

***Hallazgos entre lo sensible y lo tangible: comparación
de los métodos de fundición de plata 925 utilizada
por artesanos costarricenses***

*Findings Between the Sensitive and the Tangible:
A Comparison of the Casting Methods for 925 Silver Used by
Costa Rican Artisans*

*Hennia Cavallini
Jonathan Torres
María Fernanda Abarca*

DOI 10.15517/es.v81i1.47285



Esta obra está bajo una licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Sin Obra Derivada

Hallazgos entre lo sensible y lo tangible: comparación de los métodos de fundición de plata 925 utilizada por artesanos costarricenses

Findings between the Sensitive and the Tangible: A Comparison of the Casting Methods for 925 Silver used by Costa Rican Artisans

Hennia Cavallini¹
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica

Jonathan Torres²
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica

María Fernanda Abarca³
Universidad de Costa Rica
San José, Costa Rica

Recibido: 03 de diciembre de 2019 **Aprobado:** 16 de junio de 2020

Resumen

En este trabajo se presenta el producto de la investigación basada en la producción artesanal de aleaciones de plata; para lo cual se considera el proceso de fundición y las variables comunes utilizadas por artesanos orfebres. Esta es una investigación centrada en experiencias de artesanos, cuyo propósito es evidenciar, a partir del análisis de muestras, la complejidad que encierran dichos procesos, el grado de perfeccionamiento técnico logrado por los artesanos orfebres en su práctica y el desarrollo de su sensibilidad en el trabajo con materiales. Lo anterior, no con la intención de validar las prácticas del artesano desde la

¹ Investigadora en el Centro de Investigación en Estructuras Microscópicas (CIEMic) y profesora de Metalurgia Física en la Escuela de Ingeniería Mecánica; ambos cargos en la Universidad de Costa Rica (UCR). Doctora en Educación por la UCR. ORCID: **0000-0002-4314-8174**. Correo electrónico: hennia.cavallini@ucr.ac.cr

² Profesor en la Escuela de Tecnologías en Salud y docente e investigador Escuela de Artes Plásticas; ambos en la UCR. Licenciado en Escultura por la UCR. ORCID: **0000-0003-0794-0321**. Correo electrónico: jonathantorres78@gmail.com

³ Asistente en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) de la UCR. Estudiante de Ingeniería Mecánica en la UCR. ORCID: **0000-0002-93609-3542**. Correo electrónico: fernanda.abarca@ucr.ac.cr

ciencia, sino para dibujar caminos de enlace que permitan un beneficio mutuo. Se trabajó con tres muestras de aleaciones de plata generadas a partir de procesos artesanales. El análisis se realizó con las técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) y rayos X. Se devela, así, el efecto que puede generar el uso de oxiacetileno, oxipropano y horno eléctrico en el proceso de fundición, sus ventajas y desventajas.

Palabras clave: artesanos; metales preciosos; microscopía electrónica; combustión; fusión.

Abstract

This paper presents the research product based on the artisanal production of silver alloys, where the casting process and the common variables used by artisan goldsmiths are considered. This is a research focused on the artisans' experiences, which has the purpose of showing, from the analysis of samples, the complexity of these processes, as well as the degree of technical improvement achieved by goldsmith artisans in their practice and development of their sensitivity in working with materials. The foregoing, not to validate the craftsman's practices from science; rather, to draw link paths that allow mutual benefit. We worked with three samples of silver alloys generated from artisan processes. Scanning electron microscopy (SEM) and X-ray techniques were used for the analysis. This reveals the effect that the use of oxyacetylene, oxypropane, and electric furnace can generate in the casting process, its advantages, and its disadvantages.

Keywords: artisans; combustion; electron microscopy; melting; precious metals.

Introducción

La plata se considera un metal precioso y, en joyería, usualmente se alea con el zinc (Zn), el estaño (Sn) o el cobre (Cu), con lo cual se generan diagramas de fase de solubilidad parcial⁴. Esta capacidad de alearse depende de la compatibilidad de celdas cristalográficas⁵, de la similitud del radio atómico⁶ y de su electronegatividad⁷ (Dieter, 1986). Para joyería, la aleación base plata más común es la de cobre, ya que este elemento incrementa su dureza y resistencia, con lo cual asegura su estabilidad (Coddet, Verdy, Coddet & Debray, 2016). Una aleación de plata (Ag) base cobre (Cu) comúnmente utilizada es la denominada plata esterlina, *plata de ley* o *plata 925*, la cual está compuesta por plata en 92.5% y cobre en 7.5%.

En Europa, el uso de implementos de plata 925 inició en los años 1300, durante el período victoriano. Entre estos artefactos, destacaron la cubertería, las monedas y las joyas (Rodríguez & Rigueiro, 2015). En cambio, en el continente americano, la extracción de metales y el desarrollo de técnicas de metalurgia complejas, incluyendo la aleación de metales preciosos como la plata y el oro y de bronce con diversas composiciones, se estima haber comenzado entre 1155 a.C. y 1936 a.C. en la zona de los Andes suramericanos y alrededor del 800 a.C. en la zona de Mesoamérica (Hosler, 1988). En Costa Rica, según Corrales (2005), los primeros desarrollos en orfebrería aparecen en el periodo que él llama *Cacicazgos Tardíos*, entre el 800 d.C y el 1500 d.C.

Como sucedió en la mayoría de América Central, el advenimiento de la colonia española eliminó, en gran medida, el acceso al conocimiento ancestral de sus pueblos, lo cual incluyó mucha de la información sobre las prácticas de orfebrería precolombina. Debido a esto, gran parte de la tradición orfebre costarricense renace de la mano de maestros europeos llegados al país ya entrada la colonia. Tal es el caso de los Del Valle, una de las familias

⁴ Son representaciones gráficas referentes a la solubilidad de materiales en función de condiciones como la temperatura y la composición (Pero-Sanz, 2000).

⁵ Las celdas cristalográficas son la unidad elemental que compone los cristales. Estas celdas rodean los átomos (Pero-Sanz, 2000).

⁶ El radio atómico es la mitad del diámetro atómico, el cual es la “distancia entre los centros o núcleos de dos átomos tangentes entre sí” (Pero-Sanz, 2000, p. 61).

⁷ Es la característica en la cual un átomo tiene una carga neta mayormente negativa (Iczkowski & Margrave, 1961).

con tradición orfebre más antigua del país, encargados de la construcción y mantenimiento del *resplandor y pedestal* de oro y piedras preciosas que luce la *Virgen de los Ángeles* (Gutiérrez, 2008).

El estudio aquí presentado es la primera etapa de la investigación denominada: “Caracterización mecánica y microestructural de las aleaciones plata-cobre, utilizadas en la Facultad de Artes”, desarrollada por académicos de las facultades de Artes e Ingeniería de la Universidad de Costa Rica (UCR). La etapa que aquí se abarca inicia con una revisión de los procesos por los cuales se obtienen las materias primas y continua con los métodos y equipamientos base para crear aleaciones con metales preciosos, haciendo énfasis en la aleación de base plata 925. También, se analizan las materias primas para la conformación de aleaciones base plata que se adquieren en el centro de la ciudad de San José, Costa Rica, y los procesos típicos utilizados por la mayoría de artesanos del país, a partir de la creación de una serie de muestras de aleación de plata 925. Esto con el fin de visualizar los resultados que se consiguen con equipos básicos en talleres artesanales y, además, evidenciar el conocimiento implicado en dichos procesos. Finalmente, a partir de los análisis microestructurales de las aleaciones, obtenidos por los artesanos mediante diferentes técnicas de fundición, se busca poder observar las diferencias relacionadas entre estos procesos para poder establecer las pautas básicas que conduzcan a mejorar la calidad de los productos finales.

Procesos de conformación de aleaciones de plata utilizadas para joyería artesanal

Al tratar el tema de los procesos de conformación para joyería artesanal, de acuerdo con Quintero, Fernández y Alonso (2015), se debe considerar como fundamental: la calidad de la materia prima, las características de los crisoles y la selección de los combustibles o sistemas utilizados en el proceso de fundición, ya que de estos va a depender la calidad y las propiedades físico-mecánicas de cada pieza. A continuación, se presenta una descripción básica de cada uno de estos elementos, así como aspectos generales relacionados:

Métodos de obtención de materia prima

En el proceso de obtención de la plata se busca separar cloruros y sulfuros, que conforman el material procedente de la mina. La separación de estos componentes se lleva a cabo por procesos de cianuración o amalgamación, por medio de los cuales se obtiene plata con diferentes estados de pureza, que va a servir como base para las diferentes aleaciones utilizadas en joyería artesanal.

Amalgamación

El proceso de *amalgamación* es comúnmente llamado *beneficio de patio* (Ramírez, 2004); este consiste básicamente en cuatro etapas: 1) Trituración, 2) Mezcla y agitación con cloruro de sodio y agua, 3) Amalgamación con mercurio y 4) Separación. Actualmente, este proceso es el menos utilizado, pero la pureza alcanzada llega hasta el 99.5% (De Lacerda & Salomons, 1998). Este es el método principal de extracción artesanal utilizado en Costa Rica (Ovares, 2018).

Cianuración

El proceso de *cianuración*, al igual que el caso de la amalgamación, consta de cuatro etapas: 1) Trituración, 2) Tueste con cloruro de sodio para obtener cloruro de plata, 3) Disolución en cianuro sódico formando $\text{NaAg}(\text{CN})_2$ y 4) Precipitación de la plata metálica al interaccionar con cinc metálico (Muñoz, 2010). Este método es el más importante y empleado en la actualidad, debido a su bajo costo y a que, por medio de este, se han logrado porcentajes de pureza de hasta el 97% (Hernández, Rivera, Patiño & Juárez, 2013).

Plata como subproducto

Por un lado, cuando la plata es considerada como una impureza y se obtiene como subproducto, por ejemplo, en el caso de la extracción del oro, esta se puede separar, especialmente por electrólisis, con el que se llegan a obtener purezas hasta del 95%. Por otro lado, en el caso de que la plata (Ag) esté pareada con plomo, esta se puede separar agregando zinc (Zn) al baño metálico, para que la plata fácilmente migre al zinc formando aleaciones fáciles de destilar para poder llegar a la separación (Parga & Carrillo, 1996; Finck & Heumannskaemper, 2013).

Ahora bien, para lograr plata al 99.9%, se usa comúnmente un proceso denominado *separación*, en el cual se utiliza ácido nítrico para disolver la plata y otros metales. Seguido del proceso de separación, la plata no metálica se transforma en plata metálica por cualquiera de los siguientes métodos:

1. Refinación electrolítica (celda de Thum).
2. Reducción de nitrato de plata con soda cáustica y formaldehído.
3. Cementación de la solución.
4. Reducción del fundido (crisol para horno) de cloruro de plata con ceniza de sosa.

5. Reducción con borohidruro de sodio del cloruro de plata.
6. Reducción sólida de la fase de cloruro de plata con ceniza de sosa (Máx 500°C método de Kunda).
7. Cementación del cloruro de plata (fase⁸ sólida en bandejas).
8. Reducción con Na₂S₂O₄ 9. Reducción con dextrosa (Barrientos, 2003). Así se obtiene la plata metálica utilizada como base para cualquier aleación.

Aleaciones con metales preciosos

Para la conformación de una aleación y, especialmente, cuando se trabaja con metales preciosos utilizados en joyería, como la plata (Ag) y el oro (Au), se debe considerar el uso de un diagrama ternario de fases⁹. Para este caso, se emplea el constituido por plata (Ag)-cobre (Cu)-oro (Au) (ver figura 1), en el cual se representa gráficamente el comportamiento de las propiedades características de cada aleación, con relación a la composición de un sistema compuesto por tres elementos, esto a presión y temperatura constantes. Con estos diagramas se pueden estudiar el equilibrio de fases¹⁰, temperaturas de fusión, los estados de agregación¹¹, la estructura, la textura, la solubilización y el color en relación a la proporción de los componentes del sistema (Gómez-Díaz, Mejuto, Navaza & Rodríguez, 2002; 2003).

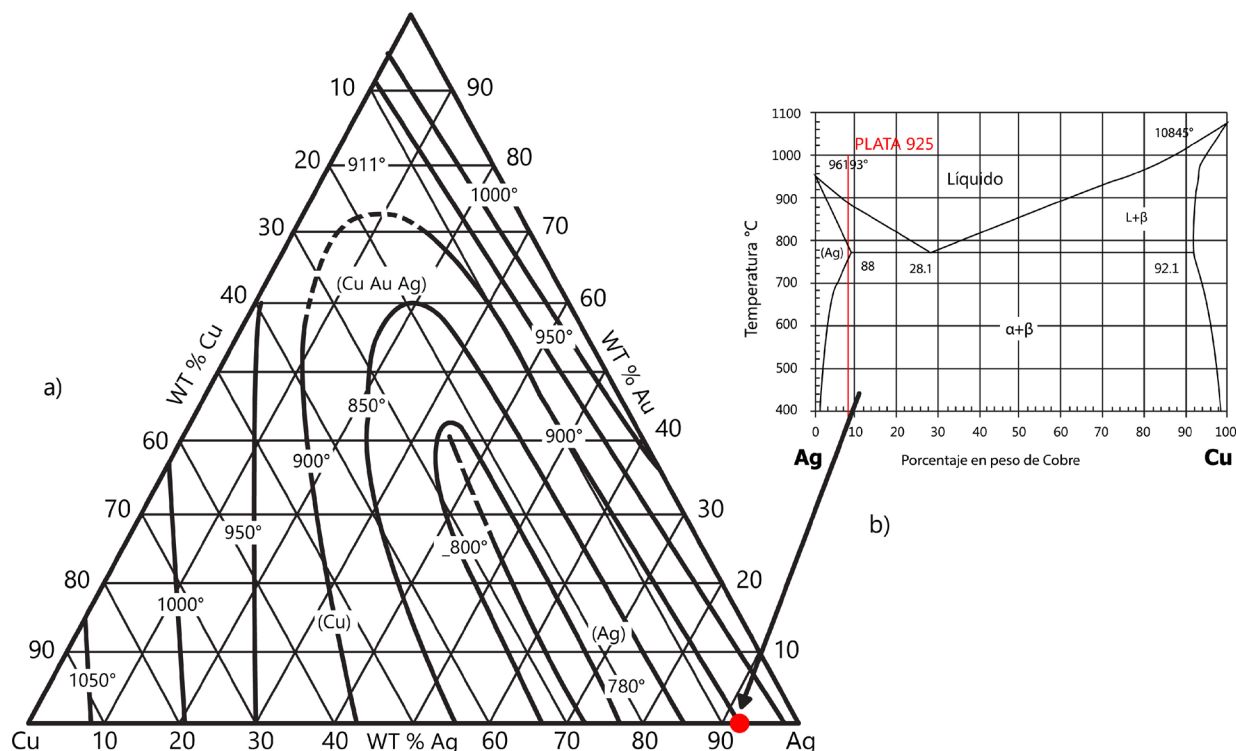
⁸ Las fases son zonas con mismo estado físico y la misma composición (Pero-Sanz,2000).

⁹ Es un diagrama por medio del cual se representan las fases según la composición y temperatura, de una aleación ternaria, es decir compuesta por tres elementos (Pero-Sanz,2000).

¹⁰ El equilibrio de fases es cuando después de cierto periodo de tiempo, “no se origina una nueva fase ni desaparece ninguna de las existentes” (Pero-Sanz, 2000, p. 124).

¹¹ Dependiendo de la temperatura y la presión los materiales pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos, estos son estados de agregación (Pero-Sanz,2000).

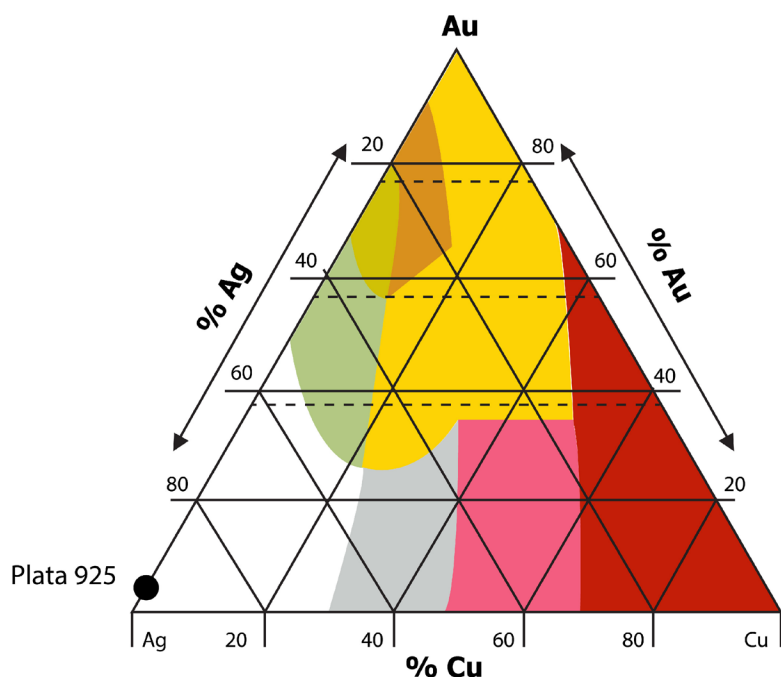
Figura 1. Composición de la aleación de Plata 925 e isotermas. a) Diagrama ternario plata (Ag)-cobre (Cu)-oro (Au), b) Diagrama binario plata (Ag)-cobre (Cu). Plata 925



Fuente: Grimwade (1990a), Castellier (1995).

Cuando se trata de seleccionar una aleación que se utilizará en una pieza de joyería, se deben tener en cuenta sus propiedades mecánicas y ópticas (color y brillo), su colabilidad, su forjabilidad y su quilataje, propiedades que dependen de la composición de la aleación seleccionada y, por supuesto, de la solubilidad de los aleantes que la constituyen (Grimwade, 1990b). En cuanto al color, en la figura 2 se pueden observar las gamas de colores que se dan para aleaciones ternarias plata (Ag)-cobre (Cu)-oro (Au).

Figura 2. Composición de la aleación de Plata 925. Diagrama ternario plata (Ag)-cobre (Cu)-oro (Au), de colores para aleaciones preciosas



Fuente: Grimwade (1990a).

Otro factor importante a considerar es la utilización de algunos elementos químicos que se agregan para mejorar algunas propiedades en las aleaciones de plata utilizadas en la producción de joyería. Algunos de estos elementos son el estaño (Sn), el zinc (Zn), el cadmio (Cd), el indio (In), el antimonio (An) y el níquel (Ni) que, aunque se agregan casi siempre en proporciones muy bajas, pueden ser alergénicos o tóxicos (Lloret, 2010). A continuación, se presenta una tabla con los elementos encontrados comúnmente en las aleaciones de plata para joyería.

Tabla 1. Principales elementos encontrados en aleaciones de plata utilizada en joyería

Elemento	Propósito de uso	Toxicidad	Alergénico
Estaño (Sn)	Control de dureza, <i>ANTITARNISH</i> *	Por inhalación (media)	Sensibilización cutánea
Zinc (Zn)	<i>Contra oxidación, aumenta la fluidez, ANTITARNISH</i>	Por inhalación (baja)	-----
Níquel (Ni)	Mejora propiedades mecánicas, aumenta la dureza	Por inhalación (alta)	Sensibilización cutánea UNE-UN 1811- 12472
Aluminio (Al)	Incrementa la elongación en porcentajes menores del 5% y la resistencia en porcentajes mayores al 5%, puede acelerar el <i>TARNISH</i> , genera películas de óxido en el baño líquido	-----	-----

Elemento	Propósito de uso	Toxicidad	Alergénico
Carbono (C)	Incrementa dureza, como producto de la combustión puede provocar <i>TARNISH</i>	-----	-----
Silicio (Si)	Aumenta la dureza y mejora las propiedades para que el material se pueda deformar en frío	-----	-----
Cobre (Cu)	Incrementa dureza	-----	-----

Dependiendo del porcentaje de cada elemento pueden cambiar las propiedades y efectos. *antiennegrecimiento. Fuente: Lloret (2010), Electrical Contacts Limited (2019), Jordan, Grenell & Herschman, (1927).

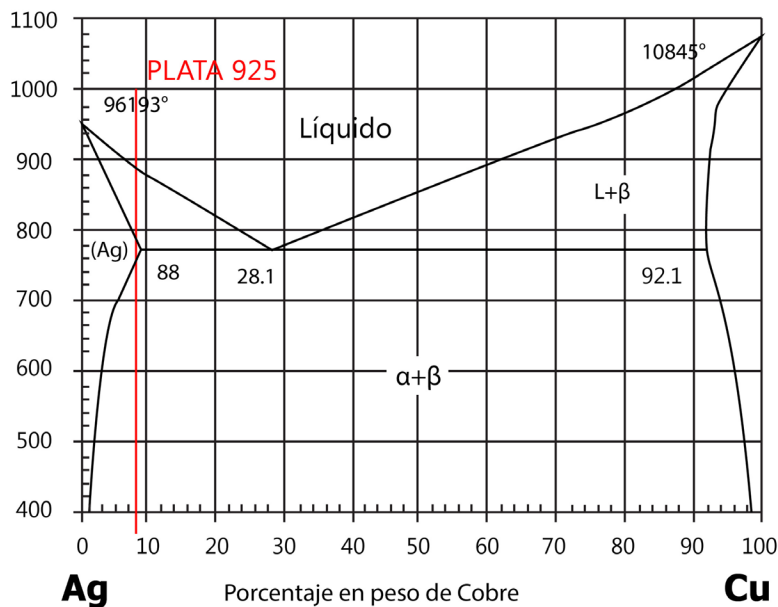
Propiedades físico-mecánicas de la aleación de plata 925

La aleación de plata 925 es también denominada de ley o plata esterlina y se usa especialmente en joyería, esto debido a su dureza y fácil deformación. En la siguiente tabla se presentan algunas propiedades físico-mecánicas y en la figura 3, se muestra representada la aleación de plata 925 en el diagrama de fases Ag-Cu.

Tabla 2. Propiedades físico-mecánicas de la aleación de plata 925

Propiedad	Valor	Unidades
Densidad	10.37x10 ³	Kg/m ³
Expansión térmica (20 °C)	1.9x10 ⁻⁵	°C ⁻¹
Calor específico	245	J/(kgK)
Conductividad eléctrica (IACS)	96	%
Esfuerzo de tensión (con recocido)	207	MPa
Elongación (recocido)	41	%
Dureza (recocido)	71	HV
Esfuerzo de tensión (dureza media)	386	MPa
Dureza (dureza media)	95	HV
Esfuerzo de tensión (totalmente duro)	496	MPa
Dureza (totalmente duro)	140	HV
Inicio de la Solidificación	891	°C
Fin de la solidificación	798	°C

Fuente: SunTech (2014).

Figura 3. Diagrama de fases binario plata (Ag)-cobre (Cu). Plata 925

Fuente: Castellier (1995).

Crisoles

Los crisoles utilizados en la fundición de metales, orientados a la producción de joyería, pueden ser de arcilla, vidrio o grafito. Estos son diseñados para soportar altas temperaturas y, según su aplicación, deben tener las siguientes características: alta resistencia frente del material fundido, buena conductividad, buena resistencia térmico-mecánica y a los cambios bruscos de temperatura (Finck & Heumannskaemper, 2013; Heine, Loper & Rosenthal, 1967), ya que, si no cumplen con estas premisas, pueden ser causantes de la contaminación primaria o secundaria del baño metálico.

La contaminación primaria del baño se puede generar si se da una reacción entre el material del crisol y los elementos que componen el baño metálico. Esto se puede evitar propiciando una alta resistencia a la formación de grietas por choque térmico en el material que conforma el crisol. En este sentido, en el caso de las fundiciones de plata, lo usual es utilizar crisoles de grafito, ya que tienen poca contracción, son resistentes a cambios bruscos de temperatura y tienen muy buena conductividad térmica, esto contribuye con la homogeneización de la temperatura del baño (Quintero, Fernández & Alonso, 2015). También,

Para realizar los ensayos mecánicos con los que se obtienen los datos de resistencia y dureza, se utilizan las normas ASTM A36 - ASTM E384 respectivamente, de la American Society for Testing and Materials.

Herramental básico utilizado en el proceso de fundición

En los procesos de fundición para orfebrería, se destaca un herramental básico en el que se incluyen: los crisoles, los hornos, los sopletes y los combustibles.

se debe tomar en cuenta que la vida del crisol puede afectar el baño metálico y provocar contaminación primaria. Así, para el caso de los crisoles de grafito, su vida útil depende del tipo herramental utilizado en el proceso de fundición y esta se considera que está va de 60 a 80 ciclos de fundición o colada (Capello, 1974).

En cuanto a la contaminación secundaria, esta es asociada al uso no selectivo de los crisoles. Es decir, para evitarla, se debe limitar el uso de un crisol a un baño metálico determinado, ya que dependiendo de la mojabilidad y textura de su superficie interna se puede propiciar el alojamiento del metal fundido, lo cual genera micro segregaciones¹² que pueden reaccionar con otros baños metálicos y contaminarlos (Grimwade, 1990b). Además, para agitar los baños líquidos se recomienda utilizar barras de grafito, las cuales no contaminan el baño (Jordan, Grenell & Herschman, 1927).

Hornos eléctricos

Para la elaboración de aleaciones destinadas a la producción de joyería, se recomienda utilizar hornos eléctricos de inducción, los cuales se seleccionan de acuerdo con la producción requerida y, al no utilizar ningún combustible directamente sobre el baño, eliminan el riesgo de contaminación directa con carbón (Flores & Orellana, 2014). Este tipo de horno se considera como el más adecuado debido a que, por medio de la agitación del baño, se le puede garantizar homogeneidad a la aleación y, además, se puede utilizar vacío o algún gas inerte directamente en la fundición para evitar oxidación, burbujas, microsegregaciones y otros defectos en el producto final (Quintero, Fernández & Alonso, 2015). No obstante, también se pueden utilizar hornos eléctricos de convección, con ciclos térmicos definidos y protocolos de agitación que garanticen la homogeneidad en la aleación. Estos se utilizan especialmente para la conformación final de piezas (Hity, 1998).

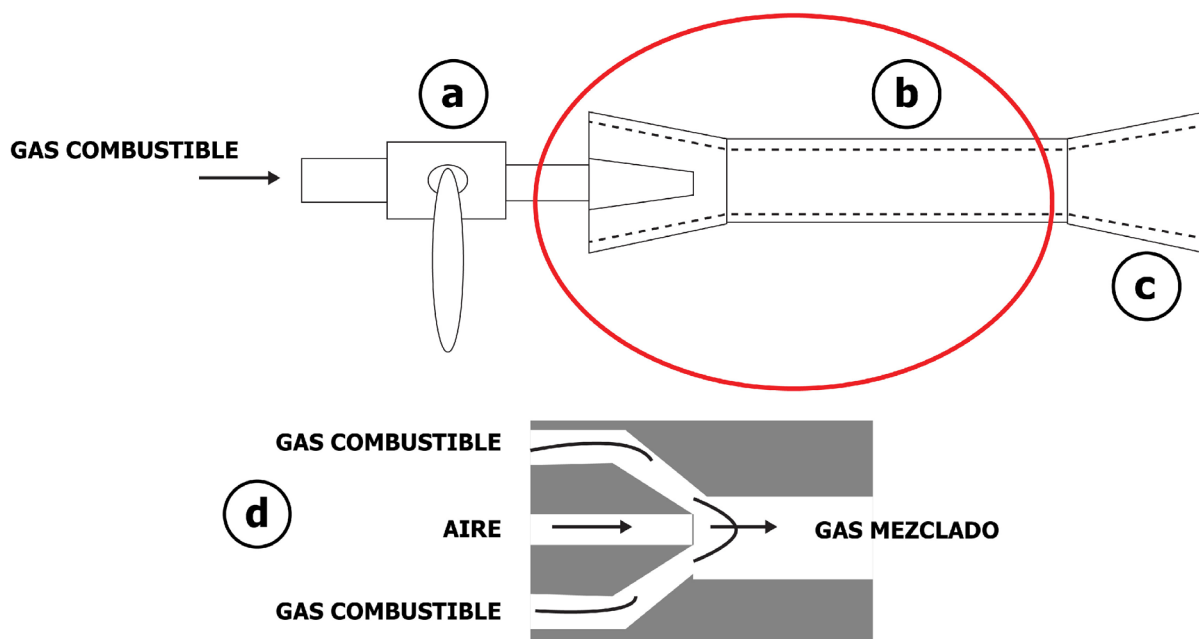
Sopletes

Los sopletes son dispositivos en los que se mezcla oxígeno/aire con un gas combustible para producir calor; su ventaja es que permiten dirigir el calor justo donde se necesite (figura 4). Se caracterizan porque desde su boquilla sale una llama, con la cual se calienta el crisol. Las características de esta llama dependen de las proporciones de concentración en

¹² Son secciones a escala micro, en las que varía la composición química con respecto al resto de la fundición (Pero-Sanz, 2000).

la mezcla oxígeno-combustible. De ese modo, para que se produzca una correcta combustión, es importante que la cantidad de oxígeno y gas suministrado pueda llegar a generar una combustión estequiométrica, en donde el oxígeno se emplee por completo. Sin embargo, factores como la dificultad para realizar la mezcla oxígeno-gas y fluctuaciones de presiones en el proceso hacen que se pierda la estequiometría¹³ en la combustión (Berry, Brumbaugh, Moulton & Shawn, 1921).

Figura 4. Diagrama de soplete y sección de alimentación de gas combustible y aire, en quemador. a) válvula de paso, b) tubo mezclador y boquilla, c) boquilla, d) boquilla



Fuente: Aguilar (2013).

Lo anterior conduce a que se consideren dos maneras de utilizar el soplete: llama blanda y llama dura. Con la llama blanda, la mayor parte del oxígeno se consume, por lo que es difícil que el material calentado por ella se oxide; se conoce como llama reductora. En el caso de utilizar la llama dura, no todo el oxígeno se consume; se conoce como llama

¹³ Es la rama que se encarga del estudio de las combinaciones de elementos según sus relaciones de masa (Salgado, Navarrete, Bustos, Sánchez & Ugarte, 2007).

oxidante. Ahora bien, la llama blanda se caracteriza por una ser más azulada con las puntas amarillentas y la llama dura, por ser de color azul claro. Esta última es usada solo cuando se necesita calentar en un punto muy específico (Wicks, 1996).

En la tabla 3, se muestran los requerimientos de oxígeno para generar combustiones estequiométricas, con acetileno y propano, gases combustibles utilizados comúnmente en orfebrería.

Tabla 3. Requerimiento de oxígeno o aire para la combustión estequiométrica de algunos combustibles

Sustancia	Producto	En peso, Kg de comburente/kg de combustible		En volumen, m ³ de comburente/m ³ de combustible	
		Oxígeno	Aire	Oxígeno	Aire
Propano	3CO ₂ +3H ₂ O	3,99	17,24	2,00	9,57
Acetileno	2CO ₂ + H ₂ O	3,07	13,26	2,50	11,96

Fuente: SunsTech (2014).

Combustibles: el acetileno y el gas propano

El acetileno es un gas combustible que produce la llama principal más caliente y concentrada de todos los gases combustibles industriales. Su poder calorífico es bastante bajo, pero la parte emitida por la llama principal es muy alta, de aproximadamente el 30%, lo que hace que el acetileno sea el gas combustible que genera el máximo calor en la llama principal. En cuanto al propano, tiene un poder calorífico más alto por kg de gas que el acetileno, pero genera una menor porción de este calor en la llama principal. La temperatura de llama es inferior y el requisito de oxígeno es superior al del acetileno (figura 4) (Muñoz, 2000; Flores & Orellana, 2014).

Con respecto al poder calorífico de un combustible, es la cantidad total de calor que este contiene, incluyendo el calor latente del agua formada por la combustión del hidrógeno que retiene. Es así como el poder calórico queda definido por el número de unidades de calor liberadas por la unidad de masa o de volumen del combustible, quemado en un

calorímetro en condiciones previamente establecidas; así que 1) Para combustibles sólidos y líquidos por unidad de masa, se expresa en kcal/kg o kJ/m³. 2) Para combustibles gaseosos por unidad de volumen en condiciones normales (a 0 °C de temperatura y 760 mm de Hg), se expresa en kcal/m³ o kJ/m³ (Flores & Orellana, 2014). En la siguiente tabla se presentan los poderes caloríficos del acetileno y el propano.

Tabla 4. Poder calórico del acetileno y el propano

GAS	Fórmula	ΔH_c (kJ/mol combustible)	ΔH_c (kJ/gO ₂)	ΔH_c (kJ/gCO ₂)	ΔH_c (kJ/CO)
Acetileno	C ₂ H ₂	1253	15.73	14.2	12.3
Propano	C ₃ H ₈	2044	12.8	15.2	14.2

Fuente: Drysdale (2011).

En esta etapa de la investigación se utilizaron como combustibles las mezclas de oxi-propano y oxi-acetileno.

Fundentes

Los fundentes se utilizan con el propósito de bajar las temperaturas de fusión y como escoriantes, es decir, reaccionan con algún óxido en la fundición y pueden formar escoria en la superficie del metal. Es importante controlar el uso de fundentes, para evitar que este quede atrapado dentro de la fundición y genere segregaciones o microsegregaciones causantes de defectos en las piezas fundidas (Lockwood, 1877; Mccloskey, Welch & Aithal, 2000). A continuación, se presenta una tabla con los fundentes más comunes usados en orfebrería.

Tabla 5. Fundentes comunes usados en orfebrería

Fundente	Temperatura de fusión (°C)	Aplicaciones
Bórax	561/760	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O, disuelve óxidos de cobre y zinc
Ácido bórico	185/870	H ₃ BO ₃
Carbonato de sodio	852	Na ₂ CO ₃ , fundente básico

Fundente	Temperatura de fusión (°C)	Aplicaciones
Sal amoniacal	350	NH ₄ Cl, volatiliza la escoria
Nitrato de potasio	441	KNO ₃ , casi no se usa, absorbe óxidos
Sal común	804	NaCl, se usa como refinador

Fuente: Quintero, Fernández & Alonso (2015).

Estos fundentes suelen ser utilizados en procesos artesanales. Sin embargo, para la presente investigación no se utiliza ninguno de ellos con el fin de reducir el número de variables a considerar, puesto que estas afectan el producto.

Metodología utilizada por artesanos orfebres

Las muestras de aleación plata-cobre analizadas en esta investigación fueron obtenidas mediante la aplicación de una metodología básica, utilizada normalmente en talleres de orfebrería artesanal. Dicha metodología se divide en los siguientes pasos:

1. Los gránulos de plata 1000 son pesados y separados de acuerdo a la proporción exacta requerida por cada artesano (depende del producto que se desea obtener).
2. El material de cobre (Cu 99%) se secciona en pequeños fragmentos, los cuales se pesan y se separan de acuerdo con la proporción requerida.
3. Se toman la plata y el cobre preparados en los puntos anteriores y se colocan dentro de un crisol frío (seleccionado por el artesano).
4. Una vez colocado el material en el crisol, se aplica calor para fundir tratando de obtener una mezcla homogénea (el artesano puede aplicar oxiacetileno, oxipropano o fundir en horno eléctrico).
5. La aleación resultante (plata-cobre), aún en estado líquido, es vertida dentro de una lingotera de acero o sobre una superficie de material refractario, hasta enfriar, para luego ser sometida a procesos de transformación.

Metodología de la investigación

Conformación de las muestras de aleación base plata 925

Como se mencionó antes, la conformación de las muestras de aleación base plata 925 se obtiene a partir de materias primas conseguidas en el centro de la ciudad de San José, Costa Rica, entre los meses julio y agosto del año 2017. La plata “pura” o plata 1000, fue obtenida en la distribuidora de implementos de joyería Portier y el cobre utilizado fue extraído de cables eléctricos estándar comprados en la ferretería EPA. El instrumental básico utilizado consistió en: crisol de grafito de 6 cm de diámetro externo, 5 cm diámetro interno, espesor 1 cm y 0.5 cm de profundidad, combustibles oxipropano y oxiacetileno, un horno eléctrico marca Thermoline-modelo A7900 y balanza marca OCONY modelo RC25782.

Conformación de las muestras

1. Pesaje de la materia prima, el cual se hace tomando en cuenta la relación matemática específica para lograr aleación plata 925 (92.5%Ag-7.5%Cu). Se pesa material para tres muestras (cada una aproximadamente con un peso de 2 gramos, es decir 1.85 gramos de plata y 0.15 gramos de cobre).
2. Se coloca el material en el crisol, se funde individualmente cada muestra, una con oxipropano, una con oxiacetileno y una en el horno eléctrico a 980°C.
3. Si las muestras son fundidas con oxipropano/oxiacetileno, una vez fundida cada muestra se vierte sobre un ladrillo refractario básico, para finalmente dejarla enfriar al aire.
4. Si el método de fundición es con horno eléctrico, se coloca el crisol que contiene los metales al horno. Se utiliza un ciclo de calentamiento partiendo de temperatura ambiente, en el que se incluyen cuatro rampas de calentamiento. En la primera rampa se utiliza una velocidad de calentamiento de 1.3°C/min hasta llegar a los 100°C. En la segunda rampa se incrementa la velocidad a 5°C/h hasta llegar a los 700°C. En la tercera rampa de calentamiento, se aplica una velocidad de 6.3°C/min partiendo de 700°C hasta llegar a los 980°C, donde no se aplica remojo al baño. Finalmente, se saca la muestra del horno y se vierte sobre un ladrillo refractario básico para enfriar al aire.

Análisis elemental

Para la observación de superficies y análisis de elemental se utilizó las siguientes herramientas: un microscopio de barrido (SEM) *Scanning Electron Microscope* marca HITACHI modelo 3700, bases de aluminio de 51 mm de diámetro y sustrato doble cara de carbón.

1. Se conforma sobre una base de aluminio una cama compuesta de tres bandas de sustrato de carbón doble cara de 1 cm de espesor.
2. Se pule manualmente cada muestra en una de las caras, utilizando pasta de diamante de 0.5 μm y lija metalúrgica 4000.
3. Se ajusta e identifica cada muestra en la cama de sustrato de carbón, conformada en la base de aluminio. (Muestra 1: oxipropano, Muestra 2: oxiacetileno y Muestra 3: fundida en horno).
4. Se procede al análisis elemental de cada muestra en el microscopio electrónico de barrido, a una intensidad de corriente utilizada de 80 A y un voltaje de 15 Kev. Los análisis se realizan en ambas caras. Se trabaja con aumentos entre 200x y 1000x. Se hacen análisis en cuatro zonas diferentes por cara, estos se promedian (las variaciones por zona no exceden el 15%).
5. Se analiza una muestra de 3 gramos de plata 925 certificada con el propósito de contrastar con las muestras a estudiar.

Medición de dureza

Para la medición de dureza se utilizó un microdurómetro marca Bühler modelo MicroMet 5114. Se realizaron, por muestra, 12 mediciones de las cuales se obtuvo el promedio de dureza vickers para cada. Se utilizó la norma ASTM A36.

Resultados y análisis

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al realizar los análisis elementales de las muestras sometidas a estudio y de un patrón específico de plata 925 certificada.

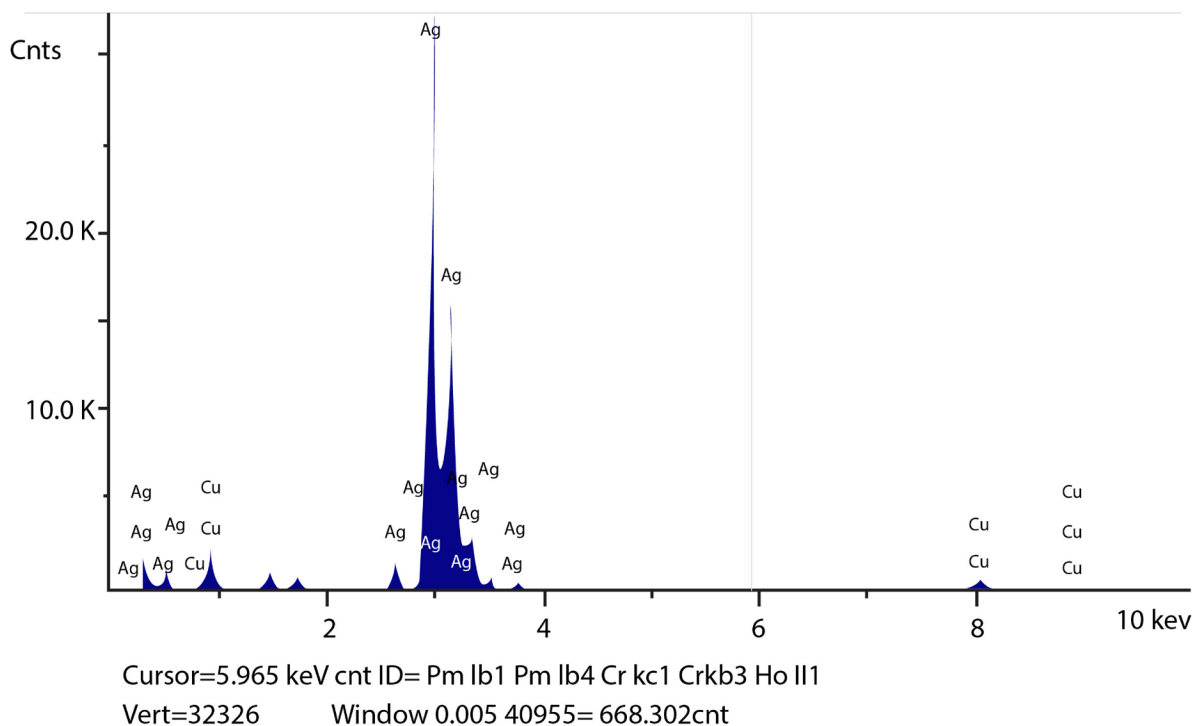
Tabla 6. Composición química promedio de material certificado plata 925 (SEM Hitachi 3700)

Elemento	% Total
Ag	92,495
Cu	7,505
Total	100

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que las variaciones en los porcentajes de cada elemento son inferiores a 0,006%. Es decir, la composición de la aleación de plata 925 utilizada para desarrollar los diferentes procesos de fundición presenta los porcentajes de plata (92,5%) y cobre esperados (7,5%). Lo anterior se puede verificar con el espectro correspondiente de rayos x, que se presenta en la siguiente figura.

Figura 5. Espectro de material plata 925, certificada. (SEM-Rayos X, Hitachi 3700)



Fuente: elaboración propia.

Con el fin de contrastar la composición de la muestra patrón, se obtienen las composiciones (SEM RAYOS X) de las muestras fundidas, con oxiacetileno (muestra 1), con oxipropano (muestra 2) y con horno eléctrico (muestra 3), las cuales se presentan en la tabla 7 junto con la plata 925 certificada (muestra 4). Se observan variaciones importantes entre los porcentajes de cobre (Cu), especialmente en las muestras fundidas con oxiacetileno y oxipropano y la presencia de carbono (C), lo que puede dar indicios de contaminación de la muestra debido a que este último se encuentra en mayor cuantía en la muestra 2.

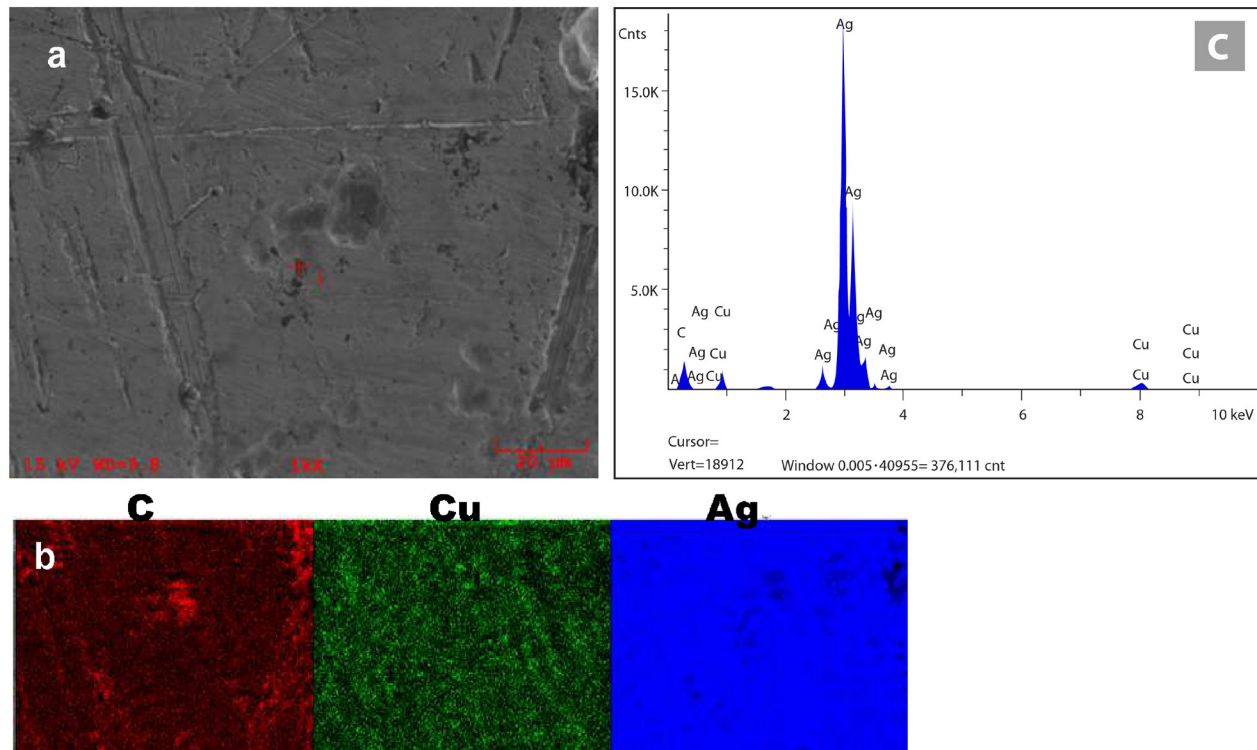
Tabla 7. Composición química de muestras de aleaciones de plata (superficie pulida) y plata 925 certificada (SEM Hitachi 3700)

Muestra	Concentración promedio (cara pulida)		
	%Ag	%Cu	%C
1 (fundida con oxiacetileno)	92,268	5,511	2,221
2 (fundida con oxipropano)	88,763	5 ,330	5,907
3 (fundida al horno 950 °C)	92,611	7,389	-
4 (plata certificada 925)	92,495	7,05	-

Fuente: elaboración propia.

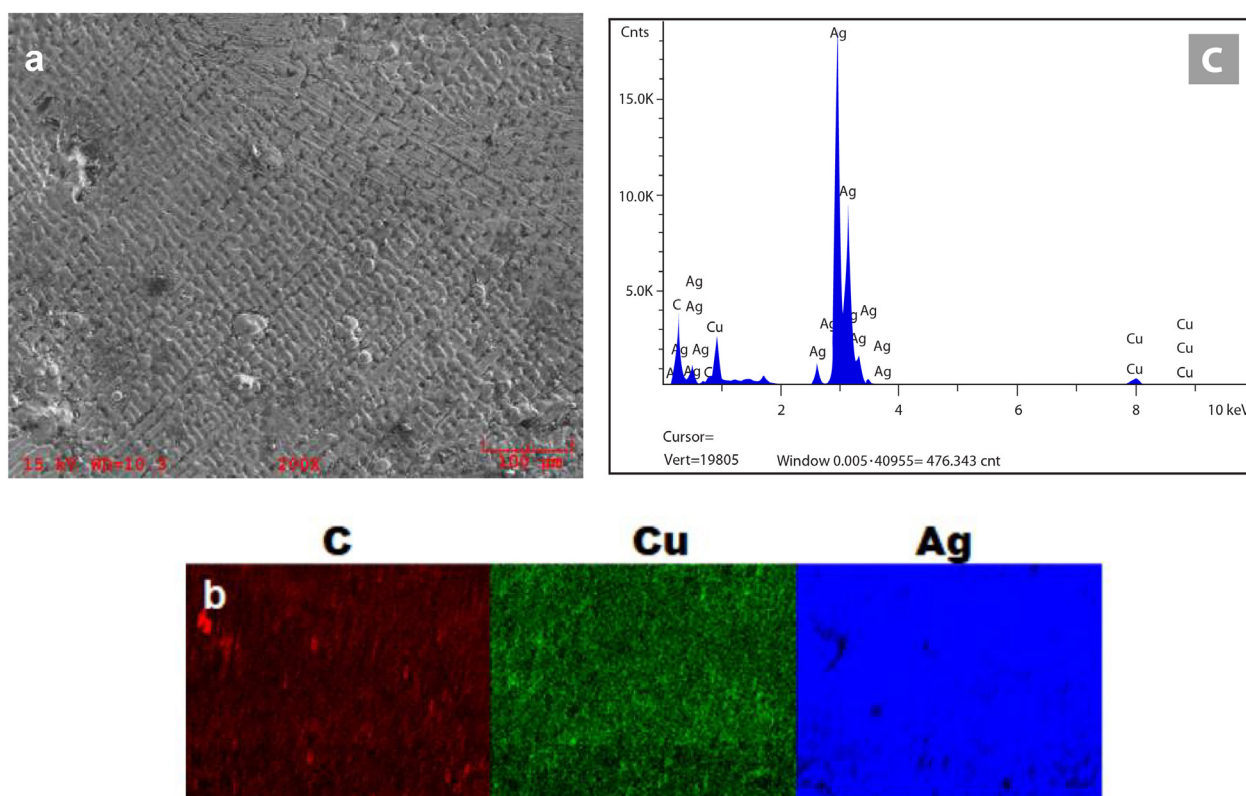
En las siguientes figuras se muestran los mapas de distribución de elementos y los espectros correspondientes para cada muestra con superficie pulida obtenida de la fundición. Sus composiciones varían con respecto a la muestra 4 (patrón certificado).

Figura 6. Aleación fundida con oxiacetileno, muestra 1 (SEM) microscopía electrónica de barrido rayos x), cara pulida. a) Imagen (200x) superficie pulida. b) Mapa de distribución de elementos en superficie de la muestra (carbono (C), cobre (Cu) y plata (Ag)). c) Espectro de composición química



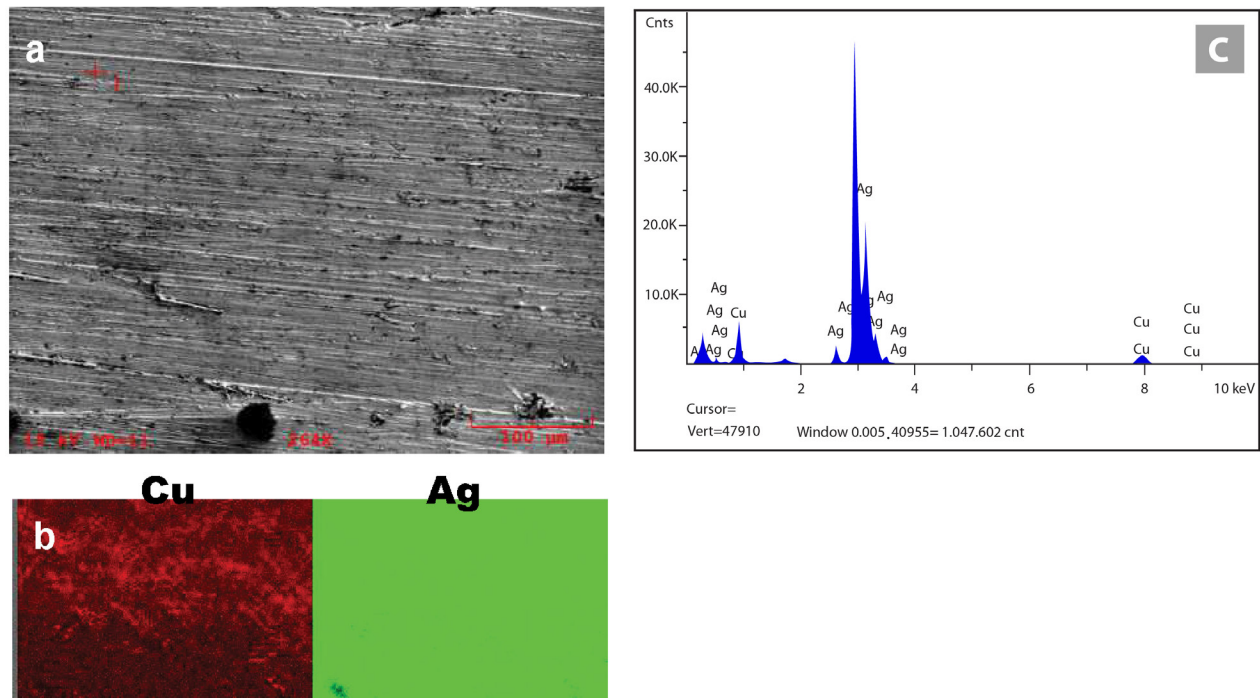
Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Aleación fundida con oxipropano, muestra 2 ((SEM) microscopía electrónica de barrido rayos x) cara pulida. a) Imagen (200x) superficie pulida. b) Mapa de distribución de elementos en superficie de la muestra (carbono (C), cobre (Cu) y plata (Ag)). c) Espectro de composición química



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Aleación fundida con horno eléctrico, muestra 3 (SEM) microscopía electrónica de barrido rayos x), cara pulida. a) Imagen (200x) superficie pulida. b) Mapa de distribución de elementos en superficie de la muestra (cobre (Cu) y plata (Ag)). c) Espectro de composición química



Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 7, hay variaciones de los porcentajes de plata (Ag) y cobre (Cu) en las muestras 1, 2 y 3, en comparación con la muestra 4 correspondiente a plata 925 certificada. Esto puede indicar imprecisiones en el proceso de pesaje de los elementos que conforman estas aleaciones. Por otro lado se evidencia la presencia de carbono, en las muestras 1 y 2, las cuales como se indica fueron fundidas con oxi-acetileno y oxi-propano, respectivamente, esto conduce a pensar en procesos de combustión incompletos, es decir se dio un faltante de oxígeno en cada uno de estos procesos de combustión. En este sentido se debe resaltar que en el caso de la muestra 2 casi se triplica el porcentaje de carbono con respecto a la muestra 1. Nótese además que para la muestra 3 no se detecta carbono en su composición, lo que identifica a este como un proceso limpio. En cuanto a la distribución del cobre en las superficies de las muestras 1, 2 y 3, de acuerdo con las figuras 6b, 7b y 8b se denota uniformidad parcial en las tres superficies analizadas.

Dureza

Superficies pulidas

Para las superficies pulidas, en la tabla 8 se puede observar la variación de las durezas de acuerdo con el proceso de fundición. El material fundido con oxi-propano alcanza la mayor dureza HV 93 y la plata certificada 925 la menor dureza HV 75, la fundición hecha con oxi-acetileno alcanza HV 83 y la hecha por medio de horno eléctrico HV 78. Este comportamiento podría atribuirse al porcentaje de carbono que tiene cada muestra, ya que el cobre es un elemento que también incrementa la dureza, pero como se puede notar se encuentra en porcentajes similares en las muestras 1 y 2 (ver tabla 7).

Tabla 8. Dureza Vickers (HV) en muestras de aleaciones de plata-cobre y plata 925 certificada (*Microdurómetro* Büehler, MicroMet 5114)

Muestra	Dureza Vickers Promedio (Superficie pulida) (HV)	Dureza Vickers Promedio (Superficie No pulida) (HV)	Diferencia entre durezas (Δ HV)	% de Carbón
1 (fundida con oxiacetileno)	83	96	13	3,224
2 (fundida con oxipropano)	93	112	19	5,907

3 (fundida al horno 980 °C)	78	105	27	-----
4 (plata certificada 925)	72	-----	-----	-----

Fuente: elaboración propia.

Superficies no pulidas

En cuanto a la medida de la dureza realizada a las superficies no pulidas, esta se incrementa en todos los casos como se puede observar en la tabla 8 y en la figura 9, sin embargo, se notan mayores diferencias para el caso de la muestra 3, la cual fue fundida en el horno (ΔHV 27). Esto se podría asociar a la morfología del compuesto generado en la capa basal¹⁴ de la muestra y a la velocidad de enfriamiento de la misma, la cual no ha sido registrada. A continuación, se puede ver el gráfico comparativo de porcentaje de carbón (C)-Dureza (HV, ΔHV)-Proceso de fundición (figura 9).

Para el análisis de las superficies no pulidas (muestras 1, 2 y 3), se realizó el análisis elemental por medio de rayos X (SEM); que se presenta a continuación (tabla 9).

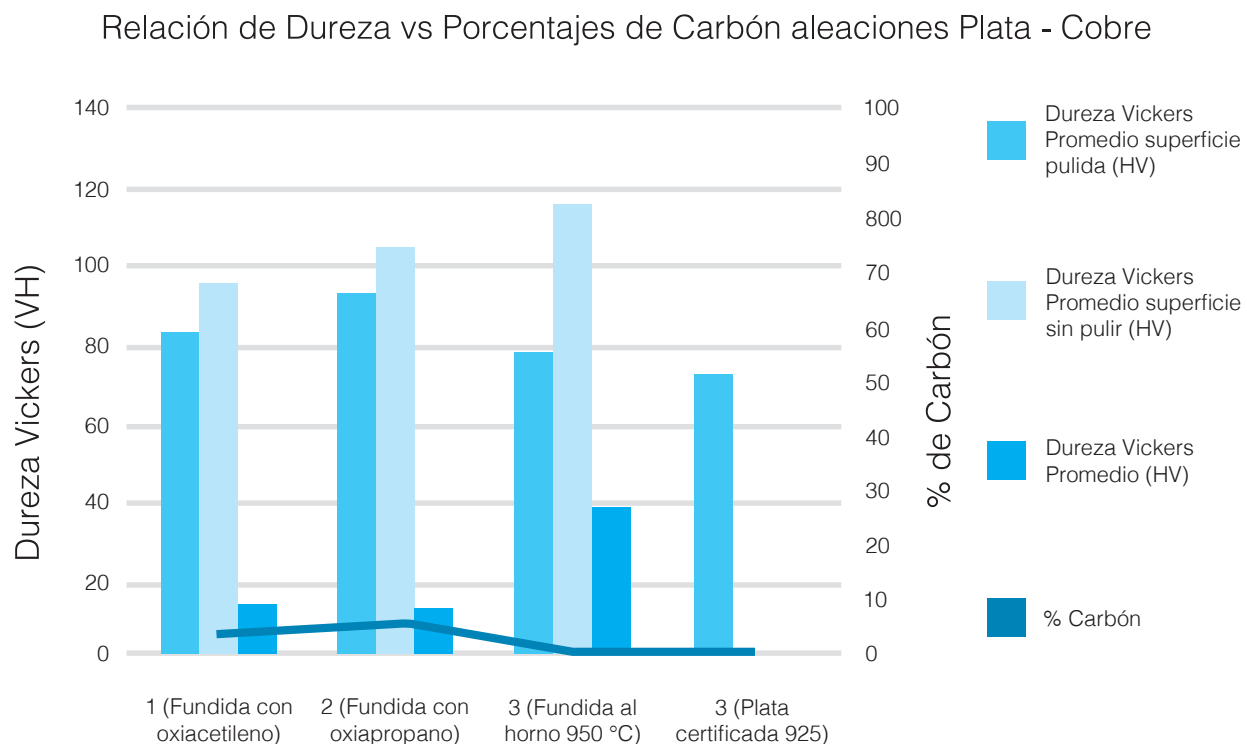
Tabla 9. Composición elemental superficie de muestras no pulidas

Elemento	Proceso de fundición		
	Oxiacetileno (%)	Oxipropano (%)	Horno (%)
O	25,044	22,099	13,252
Ag	2,466	17,548	3,531
Cu	71,390	55,840	81,597
Al	1,210	2,326	0,641
Si	0	1,929	0,974
Ca	0	0,257	0,005
Total	100	100	100

Fuente: elaboración propia.

¹⁴ Es la primera capa. La más profunda.

Figura 9. Gráfico comparativo de porcentaje de carbono- dureza Vickers según su proceso de fundición

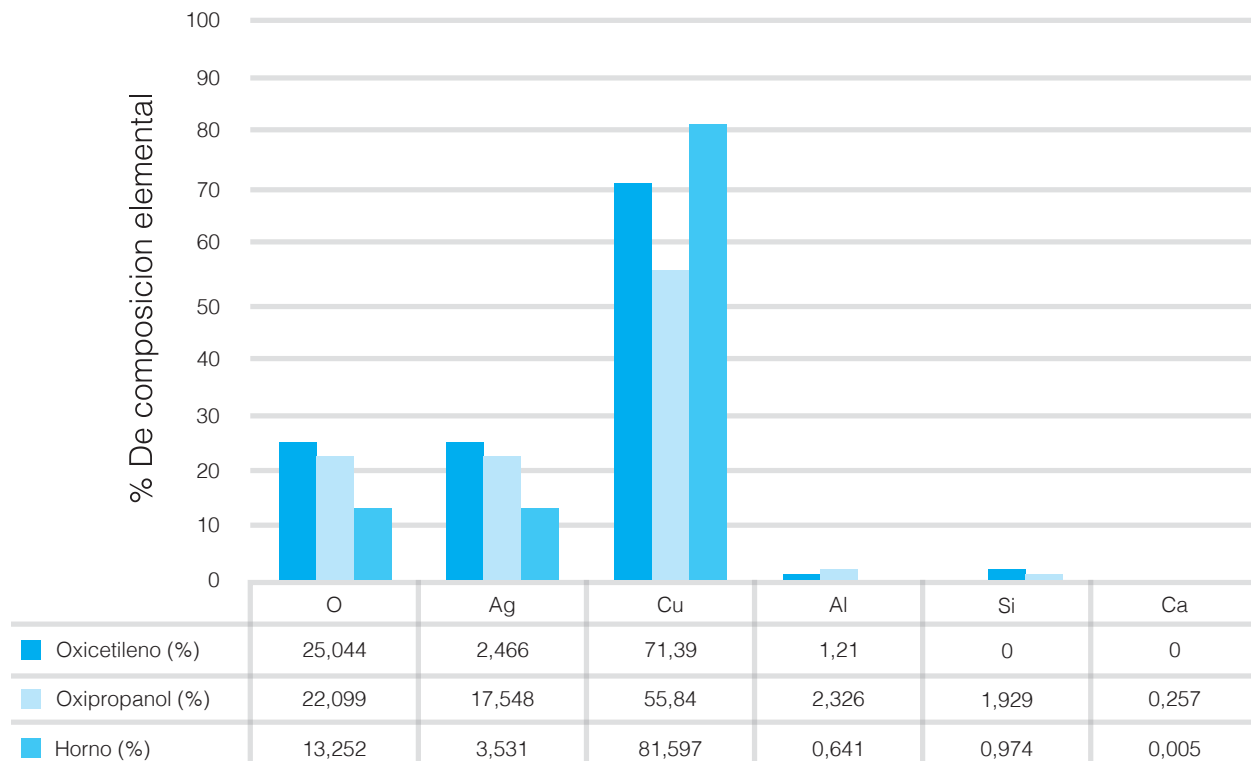


Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la *figura 10* y en la tabla 9 para la muestra 1 (fundición con oxiacetileno), la cantidad de oxígeno y cobre detectados en esta son mayores en comparación con la muestra 2. En la misma figura, también se puede observar que en la muestra 3 se presentaron mayores porcentajes de cobre en comparación con las muestras 1 y 2. En cuanto a la presencia de aluminio, se detecta en proporciones bajas para todas las muestras en el rango de 0.6% y 2.4%. Además, se detecta silicio y calcio únicamente para las muestras 2 y 3.

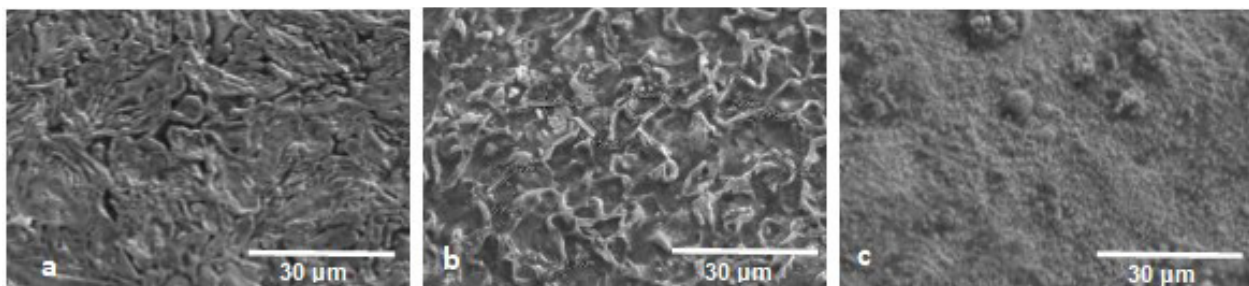
En la *figura 11*, se presentan las texturas superficiales correspondientes para las muestras estudiadas. En la muestra 1 (*figura 11a*) y 3 (*figura 11b*) se develan estructuras imbricadas de apariencia plana y multinivel respectivamente; mientras que para la muestra 2 (*figura 11c*), la superficie es de tipo granular compacta. No se observa en ninguna de las muestras la superficie basal.

Figura 10. Gráfico comparativo de composiciones químicas, por muestra (Análisis elemental)
Análisis elemental de la superficie de muestras 1,2,3 sin pulir



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Micrografías texturales de capas de óxido generadas en los procesos de enfriamiento de la aleación plata 925 (SEM Hitachi 3700) a) Textura superficial capa de óxido generada sobre material fundido con oxiacetilénico (muestra 1), b) Textura superficial capa de óxido material fundido en horno eléctrico a 980 °C (muestra 3), c) Textura superficial capa de óxido material fundido material fundido con oxipropano (muestra 2)



Fuente: elaboración propia.

Asociada a la figura 12, se presenta a continuación la tabla de composiciones puntuales de las estructuras imbricadas observadas en la muestra 1 y 3.

Tabla 10. Análisis elemental puntual de estructuras imbricadas para de la fundición con oxiacetileno (muestra 1) y fundición con horno eléctrico (muestra 3)

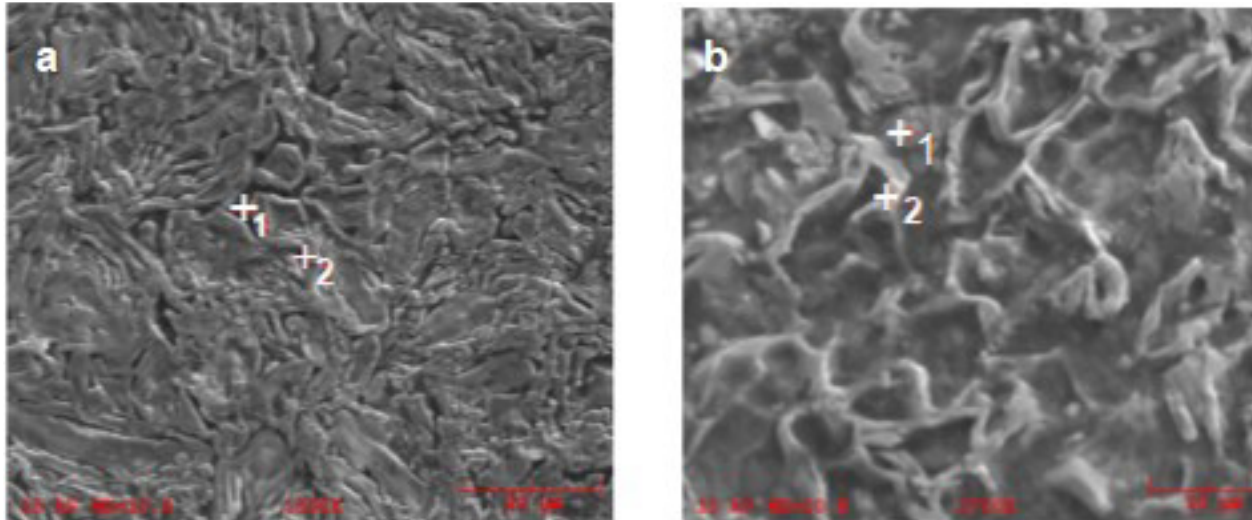
Elemento	Fundición con oxiacetileno		Fundición con horno eléctrico	
	% Punto 1	% Punto 2	% Punto 1	% Punto 2
Ag	42,304	0,597	0,843	0,229
Cu	15,240	69,385	16,719	68,539
Si	10,502	1,223	0,956	1,675
O	19,396	26,311	50,893	28,154
Al	12,559	2,484	30,451	1,083
Total	100	100	100	100

Fuente: elaboración propia.

Para el caso de la muestra 1 (figura 11a), las formaciones imbricadas están acompañadas por algunas segregaciones huecas que no permiten identificar la morfología de la superficie basal o matriz (secciones irregulares color negro). Según tabla 10 (figura 12a), estas segregaciones presentan dominio de composición superficial puntual de oxígeno (19,396%), plata (42,304%), cobre (15,204%) y aluminio (12,559%), mientras que en la superficie de las formaciones imbricadas planas el dominio de composición superficial puntual está en el cobre (69,385%) y el oxígeno (26,311%).

En cuanto a la masa de formaciones imbricadas multinivel que se observan en la muestra 3 (figura 12b), el dominio puntual se establece en el cobre (68,539%) y en el oxígeno (28,154%). Las superficies imbricadas aparentemente están superpuestas sobre una superficie basal o matriz homogénea, la cual presenta una composición superficial puntual con dominio de aluminio (30,451%), cobre (16,719%) y oxígeno (50,893%).

Figura 12. Superficies y puntos considerados para análisis por rayos X (SEM Hitachi 3700), superficies sin pulir muestras 1 y 3 a) Puntos de analizados muestra 1 (material fundido con oxiacetilénico), b) Puntos de analizados muestra 3 (material fundido en horno eléctrico a 980°C)



Fuente: elaboración propia.

Es así como la diferencia en las durezas detectada entre la superficie pulida y la superficie sin pulir se podría asociar no solo a la morfología de las estructuras encontradas, sino con la presencia de silicio, aluminio y cobre especialmente y a las velocidades de enfriamiento. En este sentido, la morfología de cada uno de estos compuestos va a depender de la cantidad de cobre (Cu%) que se encuentra en cada muestra, de la temperatura a la que fueron fundidos y de las velocidades de enfriamiento. Las estructuras más gruesas se pueden relacionar con velocidades de enfriamiento más bajas (estructuras imbricadas multinivel).

Crisol

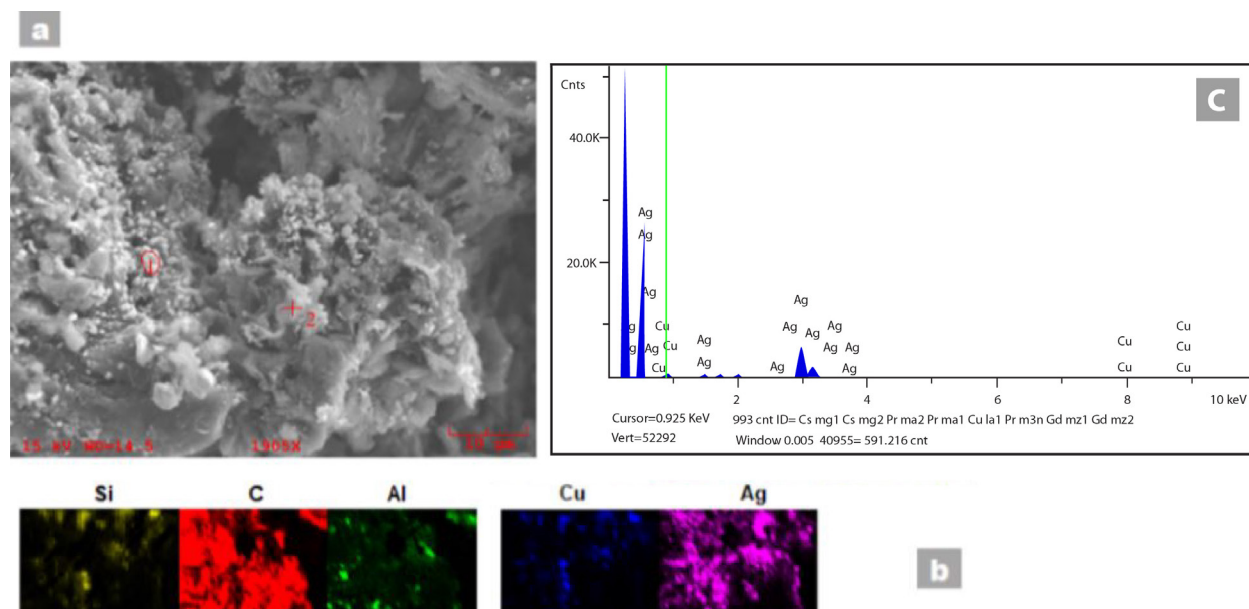
Por último, se hace el mapeo y análisis elemental para el crisol (tabla 11) con el propósito de determinar su morfología textural y fuentes de contaminación.

Tabla 11. Composición química de crisol (SEM-RAYOS X)

Elemento	Composición química del crisol		
	Crisol (%)	Punto 1 (%)	Punto 2 (%)
C	93,902	69,013	86,123
Ag	4,398	26,035	12,263
Cu	0,567	3,437	0,535
Al	0,301	0,924	0,345
Si	0,8320	0,591	0,725
Total	100	100	100

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Mapas representativos por elemento de composición química general del crisol empleado en fundición (Técnica (SEM) microscopía electrónica de barrido rayos x), a) Microestructura del crisol, b) Mapas de composición química c)Espectro, (SEM Hitachi 3700).



Fuente: elaboración propia.

En la superficie del crisol se detectan aluminio, cobre, silicio y plata, los cuales se relacionan con el compuesto que se deposita sobre la superficie basal de cada una de las muestras de superficies no pulidas. En la figura anterior (figura 13), se muestran las características del crisol, el mapeo superficial y el espectro. En cuanto a la morfología textural del crisol utilizado, esta es del tipo dendrítica arbórea, capaz de alojar restos de colada (figura 13a). Este proceso se evidenció con el análisis elemental realizado sobre la superficie interna del crisol, en el cual también se detectaron plata, aluminio, silicio y cobre en diferentes puntos, como se mencionó anteriormente. En las imágenes 13b y 13c, se muestran el mapa elemental y el espectro. Es evidente que el crisol utilizado para realizar las fundiciones de las muestras, había sido utilizado anteriormente para fundir otros materiales como aleaciones de aluminio, las cuales contaminaron el baño metálico de las muestras 1, 2 y 3.

Conclusiones

Como se menciona al inicio de este artículo, uno de los propósitos principales de los que parte esta investigación es evidenciar las complejidades del trabajo en orfebrería artesanal en el país. Por ello, para quienes participaron de este proceso, resultó de gran relevancia confirmar el alto grado de control que puede ser obtenido a partir de metodologías artesanales con técnicas tradicionales y equipamiento básico. A su vez, esto devela que se puede alcanzar un gran dominio de procesos complejos mediante el aprendizaje y el perfeccionamiento a través de la perseverancia en el tiempo.

Además, se pretende que los datos obtenidos en esta investigación sirvan a los mismos artesanos para conocer su trabajo a fondo y las tecnologías que permiten magnificar los resultados y hacer escrutinio de estos. También, se espera que los datos que se revelan en esta primera entrega sirvan de aporte para quienes trabajan en el campo de la orfebrería y otras áreas afines, de manera que puedan ser utilizados para ampliar las posibilidades de mejora en estos procesos. Con ese fin, a continuación se presenta una serie de recomendaciones para optimizar las características producto del proceso de fundición de la aleación de plata 925:

- Es indispensable conocer las temperaturas de llama y la cantidad de oxígeno que se aplica en el proceso de fundición, esto para evitar la deposición del carbono (C) en el baño líquido, elemento que propicia el ennegrecimiento conocido como *tarnish*. Para esto, el uso de termocuplas es indispensable.

- Se deben conocer las temperaturas y tiempos de trabajo durante todo el proceso de fundición, esto para poder diseñar ciclos adecuados para el proceso de conformación de las aleaciones, en los que se garantice la adecuada difusión de los aleantes y, así, reducir la generación de compuestos duros que contaminen la aleación y perjudiquen procesos posteriores como el de deformación. Se recomienda la preparación de protocolos, de manera que queden registrados todos los procedimientos y se presten para un proceso de mejora continua.
- Si se trabaja con horno eléctrico, se debe conocer la curva de temperatura de este. También es útil agitar el baño metálico cada cierto tiempo, con el propósito de propiciar una mejor difusión. Para esto se recomienda utilizar una barra de grafito, la cual contamina menos el baño. Se deben considerar rampas de temperaturas de remojo, para así garantizar una mayor difusión de los solutos.
- El uso de los crisoles debe ser limitado a una aleación específica, esto para evitar la contaminación del baño por contacto.
- El pesaje de los materiales se debe hacer con una balanza de precisión, para lograr la aleación deseada.
- Es indispensable verificar la procedencia del metal de trabajo. Se recomienda adquirir material certificado, ya que de esta forma se disminuye la probabilidad de alterar la conformación de una aleación determinada.

Referencias

- Barrientos, C. (2003). *Evaluación de dos métodos de recuperación y refinación de los metales preciosos a nivel de laboratorio a partir de los desperdicios con alto contenido de oro* (Tesis de grado). Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0847_Q.pdf
- Berry, W.; Brumbaugh, I.; Moulton, G. & Shawn, G. (1921). Design of Atmospheric Burners. *Technologic papers of the Bureau standards*, 193(1), 40-65.
- Capello, E. (1974). *Tecnología de la Fundición*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili S.A.
- Castellier, E. D. (1995). *Introducción a la ciencia e ingeniería de Materiales*. Barcelona: Editorial Reverte.
- Coddet, P.; Verdy, C.; Coddet, C. & Debray, F. (2016). On the Mechanical and Electrical

Properties of Copper-silver and Copper-silver-zirconium Alloys Deposits Manufactured by cold spray. *Elsevier*, 662(2),72-79. DOI: 10.1016/j.msea.2016.03.049

Corrales, F. (2005). Más de diez mil años de historia precolombina. En Ana María Botey Sobrado (coord.), *Costa Rica, estado, economía, sociedad y cultura: desde las sociedades autóctonas hasta 1914* (pp. 25-66). San José: Editorial de la Universidad de Costa Rica.

De Lacerda, L.D. & Salomons, W. (1998). *The Use of Mercury Amalgamation in Gold and Silver Mining. In: Mercury from Gold and Silver Mining: A Chemical Time Bomb. Environmental Science. Springer. Berlin: Heidelberg.*

Dieter, G.E. (1986). *Mechanical Metallurgy*. New York: McGraw Hill.

Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*. Edimburgo: John Wiley & Sons, Ltdv. / University of Edimburgh.

Finck, D. & Heumannskaemper, D. (2013). *Matching your crucible to your application*. Recuperado de <http://www.morganmms.com/en-gb/resources/technical-articles/matching-your-crucible-to-your-application/>

Flores, E. & Orellana, R. (2014). *Diseño y construcción de un horno de crisol para aleaciones no ferrosas* (tesis de licenciatura). Universidad de El Salvador, El Salvador.

Gómez-Díaz, D.; Mejuto, J.; Navaza, J. & Rodríguez A. (2002). Viscosities, Densities, Surface Tensions, and Refractive Indexes of 2,2,4-Trimethylpentane + Cyclohexane + Decane Ternary Liquid Systems at 298.15 K. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 47(4), 872-875. DOI: 10.1021/je010288n

Gómez-Díaz, D.; Mejuto, J.; Navaza, J. & Rodríguez A. (2003). Effect of Composition and Temperature upon Density, Viscosity, Surface Tension, and Refractive Index of 2,2,4-Trimethylpentane + Cyclohexane + Decane Ternary Liquid Systems. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 48(2), 231-235. DOI: 10.1021/je020064k

Grimwade, M. (1990a). A plain Man's guide to alloy phase diagrams: their use in jewellery manufacture-part 1. *WorldGold Council*, 29(1), 2-15.

Grimwade, M. (1990b). Melting, Alloying and casting. *World GoldCouncil*, 2, 5-10.

- Gutiérrez, F. (24 de agosto de 2008). Los joyeros de la virgen. *La nación*, 1-2. Recuperado de <http://www.nacion.com/proa/2008/agosto/24/proa1668276.html>
- Heine, R. W.; Loper, C. R. & Rosenthal, P. C. (1967). *Principles of Metal Casting*. New York, Estados Unidos: McGraw-Hill, Inc.
- Hernández, J.; Rivera, I.; Patiño, F. & Juárez, J. (2013). Estudio Cinético de la Lixiviación de Plata en el Sistema $S_2O_3^{2-}-O_2-Cu^{2+}$ Contenido en Residuos Minero-Metalúrgicos. *Información tecnológica*, 24(1), 51-58. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000100007>
- Hity, D. (1998). Electric Furnaces Process. *AIME*, 27, 52-56.
- Hosler, D. (1988). Ancient West Mexican Metallurgy: South and Central American Origins and West Mexican Transformations. *American Anthropological Association*, 90(4), 832-855, doi: 10.1525/aa.1988.90.4.02a00040.
- Iczkowski, R. & Margrave, J. (1961) Electronegativity. *Journal of the American Chemical Society*, 83(17), 3547-3551. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja01478a001>
- Jordan, L., Grenell, L. & Herschman, H. (1927). Tarnish resisting silver alloys. Department of commerce. *Technologic papers of the Bureau standards*, 21(348), 470-480.
- Lloret, G. (2010). *Los metales tóxicos en joyería y bisutería*. México: Instituto Tecnológico Metalmecánico.
- Lockwood, L. (1877). The practical gold-worked. *World Gold Council*, 7, 15-21.
- Mccloskey, J.; Welch, P. & Aithal, S. (2000). The effect of silicon desoxidation and grain refinement on the production performance of a 14 karat yellow gold casting alloy. *World Gold Council*, 30, 4-7.
- Muñoz, L. (2010). *La plata del rey y de sus vasallos: minería y metalurgia en México (siglos XVI y XVII)*. España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Escuela de Estudios Hispano-Americanos, Universidad de Sevilla.
- Muñoz, R. (2000). *Soldadura oxi-acetilénica*. Argentina: Universidad de la Plata.
- Ovares, S. (2018). *Examen de razonabilidad jurídica ante la prohibición absoluta del uso del cianuro y mercurio en el beneficio del oro en Costa Rica* (tesis de Licenciatura). Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

- Parga J. R. & Carrillo F. R. (1996). Avances en los métodos de recuperación de oro y plata de minerales refractarios. *Revista de Metalurgia*, 32(4), 254-261.
- Pero-Sanz, J. (2000). *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Madrid, España: CIE Inversiones Editoriales.
- Quintero, L.; Fernández, M. & Alonso, A. (2015). Procesos de obtención y evaluación de aleaciones preciosas base oro usadas en joyería. *Ingeniería USBMed*, 6(2), 15-23.
- Ramírez, J. (2004). *El beneficio de los minerales de plata por amalgamación* (tesis de grado). Universidad Autónoma de Zacatecas, México. Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/295053087/El-Beneficio-de-Los-Minerales-de-Plata-Por-Amalgacion>
- Rodríguez, G. & Rigueiro, J. (2015). *Manual de historia medieval Siglos III a XV*. Mar de Plata: Giem Mar del Plata.
- Salgado, G.; Navarrete, J.; Bustos, C.; Sánchez, C. & Ugarte, R. (2007). El concepto de equivalente químico y su aplicación en cálculos estequiométricos. *Educación Química*, 18(3), 222-227. DOI: 10.22201/fq.18708404e.2007.3.65952
- SunsTech. (2014). *Sterling Silver*. Recuperado de https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=silver_alloys
- Wicks, S. (1996). *Joyería Artesanal*. Madrid-España: Editorial Tursen/Hermann Blume.