

**OBTENCIÓN DE UNA ALEACIÓN PRECIOSA DE BAJO PUNTO DE FUSIÓN
PARA USO EN EL PROCESO DE MICROFUNDICIÓN CON ESMERALDAS
COLOMBIANAS PRE-ENGASTADAS**

MAYERLY JHOJANA FERNÁNDEZ TORRES
Ingeniera Metalúrgica

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2016**

**OBTENCIÓN DE UNA ALEACIÓN PRECIOSA DE BAJO PUNTO DE FUSIÓN
PARA USO EN EL PROCESO DE MICROFUNDICIÓN CON ESMERALDAS
COLOMBIANAS PRE-ENGASTADAS**

MAYERLY JHOJANA FERNÁNDEZ TORRES
Ingeniera Metalúrgica

**Trabajo de investigación para optar el título de Magister en Ingeniería de
Materiales**

Directora:
MSc. Luz Amparo Quintero Ortiz

Codirector:
Ing. Arnaldo Alonso Baquero

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA
2016

Gracias a Dios por darme la oportunidad y sabiduría en la realización de la investigación, quien fortalece mi espíritu y pone a personas tan valiosas en mi vida.

A mis padres quienes se encuentran en mi corazón en todo momento, y quienes de una u otra manera han estado ahí con sus consejos para ayudarme.

A mi Cielito, una personita muy importante quien llegó a mi vida en un momento crucial y espero se quede allí por muchos años más, quien ha centrado mis miedos y con cariño me ha cuidado y apoyado en los buenos y malos momentos.

A mi asesora y amiga Luz Amparo Quintero, por su calidad humana, quien siempre creyó en mí y me dio el apoyo para poder culminar esta gran etapa.

A mi asesor Arnaldo Alonso Baquero, quien con su experiencia y sabiduría apoyó la investigación.

AGRADECIMIENTOS

A Colciencias por la financiación del proyecto general “Innovación del método de gemas pre-engastadas en el proceso de microfundición, para su implementación en la joyería con esmeraldas colombianas”, código COLCIENCIAS: 1102-502-27903 y código VIE: 9418, con el cual se pudo desarrollar la presente investigación.

A la empresa Oro y Arte en donde siempre nos recibieron con las puertas abiertas, nos dieron todo el soporte técnico necesario y han estado presentes en todas las etapas de la investigación.

A la empresa CI Colombian, quienes apoyaron siempre el proyecto y creyeron en su culminación.

A mi directora, MSc. Luz Amparo Quintero Ortiz, quien apoyó todas las decisiones tomadas para la realización del proyecto de investigación, y siempre me ha guiado en mi formación como profesional. Al grupo de investigación GIMAT donde he podido desarrollar mis conocimientos como ingeniera.

A la Universidad Industrial de Santander por formar profesionales de alta calidad y apoyar la movilidad de sus estudiantes en los diferentes eventos científicos, principalmente al decanato de la facultad de ingenierías fisicoquímicas por financiar mi participación en el VIII Congreso Internacional de materiales, CIM 2015.

A la escuela de Ingeniería Química quien permitió la realización de algunos ensayos de DSC.

Al grupo de Investigaciones Pirometalúrgicas y de Materiales GIPIMME, especialmente a los profesores Ricardo Aristizabal y Claudia Serna, quienes colaboraron en la realización de algunas fusiones y caracterización de las mismas en su laboratorio.

Al profesor José Carlos Gutiérrez quien abrió las puertas de su laboratorio de química industrial y nos brindó un espacio para trabajar.

Al técnico Ambrosio quien siempre ha tenido disposición para colaborar a los estudiantes en los diferentes ensayos realizados, además con su alegría ayuda a que el tiempo en los laboratorios sea más agradable.

Al técnico Domingo, quien siempre nos colabora con cualquier ensayo realizado.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. GENERALIDADES DE LA TESIS	17
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS	19
2. MARCO CONCEPTUAL	20
2.1 GEMAS USADAS EN JOYERÍA	20
2.1.1 Gemas naturales.	20
2.1.2 Gemas sintéticas.	20
2.2 COMPOSICIÓN DE LAS ALEACIONES PARA JOYERÍA	21
2.2.1 Diagramas de fase.	27
2.2.2 Diagramas de fase binarios	28
2.2.2.1 Diagramas de fase ternarios.	29
2.3 FORMAS DE FUSIÓN DE LA ALEACIÓN	30
2.3.1 Hornos de inducción	30
2.3.2 Hornos de resistencia eléctrica.	30
2.4 VELOCIDADES DE SOLIDIFICACIÓN	31
2.4.1 Velocidades de solidificación alta.	31
2.4.2 Velocidades de solidificación baja.	31
2.5 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN UTILIZADAS	32
2.5.1 Análisis térmico.	32
2.5.1.1 Calorimetría diferencial de barrido.	32
2.5.1.2 Capacidad calorífica.	34
2.5.1.3 Análisis termo-mecánico.	34
2.5.2 Metalografía.	35
2.5.3 Micro-dureza VICKERS.	36
2.5.4 Color.	37
3. METODOLOGÍA	38
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	39

3.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS	39
3.2.1 Estudio de las variables que influyen en la obtención de la aleación preciosa.	39
3.2.2 Realización de pruebas preliminares.	41
3.2.3 Elaboración del plan de ensayos.	41
3.3 OBTENCIÓN DE LAS ALEACIONES PRECIOSAS	42
3.4 CARACTERIZACIÓN	45
3.4.1 Análisis de composición química.	45
3.4.2 Análisis térmico.	45
3.4.3 Análisis metalográfico.	45
3.4.4 Análisis de propiedades mecánicas.	45
3.4.5 Análisis de color.	46
3.4.6 Capacidad de llenado de la aleación.	46
3.5 REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE VERIFICACIÓN	46
3.5.2 Simulaciones en el software SOLIDCAST.	46
3.5.3 Colabilidad de la aleación seleccionada.	47
3.5.4 Colada de una pieza de joyería.	48
3.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
3.7 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL	49
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
4.1 RESULTADOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS	50
4.1.1 Resultados del estudio de variables.	50
4.1.2 Resultado de las pruebas preliminares.	52
4.1.3 Resultados de elaboración del plan de ensayos.	52
4.2 RESULTADOS DE LA OBTENCIÓN DE LAS ALEACIONES	54
4.3 RESULTADO DE LA CARACTERIZACIÓN DE LAS ALEACIONES FABRICADAS	55
4.3.1 Resultados de composición química.	55
4.3.2 Resultados del análisis térmico.	57
4.3.3 Resultados de análisis metalográfico.	64
4.3.4 Resultados de análisis de propiedades mecánicas.	75
4.3.5 Resultados de análisis de color.	77

4.3.7 Capacidad de llenado.	78
4.4 RESULTADO DE LAS PRUEBAS DE VERIFICACIÓN	80
4.4.1 Resultados de la prueba de llenado con aleaciones base oro.	80
4.4.2 Resultados de las simulaciones en el software SOLIDCAST.	81
4.4.3 Resultados de colabilidad de la aleación seleccionada.	82
4.4.4 Resultados de la colada de las piezas de joyería.	83
5. CONCLUSIONES	85
6. RECOMENDACIONES	86
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
BIBLIOGRAFÍA	94
ANEXOS	103

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagramas de fase Au-Si, Au-Ge y Au-In.	28
Figura 2. Diagrama de fase Au-Cu-Ag.	29
Figura 3. Velocidades de enfriamiento de los vidrios metálicos.	31
Figura 4. Análisis DSC de una aleación Cu-Ge.	33
Figura 5. Micrografías con constituyente eutéctico binario y ternario	35
Figura 6. Indentador usado para micro-dureza Vickers.	36
Figura 7. Interpretación de los índices CIELAB.	37
Figura 8. Descripción de la metodología para la presente investigación.	38
Figura 9. Corte isotérmico a 450° C del diagrama de fase Au-Cu-Ge.	40
Figura 10. Corte isotérmico del diagrama de fase Au, Cu, Si.	41
Figura 11. Corte isotérmico a 500° C del diagrama de fase 75% Au, 12.5% Cu, 12.5% (Ge-Si-In).	42
Figura 12. Tratamiento térmico del revestimiento comercial.	44
Figura 13. Tratamiento térmico del revestimiento comercial, modificado.	44
Figura 14. Modelo en cera realizado para las pruebas de llenado.	46
Figura 15. Modelo en diseño asistido por computador (CAD).	47
Figura 16. Malla utilizada en la prueba de colabilidad.	48
Figura 17. Esmeraldas usadas en la primera colada	48
Figura 18. Gema usada en la segunda colada	49
Figura 19. Principales variables en la fabricación de las aleaciones preciosas	50
Figura 20. Resultados de calorimetría diferencial de barrido para las aleaciones comerciales, a) Au-Ag-Cu y b) Au-Cu-Ag-Zn.	57
Figura 21. Resultados de calorimetría diferencial de barrido para las aleaciones a) Au-Cu-Si y b) Au-Liga-Si.	58
Figura 22. Resultados de la calorimetría diferencial de barrido para las aleaciones a) Au-Cu-Si-Ge-In y b) Au-liga-Si-Ge-In	60
Figura 23. Resultados de análisis termo-mecánico para las aleaciones comerciales a) I (Au-Cu-Ag) y b) II (Au-liga).	62
Figura 24. Resultados de análisis termo-mecánico para las muestras a) X (Au-liga-Si-Ge) y b) XV (Au-liga-Ge).	62
Figura 25. Imágenes de microscopía óptica de la aleación VII.	65
Figura 26. Imágenes de SEM, para la aleación VII.	65
Figura 27. Imágenes de EDS con su composición para la aleación VII.	66
Figura 28. Imágenes de microscopía óptica de la aleación VIII.	67
Figura 29. Imágenes de SEM para la aleación VIII.	67
Figura 30. Imágenes EDS con su composición para la aleación VIII.	68
Figura 31. Imágenes de microscopía óptica para la aleación X.	69
Figura 32. Imágenes de SEM, para la aleación X.	69

Figura 33. Imágenes EDS con su composición para la aleación X.	70
Figura 34. Imágenes de microscopía óptica para la aleación XIII.	71
Figura 35. Imágenes de SEM para la aleación XIII.	71
Figura 36. Imágenes EDS con composición para la aleación XIII.	72
Figura 37. Imagen de microscopía óptica para la aleación XV.	73
Figura 38. Imágenes de SEM, para la aleación XV.	73
Figura 39. Imágenes EDS con composición para la aleación XV.	74
Figura 40. Imágenes a 2800X de las aleaciones fabricadas.	75
Figura 41. Aproximación del llenado de las aleaciones.	79
Figura 42. Prueba de llenado con las aleaciones preciosas.	80
Figura 43. Resultados de simulación de solidificación de la aleación VII, VIII y X.	82
Figura 44. Resultado de la prueba de colabilidad.	83
Figura 45. Resultados de la colada final anillo 1	83
Figura 46. Resultados de la colada final anillo 2	84

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Aleaciones base oro y el color dependiendo de los elementos aleantes.	21
Tabla 2. Efecto de los principales elementos de aleación en las aleaciones base oro.	22
Tabla 3. Intervalos de composición de los elementos seleccionados	52
Tabla 4. Plan de ensayos planteado para la presente investigación.	53
Tabla 5 . Resultados de fluorescencia de rayos X	56
Tabla 6. Temperaturas de fusión de las aleaciones fabricadas.	61
Tabla 7. Resumen de las diferentes características térmicas de las aleaciones.	63
Tabla 8. Promedio de micro-dureza para las diferentes aleaciones de estudio	76
Tabla 9. Resultados obtenidos de los índices CIELAB para las diferentes aleaciones	78
Tabla 10. Parámetros termo-físicos de las aleaciones VII, VIII y X	81

ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MATERIAS PRIMAS	103
ANEXO B. CARACTERIZACIÓN DE LAS LIGAS	106

RESUMEN

Título: OBTENCIÓN DE UNA ALEACIÓN PRECIOSA DE BAJO PUNTO DE FUSIÓN PARA USO EN EL PROCESO DE MICROFUNDICIÓN CON ESMERALDAS COLOMBIANAS PRE-ENGASTADAS*

Autor: FERNANDEZ TORRES, Mayerly Jhojana**

Palabras clave: Micro-fundición, Aleaciones base oro, pre-engaste, esmeraldas colombianas, técnica de cera perdida.

En el presente trabajo de investigación, se fabricaron aleaciones base oro (cercano al 75% en masa) con elementos de aleación como el cobre, la plata y el zinc, para mejorar la dureza y colabilidad, y el germanio, silicio e indio para disminuir la temperatura de fusión. Los elementos mencionados permitieron alcanzar temperaturas de vaciado menores de 500° C. Además se evaluó la posibilidad de implementarlas en el proceso de micro-fundición con esmeraldas colombianas pre-engastadas, las cuales son difíciles de aplicar a este proceso ya que pierden sus propiedades físicas a temperaturas superiores de los 325° C.

La selección de los elementos y las composiciones de trabajo se realizaron con base en la revisión bibliográfica y con la ayuda de los diagramas termodinámicos de fase. Las aleaciones obtenidas presentaron variación en su color, coeficiente de dilatación térmica lineal, dureza, microestructura, temperatura de fusión, los cuales dependen de la composición química, obteniéndose en todos los casos un llenado del molde del 100%. Finalmente, las simulaciones del proceso de solidificación mediante el uso del software Solidcast, permitieron seleccionar una de las aleaciones, la cual presentó la menor temperatura de contacto con la gema 337,46° C.

Con el fin de evaluar el comportamiento de la gema con las nuevas aleaciones, se elaboraron dos piezas de joyería con algunas de las aleaciones fabricadas, lo cual permitió mostrar que el tratamiento térmico del revestimiento, diseño de la pieza y el tipo de gema también son parámetros que se deben tener en cuenta en la técnica de pre-engaste con esmeraldas colombianas, el cual se puede evaluar de diferentes frentes de investigación.

* Trabajo de investigación

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Maestría en ingeniería de Materiales, Directora: QUINTERO ORTIZ Luz Amparo, Codirector: ALONSO BAQUERO Arnaldo.

ABSTRACT

Title: OBTAINING LOW MELTING POINT PRECIOUS ALLOY FOR USE INVESTMENT CASTING PROCESS WITH COLOMBIAN EMERALD IN PLACE*.

Author: FERNANDEZ TORRES, Mayerly Jhojana** .

Keywords: Investment casting, Gold alloys, Pre-stonesetting, Colombian emerald, lost wax technique.

In the present work, gold alloys were manufactured (with gold close to 75% by mass) with alloy elements such as copper, silver and zinc, to improve some of its properties, and germanium, silicon and indium to decrease the melting point. The aforementioned elements allowed to cast at temperatures below 500°C. Furthermore, the possibility of implementing them is evaluated in the micro casting process with presetting Colombian emeralds, which lose its physical properties at temperatures above 325 °C.

Selecting Elements and working composition, was made based on literature review and thermodynamically Phase diagrams. Alloys did not show variation in color, coefficient of linear thermal expansion, hardness, microstructure, melt point, which depend on chemical composition. Filling the mold of 100% it was obtained. Finally, simulations of the solidification process using the software SolidCast, allowed select the X alloy, which has the lowest temperature of contact with the gem to 337,46° C.

On the other hand, for evaluate behavior gem were made two piece jewelry with some manufactured alloys, this results showed heat treatment investment, piece design and type gem are a parameters set than should consider in technique of presetting with Colombian emerald and this is a topic has some fronts investigation.

* Master Project

** Physicochemical Engineering Faculty. Metallurgical Engineering and Materials Science School. Materials Master. Director: QUINTERO ORTIZ Luz Amparo, Codirector: ALONSO BAQUERO Arnaldo.

INTRODUCCIÓN

La joyería en Colombia ha evolucionado en los últimos años, debido a la optimización de los procesos de diseño de las piezas, al desarrollo de materias primas de composiciones controladas, ofrecidas comercialmente y la implementación de mejoras en los procesos de micro-fundición.

Por su parte, los procesos de diseño, han incorporado el desarrollo de modelos 3D que son simulados con diseño asistido por computador (CAD), los cuales permiten que la pieza diseñada presente las dimensiones deseadas y mediante el prototipado rápido generarla en cera, reduciéndose así los tiempos y costos del proceso tradicional [1].

En el campo de las materiales primas, a través de investigaciones en otros países, se han desarrollado aleaciones madre de oro, platino y plata con diferentes propiedades mecánicas, físicas y químicas, las cuales pueden ser adquiridas para diferentes aplicaciones, en el mercado local [2], [3], [4].

Dentro de los avances en los procesos de micro-fundición está la inclusión de la técnica de varias gemas pre-engastadas, favoreciéndose aspectos económicos. Sin embargo, las múltiples variables que afectan la estabilidad de la gema, han limitado su implementación a solo gemas sintéticas, fabricadas para este uso y algunas gemas naturales como el diamante, ya que pueden soportar altas temperaturas del proceso, sin afectar su calidad [5].

La esmeralda colombiana, posee características únicas por su heterogeneidad y belleza, pero su uso para el proceso de micro-fundición con gemas pre- engastadas, queda limitado al uso de aleaciones de bajo punto de fusión, menores de 500°C, para evitar el deterioro de la esmeralda.

Por lo anterior, se planteó en la presente investigación fabricar aleaciones base oro de bajo punto de fusión, con características para su uso en joyería, utilizando el proceso de micro-fundición con esmeraldas colombianas pre-engastadas.

1. GENERALIDADES DE LA TESIS

En este capítulo, se presenta el planteamiento del problema, los objetivos propuestos para la tesis y se hace referencia a la estructura de la misma.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia, la fabricación de una pieza de joyería se realizaba de forma artesanal, la cual se heredaba como una tradición familiar, y pasaba de generación en generación. Sin embargo, con el paso del tiempo, el avance de nuevas tecnologías y la comercialización de productos importados, han hecho que se optimicen los procesos de fabricación, mejorando la calidad del producto y reduciendo sus costos de elaboración.

Entre los principales avances se encuentra la inclusión de diseño asistido por computador (CAD) de los modelos, el empleo de software de simulación para los procesos de colada y la implementación de nuevas técnicas de engaste.

El proceso del diseño asistido por computador (CAD) de los modelos, permite mediante software obtener una representación en 3D con las dimensiones reales del modelo, obteniéndose múltiples beneficios [6] como poder visualizar la pieza terminada antes de producirla en el metal y realizar correcciones que se consideren convenientes antes de fabricarla.

Con el software adecuado es posible simular el proceso de colada y solidificación, teniendo en cuenta los parámetros termo-físicos de la aleación, así como las propiedades del material refractario [7], lo cual, permite identificar errores en los diseños de los ataques, realizar pruebas de llenado identificando adecuadamente el modelo de trabajo.

Las nuevas tecnologías han permitido realizar el proceso de manera más rápido, disminuyendo costos de fabricación, este es el caso de la técnica de pre-engaste, donde se permite colocar la gema en la cera, ingresando éste en el proceso de colada y soportando las temperaturas del tratamiento térmico del revestimiento [8], así como la temperatura de la aleación fundida [9]. Esto permite el uso de gemas preciosas y la ubicación más precisa de las mismas reduciendo costos en comparación con el proceso tradicional [10].

En su mayoría las gemas naturales usadas en el proceso de pre-engaste son los diamantes debido a su alta conductividad térmica $2000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [11]. Sin embargo, a la hora de usar otras gemas naturales, se presentan modificaciones debido a su

heterogeneidad estructural. Este es el caso de las esmeraldas colombianas, las cuales poseen inclusiones que le dan su apreciado color, pero que a su vez no le permiten soportar cambios de temperaturas, dichos cambios generan alteraciones físicas y químicas en éstas inclusiones, lo que favorece el deterioro visual y fisuración de la esmeralda [12]. Adicional a lo anterior, se debe tener en cuenta que las esmeraldas colombianas presentan diferentes propiedades físicas, químicas y térmicas dependiendo de la región de la cual es extraída, lo que hace aún más complejo el aplicarla en el proceso de pre-engaste.

En cuanto a las aleaciones a utilizar las investigaciones han mostrado que algunas de tipo multi-componente [13], pueden ofrecer puntos de fusión relativamente bajos. Dentro de estas, una alternativa podría ser el uso de aleaciones preciosas vítreas [14], las cuales han sido motivo de múltiples estudios, ya que presentan buenas propiedades mecánicas y físicas, además poseen puntos de fusión relativamente bajos, comparados con sus aleaciones cristalinas.

Sin embargo, el proceso de fabricación de las aleaciones vítreas es complejo, ya que se deben tener en cuenta velocidades de enfriamiento altas, así como moldes metálicos generalmente en cobre, con el fin de disipar el calor rápidamente [15], y existe poca información bibliográfica a cerca de su aplicación industrial.

Con base en los aspectos planteados, la presente investigación busca desarrollar una aleación de bajo punto de fusión a partir de la selección de sus componentes, para minimizar el choque térmico entre el metal y la gema, que se presentan en el proceso de colada, lo cual favorecería la implementación de la técnica de pre-engaste con esmeraldas colombianas.

1.2 OBJETIVOS

Objetivo general

Obtener una aleación preciosa, de bajo punto de fusión, para su uso en el proceso de micro-fundición con esmeraldas colombianas pre-engastadas.

Objetivos específicos

Establecer el proceso de fabricación de la aleación preciosa de bajo punto de fusión.

Caracterizar física, mecánica, metalográfica y térmicamente las aleaciones preciosas en estudio.

Realizar pruebas de verificación de la aleación en el proceso de pre-engaste con esmeraldas, con el fin de evaluar su factibilidad de uso en este proceso.

1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis está organizada en seis capítulos. El capítulo 1 incluye el planteamiento del problema y los objetivos de la tesis. El capítulo 2 presenta el marco conceptual referente a las características de las esmeraldas colombianas, fabricación de aleaciones preciosas de bajo punto de fusión, así como las técnicas de caracterización utilizadas. El capítulo 3 muestra la metodología que se llevó a cabo en la presente investigación, describiendo cada una de las etapas, dentro de las cuales se mencionan el diseño de experimentos, obtención de las aleaciones preciosas, caracterización, realización de pruebas de verificación y análisis de resultados. En el capítulo 4, se encuentran los resultados, haciendo énfasis en las propiedades encontradas para cada una de las muestras y condiciones de fabricación de la aleación preciosa de bajo punto de fusión con esmeraldas colombianas pre-engastadas. En los capítulos 5 y 6 se muestran las conclusiones y recomendaciones respectivamente.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 GEMAS USADAS EN JOYERÍA

Las gemas son muy atractivas para el ojo humano y a través de los años se han ido implementando en la industria de la joyería. En sus inicios se usaban gemas naturales y posteriormente con el avance en la tecnología se han implantado gemas sintéticas. En la técnica de pre-engaste el uso de gemas es limitado debido a que deben tener propiedades que soporten las temperaturas del tratamiento térmico del revestimiento y el choque térmico con el metal fundido.

2.1.1 Gemas naturales. Entre las gemas naturales que se usan en la joyería con la técnica de pre-engaste se encuentran los diamantes, zafiros y rubíes. Sin embargo a la hora de usar esmeraldas colombianas hay características que limitan su uso.

La esmeralda es un mineral de berilo, su variedad se encuentra entre la goshenita (berilo incoloro), heliodoro o aguamarina (las más comunes). Para que sean esmeraldas poseen otros elementos, en el caso de las esmeraldas colombianas son cromo y vanadio en forma de átomos sustitucionales y se forman por procesos hidrotermales.

La GIA (Gemological Institute America) realiza una clasificación de las esmeraldas en tres tipos: esmeraldas tipo I, son gemas libres de grietas y con inclusiones menores, las de tipo II incluyendo inclusiones y grietas detectables macroscópicamente; finalmente, la clasificación Tipo III, corresponde a las gemas con el mayor número de inclusiones y grietas, incluidas las que no son translúcidas, sino opacas [16].

2.1.2 Gemas sintéticas. Son materiales sintetizados por el hombre, las cuales poseen la misma composición de las naturales. Actualmente existen muchos métodos de fabricación de este tipo de gemas, entre los cuales se destacan, cristalización de material fundido, de una solución de materia prima y de vapor [17].

Entre las gemas utilizadas en joyería se encuentran los cuarzos, berilos, circones entre otras.

2.2 COMPOSICIÓN DE LAS ALEACIONES PARA JOYERÍA

En joyería se utilizan aleaciones de metales preciosos, las cuales poseen diferentes propiedades a las de sus metales puros. Al adicionar cierta cantidad de un elemento se busca una mejora en las propiedades mecánicas como la dureza, sin alterar el color.

Las aleaciones más utilizadas comercialmente son las de oro, plata y platino, las cuales presentan características únicas y ciertas propiedades que son comunes entre ellas, como el brillo, color, resistencia química y no producir reacciones alérgicas al contacto con la piel, entre otras.

Las primeras aleaciones comerciales usadas en joyería son las base oro, las cuales con pequeñas cantidades adicionadas de otro elemento puede generar grandes cambios en sus propiedades mecánicas [18]. En la actualidad el oro se ha desarrollado en un gran rango de colores que se encuentran entre rojo, rosa, amarillo, amarillo pálido, verde y blanco [19]. El color depende del tipo elementos aleantes y la cantidad presente en la aleación, en la tabla 1, se muestran algunos de ellos.

Tabla 1. Aleaciones base oro y el color dependiendo de los elementos aleantes.

Quilate	% composición en peso			Color
	Au	Ag	Cu	
24	100	-	-	Amarillo
22	91.7	5.1	2.8	Amarillo
22	91.7	3.2	5.1	Amarillo oscuro
21	87.5	4.5	8.0	Amarillo-rosado
21	87.5	1.75	10.75	Rosado
21	87.5	-	12.5	Rojo
18	75.0	16.0	9.0	Amarillo claro
18	75.0	12.5	12.5	Amarillo
18	75.0	9.0	16.0	Rosado
18	75.0	4.5	20.0	Rojo

CORTI, Christopher. Basic metallurgy of the precious metals. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. May 2007, pp. 77.

Los elementos de aleación influyen de forma significativa en las aleaciones, por ejemplo, el cinc se adiciona en pequeñas cantidades, comúnmente 5%, con el fin de desoxidar y limpiar el metal, sin embargo al adicionar alrededor del 2% proporciona mayor fluidez, llenado en el molde. Adicionar cantidades cercanas al 10% aumenta la trabajabilidad de las aleaciones de oro de 8 a 14 quilates. En la tabla 2 se encuentran algunos elementos de aleación utilizados y su influencia en la aleación.

Tabla 2. Efecto de los principales elementos de aleación en las aleaciones base oro.

Elemento	Descripción
Si	<p>Propiedades: Aleaciones de oro silicio cercanas al punto eutéctico (3,16 % masa) tienen fluidez, acción capilar, presentan bajo punto de fusión y adherencia. El silicio genera un efecto fragilizante en aleaciones de 18 quilates.</p>
	<p>Adicionar esta cantidad de silicio a aleaciones de 9 quilates mejora la ductilidad [20].</p>
	<p>La adición de este elemento de 0,25 % masa, genera presencia de SiO₂ en los bordes de grano, lo cual genera fragilidad. La adición de Ni y Co mejoran las propiedades mecánicas y buen acabado superficial, disminuye la fragilización, debido a que forman compuestos intermetálicos insolubles que disminuyen el contenido de SiO₂ [21].</p>
	<p>Porcentajes de 0,05 % masa, dan fragilidad, se recomiendan usar en aleaciones de oro de 18 quilates con la limitante que generan grietas a la pieza fundida [22].</p>
	<p>Punto de fusión: Composición cercana al punto eutéctico disminuye considerablemente la temperatura de fusión.</p>
	<p>Toxicidad: Es potencialmente tóxico para los fundidores, ya que irrita la piel y los ojos por contacto, además la inhalación de los vapores irrita los pulmones.</p>
Ni	<p>Elemento blanqueador primario. Se debe usar en composiciones no mayores a 0,05 % masa, posee solubilidad completa en el rango de temperatura de 810 a 955° C [21].</p>
	<p>Es usado en aleaciones de 18-14 y 10 quilates, se usa como elemento blanqueador y endurecedor [23].</p>
	<p>Punto de fusión: Aumenta el punto de fusión de las aleaciones.</p>

Tabla 2. (Continuación).

Elemento	Descripción
Ni	<p>Toxicidad: De acuerdo a la norma UNE-EN 1811:1998 o 1999 la velocidad de liberación del níquel debe ser menor que 5 $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{semana}$, para no generar reacciones alérgicas.</p>
	<p>Se usa entre el 2 % y el 15 %, como elemento blanqueador secundario y disminuye la temperatura de líquido, incrementa la resistencia a la corrosión, incrementa la dureza, disminuye el tamaño de grano de las aleaciones fundidas.</p>
	<p>Alearlo con el Cu y la plata disminuye la temperatura de liquidus y aumenta la colabilidad de la aleación.</p>
Zn	<p>Se adiciona hasta un 15 % en peso para cambiar el color rojo de las aleaciones ricas en cobre a un amarillo-rojizo, o amarillo oscuro [21].</p>
	<p>Punto de fusión: Aunque no posee punto eutéctico el diagrama Au-Zn, la curva de líquido muestra una pequeña disminución en la temperatura de fusión con pequeñas proporciones del elemento.</p>
	<p>Toxicidad: Durante el proceso de fundición genera vapores que son perjudiciales para la salud, pueden producir dolor de cabeza, mareos, sensación de ardor, entre otros efectos.</p>
	<p>La adición de 2 % masa tiende a formar compuestos intermetálicos en las aleaciones, es comúnmente usado en soldadura [24].</p>
Sn	<p>Punto de fusión: Posee un punto eutéctico con el oro, el cual permite disminuir la temperatura de fusión de las aleaciones, sin embargo su proporción debe ser alta, alrededor de 3 % molar [24].</p>
	<p>Toxicidad: Es potencialmente tóxico para los fundidores, quienes fabrican piezas con este elemento, debido a que los vapores presentan irritación de los ojos y la piel.</p>
	<p>Su solubilidad en el oro se presenta a altas temperaturas, pero disminuye con la mismas, lo cual se mejora adicionando paladio. Reacciona con los crisoles de grafito, aumenta la temperatura de líquido del oro, además es utilizado como elemento blanqueador [25].</p>
Cr	<p>Generalmente se usa cantidades menores al 6 % en masa.</p>
	<p>Punto de fusión: Aumenta el punto de fusión de las aleaciones con el oro, debido a su bajo punto de fusión.</p>
	<p>Toxicidad: Puede causar reacciones alérgicas como erupciones cutáneas, para los seres humanos.</p>

Tabla 2. (Continuación).

Elemento	Descripción
Mn	<p>Agente blanqueador, sin embargo reacciona fácilmente genera óxidos en la aleación fundida. Grandes contenidos de manganeso generan aleaciones quebradizas, son susceptibles a la corrosión y reaccionan con el carbono de los crisoles, le da mayor trabajabilidad [25].</p> <p>Generalmente se usa cantidades menores al 15 % en masa</p> <p>Punto de fusión: Aumenta el punto de fusión al alearlo con el oro.</p> <p>Toxicidad: Es potencialmente tóxico para los fundidores, quienes fabrican piezas con este elemento, debido a que los vapores generan daños en los pulmones.</p>
Fe	<p>Incrementa la susceptibilidad a la corrosión, porcentajes mayores del 10 % produce excesiva dureza, es usado como elemento blanqueador [25].</p> <p>Generalmente se usa cantidades menores al 6 % en masa [23].</p> <p>Punto de fusión: Aumenta el punto de fusión al alearlo con el oro.</p> <p>Toxicidad: La inhalación de los vapores generan daños a los fundidores, sin embargo, el riesgo es bajo debido a la alta temperatura de ebullición.</p>
Co	<p>Presenta efecto blanqueador, mejora la trabajabilidad en las aleaciones de oro. La inhalación de vapores de cobalto es remota debido a su alto punto de fusión. Mejora las propiedades mecánicas, forma compuestos intermetálicos con el silicio [21].</p> <p>Generalmente se usa cantidades menores al 5 % en masa.</p> <p>Punto de fusión: Aumenta el punto de fusión al alearlo con el oro.</p> <p>Toxicidad: La inhalación de los vapores genera daños a los fundidores, sin embargo, el riesgo es bajo debido a la alta temperatura de ebullición.</p>
Al	<p>El uso en cantidades menores al 2 % presenta un efecto blanqueador débil, es bajo así como su trabajabilidad, además forma compuestos intermetálicos, debido a su ubicación en la tabla periódica, aumenta la probabilidad de generar par galvánico [23].</p> <p>Al alearlo con el oro y el cobre genera una aleación con memoria de forma, que le permite aplicarlo en otras áreas diferentes a la joyería [26].</p> <p>Punto de fusión: Disminuye el punto de fusión al alearlo con el oro, con composiciones pequeñas.</p>

Tabla 2. (Continuación).

Elemento	Descripción
Al	<p>Toxicidad: Es tóxico cuando se presenta una acumulación mayor a 3 g/día en el organismo.</p>
Cu	<p>Es utilizado para mejorar las propiedades mecánicas de las aleaciones con el oro. Dependiendo la composición permite variar el color de las aleaciones [27], [28], [29]. El alto contenido de cobre tiende a colorearlas de rojo, o rosado. Presenta diversas fases al solidificar [30]. Tienden a oxidarse con facilidad.</p> <p>Se puede alear en cualquier proporción con el oro, generalmente se aplica tratamiento de recocido después de la fundición [31], [32], [33].</p> <p>Punto de fusión: Adicionado en pequeñas cantidades disminuye el punto de fusión.</p> <p>Toxicidad: La inhalación de los vapores genera daños a los fundidores, sin embargo, el riesgo es bajo debido a la alta temperatura de ebullición. Se recomienda usar protección en las fosas nasales cuando se trabaja con polvos.</p>
Ag	<p>Es utilizado para mejorar propiedades, permite dar tonalidades diferentes dependiendo la composición, sin embargo, su principal característica es blanquear las aleaciones [27], [28], [29].</p> <p>Se puede alear en cualquier proporción con el oro, debido a que posee solubilidad total, generalmente se aplica tratamiento de recocido después de la fundición [31], [32], [33].</p> <p>Punto de fusión: Adicionado en pequeñas cantidades disminuye el punto de fusión.</p> <p>Toxicidad: La inhalación de los vapores genera daños a los fundidores, sin embargo, el riesgo es bajo debido a la alta temperatura de ebullición. Se recomienda usar protección en las fosas nasales cuando se trabaja con polvos.</p>
In	<p>Es usado como elemento blanqueador, sin embargo posee un alto costo. Generalmente se usa cantidades menores al 10 % en masa [23], presenta gran variedad de fases al solidificar. Es usado con el fin de aumentar la dureza, generalmente precipita en los bordes de grano [34].</p> <p>Punto de fusión: Disminuye la temperatura de fusión de la aleación.</p> <p>Toxicidad: La inhalación de los vapores genera daños a los fundidores, sin embargo, el riesgo es bajo debido a la alta temperatura de ebullición.</p>

Tabla 2. (Continuación).

Elemento	Descripción
Ge	<p>Es usado como elemento blanqueador, aumenta el tamaño de grano de las aleaciones. Se usa en composiciones cercana al eutéctico 3,16 %, con el fin de usarla como soldadura de baja temperatura de fusión, alta resistencia a la corrosión y alto quilate [35].</p> <p>Punto de fusión: Presenta un punto eutéctico el cual corresponde a una temperatura de fusión baja.</p> <p>Toxicidad: La inhalación de los vapores genera daños a los fundidores, sin embargo, el riesgo es bajo debido a la alta temperatura de ebullición.</p>
Ir	<p>Variantes del platino que blanquean al oro. Es usado como elemento blanqueador, junto con el platino o paladio. Generalmente se usa cantidades menores al 6 % en masa [23].</p> <p>Punto de fusión: Aumenta el punto de fusión.</p> <p>Toxicidad: Es potencialmente tóxico para los fundidores que trabajan piezas con ese elemento.</p>
Pt	<p>Se usa como recubrimiento de las aleaciones de oro blanco con el fin de resaltar su color, además disminuir la corrosión [23].</p> <p>Si se usa como elemento aleante, aumenta la dureza y resistencia. Generalmente se usa cantidades menores al 15 % en masa [13].</p> <p>Punto de fusión: Aumenta el punto de fusión.</p> <p>Toxicidad: El metal no es tóxico por contacto.</p>
Pd	<p>Es usado como elemento blanqueador, además, se usa como recubrimiento de las aleaciones de oro blancas, brinda, alta resistencia a la corrosión, disminuye la dureza, no forman óxidos insolubles durante la fusión, posee alto peso específico, elevada temperatura de líquido, por lo que los hace más susceptibles a reaccionar con el yeso, generalmente se usa cantidades menores al 15 % en masa [23].</p> <p>Punto de fusión: Aumenta la temperatura de fusión.</p> <p>Toxicidad: El metal no es tóxico por contacto.</p>
Rh	<p>Variantes del platino que blanquean al oro. También es usado como recubrimiento. Posee un buen color blanco, tiene alta reflectividad, no se oxida, y se puede limpiar fácilmente [36]. Generalmente se usa cantidades menores al 15 % en masa [23].</p> <p>Punto de fusión: Aumenta el punto de fusión</p>

Tabla 2. (Continuación).

Elemento	Descripción
Rh	Toxicidad: El metal no es tóxico por contacto.
Cd	Se adiciona hasta un 4% para dar un color verde a las aleaciones de oro de 18 quilates, sin embargo, se puede presentar CdO el cual es tóxico e irrita el sistema respiratorio [23].
	Se ha utilizado para soldadura ya que disminuye la temperatura de fusión de aleaciones con alto quilate y da fluidez [37].
	Punto de fusión: Disminuye el punto de fusión de la aleación.
	Toxicidad: Es altamente tóxico, genera efectos en la salud a los fundidores que inhalan sus vapores.

Se debe tener en cuenta que el objetivo principal de esta investigación es disminuir la temperatura de fusión de las aleaciones, por tanto, de la tabla anterior solo los elementos, silicio, cinc, estaño, indio germanio y aluminio permiten modificar dicha propiedad.

En cuanto a los elementos mencionados el fin es seleccionar aquellos que permitan un menor punto de fusión con el oro y a su vez se encuentren en menor proporción para poder alearlo con otros para mejorar sus propiedades.

El estaño es un elemento tóxico, el aluminio aumenta la posibilidad de generar par galvánico lo cual disminuye la resistencia al desgaste, por tanto no se tendrán en cuenta.

El cinc, presenta inconvenientes, porque se volatiliza muy fácilmente, por lo tanto, no será tenido en cuenta en la disminución de la temperatura de fusión, sin embargo, se utilizará para dar mayor fluidez en la aleación.

Por lo anterior, los elementos seleccionados para disminuir el punto de fusión de las aleaciones son: el silicio el germanio y el indio.

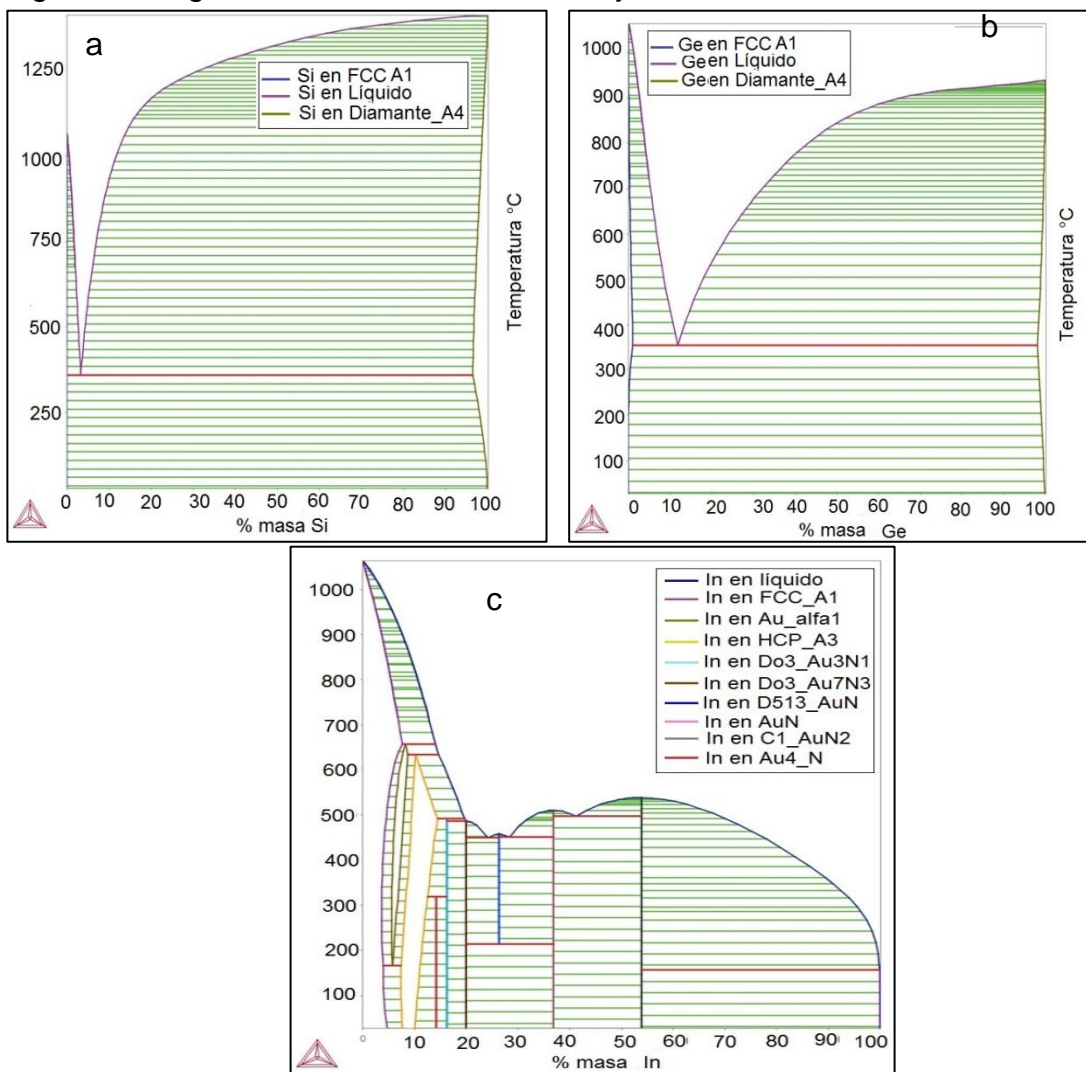
En cuanto a los elementos a utilizar para mejorar las propiedades se seleccionaron aquellos usados comúnmente, el cobre, la plata y el cinc [38].

2.2.1 Diagramas de fase. Son una herramienta termodinámica valiosa en los cuales es posible tener una representación de las fases en equilibrio para la composición de una aleación a cualquier temperatura.

2.2.2 Diagramas de fase binarios. En estos mapas se pueden apreciar las reacciones invariantes que se presentan tanto en el estado líquido como en el estado sólido de dos componentes.

Un tipo de reacción invariante de interés para la presente investigación es la eutéctica, debido a que tiene la temperatura de solidificación más baja y en ella la aleación en estado líquido se transforma en dos o tres fases sólidas dependiendo de la composición de la misma, como se muestra en la figura 1. La forma de estas fases puede ser laminar, acicular o de otro tipo.

Figura 1. Diagramas de fase Au-Si, Au-Ge y Au-In.

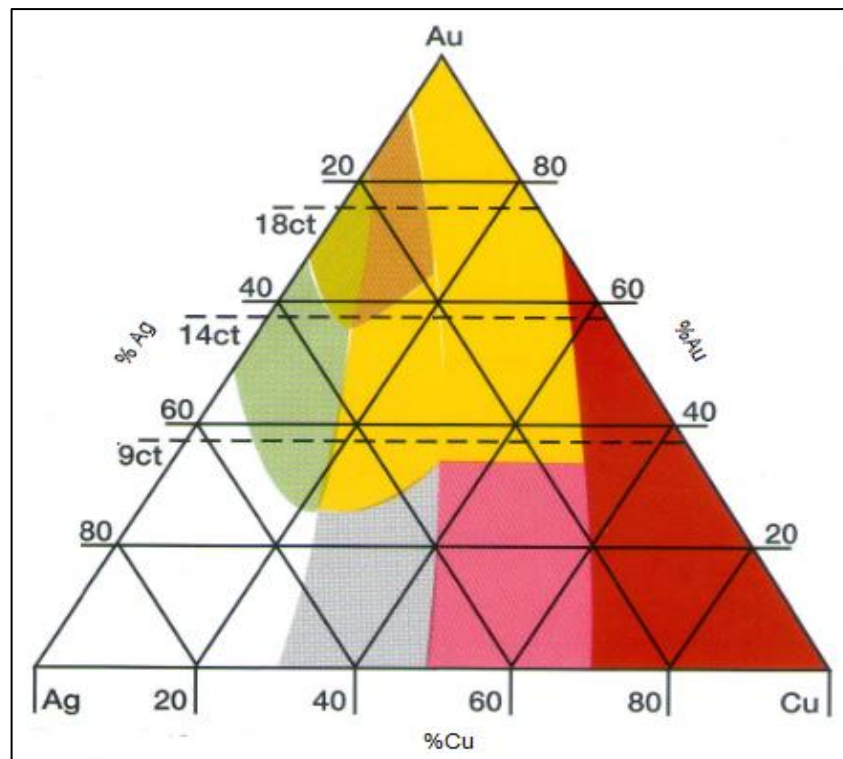


Dr. André Costa e Silva, Universidad Federal Fluminense, Volta Redonda, Brasil, comunicación personal, 2014.

2.2.2.1 Diagramas de fase ternarios. La forma más común de representar la composición de un sistema ternario es con el triángulo equilátero, cada vértice representa 100% de cada componente puro, y en cada lado se encuentra la composición del sistema binario que lo constituye. Los cortes isotérmicos de los diagramas permiten visualizar las regiones de estabilidad de las fases y las reacciones que ocurren a la respectiva temperatura. En el anexo A, se presentan diagramas y cortes isotérmicos de algunos empleados en la investigación.

Con alguna frecuencia se encuentran en la literatura estudios sobre diagramas ternarios Au-Ag-Cu, que apoyan la fabricación de aleaciones con estos tres elementos e incluso se definen intervalos donde se indica el color de la aleación atendiendo a las proporciones de los elementos (ver figura 2).

Figura 2. Diagrama de fase Au-Cu-Ag.



FERNANDEZ, M., ORTIZ, L., ALONSO, A. Procesos de obtención y evaluación de aleaciones preciosas base oro usadas en joyería. USBmed. Vol 6. No 2. Julio 2015, pp. 2.

Recientemente, se han reportado resultados de trabajos [39], [40], [41], cuya finalidad es hacer verificaciones de sistemas binarios y ternarios, con presencia de germanio, silicio, antimonio e indio acompañados de oro, plata o cobre, además de otros elementos aleantes, en algunos de los cuales a partir de tratamientos térmicos,

se busca encontrar las fases de equilibrio a temperaturas seleccionadas. Sin embargo, son trabajos elaborados en intervalos de composición y temperaturas específicos que no son de interés para la presente investigación.

2.3 FORMAS DE FUSIÓN DE LA ALEACIÓN

Para la fusión de las materias primas existen varias formas de calentamiento, en este texto se tratarán solo algunas que han tenido gran importancia en la industrial de la joyería, como son los hornos de inducción y los de resistencia.

2.3.1 Hornos de inducción. Se basa en un transformador de corriente eléctrica, en forma de espiral, con ello se forma un campo magnético mucho más grande en la carga que el horno por resistencia, y la resistencia que opone la carga al paso de corriente inducida genera un efecto de calentamiento. A su vez este calentamiento se va aumentando aunque en pequeñas proporciones.

Sus características principales son: la profundidad del baño (altura de la bobina) siempre es mayor que el diámetro. La agitación posee una excelente mezcla a la carga, lo que conduce a que tanto los elementos aleantes como la carga nueva que se va añadiendo sean rápidamente absorbidos. Esta acción agitadora es directamente proporcional a la potencia de entrada por unidad de volumen y representa la limitación que se puede aplicar a un material. Lo anterior constituye una ventaja para este proceso de investigación [42].

2.3.2 Hornos de resistencia eléctrica. La energía utilizada para el calentamiento es eléctrica. De acuerdo a la forma de funcionamiento pueden ser continuos o discontinuos y según donde se ubique la resistencia, pueden calentar por la parte inferior lateral superior o por un extremo.

Los crisoles comúnmente utilizados en la joyería son de grafito, debido a su conductividad térmica y no reaccionan con la carga aplicada. En segundo lugar se encuentran los crisoles cerámicos y otros, según las recomendaciones del fabricante del horno.

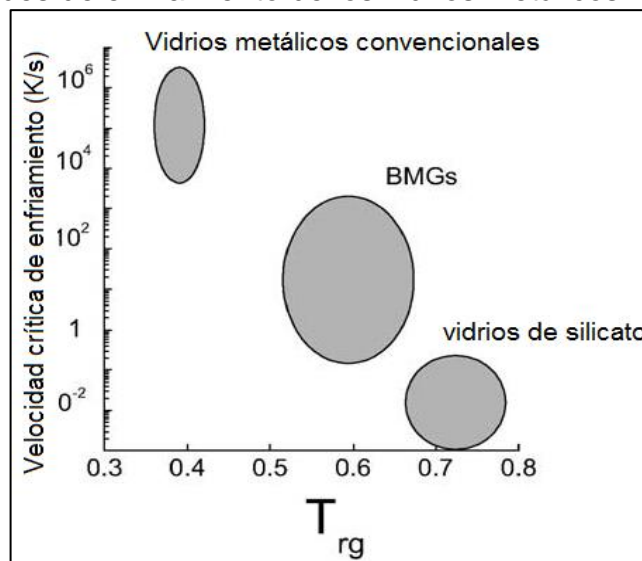
La atmósfera que se puede usar en la fabricación de aleaciones y/o piezas de joyería debe ser inerte usando argón, nitrógeno o una mezcla de gases. Generalmente en el uso de hornos de resistencia eléctrica no se emplea ningún gas, por lo que es necesario usar un fundente apropiado para evitar la oxidación.

2.4 VELOCIDADES DE SOLIDIFICACIÓN

La forma tradicional de solidificación de las piezas de joyería es aplicando velocidades lentas, con el fin de formar estructura cristalina. Actualmente y con el uso de nuevas tecnologías, se ha logrado fabricar aleaciones vítreas, las cuales necesitan velocidades de solidificación altas.

2.4.1 Velocidades de solidificación alta. Con el fin de dar solución a necesidades industriales existe una nueva familia de aleaciones llamadas vítreas en las cuales su aplicación aún es motivo de estudio [43]. En este tipo de materiales, la velocidad de enfriamiento es una variable crítica del proceso la cual puede variar entre 0,5 K/s y $1 \cdot 10^6$ K/s [44], como se puede apreciar en la figura 3.

Figura 3. Velocidades de enfriamiento de los vidrios metálicos.



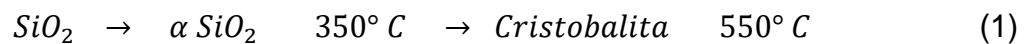
WANG, W., DONG, C., and SHEK, H. Bulk Metallic Glasses. Elsevier, 2004, pp. 49.

Entre la gran familia de aleaciones vítreas, existen algunas aleaciones preciosas, que presentan buenas propiedades eléctricas [45], cuya aplicación se enfoca en la electrónica, sin embargo se han investigado y aplicado aleaciones preciosas base oro y platino de 18 quilates, en la industria de la joyería [46], [47], las cuales contienen mejores propiedades que las mismas siendo cristalinas.

2.4.2 Velocidades de solidificación baja. En la industria de la joyería, se utilizan procesos de solidificación con enfriamiento lento, con velocidades inferiores a 0,5

K/s [48]. En esta condición de enfriamiento como se indicó, se obtienen aleaciones cristalinas.

De manera usual en este proceso, se usa revestimiento en el cual su componente principal es el yeso, este posee una composición de 25% de sulfato de calcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y 75% óxido de silicio (SiO_2). En esta mezcla se presentan transformaciones de fase, las cuales pueden generar expansiones o contracciones del molde para lo cual se hace necesario aplicar tratamiento térmico específico, antes del proceso de colada. A continuación se muestran los principales cambios de fase ocurridos en el yeso.



2.5 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN UTILIZADAS

Entre las principales técnicas de caracterización de aleaciones preciosas, se encuentran: el análisis térmico, análisis metalográfico, dureza, color y colabilidad, además de resistencia química, conductividad térmica y eléctrica, entre otras. A continuación, se hacen referencia aquellas utilizadas en la presente investigación.

2.5.1 Análisis térmico. El manejo térmico es un factor muy importante en materiales, teniendo en cuenta que sus propiedades pueden estar afectadas por cambios en las temperaturas de trabajo. Entre las técnicas más utilizadas se encuentran la calorimetría diferencial de barrido, la cual puede hallar puntos de fusión y capacidad calorífica de un material, entre otras. Por otra parte, el análisis termo-mecánico permite hallar el coeficiente de dilatación térmico lineal. Las propiedades mencionadas fueron determinadas en la presente investigación.

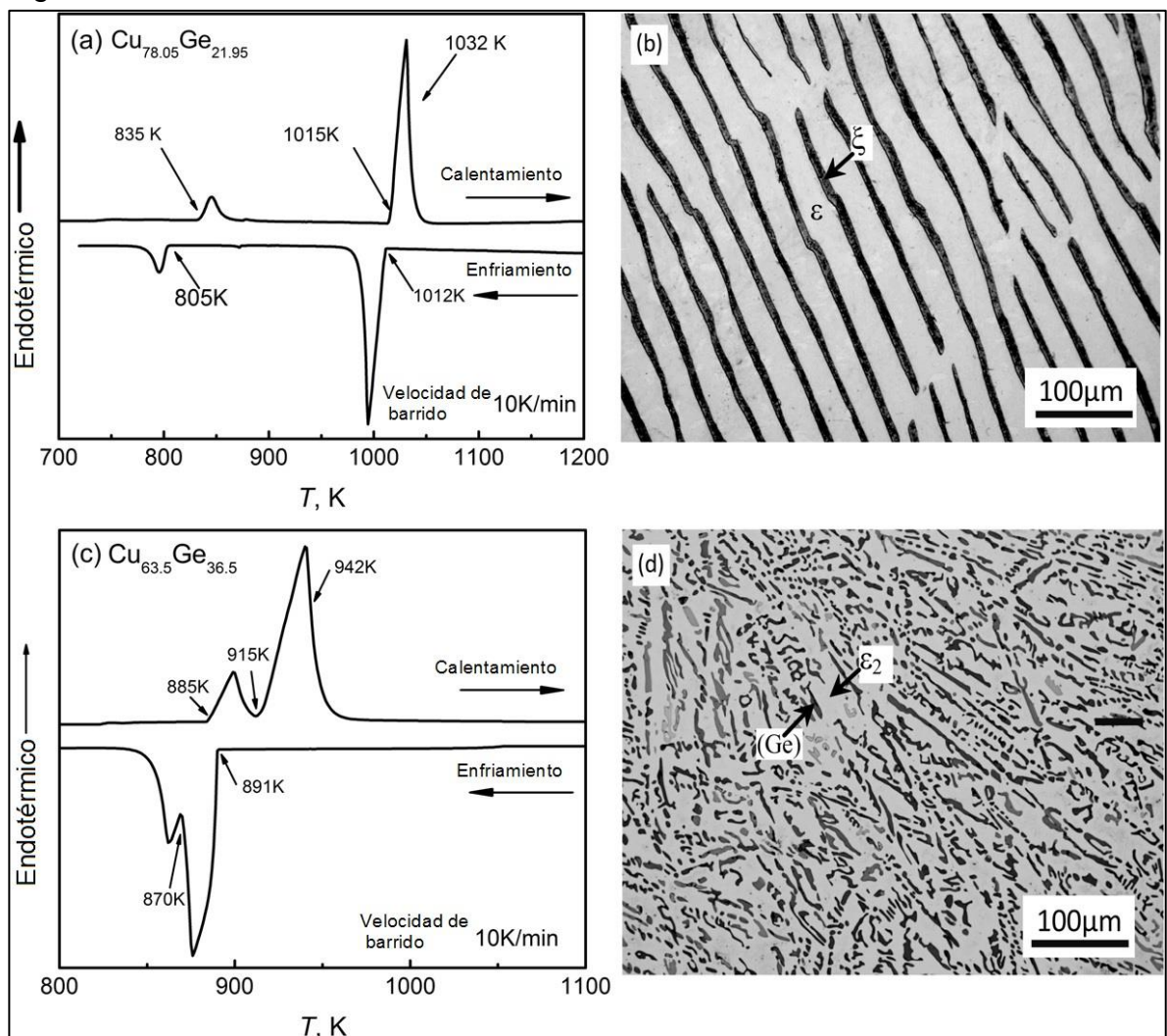
2.5.1.1 Calorimetría diferencial de barrido. Es una técnica que consiste en calentar el material de ensayo a una velocidad y atmósfera controlada. La diferencia de flujo de calor con respecto al material de referencia o blanco, es registrado continuamente. Un pico endotérmico se presenta cuando hay transiciones de fase, deshidratación y reducción, mientras las reacciones de cristalización, oxidación y algunas descomposiciones y solidificación producen efectos exotérmicos.

En los diagramas DSC, es posible diferenciar los picos correspondientes a transformaciones de fase o de fusión del material. Estos picos son agudos y muy definidos cuando corresponden a la transformación de una solución sólida o un eutéctico. Sin embargo se pueden presentar solapamiento cuando el intervalo de temperaturas entre dos transformaciones es muy pequeño.

Como ejemplo de lo mencionado anteriormente, en la figura 4, se presenta dos gráficas característica de DSC, de dos aleaciones [49].

En la figura 4a, se evidencia un pico exotérmico a 1012 K durante el proceso de enfriamiento desde la fase líquida, que corresponde a una reacción eutéctica $L \rightarrow \epsilon + \xi$, en el sistema Cu-Ge según lo reportado por los investigadores. Adicional a este, se encuentra otro pico a los 805 K de poca profundidad el cual corresponde a una reacción eutectoide $\epsilon \rightarrow \xi + \epsilon_1$.

Figura 4. Análisis DSC de una aleación Cu-Ge.



ZHAI W., GENG D. L. y otros. A calorimetric study of thermodynamic properties for binary Cu-Ge alloys. ELSEVIER. 2012. No 535, p. 74.

En la segunda gráfica, se muestran dos picos de fusión a 885 K y 915 K interconectados que corresponden a la transformación sólida de $\epsilon_2 = \text{Ge} + \epsilon_1$ y el punto de fusión del eutéctico $\epsilon_2 + \text{Ge}$. El pico exotérmico relevante durante el enfriamiento se encuentra solapado con la transformación eutectoide.

2.5.1.2 Capacidad calorífica. Es una medida cuantitativa de la energía en función de la temperatura, puede interpretarse como un efecto de inercia térmica donde indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con la cual lo cede.

Una forma de hallar la capacidad calorífica es mediante la técnica DSC, la cual consiste en calentar el material de ensayo y un material de referencia (generalmente zafiro) a una velocidad y atmósfera controlada, midiendo la energía consumida en el intervalo de temperatura. Con los valores encontrados, se puede calcular al usar la siguiente expresión.

$$C_p = \frac{y}{y'} * \frac{m'}{m} * C'_p \quad (2)$$

C_p es la capacidad calorífica de la muestra J/Kg*K; y es el flujo registrado de la muestra y la cápsula vacía a la misma temperatura; y' diferencia entre el flujo registrado del zafiro y la cápsula vacía a la misma temperatura J/s; m es la masa de la muestra; m' es la masa del zafiro y C'_p es la capacidad calorífica del zafiro.

Este análisis se realizó con el fin de efectuar las simulaciones del proceso de solidificación mediante el software Solidcast.

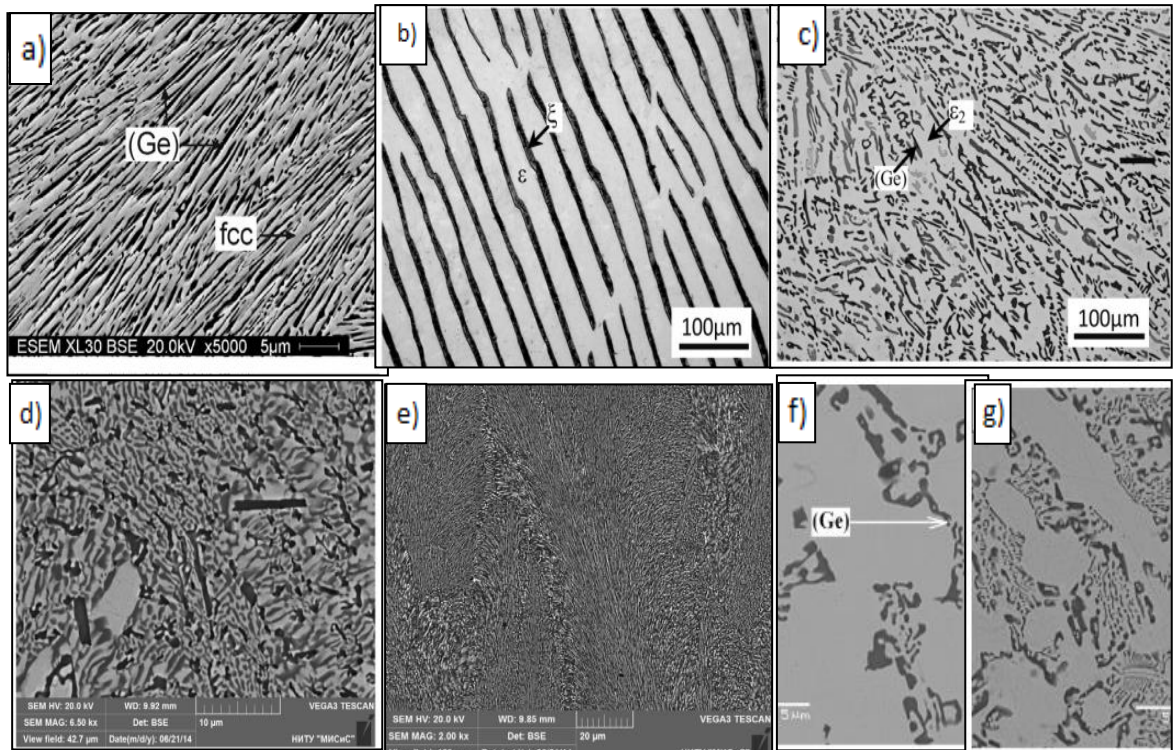
2.5.1.3 Análisis termo-mecánico. El análisis termo-mecánico sirve para hallar el coeficiente de expansión térmico lineal, el cual está relacionado con la resistencia de los enlaces atómicos, donde es necesario aplicar energía al material para que los enlaces se muevan de su posición de equilibrio. La forma experimental de hallarlo consiste en aplicar una carga constante, a una temperatura determinada y así obtener el desplazamiento del material, los datos encontrados son aplicados a la siguiente expresión:

$$\alpha_m = \frac{\Delta L_{sp} * k}{L * \Delta T} \quad (3)$$

Dónde, ΔL_{sp} , representa el cambio de longitud de la muestra debido al calentamiento y sus unidades son μm . ΔT es la diferencia de temperatura $^{\circ}\text{C}$, sobre la cual el cambio de longitud es medido. L es la longitud de la muestra a temperatura ambiente, sus unidades son metros. α_m es el coeficiente de dilatación térmico lineal, se expresa en $\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}$, y k es el coeficiente de calibración.

2.5.2 Metalografía. En el caso de las aleaciones base oro, debido al alto costo de las mismas, se busca caracterizarlas a partir de muestras de pequeños tamaños, utilizando montajes en resinas que lo permitan hacer. El ataque de estas se hace empleando agua regia diluida, por inmersión o a través de la exposición al vapor de este reactivo.

Figura 5. Micrografías con constituyente eutéctico binario y ternario



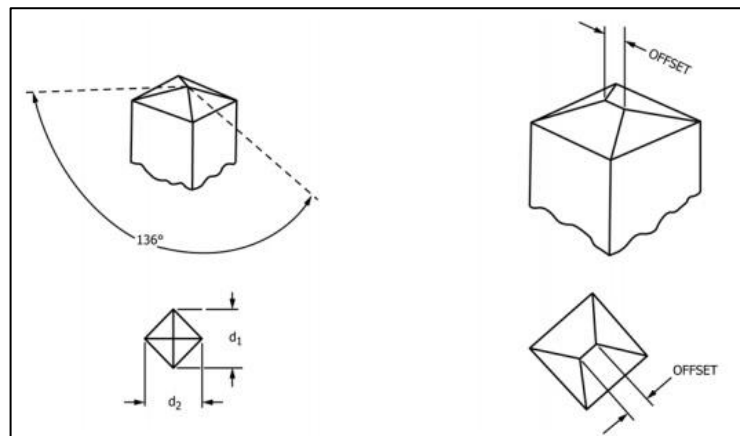
a) Eutéctico Ge + FCC en el sistema Au-Cu-Ge [39], b) Eutéctico $\epsilon + \xi$ en el sistema Cu-Ge [49], c) eutéctico $\epsilon_2 + \text{Ge}$ en el sistema Cu-Ge [49], d) eutéctico Ag + Ge + η en el sistema Au-Cu-Ge [50], e) eutéctico $\epsilon + \text{hcp} + \text{Ag}$ en el sistema Au-Cu-Ge [50], f) eutéctico en el sistema Au-Ge-In sin tratamiento térmico y g) eutéctico en el sistema Au-Ge-In con tratamiento térmico de recocido [40].

Algunos investigadores reportan la presencia de eutécticos en aleaciones con bajo punto de fusión desarrolladas para uso en soldaduras [40], como es el caso de las aleaciones con antimonio, resultados con presencia de esta mezcla de fases también se han identificado en aleaciones con el uso de germanio [39], [49], [50], [40] y silicio [41], los cuales debida a su reducida solubilidad en algunas especies como el oro, la plata y el cobre, forman precipitados del elemento puro y/o compuestos con alto contenido de estos elementos, los cuales pueden generar fragilidad en la aleación. En la figura 5 se presentan micrografías con eutéctico en aleaciones de germanio.

En la presente investigación, con el fin de lograr puntos de fusión bajos, menores de 500° C, se plantean aleaciones con composiciones alrededor del punto eutéctico.

2.5.3 Micro-dureza VICKERS. Esta es una de las formas de valorar las propiedades mecánicas en las aleaciones preciosas. Se realiza de acuerdo a la norma ASTM E384-16, donde se utiliza una máquina calibrada para forzar un indentador de diamante de geometría específica en la superficie del material a evaluar. Las fuerzas de ensayo varían entre 1 y 1000 gf ($9,8 \times 10^{-3}$ a 9,5 N) y la indentación diagonal o diagonales son medidas por un microscopio de luz después de eliminar la carga. En la figura 6, se encuentra el indentador usado.

Figura 6. Indentador usado para micro-dureza Vickers.



AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard test method for microindentation hardness of materials. ASTM E 384-16. Pensilvania, Estados Unidos: ASTM, 2016. 3 p.

$$HV = 1854,4 * \frac{P}{d^2} \quad (4)$$

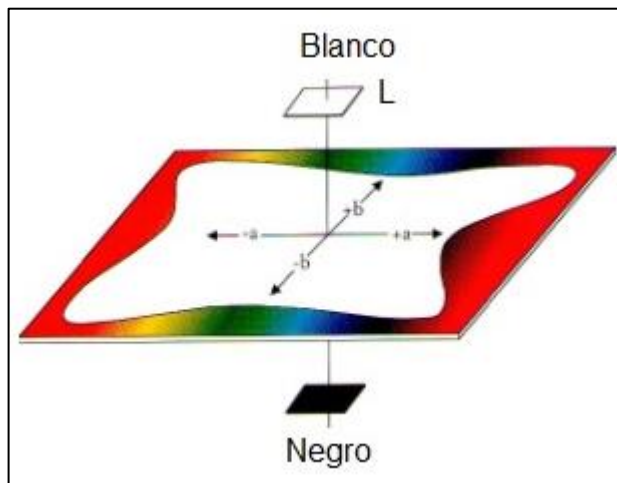
Dónde:

P es la fuerza en gf, d es la medida de la longitud de la diagonal de indentación en μm .

Este método de ensayo determina la dureza con pequeñas fuerzas aplicadas en comparación con el ensayo tradicional y son muy útiles en la evaluación de materiales, control de calidad de los procesos de fabricación, es un indicador de la maquinabilidad, resistencia al desgaste, dureza y ductilidad.

2.5.4 Color. Existen varios métodos cuantitativos para medir de forma precisa el color de un determinado material, entre los más utilizados se encuentra el sistema CIELAB, en donde se hallan las coordenadas L^* (iluminación), a^* (saturación) y b^* (tono), como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Interpretación de los índices CIELAB.

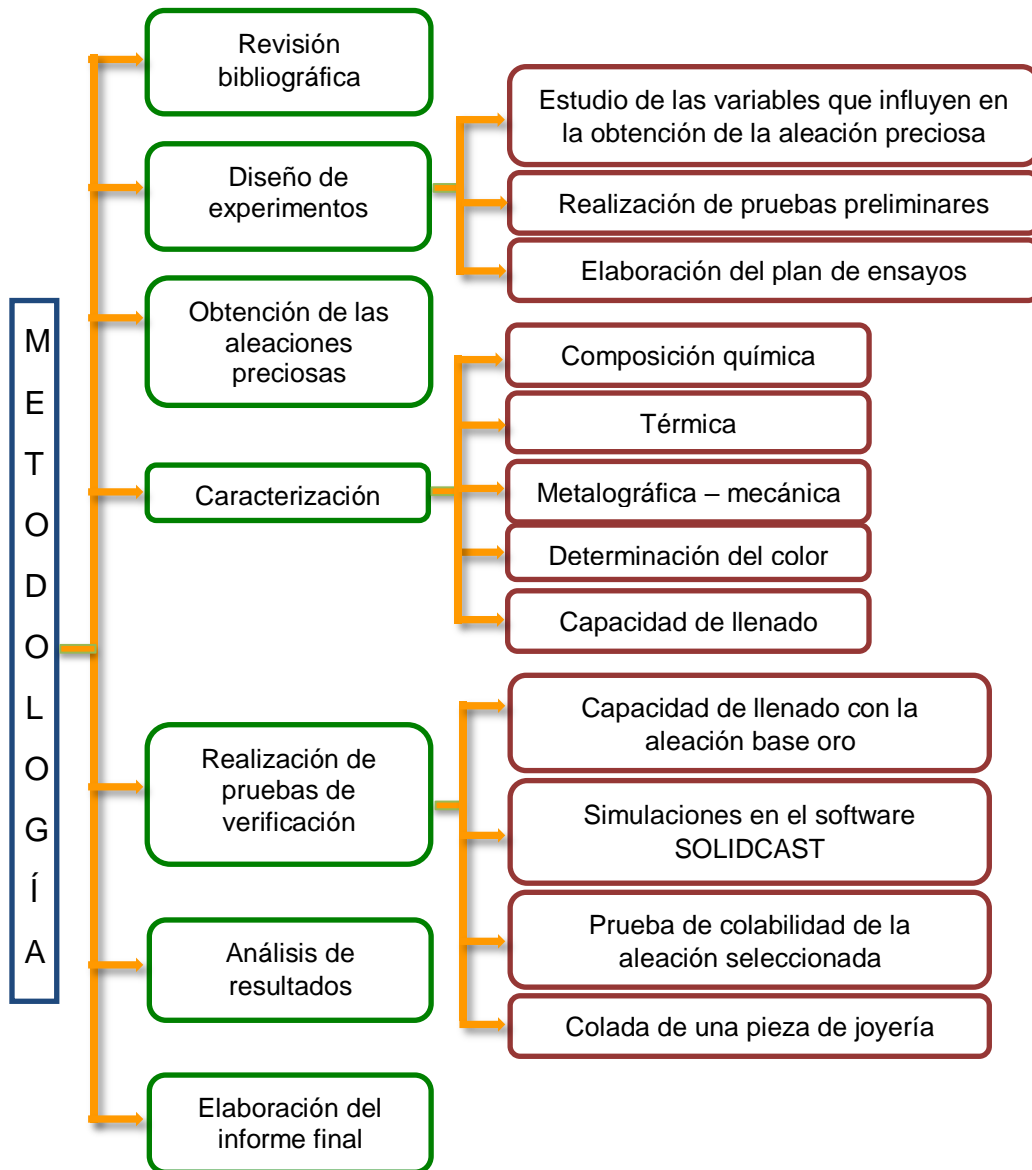


FERNANDEZ, M., ORTIZ, L., ALONSO, A. Procesos de obtención y evaluación de aleaciones preciosas base oro usadas en joyería. USBmed. Vol 6. No 2. Julio 2015, pp. 8.

3. METODOLOGÍA

En la figura 8 se presenta el esquema de la metodología empleada en la presente investigación y a continuación se indican características de las etapas indicadas.

Figura 8. Descripción de la metodología para la presente investigación.



3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se revisó información existente en las diferentes bases de datos disponibles en la Universidad, así como artículos en revistas nacionales e internacionales, normas técnicas, libros especializados y tesis de maestría. Se hizo énfasis en el estudio de los procesos de fabricación de las aleaciones preciosas, métodos de caracterización, proceso de micro-fundición usando la técnica de pre-engaste, características de gemas incluyendo esmeraldas colombianas.

3.2 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Se inició con el estudio de las variables que influyen en la obtención de las aleaciones preciosas, se realizaron algunas pruebas preliminares y se determinaron las mejores condiciones para la elaboración de estas aleaciones. Finalmente, se definió el plan de ensayos a seguir.

3.2.1 Estudio de las variables que influyen en la obtención de la aleación preciosa. Con base en la revisión bibliográfica, se estudiaron las principales variables del proceso de fabricación, que influyen sobre las características y propiedades de las aleaciones preciosas cuando se emplea la técnica de cera perdida con pre-engaste de esmeraldas colombianas. Se hizo énfasis en el estudio de los elementos de aleación, analizando su efecto sobre las propiedades térmicas, metalúrgicas y físicas. Lo anterior, permitió definir los principales elementos componentes de la aleación y su intervalo de composiciones a estudiar.

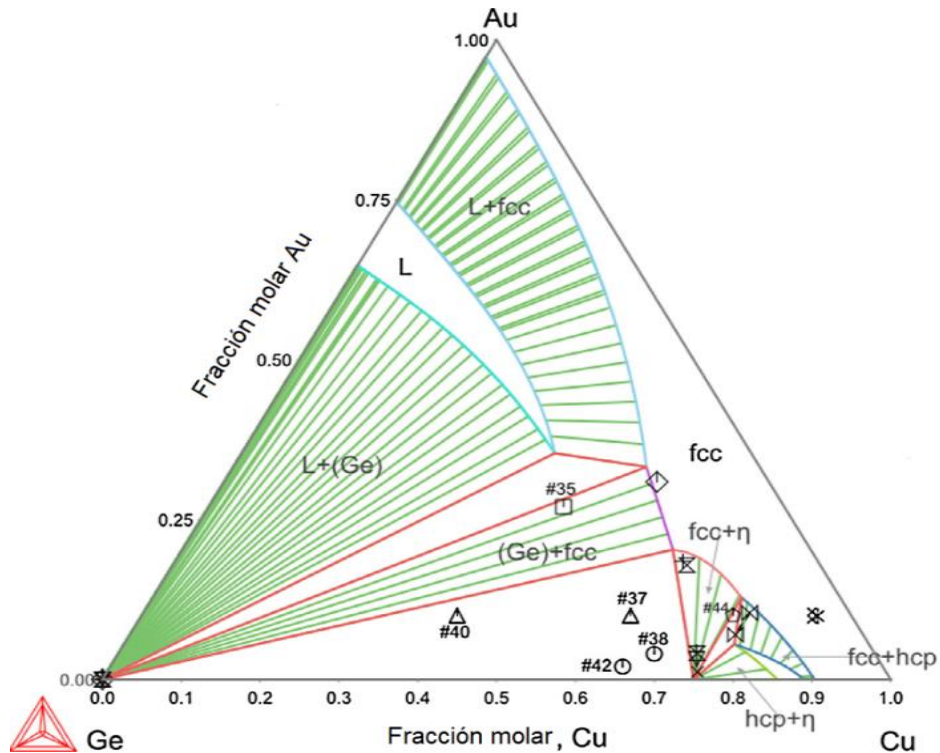
A partir de la tabla 2 se determinó que los elementos germanio, silicio e indio tienen una influencia significativa en la disminución del punto de fusión de las aleaciones base oro. Por otra parte, la adición de otros elementos como el cobre, la plata y el cinc, es conveniente para mejorar sus propiedades mecánicas y metalúrgicas.

Con el fin de estimar los porcentajes de los elementos seleccionados se utilizaron cortes isotérmicos a diferentes temperaturas especialmente inferiores de 500° C, de los diagramas Au-Cu-Ge; Au-Cu-Si, a partir de los cuales se pudieron definir las zonas de composición donde se presenta la aleación en estado líquido, para luego seleccionar las composiciones de las respectivas mezclas. Para obtener el diagrama Au-Cu-Si-Ge-In, se contó con la colaboración del doctor André Costa e Silva (Universidad Federal Fluminense, Volta Redonda, Brasil, comunicación personal, 2014) y el uso del software Thermocalc.

A continuación, en las figuras 9, 10, y 11, se presentan los diferentes diagramas utilizados, Au-Cu-Ge; Au-Cu-Si, con corte isotérmico a 450° C; Au-Cu-Si-Ge-In a

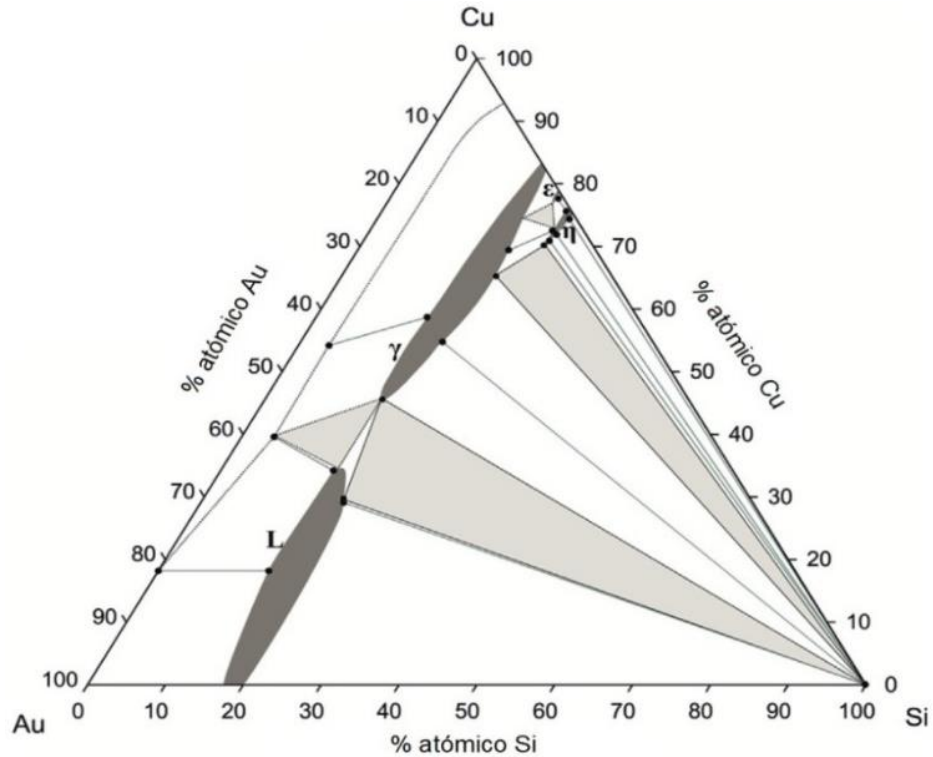
500° C, a partir de los cuales se determinaron los intervalos de composiciones donde está presente la fase líquida. Finalmente, en la figura 2, se presenta el diagrama Au-Ag-Cu usado para las mezclas comerciales.

Figura 9. Corte isotérmico a 450° C del diagrama de fase Au-Cu-Ge.



JIN, Shan; DUARTE, Liliana y LEINENBACH, Christian. Experimental study and thermodynamic description of Au-Cu-Ge system. Elsevier [online], 2014 Vol. 588, no. 5, pp. 12.

Figura 10. Corte isotérmico del diagrama de fase Au, Cu, Si.



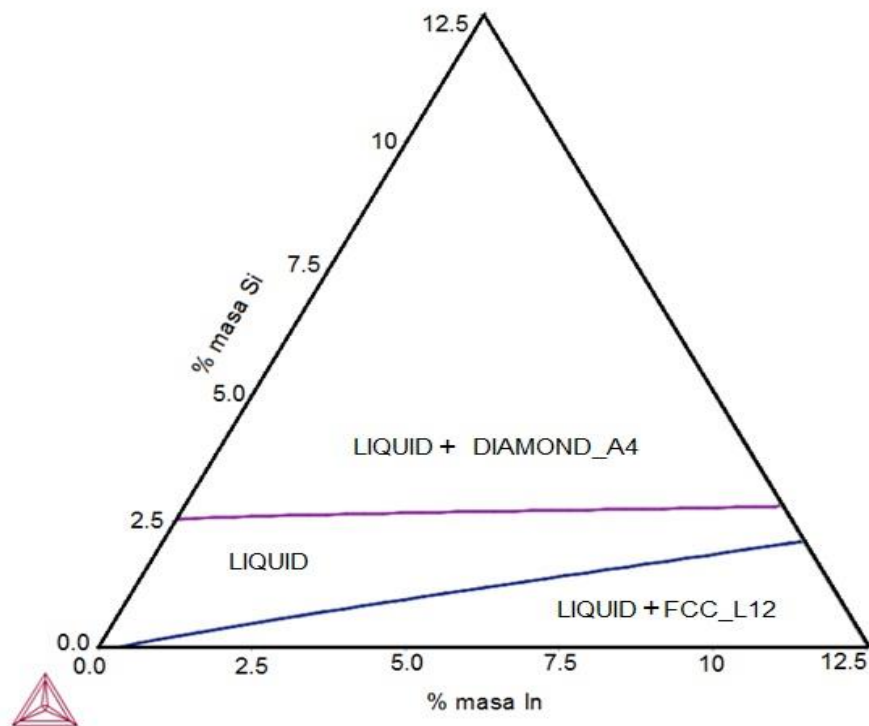
BLAZEVIC, A., EFFENBERGER H., RICHTER, K. Phase equilibria in the system Au-Cu-Si and structural characterization of the new compound $Au_{5\pm x}Cu_{2\pm x}Si$. ELSEVIER, 2014, pp. 193.

3.2.2 Realización de pruebas preliminares. Con el fin de determinar las condiciones más adecuadas para llevar a cabo la fusión de las aleaciones, se realizaron pruebas empleando diferentes medios de calentamiento, como horno de resistencia y mufla, entre otros, usando aleaciones base cobre y plata. Además se realizaron otros ensayos usando como materias primas Ag, Cu, Mg y Ca en estado puro, con el fin de fabricar una aleación base plata ($Ag_{38.5}Mg_{30.8}Ca_{23}Cu_{7.7}$) [62], la cual puede ser vítrea si se controla adecuadamente la velocidad de enfriamiento. Esto último con el fin de verificar si la infraestructura disponible, permitía fabricar aleaciones amorfas.

3.2.3 Elaboración del plan de ensayos. Para el presente estudio se determinó fabricar aleaciones base oro de 18 quilates (con contenido de oro del 75% en masa). Se escogieron estas aleaciones debido a su mayor uso comercial con esmeraldas colombianas.

En la Tabla 4 del siguiente capítulo, se presenta el plan de ensayos elaborado, donde se muestran las diferentes composiciones de las aleaciones estudiadas, indicando el porcentaje en masa de los elementos que las componen.

Figura 11. Corte isotérmico a 500° C del diagrama de fase 75% Au, 12.5% Cu, 12.5% (Ge-Si-In).



Dr. André Costa e Silva, Universidad Federal Fluminense, Volta Redonda, Brasil, comunicación personal, 2014.

3.3 OBTENCIÓN DE LAS ALEACIONES PRECIOSAS

Para la elaboración de las aleaciones se dispuso inicialmente de un horno de inducción, Fornax T, con una potencia de 3,6 KVA, el cual permite fundir cantidades de aleaciones desde 10 g y tiene la posibilidad de hacer el vaciado utilizando centrifugación.

Este horno, no posee atmósfera controlada, sin embargo se puede adaptar argón u otro gas en la fusión, no obstante en la colada no es posible, lo cual puede generar oxidación en la aleación durante esta etapa. Además, no permite la medición de la temperatura.

Con el fin poner a punto el equipo, se llevaron a cabo pruebas inicialmente con cobre puro. Posteriormente se fabricaron las aleaciones base oro de tipo comercial (aleaciones I y II). Se coló en un crisol cerámico de sílice y alúmina precalentado a 250° C, con el fin de obtener condiciones cercanas a las de micro-fundición con técnica de la cera perdida.

Se elaboraron las aleaciones III, IV, V, VI, VII y VIII, indicadas en la Tabla 4. En todos los casos se emplearon cargas inferiores a 10 g.

Las muestras I a VIII no se pre-alearon debido a las condiciones de trabajo del equipo. Este opera a la máxima potencia bajo la cual se necesitan tiempos menores a un minuto para la fusión.

A partir de estos resultados, se determinó no utilizar cobre puro para las aleaciones faltantes, por lo tanto no se fabricaron las IX, XII, XIV y XVI.

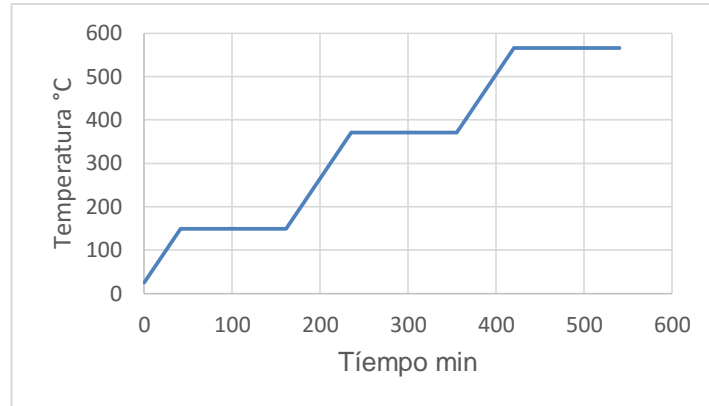
Para la elaboración de las aleaciones X, XI, XIII y XV, se usó un horno de inducción Pressovac Dual. Éste equipo posee una potencia de 3,4 KVA, además permite fundir mediante la técnica de cera perdida empleando vacío y atmósfera controlada. Los crisoles tienen capacidad desde 10 g. En estas fusiones se pre-alearon las materias primas con el fin de disminuir el punto de fusión y realizar la colada a menor temperatura.

Para la fabricación del molde se usó un modelo cilíndrico en cera, con el fin de optimizar las materias primas de la aleación y poder realizar los diferentes análisis para su caracterización.

Se utilizó un molde cerámico empleando revestimiento comercial (Diamante Kerr), este material es comúnmente usado en la técnica de cera perdida y con pre-engaste de diamantes. El tratamiento térmico aplicado para el revestimiento se muestra en la figura 12.

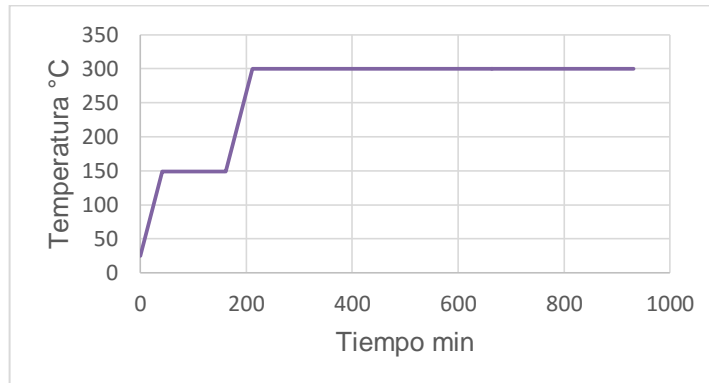
El tratamiento térmico realizado de acuerdo con recomendaciones del fabricante, consistió en aplicar tres rampas de calentamiento a 3° C/min, en la primera rampa se calentó desde temperatura ambiente hasta 149° C y se mantuvo durante 2 horas con el fin de eliminar la cera de la muestra; la segunda rampa se aumentó la temperatura desde 149° C hasta 371° C, se mantuvo a esa temperatura durante dos horas; en la tercera rampa, se calentó desde 371° C hasta los 566° C se sostuvo por tres horas; finalmente, se llevó a la temperatura de colada y se mantuvo durante una hora.

Figura 12. Tratamiento térmico del revestimiento comercial.



No obstante, con el fin de poder evaluar el comportamiento con la esmeralda, la cual requiere temperaturas preferiblemente hasta 325° C, se realizaron algunas pruebas con el tratamiento térmico del revestimiento modificado, indicado en la figura 13.

Figura 13. Tratamiento térmico del revestimiento comercial, modificado.



En este caso, para el tratamiento se aplicaron dos rampas de calentamiento a la misma velocidad 3° C/min; la primera igual que en el caso anterior desde temperatura ambiente hasta 149° C, se sostuvo durante dos horas; la segunda desde 149° C hasta 300° C/min y se mantuvo durante 12 horas [16].

3.4 CARACTERIZACIÓN

Para la caracterización de las aleaciones fabricadas, se evaluó su composición química, se realizó análisis térmico, metalográfico y mecánico. Finalmente, se determinó su color y capacidad de llenado del molde.

3.4.1 Análisis de composición química. Se empleó la técnica de fluorescencia de rayos X, con el fin de determinar las cantidades de los elementos constituyentes de las aleaciones fabricadas. Además se analizó el oro, la plata y el cobre, usados como materias primas (anexo A), mediante el Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos-X de Energía Dispersiva Shimadzu EDX-800HS.

3.4.2 Análisis térmico. Se determinaron: el punto de fusión, la capacidad calorífica y el coeficiente de dilatación térmico, usando el equipo modelo Setsys Evolution, de SETARAM.

A las muestras en estudio se les realizó calorimetría diferencial de barrido, con el fin de determinar el punto de fusión y a aquellas seleccionadas para las pruebas de verificación se les determinó su capacidad calorífica, con el apoyo de la norma ASTM E1269-11.

Con el fin de determinar el coeficiente de dilatación térmico (ASTM E831-14), se aplicó el análisis termo-mecánico, donde se midió la variación de la longitud de la muestra aplicando una carga determinada.

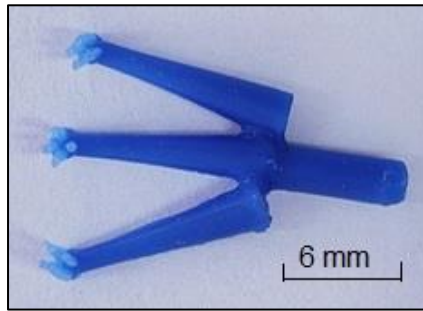
3.4.3 Análisis metalográfico. Se realizó preparación metalográfica siguiendo la norma ASTM E3-11 y para el ataque ASTM E407-07 con el fin de llevar a cabo el análisis de la microestructura, la cual se hizo mediante las técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) y óptica, además la espectroscopia de dispersión de energía (EDS) para determinar la composición de las fases. Para estos análisis se usaron los microscopios Electrónico QUANTA FEG 650 marca FEI utilizando 20 KV y aumentos entre 1000 X y 5000 X y el óptico Hirox KH 7700 empleando aumentos entre 700 X y 2800X.

3.4.4 Análisis de propiedades mecánicas. Se aplicó micro-dureza Vickers para todas las aleaciones según norma ASTM E384, empleando el micro-durómetro Innovatest.

3.4.5 Análisis de color. A las aleaciones elaboradas se les aplicó la técnica de espectrofotometría usando la norma ASTM E308, para determinar su color. Se utilizó el espectrofotómetro Color Eye XTH. Se realizaron las mediciones con el componente especular incluido (SCI), ángulo de 10° e iluminante DGS y mediante el sistema CIELAB, se determinaron los parámetros L^* , a^* y b^* .

3.4.6 Capacidad de llenado de la aleación. Se realizó la prueba de llenado a las aleaciones propuestas, para lo cual se reemplazó en cada composición de la aleación el oro (debido a su alto costo) por cobre. Para ello se empleó como modelo en cera un engaste en chatón como se muestra en la figura 14.

Figura 14. Modelo en cera realizado para las pruebas de llenado.



3.5 REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE VERIFICACIÓN

En esta etapa, se realizaron pruebas de llenado de algunas aleaciones base oro, además, se realizó simulación del proceso de solidificación utilizando el software SOLIDCAST, prueba de colabilidad de la aleación seleccionada y colada de una pieza de joyería.

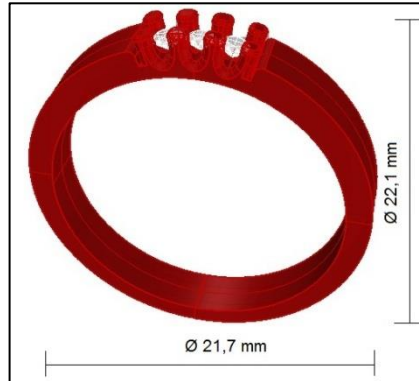
3.5.1 Pruebas de llenado con aleaciones base oro. En esta etapa se llevaron a cabo pruebas de verificación de llenado con aleaciones base oro con el fin de corroborar los resultados obtenidos del llenado reemplazando el oro por cobre.

3.5.2 Simulaciones en el software SOLIDCAST. A partir de los resultados de la caracterización de las aleaciones, se seleccionaron aquellas que mostraron el mejor comportamiento con el fin de simular el proceso de solidificación, mediante el uso del software SOLIDCAST versión 8.3.0 empleando un computador HP el cual posee Windows 7 Home Premium. Para esta última etapa fue necesario utilizar parámetros termo-físicos como capacidad calorífica, temperatura de fusión, densidad entre

otros. Además se usó un anillo como modelo, indicado en la figura 15, el cual fue diseñado mediante un software libre que permite generar archivos en la extensión STL (estereolitografía).

Cada simulación se llevó a cabo de manera individual, con una duración de 24 horas por cada muestra.

Figura 15. Modelo en diseño asistido por computador (CAD).



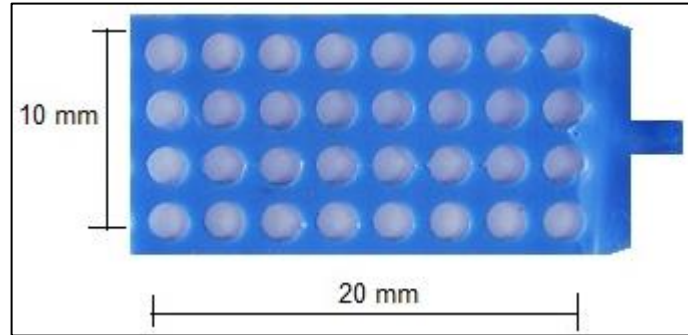
El diseño del anillo permite el engaste de tres gemas redondas con diámetro de 1,5 milímetros. Con este diseño se pretendió disminuir el contacto de la gema con la aleación y así proteger la esmeralda.

Con la información obtenida de esta etapa, se seleccionó la aleación con menor temperatura en la zona de contacto del metal fundido con la gema.

3.5.3 Colabilidad de la aleación seleccionada. Se realizó la prueba de colabilidad [51], con la aleación escogida en la etapa anterior, con el fin de verificar el llenado de la aleación, para ello se utilizó la malla mostrada en la figura 16, con dimensiones de 20 mm x 10 mm x 1 mm de espesor, con la cual se determinó el porcentaje de llenado, aplicando la ecuación 1.

$$\% \text{ llenado} = \frac{\text{área llenado}}{\text{área total}} * 100 \quad (5)$$

Figura 16. Malla utilizada en la prueba de colabilidad.



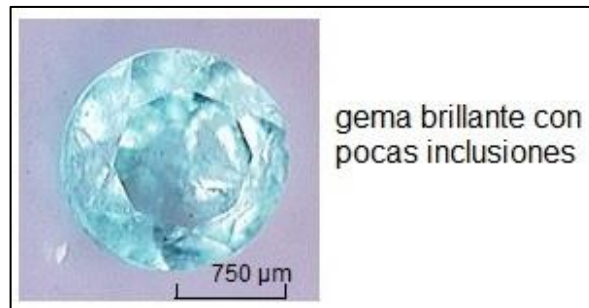
3.5.4 Colada de una pieza de joyería. Se fabricaron dos anillos, aplicando la técnica de cera perdida con pre-engaste de esmeraldas. Para el primer anillo, se utilizaron tres esmeraldas redondas de 1,5 mm de diámetro, con diferentes características físicas (con inclusiones e incluso con una grieta) como se muestra en la figura 17. Esto se llevó a cabo con el fin de verificar el comportamiento de la aleación en una pieza de joyería y observar la respuesta de las esmeraldas usadas.

Figura 17. Esmeraldas usadas en la primera colada



Para el segundo anillo se utilizó una esmeralda tipo I, redonda de 1,5 mm de diámetro (ver figura 18), con el fin de comparar los resultados obtenidos con los tipos de gema utilizados.

Figura 18. Gema usada en la segunda colada



3.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con los resultados obtenidos en la caracterización de las aleaciones y las pruebas de verificación se pudo confirmar el potencial que tienen estas aleaciones para su implementación en la técnica de la cera perdida con pre-engaste de esmeraldas colombianas.

3.7 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

Con la información obtenida en todo el proceso de investigación se realizó el respectivo informe.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

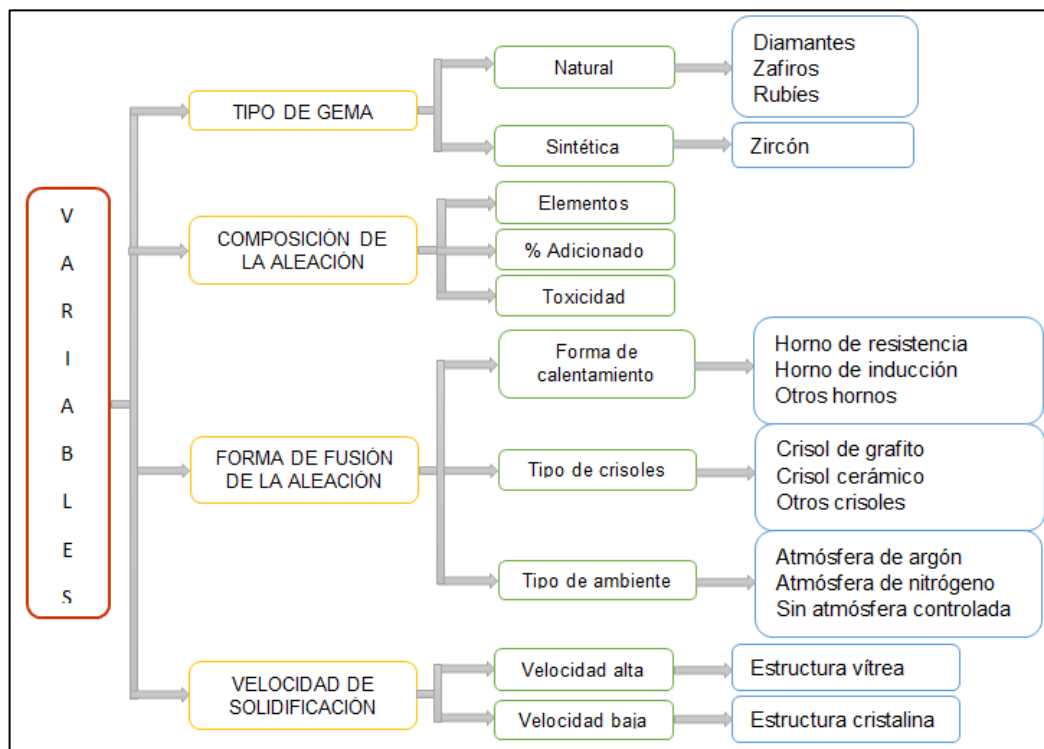
En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos de la investigación en cuanto al diseño de experimentos, obtención de las aleaciones preciosas, pruebas de caracterización y ensayos de verificación planteados.

4.1 RESULTADOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos del estudio de variables, realización de pruebas preliminares y elaboración del plan de ensayos.

4.1.1 Resultados del estudio de variables. Se identificaron las principales variables que influyen en las propiedades y características de las aleaciones preciosas usando la técnica de la cera perdida con pre-engaste de esmeraldas colombianas: el tipo de gema, la composición de la aleación, la forma de fusión y la velocidad de solidificación, ver figura 19.

Figura 19. Principales variables en la fabricación de las aleaciones preciosas



En cuanto al tipo de gema, sus propiedades y características son fundamentales para definir las condiciones de operación (temperatura de fusión, temperatura de colada, temperatura del tratamiento térmico del revestimiento), que disminuyan el choque térmico y eviten su daño. Cuando las gemas son sintéticas, su homogeneidad estructural facilita su uso en la técnica, caso contrario sucede con las gemas naturales donde la presencia inclusiones y heterogeneidades las hacen más susceptibles a los cambios térmicos [16].

La composición de la aleación, es determinante en las propiedades de la misma, por lo tanto una adecuada selección de los elementos aportará en la calidad de la aleación obtenida [52]. Por otra parte, dado el uso continuo de estos materiales por los seres humanos, el grado de toxicidad de los elementos es crítico en su selección [53].

Por otro lado, en la forma de fusión es importante establecer el sistema de calentamiento, el cual puede ser utilizando un horno de resistencia o inducción que permita la fusión y homogeneización adecuada de los elementos en la aleación [54]. Además, se deben emplear crisoles que no contaminen la muestra los cuales pueden ser cerámicos o de grafito. Finalmente, es necesario escoger el tipo de ambiente en el cual se llevará a cabo la fusión. En este sentido, es posible emplear atmósfera controlada usando argón o nitrógeno o mezcla de gases que cumplan este objetivo, o simplemente emplear fundente sin atmósfera controlada.

La velocidad de solidificación influye en las propiedades de la aleación pues determina que esta sea cristalina o vítrea [55]. Recientes investigaciones se dirigen a la fabricación de aleaciones preciosas vítreas de bajo punto de fusión, con excelentes propiedades, que requieren condiciones muy estrictas para su elaboración [43], [56] y tienen restricciones en espesores y tamaños.

Para el caso de la presente investigación, se determinó que la esmeralda colombiana pierde algunas de sus propiedades a temperaturas por encima de los 325° C [16]; además, fue necesario seleccionar aquellas que poseían el menor número de inclusiones, las cuales de acuerdo al Instituto Americano de Gemología GIA, las clasifican como tipo I. Con base en lo anterior, se planteó fabricar una aleación con un punto de fusión menor de 500° C, con el fin de disminuir el choque térmico y preservar sus propiedades, así como usar un tratamiento térmico del revestimiento cuya temperatura no afecte las características de las gemas.

A partir de la información presentada en la tabla 2, se seleccionaron el silicio, germanio e indio como elementos para disminuir el punto de fusión de la aleación, dado que estos presentan puntos eutécticos con el oro, no generan reacciones alérgicas por uso en lo seres humanos y existen referencias bibliográficas que señalan algunos usos en aplicaciones en joyería [57] y odontología [58].

Con el fin de mejorar las propiedades de estas aleaciones, se plantea agregar el cobre, la plata y el cinc como elementos complementarios.

Con base en la información derivada de los diagramas de equilibrio de fases, se establecieron los intervalos de composición para los elementos de aleación, indicados en la tabla 3.

Tabla 3. Intervalos de composición de los elementos seleccionados

Elemento	Au	Cu	Ag	Zn	Si	Ge	In
% masa	75	12,5 - 25	5,28 – 12,5	0,36 – 0,67	0,5 – 2,84	0,21 – 12,38	9,79 – 12,5

Con el fin de adicionar el zinc y la plata, se decidió trabajar con una aleación madre base cobre (Cu-Ag-Zn) usada comercialmente en joyería. A estas aleaciones se les realizó análisis químico, físico y metalúrgico, con el fin de obtener sus propiedades más relevantes. Los resultados obtenidos se encuentran en el anexo B.

En el caso particular de las aleaciones preciosas es importante definir el sistema de calentamiento que permita de manera efectiva la fusión y/o disolución de las especies en la mezcla, teniendo en cuenta las altas temperaturas de fusión (como el caso del silicio) y las diferencias en estas temperaturas entre los distintos elementos. Finalmente, se debe definir el sistema de enfriamiento posible de aplicar técnica y económicamente en esta investigación. Con este fin se desarrollaron las pruebas preliminares.

4.1.2 Resultado de las pruebas preliminares. Se verificó que la capacidad del crisol del horno de resistencia disponible en la Universidad era demasiado elevado (1 kg) y no permitía la realización de fusiones menores a 30 g de manera efectiva. Se confirmó que las condiciones de operación disponibles, no facilitaban la realización de pruebas con altas velocidades de enfriamiento necesarias para la elaboración de aleaciones vítreas de bajo punto de fusión [14].

Los resultados de estas pruebas mostraron que es fundamental disponer de un equipo con ambiente controlado, de alta capacidad de calentamiento (> 1200° C), preferiblemente por inducción para mayor homogeneización de la muestra, con crisoles que permitan fundir efectivamente muestras menores de 10 gramos dado los costos de las materias primas.

4.1.3 Resultados de elaboración del plan de ensayos. En la Tabla 4, se presenta el plan de ensayos establecido para esta investigación. En la primera

columna se le asigna número romano a las diferentes composiciones de las aleaciones, indicándose el porcentaje en masa de los elementos componentes.

En este plan de ensayos se planteó elaborar dos aleaciones de oro comercial (18 quilates), una a partir de los elementos puros (aleación I) y otra (aleación II) de oro puro y aleación madre Cu-Ag-Zn (Legor C183N), disponibles comercialmente para fabricar aleaciones base oro de 18 quilates comúnmente denominada liga. Estas fueron tomadas como referencia para comparación. Inicialmente se propuso fabricar todas las aleaciones empleando cobre y liga con el fin de evaluar los mejores resultados.

Además se propuso preparar aleaciones con adición de los otros elementos seleccionados en la investigación y combinaciones entre ellos (aleaciones III a XV). No se propuso la composición con la adición de sólo indio por no disponer de un corte isotérmico a 500° C del diagrama Au-Cu-In. Además en el diagrama Au-In se presenta a 500 °C fase líquida a 23% y 30% de In (puntos eutécticos), valores que no permiten la fabricación de aleaciones de 18 quilates con la adición de cobre o liga.

Tabla 4. Plan de ensayos planteado para la presente investigación.

Nomenclatura de la prueba	% Au	% Otros	% Si	% Ge	% In
I	75	25	0	0	0
II (liga)		25	0	0	0
III		23	0	1,3	0
IV (liga)		23	0	1,3	0
V		22,16	2,84	0	0
VI (liga)		22,16	2,84	0	0
VII			2,5	0,21	9,79
VIII (liga)			2,5	0,21	9,79
IX			0,5	12	0
X (liga)			0,5	12	0
XI (liga)			2,4	10,1	0
XII		12,5	2,4	0	10,1
XIII (liga)			2,4	0	10,1
XIV			0	12,38	0,12
XV (liga)			0	12,38	0,12
XVI			0	0	12,5

Tabla 4. (Continuación)

Nomenclatura de la prueba	% Au	% Otros	% Si	% Ge	% In
XVII (liga)	75	12,5	0	0	12,5

4.2 RESULTADOS DE LA OBTENCIÓN DE LAS ALEACIONES

Se realizaron las fusiones de las aleaciones I a VIII del plan de ensayos, en un horno de inducción Fornax T, con crisol de grafito, sin emplear la técnica de cera perdida. Estas primeras fusiones permitieron obtener aleaciones base oro, con porcentajes de oro cercanos al 75% (18 quilates), algunas con bajo punto de fusión, lo cual se pudo verificar con pruebas posteriores.

Por otra parte, utilizando horno de inducción Pressovac Dual, con crisol de grafito, usando la técnica de cera perdida, se fabricaron las aleaciones X, XI XIII y XV, mostradas en el plan de ensayos.

Los resultados obtenidos con el tratamiento térmico modificado, aplicado al molde, son adecuados debido a que a 300° C no ocurre ninguna transformación de fase en el revestimiento comercial y por lo tanto no se generaron defectos de fundición en la aleación fabricada lo cual permitiría su implementación con las esmeraldas pre-engastadas.

Con los resultados obtenidos, con todas las pruebas realizadas se establecieron las condiciones necesarias para la obtención de las aleaciones de bajo punto de fusión:

- Se debe usar horno de inducción con dispositivo para realizar la colada mediante la técnica de cera perdida, con atmósfera controlada, utilizando crisol de grafito (con capacidad acorde a la cantidad de muestra a fundir).
- Se debe partir de materias primas de alta pureza para poder garantizar la composición.
- Pre-alea las materias primas con el fin de disminuir la temperatura de colada, en este sentido, es recomendable hacer una aleación de oro y el o los elementos de alto punto de fusión (cobre, germanio y silicio), para esto, es conveniente llevar la muestra hasta la temperatura de fusión del oro, lo cual permite la disolución de los otros elementos y está de acuerdo con lo indicado por Tobón y colaboradores [20], quienes prepararon aleaciones oro-silicio, logrando la disolución de las especies con calentamiento a

temperatura cercana a la de fusión del oro. Posteriormente, agregar la liga con el elemento indio, si este es necesario, esto con el fin de evitar las pérdidas de elementos por volatilización.

- El uso de liga en la fabricación de la aleación, ayuda a mejorar las propiedades mecánicas, disminuyendo su dureza y aumenta la colabilidad a la mezcla por la presencia de zinc, características que no se logran con la adición de solo cobre. Sin embargo, el uso de la liga (aleación multi-componente), hace compleja la microestructura obtenida generando la precipitación de fases de alta dureza, como se pudo corroborar en el análisis de la micro-estructura.
- Se pudo confirmar que la temperatura de colada debe estar alrededor de 50° C por encima de la temperatura de fusión de la aleación para tener la fluidez adecuada, aspecto recomendado por otros investigadores [42].
- Se debe fabricar el molde cerámico aplicando el tratamiento térmico modificado para evitar gradientes térmicos que afecten el proceso.

4.3 RESULTADO DE LA CARACTERIZACIÓN DE LAS ALEACIONES FABRICADAS

A continuación se presentan los resultados de los diferentes análisis iniciando por composición química, seguida de análisis térmico, metalográfico, propiedades mecánicas, de color y finalmente capacidad de llenado del molde.

4.3.1 Resultados de composición química. En la tabla 5 se muestran las composiciones de las diferentes aleaciones fabricadas, usando la técnica de caracterización de fluorescencia de rayos X.

Los resultados muestran que para la mayoría de las aleaciones el contenido de oro obtenido es cercano al 75%, lo cual corresponde a la condición planteada inicialmente. Sin embargo, se observan variaciones en el contenido por debajo y por encima de este valor, lo cual puede estar asociado al proceso de fabricación, que involucra varios factores, como el control de la atmósfera y la temperatura del proceso, el uso de cobre o liga y la pre-aleación de las materias primas.

El horno Fornax T, no poseía atmósfera controlada en la etapa de colada lo cual generó pérdidas por oxidación, esto coincide con lo dicho por Dieter Ott [59], en su investigación *Metallurgical and chemical factors influencing working conditions*, donde menciona la presencia de oxígeno/aire en la atmósfera circundante, lo cual

oxida metales no preciosos como el cobre (elemento hallado en las aleaciones I, III, V y VII) y zinc (encontrado en las muestras II, IV, VI, y VIII).

Tabla 5 . Resultados de fluorescencia de rayos X

Nomenclatura de la prueba	% Au	% Otros*	% Si	% Ge	% In
I	76,04	23,96	0	0	0
II (liga)	74,84	25,16	0	0	0
III	73,40	24,53	0	2,07	0
IV (liga)	73,79	23,38	0	2,83	0
V	71,46	26,34	2,20	0	0
VI (liga)	77,98	19,07	2,95	0	0
VII	71,62	13,07	3,33	0,32	11,66
VIII (liga)	66,32	14,15	8,56	0,47	10,50
X (liga)	78,01	9,88	1,49	10,62	0
XI (liga)	78,03	10,48	3,5	7,99	0
XIII (liga)	73,05	10,01	6,61	0	10,33
XV (liga)	81,64	5,49	0	12,87	0

* Corresponde al contenido de Cu, Ag, Zn y otros elementos. No se reportan estos valores dada las condiciones de confidencialidad del proyecto.

De forma adicional, no se presentó control de temperatura para el mismo horno, sin embargo su calentamiento supera los 1000° C, ya que es usado para fabricar aceros. Este hecho conlleva a la variación en la composición como sucedió en la aleación VIII, muestra que presenta elementos constituyentes con diferentes temperaturas de fusión, particularmente el cinc, elemento estudiado por Omar Quintero [42] en su libro principios de fundición, donde se menciona las limitantes del elemento aleante, ya que posee fusión a los 419,5° C y vaporización a los 907° C, temperaturas superadas en la colada.

En el caso del uso del horno Pressovac Dual, se presentó una menor variación del porcentaje de oro ya que se cuenta con atmósfera y temperatura controladas durante todo el proceso, disminuyendo las pérdidas por oxidación y volatilización de las especies.

En cuanto a la atmósfera controlada, factor importante tratado por el investigador Dieter Ott [59], utilizar atmósfera neutra, por la presencia de argón o nitrógeno, cuida la masa fundida y no genera ningún tipo de reacción, sin embargo, estos gases no la protegen completamente debido al calentamiento del gas en contacto con la superficie de la fundición, provocando diferencias de densidad entre el gas en el

crisol y la atmósfera circundante, lo cual produce turbulencia reduciendo el efecto de protección. Como consecuencia de esto, las muestras fabricadas con atmósfera neutra también presentaron variación en la masa respecto a las cargas calculadas inicialmente.

Por lo anterior, pre-alea las especies influye en las pérdidas de las materias primas, reduce el choque térmico entre la aleación y el molde, ya que se puede colar a menor temperatura y ayuda además a homogenizar la muestra, como se pudo corroborar en las pruebas de verificación. El control de la temperatura de colada de la aleación, afecta los resultados en cuanto a los defectos de fundición como agrietamiento por choque térmico y reacción con el revestimiento, además de otros defectos generados por la fabricación del molde y su tratamiento térmico [54].

4.3.2 Resultados del análisis térmico. A continuación se muestran los resultados de los análisis térmicos realizados a las diferentes aleaciones fabricadas. Se presentan inicialmente los obtenidos por calorimetría diferencial de barrido y posteriormente los de análisis termo-mecánico.

En la figura 20 a y b se muestran las curvas obtenidas de DCS para las aleaciones preciosas comerciales. Los resultados señalan un solo pico de solidificación y fusión, comportamiento que se presenta en metales puros y aleaciones cuya microestructura muestra una sola fase [60].

Figura 20. Resultados de calorimetría diferencial de barrido para las aleaciones comerciales, a) Au-Ag-Cu y b) Au-Cu-Ag-Zn.

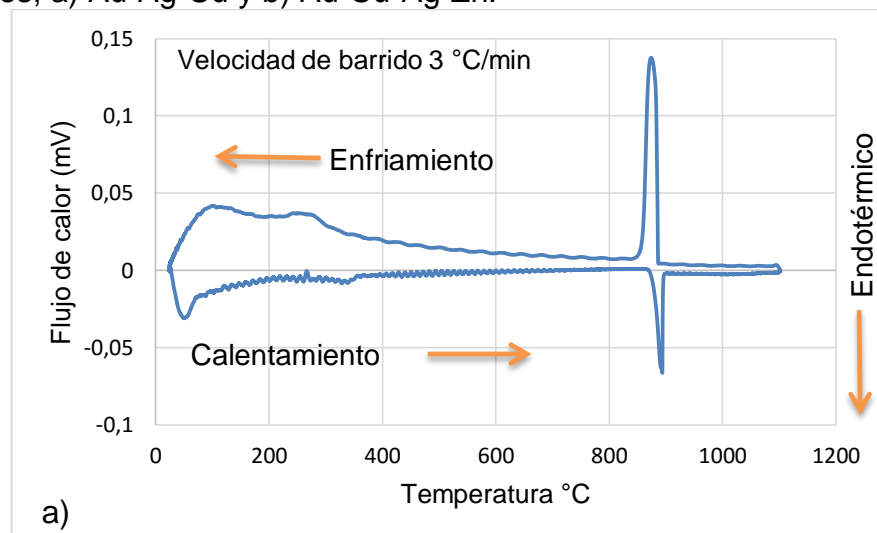
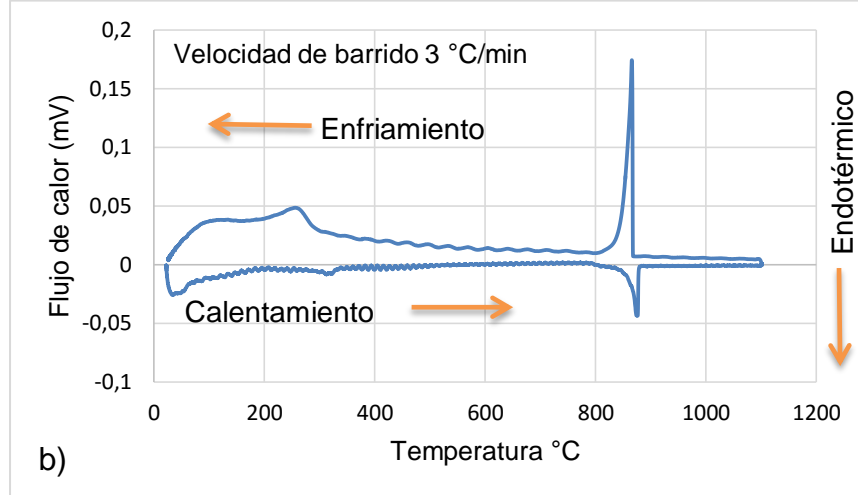


Figura 20. (Continuación).



La temperatura de fusión de las aleaciones es cercano a 900° C para las dos muestras como se observa en la figura 20. A partir de estos resultados se confirma que el uso del cinc no afecta la temperatura de fusión pero si influye en la fluidez de la aleación, como se señala en las investigaciones adelantadas por Ott Dieter [59].

Figura 21. Resultados de calorimetría diferencial de barrido para las aleaciones a) Au-Cu-Si y b) Au-Liga-Si.

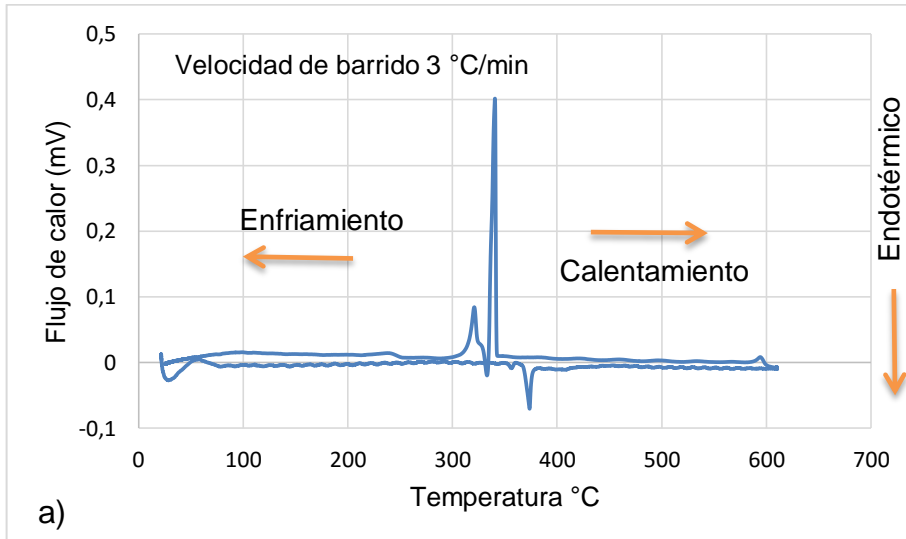
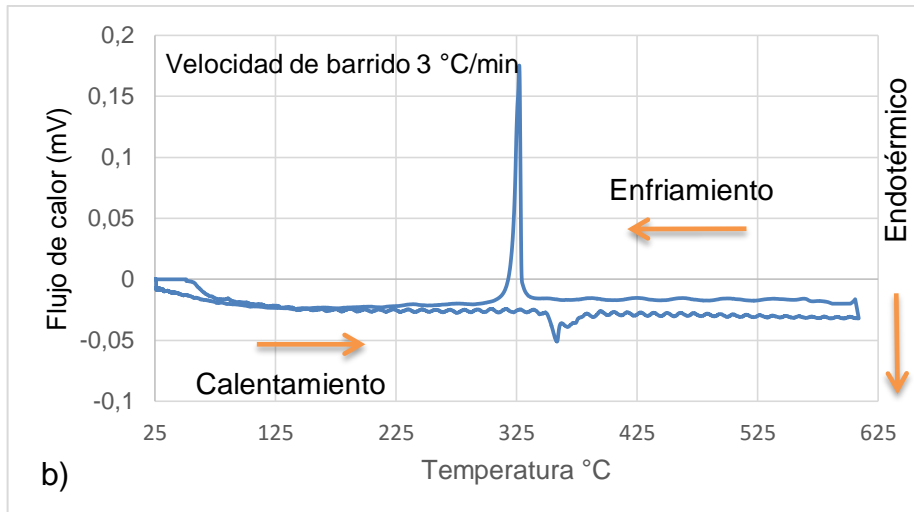


Figura 21. (Continuación).



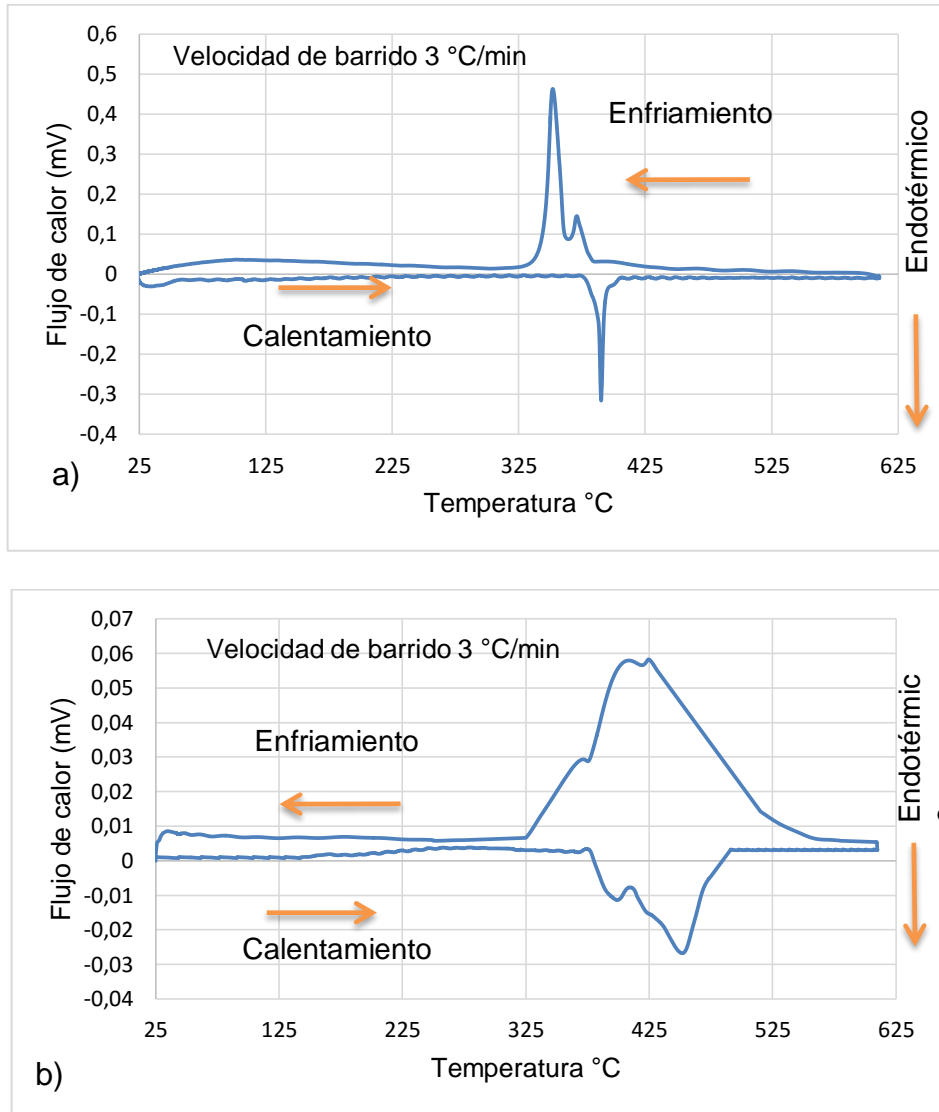
En la figura 21 a y b, se presentan los resultados obtenidos de DSC, para las aleaciones V (Au-Cu-Si) y VI (Au-liga-Si). La aleación V, en la zona de enfriamiento muestra dos picos, con diferente consumo de energía, los cuales podrían corresponder a la formación de una reacción eutéctica de mayor consumo de energía y una fase primaria con menor consumo de energético. Zhai [49], realizó estudios en aleaciones Cu-Ge, el análisis DSC de la composición $\text{Cu}_{87.2}\text{Ge}_{12.8}$ mostró un comportamiento similar al encontrado en la aleación V, sin embargo, los dos picos mostrados representan una reacción peritética que no es nuestro caso y el segundo pico la solidificación de la aleación.

Por otra parte, la aleación VI, solo mostró un pico de solidificación muy marcado, lo cual correspondería a la reacción eutéctica, lo cual se corrobora por Zhai [49] ya que también lo encontró en el termograma para la composición $\text{Cu}_{95.6}\text{Ge}_{4.4}$.

En la figura 22 a y b, se encuentran los resultados obtenidos de calorimetría diferencial de barrido, de las muestras VII y VIII, las cuales poseen silicio, germanio e indio. La aleación VII el pico de fusión es definida, mientras en la solidificación se muestran dos picos, en los cuales se presenta una posible solidificación de fase primaria seguida de eutéctico.

Para la aleación VIII, el uso de liga, permite visualizar un pico de fusión y solidificación, con gran consumo de energía debido al gran número de elementos constituyentes en la muestra, por su parte Zhai [49], confirma lo mencionado, ya que en su estudio muestra la influencia de la variación de germanio en la forma de los picos del termograma, en el que el aumento en su contenido genera una variación en la forma del pico.

Figura 22. Resultados de la calorimetría diferencial de barrido para las aleaciones a) Au-Cu-Si-Ge-In y b) Au-liga-Si-Ge-In



De la información obtenida de las gráficas, en la tabla 6, se encuentra un resumen de los diferentes puntos de fusión encontrados para las aleaciones fabricadas.

Se puede observar el alto punto de fusión de las aleaciones comerciales (I y II), así como valores superiores a los 600 °C para las muestras III y IV, razón por la cual estas no son adecuadas para su implementación en el proceso de la cera perdida con esmeraldas pre-engastadas. En cuanto a las demás aleaciones, presentan un punto de fusión menor a 500 °C, lo cual las habilita para el proceso.

Tabla 6. Temperaturas de fusión de las aleaciones fabricadas.

Aleación	Temperatura de fusión °C
I	893
II	876
III	> 600
IV	> 600
V	373,4
VI	358,7
VII	390,2
VIII	451,3
X	398
XI	341
XIII	390
XV	391

Adicional al análisis DSC, se realizó uno de tipo termo-mecánico, en el cual se halló la variación dimensional respecto a una carga constante aplicada y el aumento de la temperatura. Esta propiedad, es de gran ayuda en los procesos de manufactura, ya que se puede prevenir los defectos de fundición, así poder controlar la calidad la aleación [62].

Los cambios dimensionales graficados para las aleaciones comerciales se encuentran en la figura 23 a y b, se presentó una expansión térmica de 2,6% para las dos muestras, además, una variación en la curva a baja temperatura, lo cual generalmente representa una transformación de fase [63] que se observan en los resultados de DSC para las mismas muestras, en las cuales se encuentra un pico endotérmico a temperatura menor de 200° C, figura 21 a y b. No obstante, estas transformaciones de fase no se realizan en la fundición, debido probablemente a la velocidad de solidificación, de acuerdo a estudios acerca de la temperatura medida en el molde realizadas por Patrick [48], el metal líquido tarda algunos minutos en disminuir la temperatura dentro del molde y solidificar completamente, tiempo insuficiente para realizar las transformaciones de fase de equilibrio.

Los análisis termo-mecánicos a las demás muestras se realizaron a menor temperatura (250° C) respecto a las aleaciones comerciales (600° C), dado a que la técnica no se puede aplicar si la muestra se lleva al punto de fusión.

Las curvas de las aleaciones III a XV no mostraron ninguna variación en la pendiente de la curva, por tanto tampoco se evidenció transformación de fase en el intervalo de trabajo. En la figura 24 a y b, se muestra como ejemplo los resultados de TMA para las aleaciones X y XV.

Figura 23. Resultados de análisis termo-mecánico para las aleaciones comerciales a) I (Au-Cu-Ag) y b) II (Au-liga).

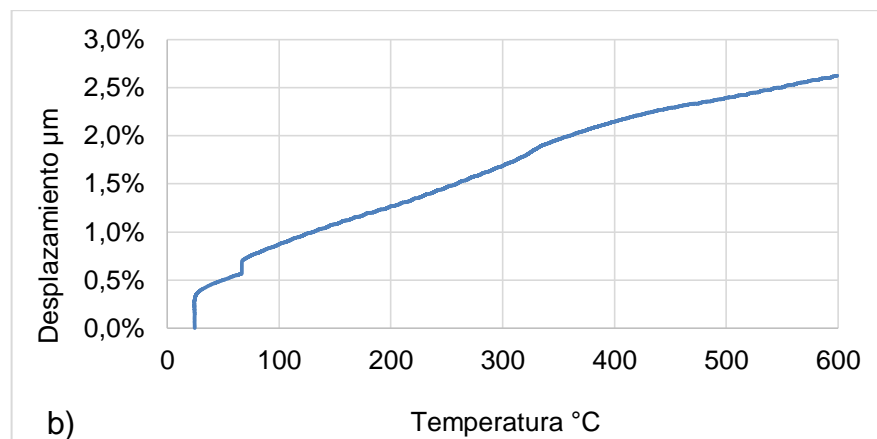
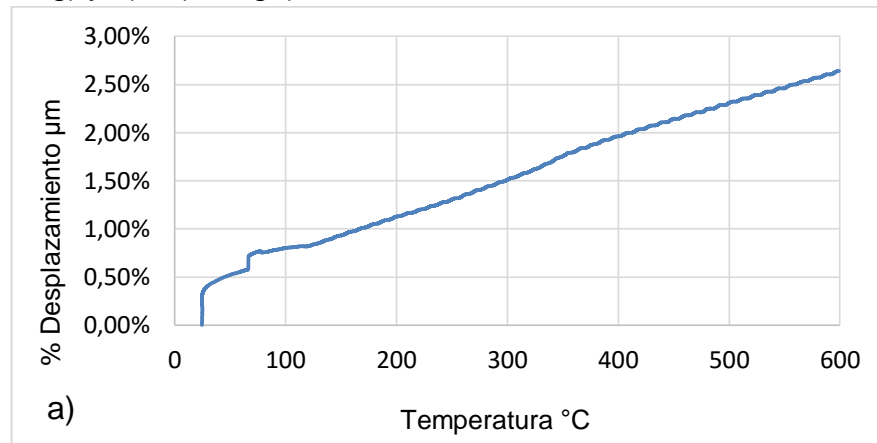


Figura 24. Resultados de análisis termo-mecánico para las muestras a) X (Au-liga-Si-Ge) y b) XV (Au-liga-Ge).

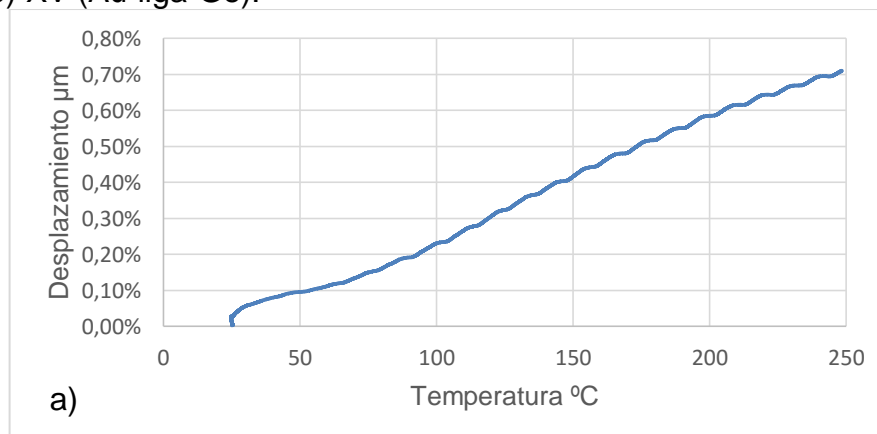
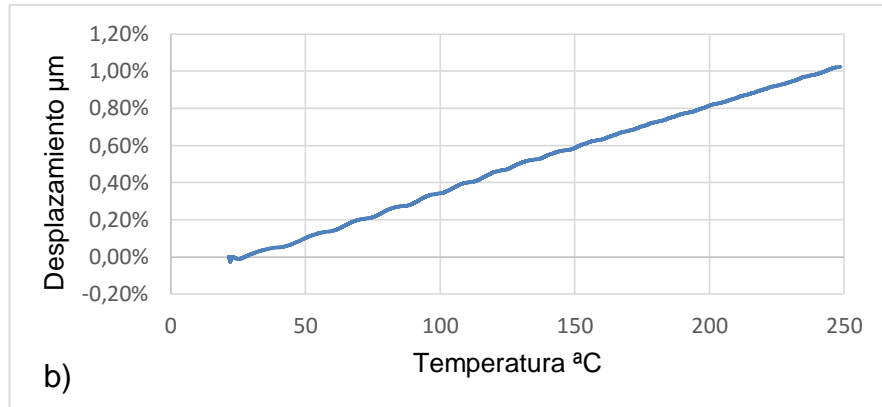


Figura 24. (Continuación)



Con los resultados obtenidos del análisis termo-mecánico se calcularon los diferentes coeficientes de dilatación térmica lineal, los cuales se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Resumen de las diferentes características térmicas de las aleaciones.

Aleación	Coefficiente de dilatación térmica lineal α ($\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{C}^{-1}$)
I	28,39
II	29,2
III	28,2
IV	18,73
V	18,82
VI	18,86
VII	11,04
VIII	10
X	23,52
XI	15,36
XIII	20,62
XV	34,05

Los valores del coeficiente de dilatación térmica lineal, oscilan entre $10 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}^{-1}$ y $34,05 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}^{-1}$. El menor coeficiente lo presenta la aleación V lo que implicaría menores cambios dimensionales asociados a cambios de temperatura, por tanto menores defectos por contracción. Caso contrario sucede con la aleación XV, la cual posee el coeficiente más alto.

Choi [64] investigó la influencia de precipitados en el coeficiente de expansión térmico lineal por la presencia de silicio, donde en los termogramas se deben visualizar las diferentes fases que se forman, en las aleaciones fabricadas, no se presentó ningún caso por lo cual se puede deducir que, son estables térmicamente en las temperaturas analizadas, lo cual no generará ningún defecto en el proceso de solidificación.

Los resultados de capacidad calorífica se encuentran en los resultados de pruebas de verificación, debido a que solo se le determinaron a las aleaciones escogidas.

4.3.3 Resultados de análisis metalográfico. A las aleaciones fabricadas, se les realizó análisis micro-estructural para determinar las fases presentes con el uso de la técnica SEM y microscopía óptica. Además, se hizo una aproximación de su composición, mediante la técnica EDS.

En la figura 25 a-d, se observa la microestructura correspondiente a la aleación VII (Au-Cu-Si-Ge-In) tomada entre 700X y 2800X. En estas micrografías se aprecia la presencia de una fase primaria (P), eutéctico (E) y una fase precipitada (*p*) la cual posee 18,14 % de silicio. Lo anterior se pudo corroborar mediante SEM como se muestra en la figura 26. Estos resultados están acordes con la gráfica DSC (figura 22 a)) obtenida para esta aleación la cual muestra dos picos exotérmicos, que podrían corresponder a la solidificación de una fase primaria y eutéctico, pico de menor y mayor consumo de energía respectivamente [40].

La fase con alto contenido de silicio, fase precipitada (*p*), se encuentra en los límites de grano, lo cual genera un endurecimiento de la aleación y dependiendo de la composición fragilidad en la misma, como ha sido reportado por algunos investigadores como Greg y Rob [65], quienes investigaron la influencia del silicio en aleaciones de oro de 10, 14 y 18 quilates, encontrando que para las diferentes quilates, el aumento en el contenido de silicio aumenta el tamaño de grano, generando fragilidad, sin embargo mejora el acabado superficial por su efecto desoxidante, aspectos encontrados en las aleaciones fabricadas.

En la figura 27, se muestran los resultados de EDS, para la aleación en estudio, en la cual se determinó la composición de las fases mostradas en la microestructura.

Figura 25. Imágenes de microscopía óptica de la aleación VII.

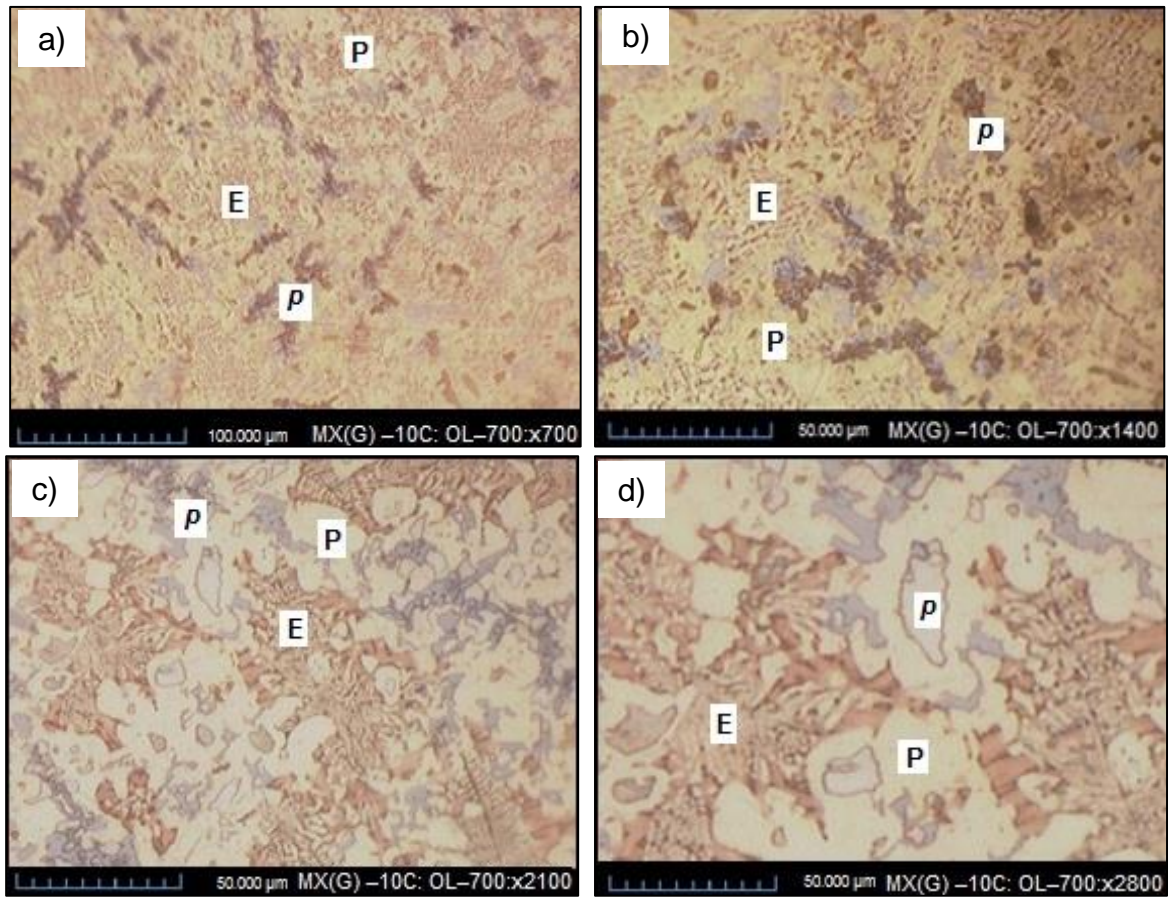


Figura 26. Imágenes de SEM, para la aleación VII.

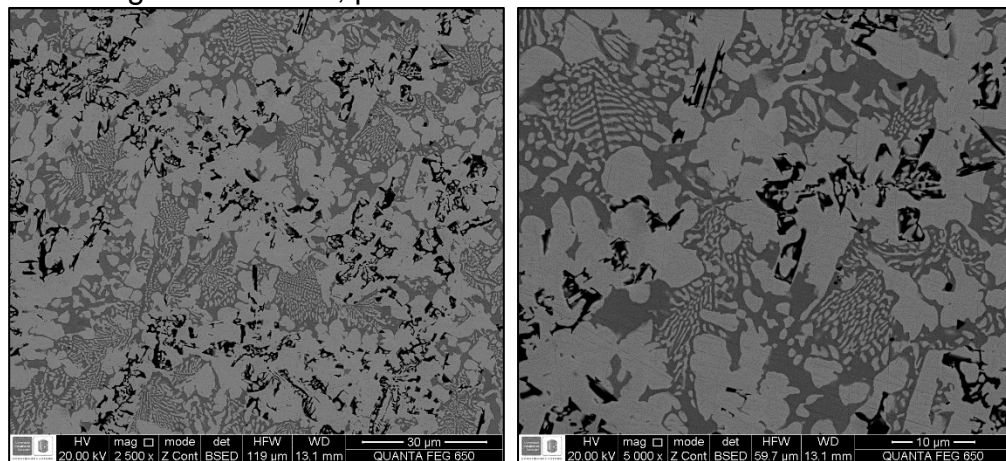
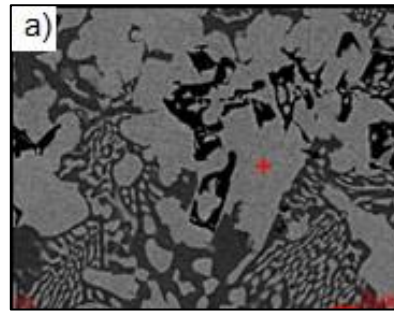
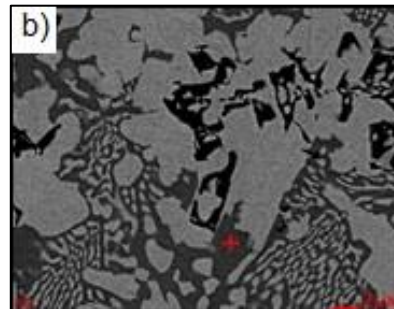


Figura 27. Imágenes de EDS con su composición para la aleación VII.

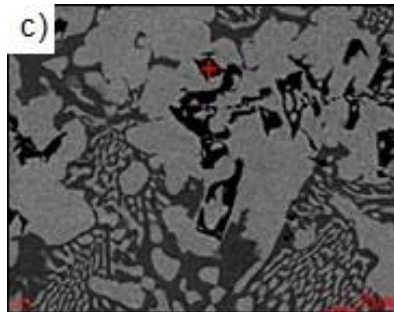
Elemento	Wt%	At%
CK	04.59	30.75
NK	02.16	12.43
OK	01.32	06.66
SiK	01.38	03.95
InL	08.97	06.29
CuK	07.66	09.70
AuL	73.93	30.22
Matriz	Corrección	ZAF



Elemento	Wt%	At%
CK	04.95	29.09
NK	01.53	07.73
OK	01.28	05.67
SiK	04.04	10.16
InL	02.86	01.76
CuK	19.92	22.14
AuL	65.41	23.45
Matriz	corrección	ZAF



Elemento	Wt%	At%
CK	04.47	21.86
NK	01.46	06.12
OK	01.14	04.19
GeL	03.20	02.59
SiK	18.14	37.98
InL	04.70	02.41
CuK	07.79	07.21
AuL	59.10	17.64
Matriz	Corrección	ZAF



En las figuras 28, 29 y 30, se muestran la microestructura y el análisis de EDS de la aleación VIII (Au-Si-Ge-liga-In). Esta aleación multi-componente está constituida principalmente por eutéctico con crecimiento tanto laminar como irregular, estructuras encontradas en investigaciones sobre aleaciones preciosas realizadas por Morando y et al [66]. Adicionalmente, se observa la presencia de un precipitado con alto contenido de silicio, similar al mostrado por la aleación VII.

Figura 28. Imágenes de microscopía óptica de la aleación VIII.

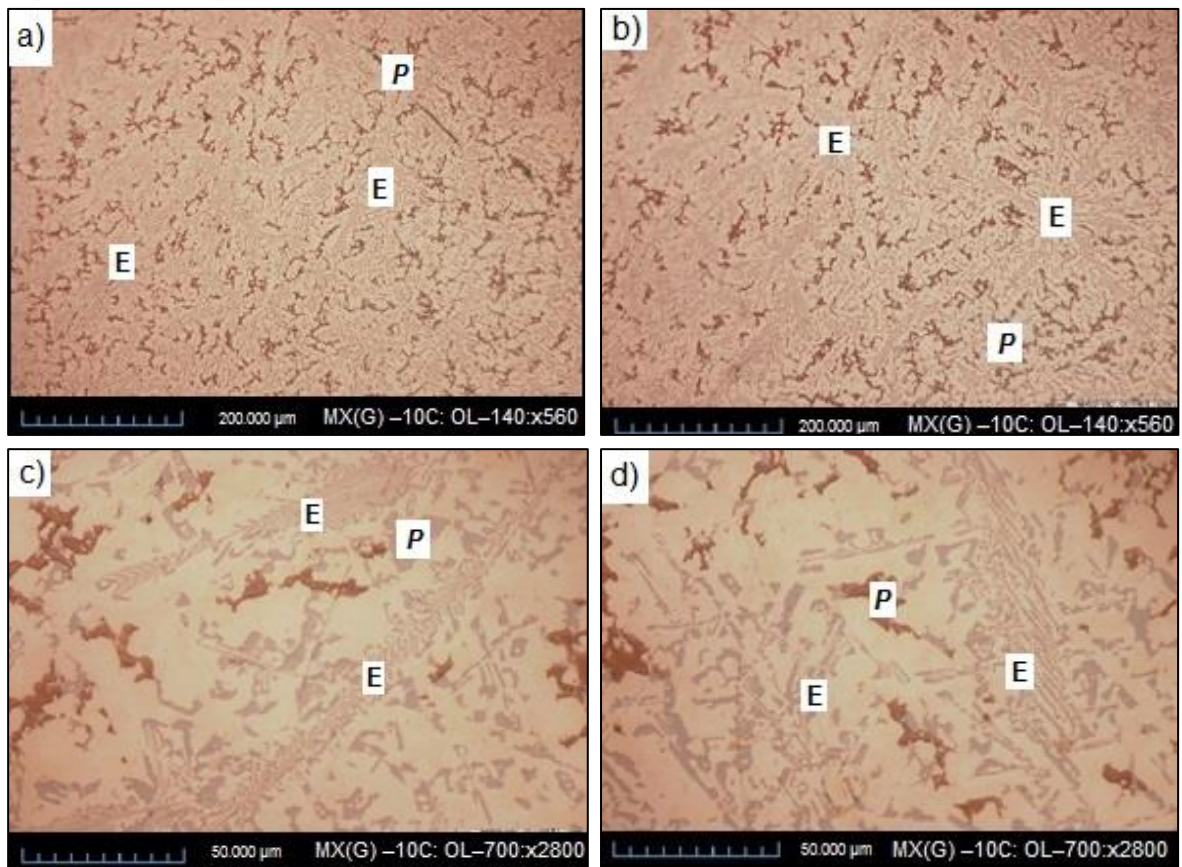


Figura 29. Imágenes de SEM para la aleación VIII.

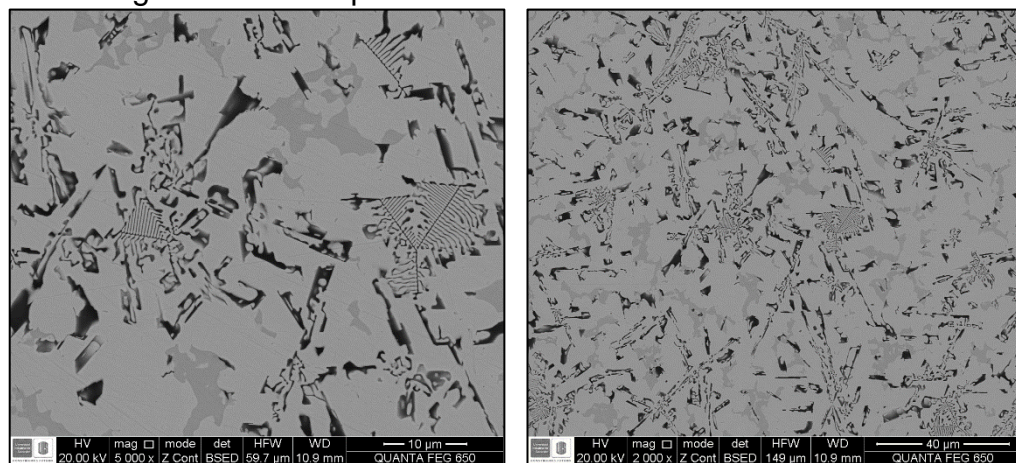
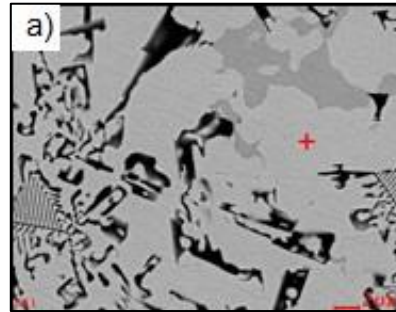
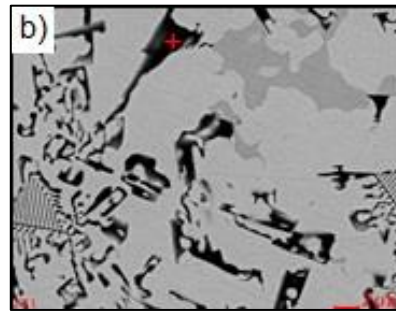


Figura 30. Imágenes EDS con su composición para la aleación VIII.

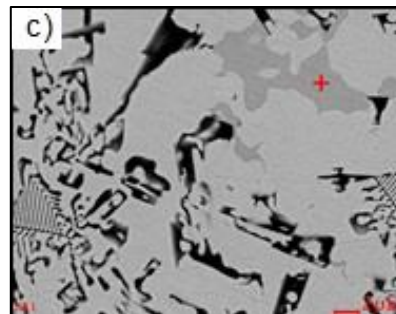
Elemento	Wt%	At%
CK	02.42	20.29
NK	02.20	15.77
SiK	01.59	05.68
AgL	05.71	05.33
InL	09.26	08.11
CuK	04.26	06.75
AuL	74.56	38.07
Matriz	Corrección	ZAF



Elemento	Wt%	At%
CK	02.13	09.49
GeL	05.83	04.30
SiK	35.25	67.20
AgL	02.79	01.39
InL	04.37	02.04
CuK	03.65	03.08
AuL	45.98	12.50
Matriz	Corrección	ZAF

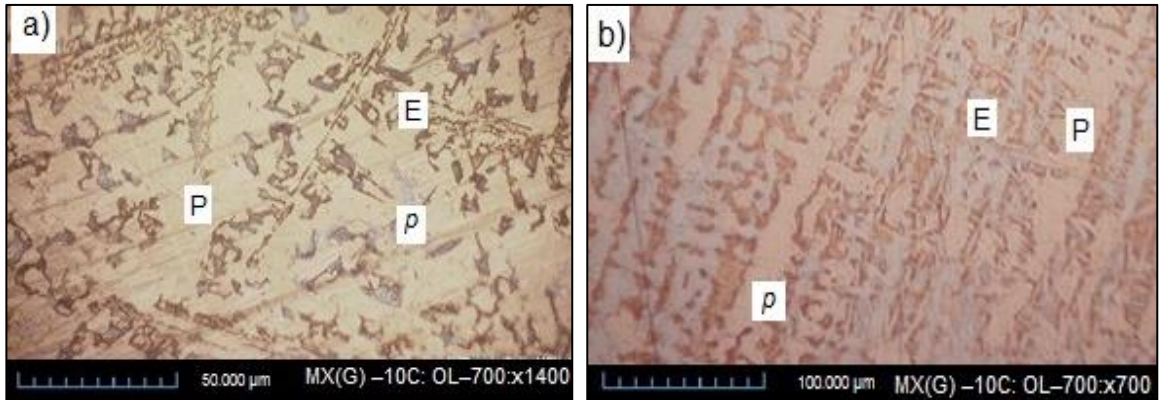


Elemento	Wt%	At%
CK	02.15	16.00
NK	01.83	11.69
SiK	04.14	13.20
AgL	01.03	00.86
InL	02.52	01.96
CuK	16.94	23.86
AuL	71.39	32.44
Matriz	Corrección	ZAF



Las diferentes morfologías presentadas están asociadas a la presencia del gran número de elementos componentes, los cuales podrían formar diferentes eutécticos. Se debe tener en cuenta que tanto el oro, como el cobre y la plata forman eutécticos binarios con el silicio [67], [68] y con el germanio [69], este caso podría presentar en la aleación, dada la morfología de la microestructura.

Figura 31. Imágenes de microscopía óptica para la aleación X.



En las figuras 31, 32 y 33, se muestra la microestructura y el análisis EDS, de la aleación X (Au-Ge-Si-liga). Se observa una fase primaria, eutético más precipitado en pequeñas cantidades. El eutético, presenta un crecimiento irregular, semejante a los encontrados en las investigaciones con Cu-Ge realizada por W. Zhai y et al [69] y Au-Cu-Ge adelantado por Shan Jin y et al [39].

Figura 32. Imágenes de SEM, para la aleación X.

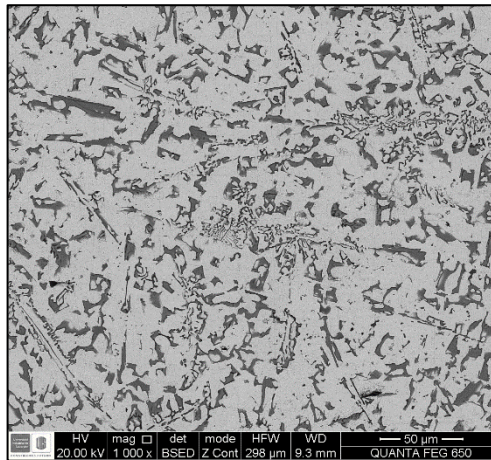
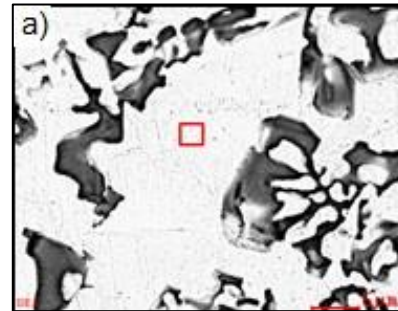
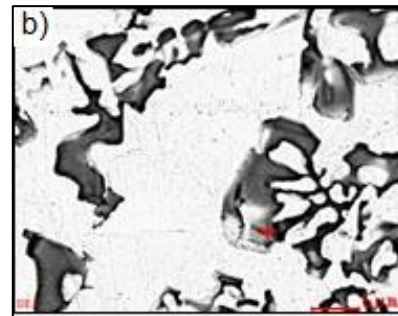


Figura 33. Imágenes EDS con su composición para la aleación X.

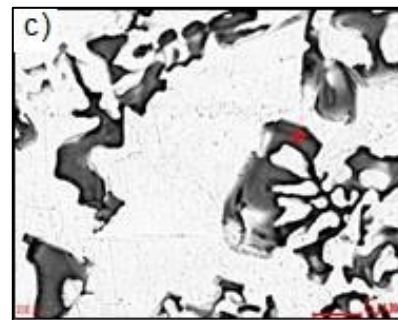
Elemento	Wt%	At%
CK	02.26	17.76
NK	02.40	16.22
OK	00.92	05.42
GeL	08.14	10.60
SiK	00.18	00.62
AgL	06.54	05.72
CuK	05.48	08.14
AuL	74.08	35.53
Matriz	Corrección	ZAF



Elemento	Wt%	At%
CK	01.55	13.15
NK	01.50	10.92
OK	00.62	03.92
SiK	00.53	01.91
AgL	06.86	06.48
CuK	04.46	07.16
AuL	70.10	36.27
GeK	14.39	20.20
Matriz	Corrección	ZAF



Elemento	Wt%	At%
CK	01.84	13.69
NK	01.56	09.95
OK	01.00	05.61
SiK	00.73	02.33
AgL	06.28	05.21
CuK	03.11	04.38
AuL	59.82	27.18
GeK	25.66	31.64
Matriz	Corrección	ZAF



En las figuras 34, 35 y 36, se presentan micrografías de la aleación XIII (Au-Si-liga-In), así como el análisis de EDX. En estas se aprecia fase primaria en pequeña cantidad, acompañada de eutéctico y una fase precipitada de gran tamaño, con bordes rectos, apreciable a bajos aumentos. La fase precipitada se presenta debido a la baja solubilidad del silicio en el oro (2 % atómico), el cual puede variar entre el 1 al 4 % atómico en presencia de Cobre, de acuerdo a estudios realizados por Amir Blazevic y et al [41].

Figura 34. Imágenes de microscopía óptica para la aleación XIII.

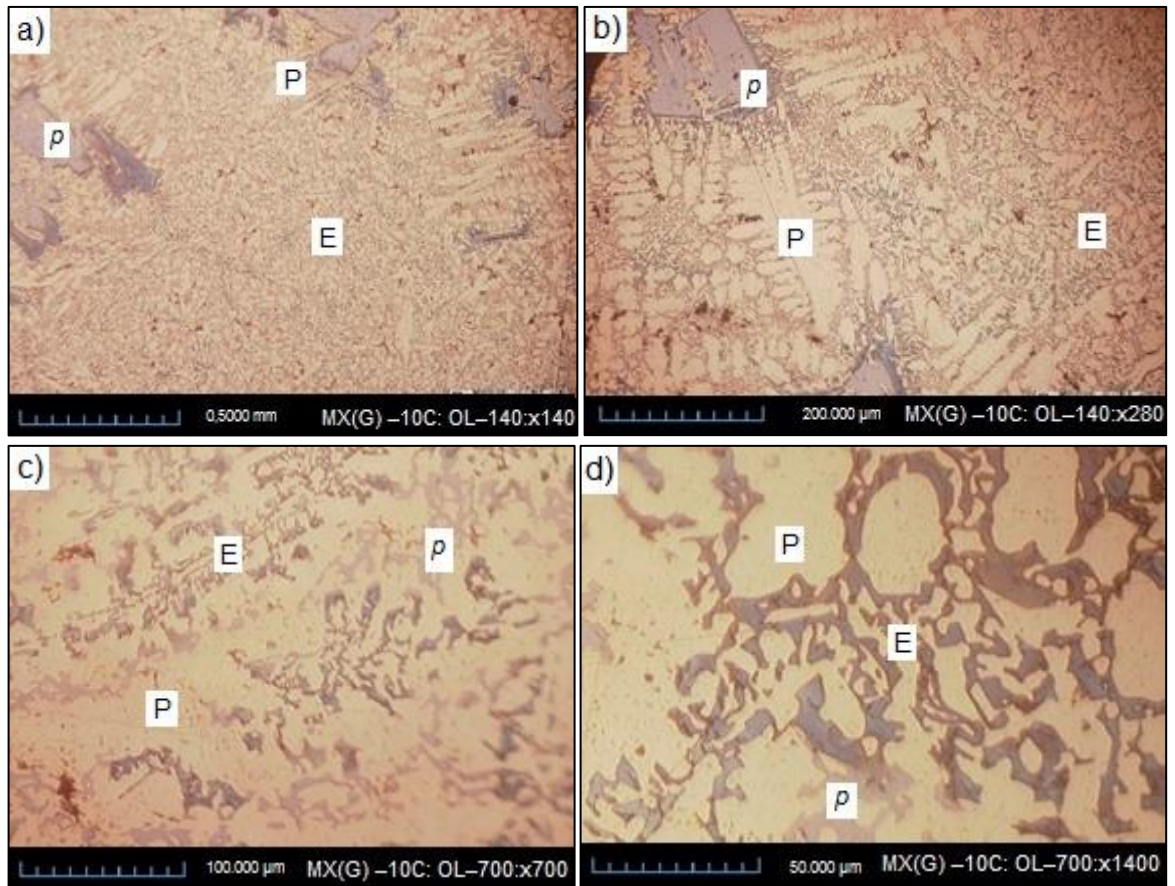


Figura 35. Imágenes de SEM para la aleación XIII.

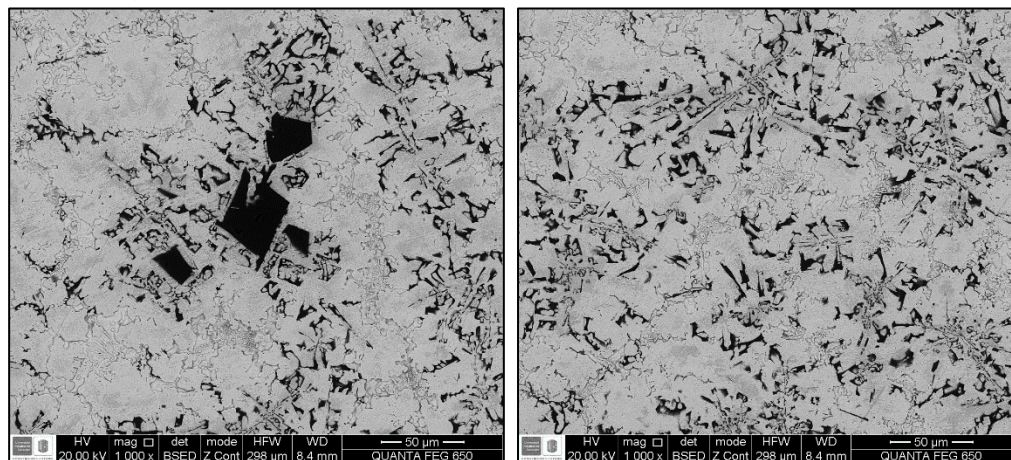
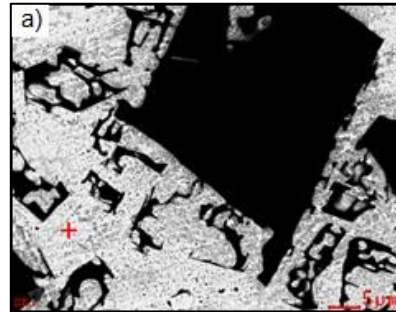
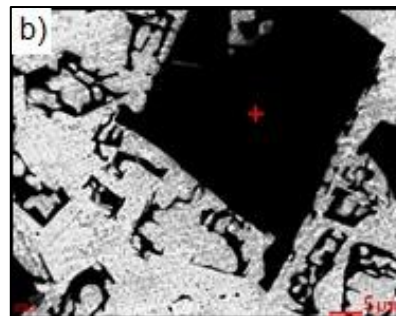


Figura 36. Imágenes EDS con composición para la aleación XIII.

Elemento	Wt%	At%
CK	01.96	17.67
SiK	05.33	20.50
ClK	00.11	00.34
AgL	06.72	06.73
InL	08.42	07.92
CuK	03.78	06.43
AuL	73.68	40.42
Matriz	Corrección	ZAF



Elemento	Wt%	At%
GeL	02.07	01.03
SiK	72.72	93.73
AgL	02.18	00.73
InL	02.12	00.67
AuL	20.91	03.84
Matriz	Corrección	ZAF



Los mismos investigadores reportan la formación de eutécticos ternarios en aleaciones Au-Cu Si, los cuales fueron difíciles de confirmar por no tener una estructura eutéctica definida. Muestras preparadas para estudiar este eutéctico, mostraron patrones de difracción completamente desconocidos, debido a la formación de eutéctico metaestables por enfriamiento rápido, el cual se presenta aún en aleaciones de composición binaria, lo cual hace difícil el análisis de la microestructura en este tipo de muestras.

En las figuras 37, 38 y 39, se presentan la microestructura y el análisis EDS correspondientes a la aleación XV (Au-Ge-liga). En estas se muestran una fase primaria en pequeñas proporciones acompañada de eutéctico y de una fase precipitada rica en germanio, con bordes redondeados, diferentes a los presentados en las fases ricas en silicio, como se aprecia en la aleación XIII.

El eutéctico, presenta un crecimiento irregular, semejante a los encontrados en las investigaciones con Cu-Ge realizada por W. Zhai [69] y colaboradores y Au-Cu-Ge adelantadas por Chan Jin y et al [39].

Figura 37. Imagen de microscopía óptica para la aleación XV.

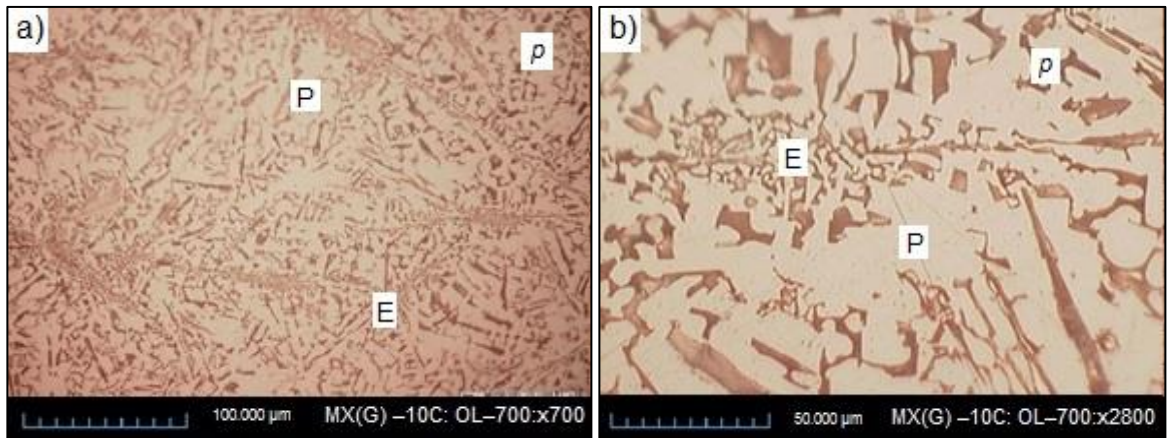
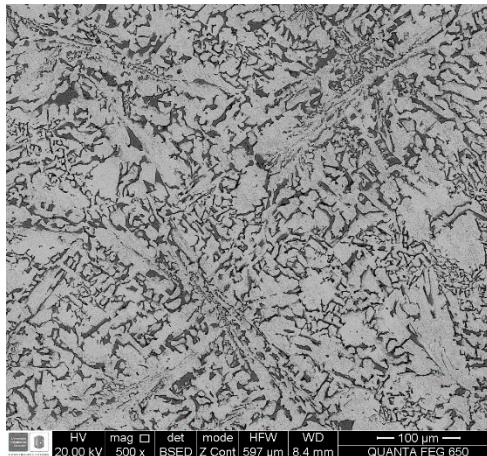


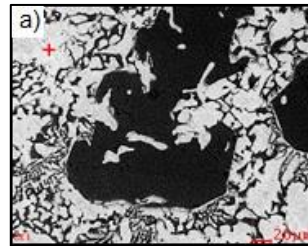
Figura 38. Imágenes de SEM, para la aleación XV.



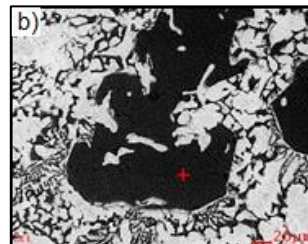
De acuerdo con la información obtenida del análisis metalográfico realizado a las muestras fabricadas y con base en la figura 40, se puede decir que las aleaciones I y II presentan una micro-estructura constituida por una fase primaria rica en oro, con presencia de segregación debida probablemente al proceso de enfriamiento rápido sufrida por la muestra.

Figura 39. Imágenes EDS con composición para la aleación XV.

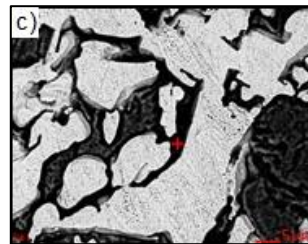
Elemento	Wt%	At%
CK	02.15	23.02
GeL	06.33	11.24
AgL	03.82	04.57
CuK	02.77	05.62
AuL	84.93	55.56
Matriz	Corrección	ZAF



Elemento	Wt%	At%
CK	03.74	20.76
AuM	15.74	05.33
GeK	80.51	73.91
Matriz	Corrección	ZAF



Elemento	Wt%	At%
CK	12.72	49.33
OK	04.73	13.78
CIK	02.42	03.17
AgL	01.45	00.63
AuL	42.96	10.16
GeK	35.72	22.92
Matriz	Corrección	ZAF

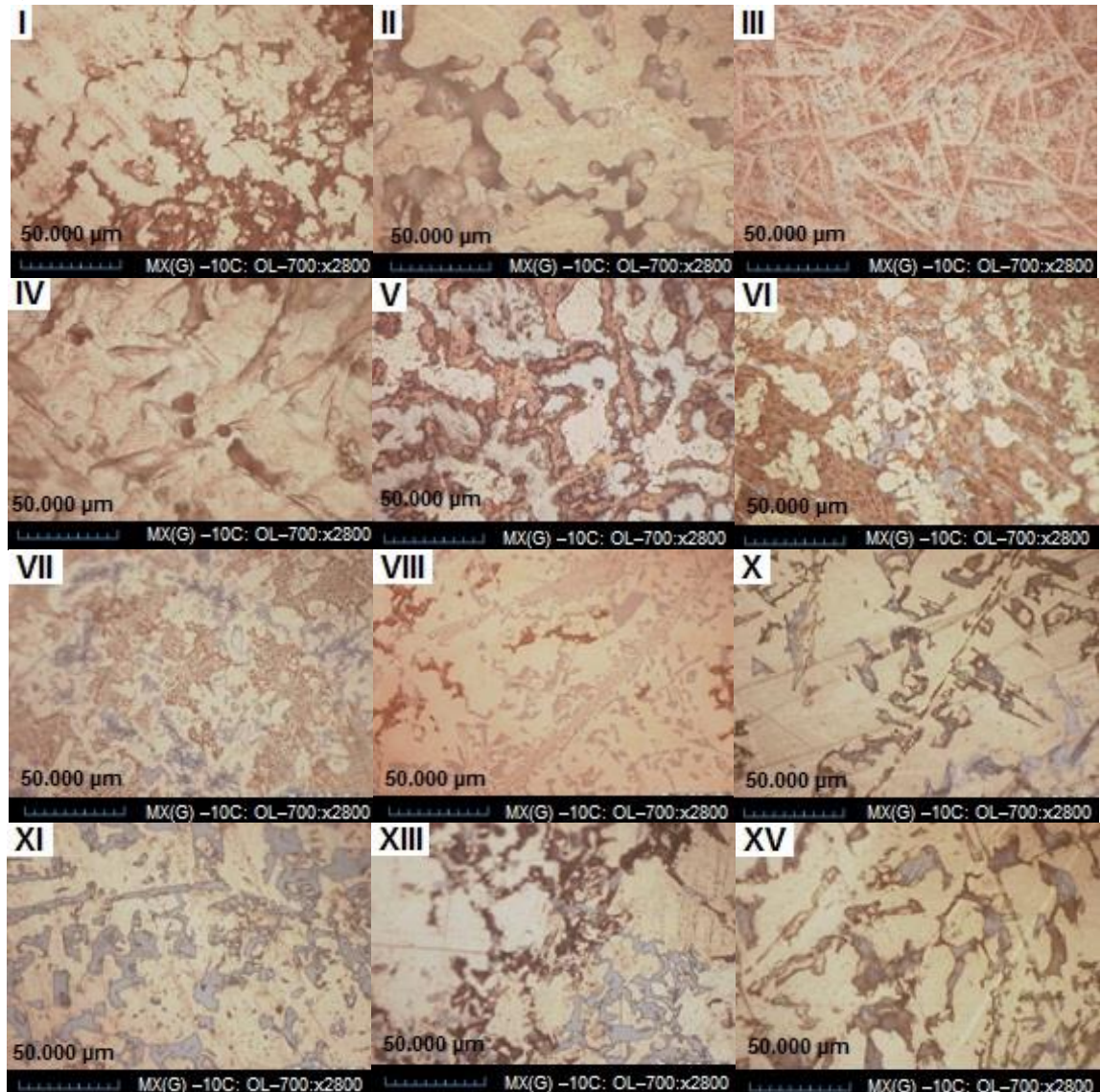


La aleación III, muestra una micro-estructura en forma acicular, posiblemente por la presencia de germanio y a la velocidad de enfriamiento. Para la aleación IV, el uso de liga en su fabricación modificó su estructura presentando una fase primaria y segregación en sitios inter-dendríticos.

Las aleaciones V y VI, presentan una fase primaria rica en oro y presencia de eutéctico, el uso de liga en la aleación VI disminuyó el tamaño de las dendritas y se presenta una fase con alto contenido de silicio.

Las aleaciones VII y VIII, presentan un eutéctico. En la aleación VII la fase primaria se encuentra en pequeñas cantidades, además presentan una fase precipitada rica en oro con 18,14% de silicio, mientras que la aleación VIII muestra una fase rica en oro con contenido de silicio mayor.

Figura 40. Imágenes a 2800X de las aleaciones fabricadas.



Las aleaciones X, XI, XIII y XV, presentan una fase primaria rica en oro acompañada de eutéctico. La aleación X muestra una fase rica en oro con contenido de germanio del 25,66%, mientras que las aleaciones XI y XV tienen una fase rica en germanio con contenidos entre el 51% y 80%, la aleación XIII tiene una fase rica en silicio, con contenido de 72,72% [24].

4.3.4 Resultados de análisis de propiedades mecánicas. A continuación en la Tabla 8, se muestran los resultados promedio de tres valores de micro-dureza medidos para cada una de las muestras en estudio.

Tabla 8. Promedio de micro-dureza para las diferentes aleaciones de estudio

Aleación	Micro-dureza Vickers (HV)	Desviación
I	159	12,4
II	138	3,2,
III	321	5,2
IV	143	8,4
V	340	14,5
VI	280	21
VII	250	5,9
VIII	222	6,6
X	191	5,2
XI	281	18,47
XIII	266	11,5
XV	142	8,2

De la observación de la tabla, se puede apreciar que los valores de micro-dureza oscilan entre 138 HV y 340 HV. De las aleaciones propuestas, la aleación XV tiene el menor valor de dureza, cercano al de las aleaciones comerciales y además posee el mayor contenido de oro. Es importante aclarar que en la medición de la micro-dureza de la aleación XIII, se observó un alto valor en una de las lecturas 380 HV" el cual podría corresponder a la fase precipitada rica en silicio, aspecto que no se evidencia en el valor promedio reportado.

Por otra parte, la aleación V, tiene el mayor valor de dureza asociado probablemente a su contenido de silicio (disuelve un 3% en la fase primaria). La aleación VIII aunque tiene el mayor contenido de silicio, no presenta el mayor valor de dureza debido a que disuelve solo 1,59% en la fase primaria, la cual se encuentra en mayor proporción.

En aleaciones como la IV, VI y VIII, el uso de liga en su fabricación disminuye el valor de la dureza, comparadas con las muestras similares (III, V, VII) preparadas con solo cobre. El aumento en el número de elementos de aleación produce modificaciones en la estructura obtenida en cuanto a la forma y proporción de las fases, así como de la presencia de precipitados.

La investigación mostró un mayor efecto en la dureza por la presencia de silicio que por el germanio. Además se observó poca disolución de germanio en la fase primaria cuando hay presencia de silicio. Los precipitados ricos en germanio produjeron menores valores de dureza que aquellos con alto contenido de silicio.

Por otra parte, Greg y Rob [65] mostraron que la adición de silicio, genera un aumento en la dureza y disminuye su ductilidad, para aleaciones de 10 y 14 quilates sin embargo en aleaciones de 18 ocurrió un efecto contrario, de acuerdo con esto, se esperaría que las aleaciones fabricadas presentaran dureza baja, sin embargo, la presencia de silicio y germanio produjo endurecimiento, debido probablemente a las fases precipitadas encontradas en la mayoría de las muestras [39] y [41].

Además, la homogeneidad, es un tema importante, ya que su ausencia genera segregación y fases inesperadas, suceso ocurrido en las muestras fabricadas. Dieter Ott [59], sobre este tema, menciona la afinidad que deben tener los elementos constituyentes de la aleación para poseer una buena homogeneidad, además asegura que es conveniente generar turbulencia en la fundición, hecho proporcionado por los hornos de inducción.

Con base en el análisis hecho, las aleaciones XI y XIII, no serían aptas para el proceso debido a presencia de una fase con alto contenido de germanio y/o silicio, las cuales poseen alta dureza.

4.3.5 Resultados de análisis de color. En la En cuanto a las coordenadas del color, Las aleaciones de 18 quilates poseen una saturación 4 (a^*) y tono de 28 (b^*) [70], valores encontrados en las aleaciones comerciales. Adicional, el contenido de cobre genera una variación en el tono, Además el aumento en la saturación, tiende al color del oro puro cuyas coordenadas son L^* 84, a^* 4,8 y b^* 34,4, como se encuentra reportado por G. Raykhtsaum [71].

Los elementos de aleación utilizados en la investigación, silicio, germanio e indio, son blanqueadores del oro, al igual que la plata [70], por tanto algunas aleaciones fabricadas tienden al color blanco y aquellas que presentan un color amarillo no es tan marcado como el oro comercial de 18 quilates.

4.3.6 Tabla 9 se encuentran los resultados de las diferentes mediciones llevadas a cabo. El valor YI determinado mediante la ecuación 6, indica el índice de amarillamiento para cada una de las aleaciones.

$$YI = \frac{100(1.28a^* - 1.06b^*)}{L} \quad (6)$$

En cuanto a las coordenadas del color, Las aleaciones de 18 quilates poseen una saturación 4 (a^*) y tono de 28 (b^*) [70], valores encontrados en las aleaciones

comerciales. Adicional, el contenido de cobre genera una variación en el tono, Además el aumento en la saturación, tiende al color del oro puro cuyas coordenadas son $L^* 84$, $a^* 4,8$ y $b^* 34,4$, como se encuentra reportado por G. Raykhtsaum [71].

Los elementos de aleación utilizados en la investigación, silicio, germanio e indio, son blanqueadores del oro, al igual que la plata [70], por tanto algunas aleaciones fabricadas tienden al color blanco y aquellas que presentan un color amarillo no es tan marcado como el oro comercial de 18 quilates.

Tabla 9. Resultados obtenidos de los índices CIELAB para las diferentes aleaciones

Aleación	Índice CIELAB			YI	Color
	L^*	a^*	b^*		
I	78,40	5,33	28,32	-29,59	Amarillo
II	79,19	4,65	26,73	-28,26	Amarillo
III	69,50	8,36	26,73	-25,37	Rosado
IV	78,17	2,52	20,14	-23,18	Rosada
V	64,13	3,01	13,25	-15,89	Blanca
VI	73,37	1,66	19,55	-25,34	Blanca
VII	66,98	1,43	14,93	-20,89	Blanca
VIII	64,90	0,48	16,27	-25,62	Blanca
X	75,80	1,31	16,85	-21,35	Amarilla
XI	77,79	3,62	20,43	-21,88	Amarilla pálido
XIII	74,58	-0,26	17	-24,60	Amarilla pálido
XV	78,94	1,4	21,67	-28,26	Amarilla

L^* = Claridad (L^+ : claro, L^- : oscuro).

a^* = Saturación (a^+ tendencia al rojo, a^- tendencia al verde).

b^* = Tono (b^+ tendencial al amarillo, b^- tendencial al azul).

De las aleaciones con temperatura de fusión menor a 500°C , cuyos índices se aproximan más a las comerciales, son las aleaciones X, XI, y XV “lo cual fue corroborado con la inspección visual”.

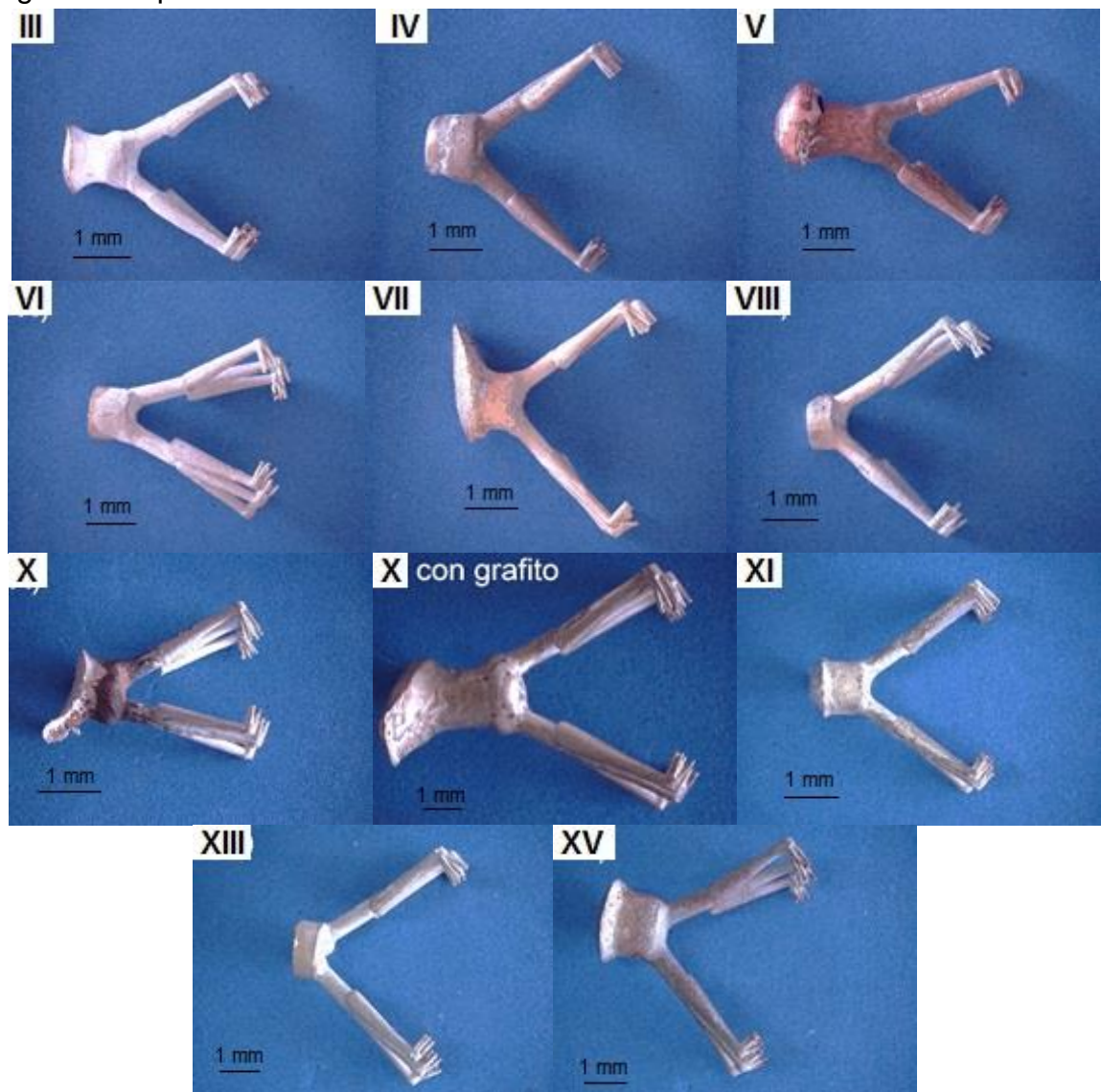
4.3.7 Capacidad de llenado. Los resultados obtenidos de esta prueba se muestran en la figura 41, en la cual todas las aleaciones presentan un llenado completo, sin embargo, se debe tener en cuenta que para corroborar estos resultados son importantes las simulaciones de las aleaciones que finalmente se escojan.

Se destaca que el cambio de oro por cobre produjo modificación en el color de las aleaciones obtenidas, mostrando tendencia marcada al color rosado en el caso de

la aleación V, debido a su alto contenido de cobre (cercano al 90%). De igual manera se acentuó el color amarillo en las aleaciones VI y VII.

Se observó además, cierta reacción del revestimiento con la aleación produciéndose una capa ligeramente blanca, lo cual puede atribuirse a la temperatura de colada (alrededor de los 600° C). Adicional a lo anterior, se observó una capa de óxido en algunas aleaciones como es el caso de las muestras IV, V y XV, y en algunos casos se apreció residuos de cera (capa oscura), como en la muestra X.

Figura 41. Aproximación del llenado de las aleaciones.



Con el fin de evitar la reacción superficial de la aleación X con el revestimiento, se le aplicó una capa de grafito en polvo, obteniéndose un mejor resultado. Sin embargo, se generó rugosidad superficial asociada con el material en polvo utilizado.

De acuerdo con los resultados obtenidos con el análisis de caracterización de las aleaciones se decidió, inicialmente, probar las aleaciones V, VI, VII, VIII, X y XV, para realizar algunas pruebas de verificación.

4.4 RESULTADO DE LAS PRUEBAS DE VERIFICACIÓN

En esta etapa, se verificó llenado de las aleaciones, se realizaron las simulaciones en el software SOLIDCAST, se realizó la prueba de colabilidad y se hicieron las coladas finales empleando esmeraldas colombianas pre-engastadas.

4.4.1 Resultados de la prueba de llenado con aleaciones base oro. Se realizó la prueba de llenado a las aleaciones V, VI, VII, VIII, X y XV. Se excluyeron las muestras I y II correspondientes a las comerciales, la III y IV por tener puntos de fusión mayores a 500° C y la XI y XIII por su microestructura, pues presentan fases ricas en germanio y/o silicio. Se decidió incluir la muestra XV debido a su baja dureza y sus características físicas.

Figura 42. Prueba de llenado con las aleaciones preciosas.



En la figura 42, se presentan fotografías de las muestras obtenidas, donde se verificó 100% de llenado con las aleaciones preciosas probadas, resultados esperados de acuerdo a investigaciones realizados por Greg y Rob [65], donde reporta la mejora en el llenado por la presencia de silicio en aleaciones de oro de diferentes quilates, así como Diter Ott [59], menciona el buen llenado generado por la presencia de cinc.

Los resultados obtenidos mostraron que las piezas fundidas no reaccionaron con el revestimiento, tampoco se vio la presencia de óxido en la superficie, por la presencia de atmósfera neutra [59], caso contrario a lo ocurrido en las pruebas realizadas con cobre.

La aleación V aunque presentó un llenado total, en la etapa de limpieza ocurrió ruptura del engaste en forma de chatón, asociado a su alta dureza, generando fragilidad, dada la presencia de silicio [65]. Por lo tanto, se descartó para su uso en las demás pruebas.

La aleación VI presentó gran rugosidad y la XV agrietamiento superficial en algunas zonas, lo cual está acorde con la presencia de una fase rica en germanio (alrededor del 80%). Las aleaciones VII, VIII y X presentaron los mejores acabados superficiales y color amarillo, se escogió este color debido a su uso frecuente con engaste de esmeraldas, por lo tanto fueron pre-seleccionadas para hacer simulaciones con el software SOLIDCAST.

4.4.2 Resultados de las simulaciones en el software SOLIDCAST. Con los resultados obtenidos de la caracterización y las pruebas de llenado mencionadas anteriormente, se seleccionaron las aleaciones VII, VIII y X, para realizar las simulaciones del proceso de solidificación en el software SOLIDCAST.

Para la realización de las simulaciones fue necesario utilizar los parámetros termo-físicos solicitados por el software, los cuales se muestran en la tabla 11.

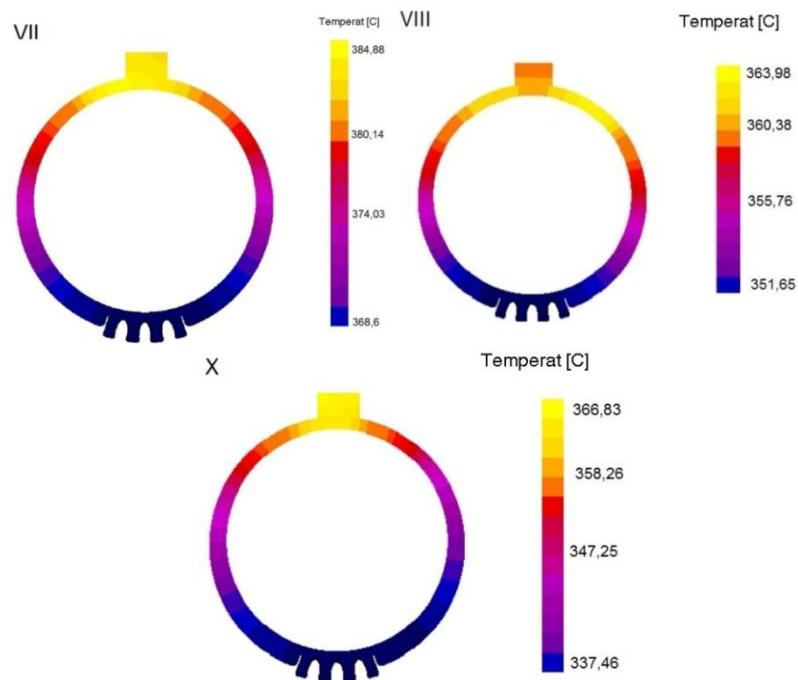
Tabla 10. Parámetros termo-físicos de las aleaciones VII, VIII y X

Aleación	Conductividad térmica W/m- K	Calor específico J/Kg-k	Densidad Kg/m ³	Temperatura inicial °C	Temperatura solidificación °C
VII		363,98	15438	417	367
VIII	308,2	253,63	14528	470	385
X		544,15	15326	373	349

En la figura 43, se muestran los resultados de la simulación de las aleaciones seleccionadas. En ella se indican la imagen del anillo junto con la respectiva escala de temperaturas diferenciadas por colores. En la imagen se observa la zona de temperatura más baja (zona de color azul), la cual coincide con el lugar donde se encontrarían las esmeraldas pre-engastadas. Además se puede observar el proceso de llenado visualizando las diferentes temperaturas que maneja la pieza de acuerdo a propiedades de la aleación, el ataque está acorde dado a que no se muestran zonas sin metal fundido las cuales generan porosidad, sin embargo, posibles reacciones formadas por un molde muy caliente no se pueden predecir en la simulación como lo menciona el investigador Ulrich [72].

De acuerdo con los resultados de las simulaciones se pudo observar que las temperaturas en el punto de interacción con la gema oscilan entre $368,6^{\circ}\text{C}$ y $337,46^{\circ}\text{C}$. La aleación X posee la temperatura más baja, lo cual permite seleccionarla para realizar las pruebas con las gemas engastadas y el ensayo de colabilidad.

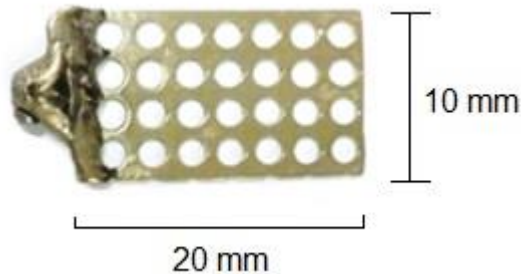
Figura 43. Resultados de simulación de solidificación de la aleación VII, VIII y X.



4.4.3 Resultados de colabilidad de la aleación seleccionada. Empleando la aleación X, se llevó a cabo la prueba de colabilidad utilizando la malla indicada anteriormente. Los resultados mostraron 100% de llenado, (ver figura 44) situación

esperada dados los reportes de las diferentes investigaciones realizadas con aleaciones que poseen silicio [65], germanio [39] y la presencia de cinc [59].

Figura 44. Resultado de la prueba de colabilidad.



4.4.4 Resultados de la colada de las piezas de joyería. En la figura 44, se presentan fotografías de la pieza de joyería fabricada con la aleación X. Se obtuvo un anillo en oro amarillo de 18 quilates con las tres esmeraldas utilizadas. Fue fácil la remoción del revestimiento y el pulido de la pieza.

Se observó daño en las características físicas de las esmeraldas, hubo pérdida de brillo y cambio en su color. Lo anterior, se presentó debido a un área de contacto grande entre la gema y el metal fundido. Los daños ocasionados se encuentran asociados al diseño del anillo y la forma como se llevó a cabo el engaste, lo cual se pudo corroborar al extraer una de las gemas. En la figura 45-b se puede observar la zona del engaste.

Figura 45. Resultados de la colada final anillo 1



Para el anillo 2, se modificó la forma de engaste, con el fin de reducir el contacto de la gema con el metal fundido, ver figura 46-a. Se obtuvo como resultado la gema envuelta en el chatón sin daño en sus bordes pese al contacto directo con el metal. Sin embargo, presentó un ligero daño en el culet (cono de terminación) de la gema, debido a que la esmeralda se desplazó de su posición inicial, lo cual generó contacto directo con uno de los lados de sujeción, como muestra la figura 23b.

Figura 46. Resultados de la colada final anillo 2



5. CONCLUSIONES

En el proceso de fabricación una aleación preciosa de bajo punto de fusión, es necesario partir de materias primas de alta pureza para garantizar su composición. Además, se debe pre-alejar con el fin de disminuir la temperatura de colada y evitar la pérdida de elementos por volatilización. En cuanto al tipo de horno, debe ser preferiblemente de inducción con dispositivo para realizar la colada mediante la técnica de cera perdida y es recomendable que posea atmósfera controlada y usar crisoles de grafito (con capacidad acorde a la cantidad de muestra a fundir).

Cuando se utilizan esmeraldas colombianas en la técnica de micro-fundición con pre-engaste, estas deben ser de tipo I, bajo nivel de inclusiones, (de acuerdo a la clasificación realizada por la GIA), se debe aplicar al molde un tratamiento térmico que no supere los 300° C y usar aleaciones preciosas con temperaturas de colada menores a 500° C, con el objetivo de disminuir el choque térmico entre la gema-aleación-molde y preservar las propiedades y características de las esmeraldas.

La investigación permitió corroborar que es posible obtener aleaciones de bajo punto de fusión debido a la presencia de eutéctico, en este sentido el uso de diagramas de equilibrio de fases contribuyó a definir con mayor certeza las composiciones de trabajo y así poder optimizar los recursos asignados debido al costo elevado de las materias primas.

El uso de liga en la fabricación de la aleación, ayuda a mejorar las propiedades mecánicas, disminuyendo su dureza y da fluidez a la mezcla por la presencia de zinc, características que no se logran con la adición de solo cobre. Sin embargo, el uso de esta aleación multi-componente, hace compleja la microestructura obtenida generando la precipitación de fases de alta dureza, como se pudo corroborar en el análisis de la micro-estructura.

Las técnicas de caracterización físicas, mecánicas, metalúrgicas, térmicas y químicas empleadas en la investigación fueron fundamentales para identificar características y propiedades de las aleaciones fabricadas, sin embargo, no son suficientes para garantizar su aplicación y es necesario complementarlas con otras de tipo termodinámico y químico entre otros, a partir de las cuales se podrían hacer los ajustes necesarios para su correcta implementación en la industria de la joyería.

A partir de las pruebas de verificación, se obtuvo dos piezas de joyería en oro amarillo con esmeraldas pre-engastadas, en las cuales se presentó llenado del 100%, empleando una de las aleaciones estudiadas, con temperatura de fusión de 390° C, lo cual permite concluir que es posible fabricar aleaciones base oro de 18 quilates con temperaturas de fusión menor a 500° C.

6. RECOMENDACIONES

El trabajo realizado constituye un primer paso en la investigación de las aleaciones preciosas de bajo punto de fusión aplicadas a la industria de la joyería y es necesario continuar con esta línea realizando ajustes en las composiciones químicas, con el fin de mejorar sus propiedades, de manera que permitan su correcta implementación.

Es conveniente profundizar en la caracterización de estas aleaciones incluyendo otras técnicas, con el fin de determinar las propiedades que no se plantearon en esta investigación.

Se recomienda realizar un estudio con el fin de determinar el diseño más adecuado para la aplicación de la técnica de micro-fundición con pre-engaste de esmeraldas colombianas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ADLER, Steven. The Revolution of CAD/CAM in the Casting of Fine Jewelry. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. May 2005, pp. 1 – 27.
- [2] Group Legor, Vicenza (Italy). You're Jewelry Technology Provider [Visto junio de 2015]. Disponible en: <www.legor.com>.
- [3] AFEMO (Associazione Fabricanti Ed EsportatotiMachinari per Oreficeria) [visto Julio 2015]. Disponible en <<http://www.afemo.it/lang1/melt-italiana.html>>.
- [4] UNITED. Precious Metal Refining, Inc. [Visto Julio 2015] Disponible en www.unitedpmr.com.
- [5] SCOTT, Phillip. Taking the Mystery Out of Casting Stone in Place. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Symposium on Jewelry Manufacturing Technology, 2004, pp. 110.
- [6] SCOTT, Patrick. Cad Software for Jewelry Design: A Comprehensive Survey. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 2005, pp. 409 – 422.
- [7] GRANDE, Marco, PORTA, Lorenzo y TIBERTO Darío. Computer simulation of the Investment Casting Process: Widening of the Filling Step. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 2007, pp. 1 – 17.
- [8] DESAI, K. Innovative Lost Wax Investment Casting. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 2005, pp. 193 – 214.
- [9] CORTI, Christopher. Basic Metallurgy of the Precious Metals. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 2007, pp. 77 – 108.
- [10] SCHUSTER, Hubert y BOLZONELLA, Alberto. The Preparation of the master mold- The Key Point of Stone-In-Place Casting. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 2005, pp. 399 – 408.

- [11] ASKELAND, Donald y PHULÉ Pradeep. Propiedades Térmicas de Los Materiales. En: Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 4 ed. México D.F: Cengage Learning, 2009, pp. 930. ISBN-13: 978-970-686-361-4.
- [12] TOLOSA, Yuly y VALDERRAMA, Asbleidy. Estudio de las Variables que Regulan el Tratamiento Térmico del Yeso y su Adaptación al Método de Pre-engaste de las Esmeraldas Colombianas. Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 2012, 1 – 70 p.
- [13] ZHANG, W. y et al. A. New Au-based bulk glassy alloys with ultralow glass transition temperature. Elsevier [online]. 2009, Vol. 61, no 7 [citado 10 febrero 2016], pp. 744 – 747. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646209004205>>.
- [14] WANGA, W.; DONG, C. & SHEK, H. Bulk Metallic Glasses. Elsevier [online], 2004, Vol. 44, no 2 – 3, pp. 45 – 89. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X04000300>>.
- [15] SCOTT, Patrick. Cad Software for Jewelry Design: A Comprehensive Survey. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 2005, pp. 409 – 422.
- [16] DAZA, Juan. Estudio de las variables determinantes en la tolerancia de las esmeraldas colombianas al método de gemas pre-engastadas para el proceso de micro-fundición. Trabajo de investigación Magister en Ingeniería de Materiales. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 1 – 103 p.
- [17] LOEWEN, Roland. Gems made by man. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 1996, pp. 407 – 451.
- [18] BERNARDIN, John. Understanding Micro alloys. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing. 2005, pp. 53 – 61.
- [19] CORTI Christopher. What is a White Gold? Progress on Issues! Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 2005, pp. 103 – 158.
- [20] TOBON, Julian y et al. Fabricación y caracterización de la aleación Au-Si en composiciones próximas al eutéctico. Revista Colombiana de Materiales [online], 2012, no 2, pp. 1 – 10. Disponible en internet:

<<http://aprendeonline.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/article/view/11282/10326>>.

- [21] GUSMANO, G.; y et al. Influence of Si, Ni and Co addition on gold alloy for investment cast. Elsevier [online], 2001 Vol. 325, no 1-2, pp. 252 – 258. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838801012750>>.
- [22] SHUSTER A. The preparation of master mold. The key point of stone-in-place casting. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. May 2005, pp. 399 – 408.
- [23] GARCIA, Mónica. Evaluación cromática y microestructural de una aleación de oro blanco al Mn en estado fundido y tratado térmicamente. Trabajo de investigación Magister en Ingeniería Metalúrgica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 1 – 151 p.
- [24] JACOBSON, M., SANGHA, S. A low melting point solder for 22 carat yellow gold. London, England. Gold Bulletin. July 1996, pp. 7 – 10.
- [25] DABALÁ, M., MAGRINI, M., POLIERO M., GALVANI, R. Production and characterization of 18 carat white gold alloys conforming to European Directive 94/27 CE. London, England. Gold Technology. April 1999, pp. 29 – 31.
- [26] BHATIA, V., KEALLEY, C., WUHRER, R., WALLWORK, K., CORTIE M. Ternary β and γ phases in the Al-Au-Cu system at 750° C. ELSEVIER, 2009, pp. 100 – 107.
- [27] NISHIO A. Gold alloy data, 21 carat, red Au 875 – Cu 125. London, England. Gold Technology. July 1996, pp. 23 – 26.
- [28] NISHIO A. Gold alloy data, 21 carat, pink Au 875 – Cu 107,5 – Ag 17,5. London, England. Gold Technology. July 1996, pp. 19 – 22.
- [29] NISHIO A. Gold alloy data, 21 carat, yellow-pink Au 875 – Ag 45 – Cu 80. London, England. Gold Technology. July 1996, pp. 15 – 18.
- [30] CHUDNENKO, K., PAL'YANOVA, G. Thermodynamic properties of solid solution in the Ag-Au-Cu system. Elsevier [online], 2014 Vol. 55, no. 3, pp. 349 – 360. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068797114000273>>.

- [31] TAIMSALU P. Gold alloy data, Au 917 – Ag 55 – Cu 28. London, England. Gold Technology. January 1990, pp. 6 – 9.
- [32] TAIMSALU P. Gold alloy data, Au 750 – Ag 125 – Cu 125. London, England. Gold Technology. January 1990, pp. 9 – 13.
- [33] TAIMSALU P. Gold alloy data, Au 585 – Ag 300 – Cu 115. London, England. Gold Technology. January 1990, pp. 14 – 18.
- [34] MAIER, A., TKALCEC, I., MARI, D., SCHALLER, R. New In-Pd mechanical loss peak in the ternary gold alloys. Elsevier [online], 2013 Vol. 61, no. 16, pp. 6107 – 6113. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645413004977>>.
- [35] SANGHA, S., HARRISON, M., JACOBSON, D. New low temperature high carat gold solders and their applications. London, England. Gold Technology. July 1996, pp. 7 – 10.
- [36] FACCENDA, V. Handbook on finishing in gold jewellery manufacture. Mila, Italy. World Gold Council. 1999, pp.52.
- [37] OTT, D. Development of 21carat Cadmium-free gold solders. London, England. Gold Technology. July 1996, pp. 2 – 6.
- [38] RAPSON W. The metallurgy of the carat gold alloys. London, England. Gold Technology. May 1991, pp. 1 – 14.
- [39] JIN, Shan; DUARTE, Liliana y LEINENBACH, Christian. Experimental study and thermodynamic description of Au-Cu-Ge system. Elsevier [online], 2014 Vol. 588, no. 5, pp. 7 – 16. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838813027849>>.
- [40] CHIDAMBARAM, Vivek; HALD John y HATTEL Jesper. Development of Au-Ge based candidate alloys as an alternative to high-lead content solders. Elsevier [online], 2010 Vol. 490, no. 1 – 2, pp. 170 – 179. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838809020842>>.
- [41] BLAZEVIC, Amir; EFFENBERGERB, Herta y RICHTER, Klaus. Phase equilibria in the system Au-Cu-Si and structural characterization of the new compound $Au_{5\pm x}Cu_{2\pm x}Si$. Elsevier [online], 2014 Vol. 46, pp. 190 – 198. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966979513003166>>.

- [42]QUINTERO, Omar. Principios de tecnología de fundición. EQUINOCCIO. Caracas, Venezuela, 2009.
- [43]AXINTE, E. Metallic glasses from “alchemy” to pure science: Present and future of design, processing and applications of glassy metals. Elsevier [online], 2012 Vol.35, pp. 518 – 556. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911006510>>.
- [44]WANG. Op. cit, p. 60.
- [45]LAWS, Kevin; SHAMLAYEA Karl y FERRY Michael. Synthesis of Ag based Bulk Metallic Glass in the Ag-Mg-Ca [Cu] alloys system. Elsevier [online], 2012 Vol. 513, no. 5, pp. 10 – 13. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838811020664>>.
- [46]SCHROERS, Jan y et al. Precious Bulk Metallic Glasses for Jewelry Applications. Elsevier [online], 2007 Vol. 449 – 451, pp. 235 – 238. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509306013190>>.
- [47]LOHWANGWATANA Boonrat y et al. Liquid metal-Hard 18K and 850 Pt Alloys that can be processed like Plastics or Blown like Glass. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2007, pp. 289 – 304.
- [48]DUBOIS, Patrick y et al. Temperatura measurements in mold cavities during vacuum-assisted, static pouring of 14 yellow gold. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2007, pp. 131 – 156.
- [49]ZHAI, W., and others. A calorimetric study of thermodynamic properties for binary Cu-Ge Alloys. Elsevier [online], 2012 Vol. 535, pp. 70 – 77. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838812007554>>.
- [50]AKHMETOVA, A. M., and others. Experimental investigations of the Ag-Cu-Ge-system. Elsevier [online], 2015 Vol. 630, pp. 84 – 83. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838815000729>>.
- [51]FERNÁNDEZ, Mayerly; ORTIZ, Luz y ALONSO, Arnaldo. Procesos de obtención y evaluación de aleaciones preciosas base oro usadas en joyería. USBmed. Julio 2015 Vol. 6, no 2, pp. 15-25. Disponible en internet: <<http://revistas.usb.edu.co/index.php/IngUSBmed/article/view/1727/1500>>.

- [52]CORTI, Christopher. Basic Metallurgy of the Precious Metals. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Santa Fe Symposium, 2007, pp. 77-108.
- [53]HOSTÝNEK, J. Gold: An Allergen of Growing Significance. Elsevier [online], 1997 Vol. 35, no. 8, pp. 839-844. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278691597000586>>.
- [54]WRIGHT, J. Technical manual for gold jewellery. Milan, Italy. World Gold Council. 1998, pp. 2.3.
- [55]SOINILA, E., y et al. Bulk metallic glass tube casting. Elsevier [online], 2011 Vol. 509, pp. S210-S213. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838810031373>>.
- [56]LOUZGUINE, Dimitri, y et al. Comparative analysis of glass-formation in binary, ternary, and multicomponent alloys. Journal of applied physics [online], 2010, no 108, pp. 103511-1 – 103511-8. Disponible en internet: <<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/108/10/10.1063/1.3506687>>.
- [57]CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY. Au-base bulk solidifying amorphous alloys. Inventores: J. Schroers y A. Peker U. KLOTZ y M. EISENBART. Fecha de solicitud: 17, octubre, 2005. Estados Unidos, patente de investigación, ESWO2006045106 A1. 27, abril, 2006.
- [58]JOSTENS, INC. Silver alloy. Inventores: T. Cleabert. Fecha de solicitud: 30, agosto, 2012. Estados Unidos, patente de investigación, US 20140065011 A1. 6, marzo, 2014.
- [59]DIETER, Ott. Metallurgical and chemical factors influencing working conditions. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Santa Fe Symposium, 2000, pp. 227 – 250.
- [60]AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Melting And Crystallization Temperatures By Thermal Analysis. ASTM E 794 – 06*. Pensilvania, Estados Unidos: ASTM, 2012. 1 – 4 p.
- [61]KOROJY B., y FREDRIKSSON H. On solidification of hypereutectic Al-Si alloys. Transactions of The Indian Institute of Metals, 2009 Vol. 62, no 4 – 5, pp. 361 – 365. Disponible en internet: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s12666-009-0066-1>>.
- [62]CORTI, Christopher. Property measurement: what use is it to jewelers?. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Santa Fe Symposium, 2012, pp. 145-165.

- [63] MERINO, María. Diagramas y transformaciones de fase. Métodos experimentales para la determinación de diagramas de equilibrio. Reduca [online], 2012, pp. 364 – 381, ISSN: 1989 – 5003. Disponible en internet: <<http://www.revistareduca.es/index.php/reduca/article/viewFile/944/961>>.
- [64] CHOI, S.; CHO, H y KUMAI, S. Influence of precipitation on the coefficient of thermal expansion of Al-Si-Mg-Cu-(Ti) alloys. Elsevier [online], 2016 Vol. 655, pp. 6 – 10. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838815311841>>.
- [65] NORMANDEAU, Greg y ROETERINK, Rob. The optimisation of silicon alloying additions in carat gold casting alloys. . London, England. Gold Bulletin. 1996, pp. 4 – 15.
- [66] MORANDO, C.; GARBELLINI, O., y PALACIO, H. Fluidéz de aleaciones de sistemas eutécticos. Anales AFA, [online], 2004 Vol. 16, pp. 194 – 197. Disponible en internet: <<http://anales.fisica.org.ar/journal/index.php/analesafa/article/viewFile/324/335>>.
- [67] WANG, Jian y et al. Thermodynamic description of Au-Ag-Si ternary system. Elsevier [online], 2007 Vol. 17, no 6, pp. 1405 – 1411. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632607602854>>.
- [68] SUFRYD, Katarzyna y et al. Experimental investigation of the Cu–Si phase diagram at $x(\text{Cu}) > 0.72$. Elsevier [online], 2011 Vol 19, no 10, pp. 1479 – 1488. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966979511001634>>.
- [69] ZHAI, W., y et al. A calorimetric study of thermodynamic properties for binary Cu–Ge alloys. Elsevier [online], 2012 Vol. 535, pp. 70 – 77. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838812007554>>.
- [70] CRETU, Cristian y VAN DER LINGEN, Elma. Coloured gold alloys. London, England. Gold thecnology 2000, pp. 31 – 39.
- [71] RAYKHTSAUM, G., Y AGARWAL, D. The color of gold. London, England. Gold thecnology 1997, pp. 26 – 30.
- [72] KLOTZ, Ulrich. Computer simulation in jewelry technology meaningful use and limitations. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing. 2012, pp. 297 – 319.

BIBLIOGRAFÍA

ADLER, Steven. The Revolution of CAD/CAM in the Casting of Fine Jewelry. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. May 2005, pp. 1 – 27.

AFEMO (Associazione Fabricanti Ed EsportatotiMachinari per Oreficeria) [visto Julio 2015]. Disponible en <<http://www.afemo.it/lang1/melt-italiana.html>>.

AKHMETOVA, A. M., and others. Experimental investigations of the Ag-Cu-Ge-system. Elsevier [online], 2015 Vol. 630, pp. 84 – 83. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838815000729>>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard test method for microindentation hardness of materials. ASTM E 384-16*. Pensilvania, Estados Unidos: ASTM, 2016. 1 – 28 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry. ASTM E 1269 – 11*. Pensilvania, Estados Unidos: ASTM, 2011. 1 – 6 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis. ASTM E 831 – 14*. Pensilvania, Estados Unidos: ASTM, Reapproved 2010. 1 – 6 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. ASTM E 407 – 07*. Pensilvania, Estados Unidos: ASTM, Reapproved 2015. 1 – 22 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. ASTM E 3 – 11*. Pensilvania, Estados Unidos: ASTM, Reapproved 2016. 1 – 12 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Practice for*

Computing the Colors of Objects by Using the CIE System. ASTM E 308 – 15. Pensilvania, Estados Unidos: ASTM, 2016. 1 – 45 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Melting And Crystallization Temperatures By Thermal Analysis. ASTM E 794 – 06.* Pensilvania, Estados Unidos: ASTM, 2012. 1 – 4 p.

ASKELAND, Donald y PHULÉ Pradeep. *Propiedades Térmicas de Los Materiales. En: Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* 4 ed. México D.F: Cengage Learning, 2009, pp. 930. ISBN-13: 978-970-686-361-4.

AXINTE, E. Metallic glasses from “alchemy” to pure science: Present and future of design, processing and applications of glassy metals. Elsevier [online], 2012 Vol.35, pp. 518 – 556. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911006510>>.

BERNARDIN, John. *Understanding Micro alloys.* Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing. 2005, pp. 53 – 61.

BHATIA, V., KEALLEY, C., WUHRER, R., WALLWORK, K., CORTIE M. Ternary β and γ phases in the Al-Au-Cu system at 750° C. ELSEVIER, 2009, pp. 100 – 107.

BLAZEVIC, Amir; EFFENBERGERB, Herta y RICHTER, Klaus. Phase equilibria in the system Au-Cu-Si and structural characterization of the new compound $Au_{5\pm x}Cu_{2\pm x}Si$. Elsevier [online], 2014 Vol. 46, pp. 190 – 198. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966979513003166>>.

CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY. Au-base bulk solidifying amorphous alloys. Inventores: J. Schroers y A. Peker U. KLOTZ y M. EISENBART. Fecha de solicitud: 17, octubre, 2005. Estados Unidos, patente de investigación, ESWO2006045106 A1. 27, abril, 2006.

CHIDAMBARAM, Vivek; HALD John y HATTEL Jesper. Development of Au-Ge based candidate alloys as an alternative to high-lead content solders. Elsevier [online], 2010 Vol. 490, no. 1 – 2, pp. 170 – 179. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838809020842>>.

CHOI, S.; CHO, H y KUMAI, S. Influence of precipitation on the coefficient of thermal expansion of Al-Si-Mg-Cu-(Ti) alloys. Elsevier [online], 2016 Vol. 655, pp. 6 – 10. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838815311841>>.

CHUDNENKO, K., PAL'YANOVA, G. Thermodynamic properties of solid solution in the Ag-Au-Cu system. Elsevier [online], 2014 Vol. 55, no. 3, pp. 349 – 360. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068797114000273>>.

CORTI, Christopher. Basic Metallurgy of the Precious Metals. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 2007, pp. 77 – 108.

CORTI, Christopher. Property measurement: what use is it to jewelers?. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Santa Fe Symposium, 2012, pp. 145-165.

CORTI Christopher. What is a White Gold? Progress on Issues! Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 2005, pp. 103 – 158.

CRETU, Cristian y VAN DER LINGEN, Elma. Coloured gold alloys. London, England. Gold technology 2000, pp. 31 – 39.

DABALÁ, M., MAGRINI, M., POLIERO M., GALVANI, R. Production and characterization of 18 carat white gold alloys conforming to European Directive 94/27 CE. London, England. Gold Technology. April 1999, pp. 29 – 31.

DAZA, Juan. Estudio de las variables determinantes en la tolerancia de las esmeraldas colombianas al método de gemas pre-engastadas para el proceso de micro-fundición. Trabajo de investigación Magister en Ingeniería de Materiales. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 1 – 103 p.

DESAI, K. Innovative Lost Wax Investment Casting. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 2005, pp. 193 – 214.

DIETER, Ott. Metallurgical and chemical factors influencing working conditions. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Santa Fe Symposium, 2000, pp. 227 – 250.

DUBOIS, Patrick y et al. Temperatura measurements in mold cavities during vacuum-assisted, static pouring of 14 yellow gold. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2007, pp. 131 – 156.

FACCENDA, V. Handbook on finishing in gold jewellery manufacture. Mila, Italy. World Gold Council. 1999, pp.52.

FERNÁNDEZ, Mayerly; ORTIZ, Luz y ALONSO, Arnaldo. Procesos de obtención y evaluación de aleaciones preciosas base oro usadas en joyería. USBmed. Julio 2015 Vol. 6, no 2, pp. 15-25. Disponible en internet: <<http://revistas.usb.edu.co/index.php/IngUSBmed/article/view/1727/1500> >.

GARCIA, Mónica. Evaluación cromática y microestructural de una aleación de oro blanco al Mn en estado fundido y tratado térmicamente. Trabajo de investigación Magister en Ingeniería Metalúrgica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 1 – 151 p.

GRANDE, Marco, PORTA, Lorenzo y TIBERTO Darío. Computer simulation of the Investment Casting Process: Widening of the Filling Step. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 2007, pp. 1 – 17.

Group Legor, Vicenza (Italy). You're Jewelry Technology Provider [Visto junio de 2015]. Disponible en: <www.legor.com>.

GUSMANO, G.; y et al. Influence of Si, Ni and Co addition on gold alloy for investment cast. Elsevier [online], 2001 Vol. 325, no 1-2, pp. 252 – 258. Disponible

en internet: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838801012750>>.

HOSTÝNEK, J. Gold: An Allergen of Growing Significance. Elsevier [online], 1997 Vol. 35, no. 8, pp. 839-844. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278691597000586>>.

JACOBSON, M., SANGHA, S. A low melting point solder for 22 carat yellow gold. London, England. Gold Bulletin. July 1996, pp. 7 – 10.

JIN, Shan; DUARTE, Liliana y LEINENBACH, Christian. Experimental study and thermodynamic description of Au-Cu-Ge system. Elsevier [online], 2014 Vol. 588, no. 5, pp. 7 – 16. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838813027849>>.

JOSTENS, INC. Silver alloy. Inventores: T. Cleabert. Fecha de solicitud: 30, agosto, 2012. Estados Unidos, patente de investigación, US 20140065011 A1. 6, marzo, 2014.

KLOTZ, Ulrich. Computer simulation in jewelry technology meaningful use and limitations. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing. 2012, pp. 297 – 319.

KOROJY B., y FREDRIKSSON H. On solidification of hypereutectic Al-Si alloys. Transactions of The Indian Institute of Metals, 2009 Vol. 62, no 4 – 5, pp. 361 – 365. Disponible en internet: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s12666-009-0066-1>>.

LAWS, Kevin; SHAMLAYEA Karl y FERRY Michael. Synthesis of Ag based Bulk Metallic Glass in the Ag-Mg-Ca [Cu] alloys system. Elsevier [online], 2012 Vol. 513, no. 5, pp. 10 – 13. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838811020664>>.

LOEWEN, Roland. Gems made by man. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 1996, pp. 407 – 451.

LOHWANGWATANA Boonrat y et al. Liquid metal-Hard 18K and 850 Pt Alloys that can be processed like Plastics or Blown like Glass. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology 2007, pp. 289 – 304.

LOUZGUINE, Dimitri, y et al. Comparative analysis of glass-formation in binary, ternary, and multicomponent alloys. Journal of applied physics [online], 2010, no 108, pp. 103511-1 – 103511-8. Disponible en internet: <<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/108/10/10.1063/1.3506687>>.

MAIER, A., TKALCEC, I., MARI, D., SCHALLER, R. New In-Pd mechanical loss peak in the ternary gold alloys. Elsevier [online], 2013 Vol. 61, no. 16, pp. 6107 – 6113. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645413004977>>.

MERINO, María. Diagramas y transformaciones de fase. Métodos experimentales para la determinación de diagramas de equilibrio. Reduca [online], 2012, pp. 364 – 381, ISSN: 1989 – 5003. Disponible en internet: <<http://www.revistareduca.es/index.php/reduca/article/viewFile/944/961>>.

MORANDO, C.; GARBELLINI, O., y PALACIO, H. Fluidéz de aleaciones de sistemas eutécticos. Anales AFA, [online], 2004 Vol. 16, pp. 194 – 197. Disponible en internet: <<http://anales.fisica.org.ar/journal/index.php/analesafa/article/viewFile/324/335>>.

NISHIO A. Gold alloy data, 21 carat, pink Au 875 – Cu 107,5 – Ag 17,5. London, England. Gold Technology. July 1996, pp. 19 – 22.

NISHIO A. Gold alloy data, 21 carat, red Au 875 – Cu 125. London, England. Gold Technology. July 1996, pp. 23 – 26.

NISHIO A. Gold alloy data, 21 carat, yellow-pink Au 875 – Ag 45 – Cu 80. London, England. Gold Technology. July 1996, pp. 15 – 18.

NORMANDEAU, Greg y ROETERINK, Rob. The optimisation of silicon alloying additions in carat gold casting alloys. . London, England. Gold Bulletin. 1996, pp. 4 – 15.

OTT, D. Development of 21carat Cadmium-free gold solders. London, England. Gold Technology. July 1996, pp. 2 – 6.

QUINTERO, Omar. Principios de tecnología de fundición. EQUINOCCIO. Caracas, Venezuela, 2009.

RAPSON W. The metallurgy of the carat gold alloys. London, England. Gold Technology. May 1991, pp. 1 – 14.

RAYKHTSAUM, G., Y AGARWAL, D. The color of gold. London, England. Gold thecnology 1997, pp. 26 – 30.

SCHROERS, Jan y et al. Precious Bulk Metallic Glasses for Jewelry Applications. Elsevier [online], 2007 Vol. 449 – 451, pp. 235 – 238. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509306013190>>.

SCHUSTER, Hubert y BOLZONELLA, Alberto. The Preparation of the master mold-The Key Point of Stone-In-Place Casting. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 2005, pp. 399 – 408.

SCOTT, Patrick. Cad Software for Jewelry Design: A Comprehensive Survey. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Symposium on Jewelry Manufacturing Technology. 2005, pp. 409 – 422.

SCOTT, Phillip. Taking the Mystery Out of Casting Stone in Place. Albuquerque, New Mexico. Eddy Bell. Symposium on Jewelry Manufacturing Technology, 2004, pp. 110.

SOINILA, E., y et al. Bulk metallic glass tube casting. Elsevier [online], 2011 Vol. 509, pp. S210-S213. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838810031373>>.

SUFRYD, Katarzyna y et al. Experimental investigation of the Cu–Si phase diagram at $x(\text{Cu}) > 0.72$. Elsevier [online], 2011 Vol 19, no 10, pp. 1479 – 1488. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966979511001634>>.

SANGHA, S., HARRISON, M., JACOBSON, D. New low temperature high carat gold solders and their applications. London, England. Gold Technology. July 1996, pp. 7 – 10.

TAIMSALU P. Gold alloy data, Au 585 – Ag 300 – Cu 115. London, England. Gold Technology. January 1990, pp. 14 – 18.

TAIMSALU P. Gold alloy data, Au 750 – Ag 125 – Cu 125. London, England. Gold Technology. January 1990, pp. 9 – 13.

TAIMSALU P. Gold alloy data, Au 917 – Ag 55 – Cu 28. London, England. Gold Technology. January 1990, pp. 6 – 9.

TOBON, Julian y et al. Fabricación y caracterización de la aleación Au-Si en composiciones próximas al eutéctico. Revista Colombiana de Materiales [online], 2012, no 2, pp. 1 – 10. Disponible en internet: <<http://aprendeonline.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/article/view/11282/10326>>.

TOLOSA, Yuly y VALDERRAMA, Asbleidy. Estudio de las Variables que Regulan el Tratamiento Térmico del Yeso y su Adaptación al Método de Pre-engaste de las Esmeraldas Colombianas. Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, 2012, 1 – 70 p.

UNITED. Precious Metal Refining, Inc. [Visto Julio 2015] Disponible en www.unitedpmr.com.

WANG, Jian y et al. Thermodynamic description of Au-Ag-Si ternary system. Elsevier [online], 2007 Vol. 17, no 6, pp. 1405 – 1411. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1003632607602854>>.

WANGA, W.; DONG, C. & SHEK, H. Bulk Metallic Glasses. Elsevier [online], 2004, Vol. 44, no 2 – 3, pp. 45 – 89. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X04000300>>.

WRIGHT, J. Technical manual for gold jewellery. Milan, Italy. World Gold Council. 1998, pp. 2.3.

ZHAI, W., y et al. A calorimetric study of thermodynamic properties for binary Cu–Ge alloys. Elsevier [online], 2012 Vol. 535, pp. 70 – 77. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838812007554>>.

ZHANG, W. y et al. A. New Au-based bulk glassy alloys with ultralow glass transition temperature. Elsevier [online]. 2009, Vol. 61, no 7 [citado 10 febrero 2016], pp. 744 – 747. Disponible en internet: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646209004205>>.

ANEXOS

ANEXO A. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MATERIAS PRIMAS

Se hizo análisis de composición química de las materias primas mediante la técnica de fluorescencia de rayos X.

Tabla 1. Composición química de las materias primas.

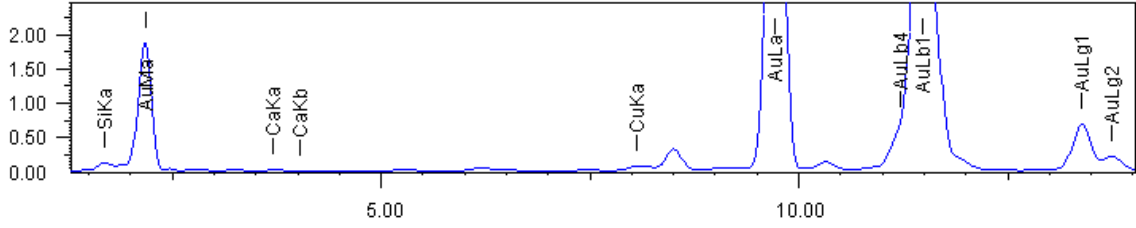
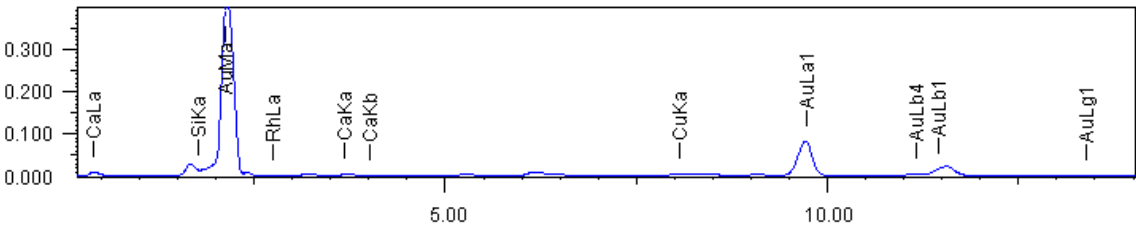
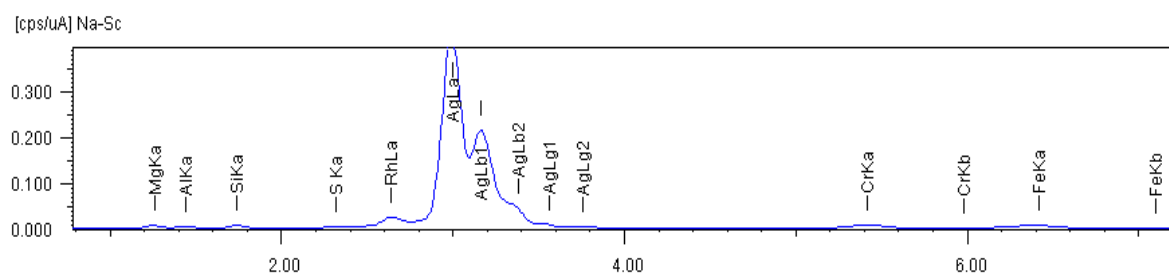
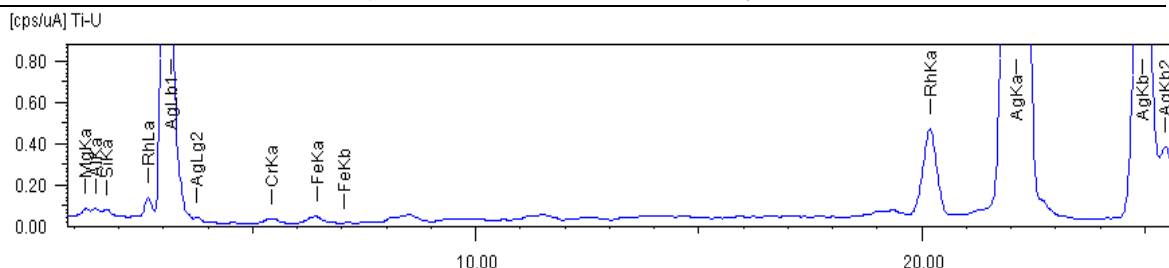
DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS		
Nombre de la muestra	Oro	
Espectro de fluorescencia de rayos X		
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> [cps/uA] Ti-U [keV] </div>  </div>		
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> [cps/uA] Na-Sc [keV] </div>  </div>		
Composición		
ELEMENTO	Composición (%)	Desviación media
Oro (Au)	97.67	0.24
Calcio (Ca)	1.06	0.03
Silicio (Si)	1.01	0.03
Cobre (Cu)	0.26	0.01

Tabla 1. Composición química de las materias primas.

DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

Nombre de la muestra Plata

Espectro de fluorescencia de rayos X



Composición

ELEMENTO	Composición (%)	Desviación media
Plata (Ag)	95.96	0.20
Magnesio (Mg)	2.34	0.04
Aluminio (Al)	0.56	0.02
Silicio (Si)	0.50	0.01
Cromo (Cr)	0.42	0.03
Hierro (Fe)	0.18	0.02
Azufre (S)	0.05	0.01

Tabla 1. Composición química de las materias primas.

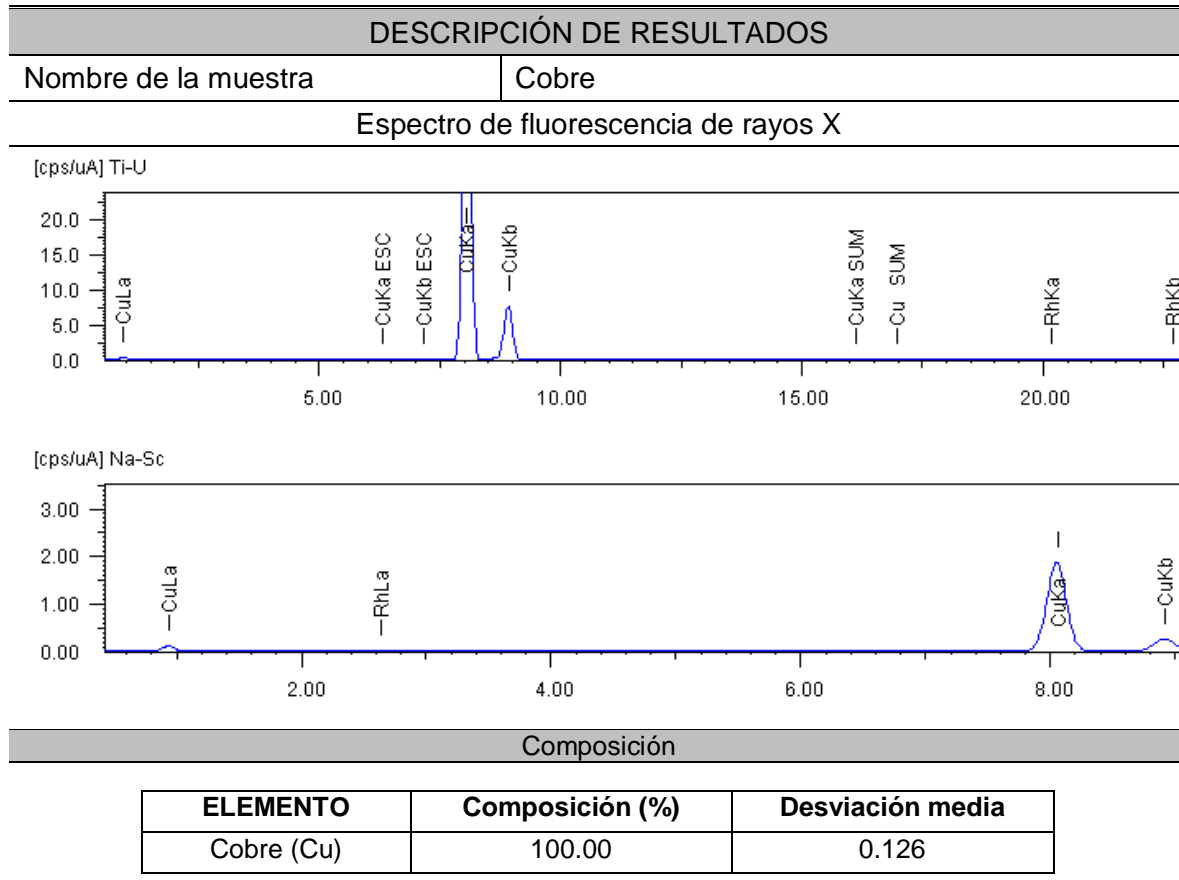


Tabla 1. Composición química de las materias primas.

Materia prima	Composición, % masa	
Silicio (Si)*	Silicio	99,99
Germanio (Ge)*	Germanio	99,99
Indio (In)*	Indio	99,99

* Composiciones dadas por el fabricante.

ANEXO B. CARACTERIZACIÓN DE LAS LIGAS

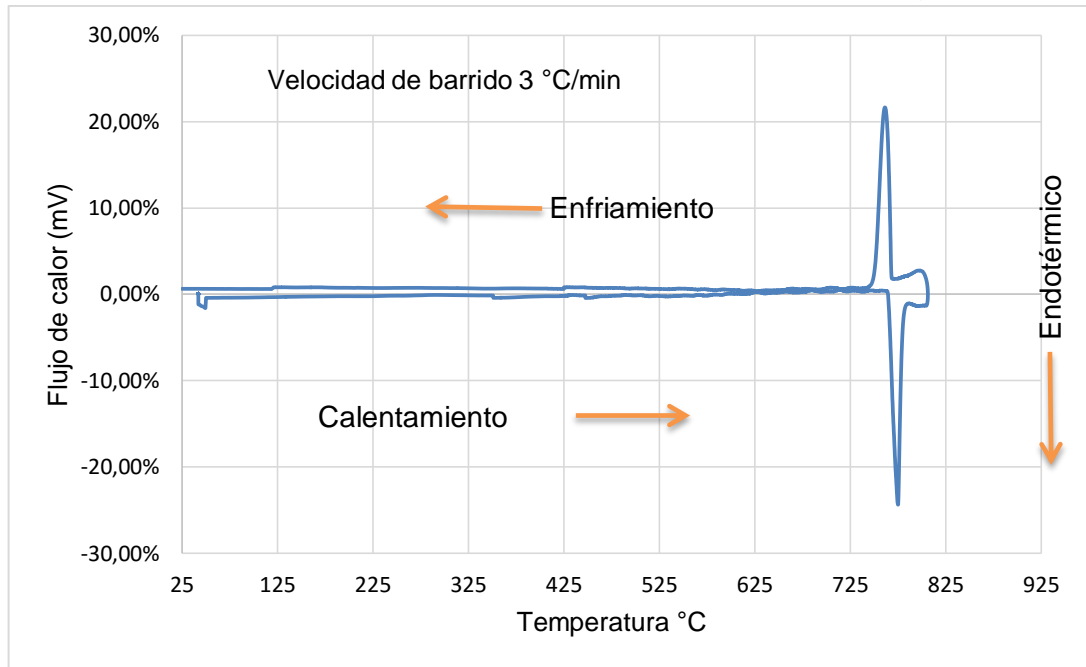
Para la caracterización de la liga C132N, fue necesario evaluar su composición química, se realizó análisis térmico, metalográfico y de color, usando las normas y equipos mencionados en la caracterización de las aleaciones fabricadas.

Tabla 2. Composición química.

DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS		
Nombre de la muestra	Liga C132N	
Espectro de fluorescencia de rayos X		
Composición		
ELEMENTO	Composición (%)	Desviación media
Cobre (Cu)	54,9	0,1
Plata (Ag)	42,2	0,1
Zinc (Zn)	2,84	0,02
Cromo (Cr)	0,061	0,016

La curva de calorimetría diferencial de barrido muestra un pico endotérmico de fusión a 716,35° C.

Figura 1. Resultados de calorimetría diferencial de barrido para la liga C132N



El análisis metalográfico muestra dendritas estructura propia de la solidificación por fundición. El valor encontrado de micro-dureza es de 102 HV.

Microestructura de la liga C183N, a) 2100X y b) 2800X

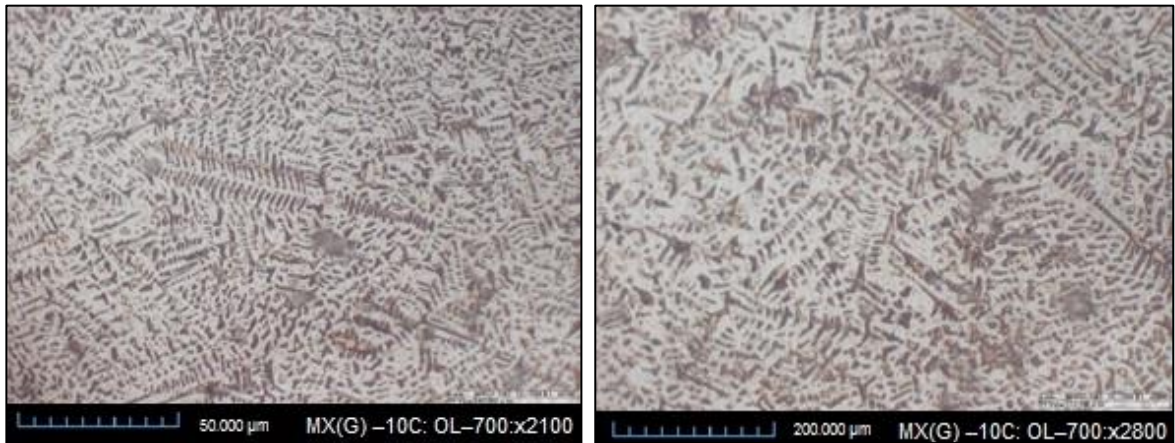


Tabla 4. Índices CIELAB hallados para la liga

Liga C183N	Índices CIELAB		
	L*	a*	b*
	5,3	23,8	87,6

Los valores hallados para los índices CIELAB son cercanos a los indicados por el comercializador.