

LAS ALEACIONES SUDAMERICANAS PREHISPÁNICAS DE Au-Pt DESDE LA CIENCIA E INGENIERÍA METALÚRGICAS

Guillermo Salas Banuet ¹, José Ramírez Vieyra ^{2*}, María Eugenia Noguez Amaya ³

¹ Ingeniero Químico Metalúrgico, Universidad Nacional Autónoma de México.

² Maestro en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

³ Maestra en Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

* E-mail: jgrv@unam.mx

RESUMEN.

Las aleaciones oro-platino usadas para fabricar objetos sagrados, encontrados en el área cultural Tumaco-La Tolita y fabricados entre el 300 a.C. y el 500 d.C., han llamado la atención de los profesionales de la arqueología, la metalurgia y la arqueometalurgia. Aunque existe consenso general en cuanto a la existencia de una diversidad de procesos para explicar sus microestructuras, aún existen discrepancias sobre su interpretación e implicaciones. En este trabajo se hace una revisión crítica de la mayoría de los estudios publicados sobre la manufactura por sinterizado -la producción de piezas de aleaciones metálicas calentando, sin llegar a la temperatura de fusión, modeladas por presión - de conglomerados de oro con hojuelas o polvo de platino (entre 2 y 0,044 mm aproximadamente), desde el punto de vista del paradigma de la Ciencia e Ingeniería Metalúrgica (CIM). Se introducen algunos conceptos de esta disciplina que ayudan a entender mejor las estructuras, el procesamiento (los métodos de fabricación), las propiedades y los comportamientos de estas aleaciones y se señalan los aportes que, según los propios autores, ha realizado cada grupo de investigación aquí presentado. Al analizar los diagramas de fases involucrados, los autores de este trabajo aportan una posible explicación respecto a la observación de la dureza y fragilidad de las partículas del platino y de las piezas.

Palabras clave: Arqueometalurgia, aleaciones oro-platino, cultura Tumaco-La Tolita, propiedades, microestructura, proceso, comportamientos.

SOUTH AMERICAN PRE HISPANIC Au-Pt ALLOYS FROM THE METALLURGICAL SCIENCE AND ENGINEERING

ABSTRACT

The gold-platinum alloys, used to make sacred objects, found in the Tumaco-La Tolita cultural area and manufactured between 300 BC. and 500 A.D., have drawn the attention of archeology, metallurgy and archaeometallurgy professionals. Although there is general consensus as to the existence of a diversity of processes to explain their microstructures, there are still discrepancies about their interpretation and implications. In this work a critical review of most of the published studies on manufacturing by sintering -the production of metal alloy parts by heating, without reaching the melting temperature, modeled by pressure- gold conglomerates with platinum flakes or sand (between 2 and 0,044 mm approximately) is made from the point of view of the paradigm of Metallurgical Science and Engineering (MSE). Some concepts of this discipline are introduced

that help to better understand the structures, processing (manufacturing methods), properties and behaviors of these alloys and indicate the contributions that, according to the authors themselves, each presented research group has made. By analyzing the involved phase diagrams, the authors of this work provide a possible explanation regarding the observation of the fragility of platinum particles and the hardness of the pieces.

Keywords: Archaeometallurgy, gold-platinum alloys, Tumaco-La Tolita culture, properties, microstructure, processes, behaviors.

1. INTRODUCCIÓN

Desconocidos por la mayoría, pero altamente estimados por quienes los conocen, los sorprendentes objetos de la orfebrería prehispánica fabricados con aleaciones Au-Pt entre los años 500 a.C. y 500 d.C. aproximadamente (Fig. 1), son productos culturales de un pensamiento sagrado de los grupos humanos del área Tumaco-La Tolita, los cuales habitaron el área conocida como Tumaco-Esmeraldas, ubicada en alrededor de 500 Km del litoral del océano Pacífico, al norte de Ecuador (provincia de Esmeraldas) y al suroriente de Colombia (departamentos de Nariño y Cauca). Hoy así los ubicamos, pero hace 2000 años no había países ni fronteras y aunque ahora se encuentren en museos del Ecuador o Colombia, continúan perteneciendo a los ingeniosos orfebres que los fabricaron.



Figura 1. Algunos objetos: a) Máscara zoomorfa articulada, oro, plata, platino y pedrería, Museo Nacional del Banco Central del Ecuador, Quito [1]. b) Pendiente, laminado con forma de felino, filigrana de oro entorchada y platino laminado, Museo Nacional del Banco Central del Ecuador, Quito [1]. c) Tapa de orejera con cabeza de ave, oro y platino laminado y repujado, Museo del Oro, Bogotá, Colombia [2].

Esos objetos -buscados y encontrados, fechados, coleccionados, analizados, expuestos en museos, por y gracias a los arqueólogos, y divulgados a través de la publicación de los resultados de los trabajos realizados sobre ellos, - han motivado múltiples preguntas que, con mayor o menor éxito, han intentado responder desde la visión particular de alguna de las otras ciencias académicas y/o desde alguna de sus disciplinas o subdisciplinas lo que, en ocasiones, puede dar resultados arbitrarios o ambiguos. Como ejemplo, para los metales y sus aleaciones, la metalografía es una subdisciplina de la metalurgia física, disciplina que pertenece a la Ciencia e Ingeniería Metalúrgica

(CIM)⁴ la cual, para funcionar correctamente, debe cumplir con su criterio, contenido en la interrelación de cuatro aspectos que enmarcan su actividad: 1. la estructura -en cualquiera de sus diversos niveles: electrónica, atómica, cristalina, microestructura o macroestructura- que incluye su relación con la composición química; 2. las propiedades, esto es sus características medibles, que se relacionan a los distintos niveles de la estructura; 3. los comportamientos derivados de las propiedades medidas y que se contemplan en dos aspectos: a) cómo se comporta el material durante su fabricación y b) cómo lo hace el objeto fabricado con el material, mientras se usa; y 4. el procesamiento (el método o conjunto de métodos de fabricación), a través del cual se le da una forma utilitaria al material y que, a su vez, modifica la estructura. Cuando se trata del estudio de aleaciones metálicas es fundamental enfocar las preguntas a la búsqueda de sus respuestas con la perspectiva de este criterio que, conforme sea satisfecho, ayudará a que otras ciencias planteen sus propias preguntas y encuentren sus respectivas respuestas, lo que facilitará la síntesis de mejores y más amplios significados.

En este trabajo se hace una revisión crítica de algunos estudios publicados sobre la manufactura por sinterizado de estas aleaciones, desde el punto de vista del paradigma de la CIM, con el objetivo de rescatar, señalar, comentar y complementar algunos aspectos de los diferentes trabajos publicados sobre las aleaciones ecuatorianas y colombianas Au-Pt con el enfoque en su proceso de manufactura por sinterizado, dejando fuera las de recubrimiento.

2. UNA MUESTRA DE LA RELACIÓN CIM

2.1. Conceptos básicos

Bajo condiciones normales de solidificación, la estructura -llamada *de colada*- de todos los metales sólidos es cristalina; cerca del 90% de ellos tiene alguna de las estructuras Cúbica Centrada en las Caras, Cúbica Centrada en el Cuerpo o Hexagonal Compacta.

Todas las estructuras cristalinas son imperfectas, pues siempre habrá una enorme cantidad de defectos; son dos los principales, por el papel determinante que tienen en las modificaciones estructurales y de propiedades: A) las vacancias, lugares donde faltan átomos (el número aproximado de ellas en el Au, a temperatura ambiente, es de una por cada mil billones de átomos mientras que a 950 °C es de una por cada mil átomos), fundamentales para el proceso de difusión; además, las vacancias también cambian de lugar conforme lo hacen los átomos; como un ejemplo, se ha calculado que a esa temperatura se mueven 30,000 millones de veces cada segundo, mientras que a la temperatura ambiente lo hacen una vez cada 11 días; estos hechos indican que a mayor temperatura habrá una mayor difusión de los elementos presentes; y B) las dislocaciones, hileras de átomos desfasadas de su posición original en la red cristalina; una aleación ingenieril sin deformar, del tamaño de un terrón de azúcar, contiene diez millones por centímetro cuadrado, aproximadamente, o 100.000 km de líneas de dislocación, 2,5 veces el perímetro del ecuador; durante la deformación mecánica del metal sin calentar estos defectos se multiplican -un metal con 3% de deformación, puede incrementar su número de dislocaciones en 15 veces- e interactúan con la estructura cambiándola constantemente, así como a sus propiedades y comportamientos [3].

⁴ En realidad, el concepto es más amplio y corresponde a la ciencia e ingeniería de materiales. Se aplica aquí solamente a materiales metálicos.

2.2. El caso del oro puro

El objeto de oro más antiguo encontrado en la región, perteneciente a la cultura *La Tolita*, es una laminilla con forma de *F* -cuya longitud y anchura son 18 X 11 mm y un espesor máximo de 0.1 mm- la cual presenta dos perforaciones; está fechada entre los años 918 y 780 a.C. Los primeros de la cultura Tumaco son hilos delgados, fechados alrededor del año 300 a. C. Para ambos casos, el proceso de manufactura fue la forja (el martillado en frío) [4].

De todos los metales, el oro tiene el primer lugar de los mejores comportamientos maleable (significa que puede golpearse y extenderse en planchas o láminas o que se le puede dar otra forma, sin romperlo) y dúctil (significa que mecánicamente se puede extender en alambres o hilos), por lo que, durante su estiramiento, el porcentaje de aumento en su longitud deberá de ser linealmente proporcional al porcentaje de su reducción de área (dos propiedades), siendo la mayor longitud de hilo formado por unidad de masa del metal un coeficiente de la ductilidad.

En el caso de un gramo de Au, éste puede formar una hoja de $0,6 \text{ m}^2$ (6000 cm^2) con un espesor de $0,2 \text{ }\mu\text{m}$, aplicándole un proceso de martillado, o formar un alambre de 2,5 km de largo y de $10 \text{ }\mu\text{m}$ de diámetro, estirándolo con el proceso de trefilado, sin necesidad de ser recocido (calentado a relativas bajas temperaturas) pues no aumenta su resistencia durante su deformación en frío [5]. Las enormes ductilidad y maleabilidad se deben a dos aspectos: 1) a que la estructura cristalina del oro es cúbica centrada en las caras -los metales con esta estructura pueden deformarse inicialmente a temperatura ambiente, aunque una vez endurecidos deban de ser calentados para recrystalizar, con lo cual se puede continuar la deformación- la cual contiene 12 sistemas de deslizamiento - cuatro planos compactos (111) y tres direcciones de deslizamiento $\langle 110 \rangle$ - los cuales permiten que las dislocaciones presentes, formadas durante la solidificación, y las que se vayan generando, se muevan fácilmente o, dicho de otro modo, que la presencia natural de las dislocaciones inicialmente favorece una baja resistencia de los planos compactos a deslizar en sus direcciones preferenciales, con lo que el metal presenta una facilidad a ser deformado; y 2) al inexistente aumento de resistencia a ser deformado y, así, a la nula necesidad de ser calentado durante el proceso de deformación para recrystalizar (significa llevar al metal a un estado similar al inicial, de colada) cuya explicación no es clara, pero que podría deberse a que el oro tenga la imposibilidad de multiplicar sus dislocaciones, a que su temperatura de recrystalización sea la ambiental [6,7] o a que los granos absorban las deformaciones causadas por los deslizamientos de los planos, evitando las tensiones internas cuando se alcanza el punto crítico de resistencia mecánica. En otros metales, la deformación provoca un gran incremento en el número de dislocaciones que aumentan sus resistencias mecánicas, disminuyendo su plasticidad y aumentando su fragilización. Esto favorece la formación de grietas, debido a la acumulación de los planos que se *deslizaron* junto con las dislocaciones hasta los límites de los granos, que empujan a los granos vecinos y concentran entre ellos grandes tensiones, lo que puede llevar a que el metal se fracture. Cabe mencionar que el Pt es el tercer metal en cuanto a ductilidad y el sexto en maleabilidad.

3. LOS AUTORES Y SUS TRABAJOS

3.1. P. Bergsøe (1937)

El haber tenido a su alcance alrededor de 80 piezas de aleaciones Au-Pt prehispánicas, fue el mejor incentivo para que una persona como Paul Bergsøe aplicara toda su creatividad al observar, suponer, intuir, simular, deducir y escribir, en forma tan detallada, su folleto-libro *La Metalurgia y Tecnología del oro y el platino entre los indios precolombinos, de la región Tumaco- La Tolita*

[8]. Éste continúa siendo la referencia clásica en el tema. Para ese tiempo la metalurgia venía desarrollándose a pasos agigantados, tanto en equipo experimental como en conceptos y metodología, que él ya no tuvo a su alcance.

Dado que el proceso y los conceptos de la interdifusión estaban escasamente divulgados en su época, no es de extrañarse que Bergsøe, al referirse al método de fabricación de aleaciones Au-Pt, use las frases: *el oro fundido permea al platino y el platino se disuelve en la fusión de oro*, para referirse a un proceso que se conoce actualmente como interdifusión, que se realiza a nivel atómico entre los metales participantes y que puede usarse para formar aleaciones o para unir dos piezas. *La mezcla soporta ya golpes ligeros de martillo, especialmente en caliente... y mediante los golpes y el calentamiento puede llegar a la homogeneización.* Así, después de iniciarse la difusión favorecida con un metal en estado líquido (aquí, el oro), se termina la difusión entre ambos en estado sólido, ayudada con un trabajado mecánico, martillado en este caso. Él dedujo el proceso mediante la observación macroscópica de piezas pequeñas semiterminadas, Figs. 57-58 de su libro. Algunas de ellas mostraban a simple vista partículas de Pt embebidas en oro, otras tenían la apariencia de partículas de Pt puro. En el análisis químico, muy probablemente realizado por vía húmeda, se constataba la presencia de platino con oro y un poco de plata, según escribe. En su Tabla II, a un pedazo semiacabado le da la composición 16%Au, 3%Ag, 72%Pt, 0%Cu (en peso).

Aporta otras observaciones respecto a la materia prima del proceso: el contenido de plata en las piezas que analizó se encontró siempre dentro de las cantidades que acompañan usualmente al oro nativo (hasta 28%). Y con respecto al platino, establece que el natural contiene hasta 20% de otros metales: Ir, Pd, Rh, además de Ni y Fe, sin que haya reportado la realización de análisis a ninguno de estos dos elementos. Además, hace notar la presencia de cobre (0,5 a 50%) en algunas de las piezas con contenidos bajos de platino (0,2-12,3%) lo cual le sugiere que fue agregado intencionalmente para obtener una coloración de tinte rojizo.

En relación con las propiedades, Bergsøe hace notar que hay, al menos, 5 coloraciones: 1) Las doradas, compuestas mayoritariamente de oro. 2) Las de un dorado ligero, al que contribuye la plata. 3) Las de tonalidad rojiza, con contenidos altos en cobre. 4) Las doradas grisáceas, v. gr. 26%Pt, 1%Cu, 64%Au. Y 5) Las blancas, en aleaciones con 40-72%Pt cuya dureza, que es reportada como excepcionalmente alta, no es atribuida necesariamente al trabajado en frío sino a la presencia del platino. Bergsøe realizó simulaciones de aleaciones desde 0,5% hasta 40%Pt, con metales no nativos, las sometió a forja, deformación en frío y recocido. Sus resultados variaron al cambiar el contenido de los aleantes. En estado de recocido, las aleaciones presentaban una dureza Brinell de 174-201 y trabajados en frío de 201 a 270 -Tabla IV de su libro-. Un comportamiento que resalta es el de la fragilidad durante la forja con altos contenidos de platino, al grado de romperse las piezas, sin dar alguna explicación al respecto. Con esto, la relación que utiliza Bergsøe contempla la macroestructura, el procesamiento, las propiedades y el comportamiento, aunque de manera limitada, debido a la época en que vivió. El principal valor de su trabajo es haber tenido la visión de la metodología del proceso del sinterizado.

Con respecto a los objetos y al uso de piezas trabajadas con esas aleaciones, es notorio que él, como una gran mayoría de los investigadores, los clasifiquen en artefactos (utilitarios) y baratijas (ornamentales), olvidándose de que el ser humano, desde su inicio como tal en los grupos primitivos, es primordialmente religioso, como lo concluyen la mayoría de los estudios antropológicos actuales.

3.2. D. Scott (1980 y 1994 con W. Bray, y 2011)

Cuarenta y tres años después de la publicación de Bergsøe, Scott y Bray [9] muestran ya el uso de una técnica metalúrgica imprescindible: la metalografía. Explican el proceso de fabricación como un *sinterizado*, con una posterior *interdifusión*. Admiten la propuesta de Bergsøe como la más viable, esto es: colocar juntos los granos pequeños de platino y rodearlos con oro como material fusible y aglutinante. De allí, se llegaría a la aleación final mediante la difusión en estado sólido martillando en caliente.

Más adelante Scott [10], al observar las microestructuras, suyas y de otros autores, y relacionarlas con el proceso, admite que debe haber una amplia variedad de rutas para obtener estas aleaciones.

Se detallarán dos microestructuras que resumen el aporte significativo del trabajo de Scott. Una de las más reveladoras del proceso de fabricación es la mostrada en la Fig. 2, la cual pertenece a un fragmento de una pieza semiterminada de Tumaco-La Tolita, que se encuentra en el Museo Nacional de Dinamarca en Copenhague; es muy similar a alguna de las que Bergsøe describe como la que usó para desarrollar la idea del proceso de obtención de la aleación, al observar la macroestructura de la pieza de su Fig. 58.



Figura 2. Microestructura del fragmento de una pieza semiterminada encontrada en Tumaco-La Tolita (132x) [9–11].

La microestructura revela grandes partículas de platino rodeadas de oro o de una incipiente aleación de Au-Pt; se observa una de las partículas de platino un tanto fracturada y algo de oro o de aleación de oro, ubicada entre las partes remanentes. Esto dio origen a que Scott escribiera: *El efecto de la fusión y el trabajado es destruir estas partículas de platino en una fina dispersión de pequeños trozos globulares remanentes*; la extensión del fenómeno dependería de las características del trabajado, del tamaño de los granos de platino y de la temperatura. Esto se llegó a interpretar como una fractura física [12–13]. Relacionando esta microestructura con el comportamiento de la pieza, Scott [10] remarca que revela un primer paso hacia la obtención de la aleación que se sinteriza, al señalar que se encuentran grandes bloques o partículas de platino, porosidad muy visible y una dificultad al trabajarla si la masa sin alear no se *separa en pequeñas piezas*. Las piezas ya terminadas no deben tener poros ni grandes masas de platino para tener dureza, no fracturarse y resistir el desgaste si van a ser usadas como punzones, por ejemplo. Scott y Bray [9] proporcionan la composición química de la muestra en observación, determinada por microsonda electrónica: hay 3 áreas puntuales analizadas correspondientes a distintos aspectos de la microestructura: una, la de la partícula de Pt, con 85,26%Pt, 2,16%Rh, 7,19%Fe, 0,87%Cu, no se detectó oro ni plata;

otra, la de la aleación de oro con platino al inicio de su formación, 79,51%Au, 5,68%Pt, 8,98%Ag, 7,19%Cu, análisis de 1980 (o bien, 85%Au, 12.6%Ag, 2%Cu, en Scott 1994); una más de algún área notoria de inclusiones de Pt, 3,17%Pt, 40,23% Ir, 43,54% Os, 10,16%Ru. También establecen la importancia de la presencia del Fe en el Pt aluvial, al aportar otros datos, como la gran dureza (90-200 HV). Incluyen la composición de tres muestras de platino aluvial provenientes de tres regiones diferentes, donde se muestra que todas tienen platinoides (Pd, Rh, Ir) y Fe, entre 5,31 y 8,03%. Hacen una simulación en el laboratorio, de la aleación Pt-6%Fe con metales no nativos obteniendo una dureza elevada (130 HV) al trabajarla hasta con un 50% de deformación, sin reportar fractura. Relacionan este proceso de trabajado a la posibilidad de que el platino aluvial sin alear pudiera haber sido usado así por los prehispánicos como otra alternativa para obtener piezas.

Uniendo estos datos a la microestructura y al diagrama de fase de Au-Pt que se reporta, puede haber la siguiente interpretación: las partículas de platino, cuyo análisis se efectuó en el centro de la muestra sin haber evidencia todavía de la difusión del oro en ellas y que tienen hierro, rodio y cobre, son las que podrían fracturarse, la matriz de oro es una aleación de oro con poco platino ya difundido u oro nativo, todavía sin platino; mencionan que el efecto de la sinterización es producir una aleación Au-Pt como matriz de la aleación, que contenga partículas de platino. La dureza de la aleación se incrementa por la presencia del Fe y los otros aleantes inherentes al oro como son plata y cobre. Establecen que el color de las aleaciones Au-Pt puede variar del color oro al gris-amarillo y al gris blanco, de acuerdo al contenido de platino.

Otra de las microestructuras, la más reveladora del proceso de interdifusión, es la de la Fig. 3. Pertenece a una nariguera de origen desconocido, con el No. 4729 de la colección del Museo del Oro en Bogotá, Colombia. El análisis químico determinado por microsonda electrónica muestra 22%Au; 75.8%Pt. La fotomicrografía revela partículas redondeadas, distribuidas casi aleatoriamente dentro de una matriz de aleación de Au-Pt, sin porosidades y sin lograr apreciar con claridad el tamaño de grano de la matriz. Scott, después del trabajo de Handwerker et al. [14] realizado a 1100 °C, pensó que debió trabajarse a esa alta temperatura por el grado de difusión que presenta. De esta microestructura, que contrasta con la de la pieza semiterminada, deduce que debe haber una gran diversidad de procesos de sinterizado del oro y platino nativos que da lugar a un amplio rango de microestructuras. Admite que la fusión del oro pudo no haberse necesitado para iniciar la sinterización. Esto es, que la difusión pudo haberse realizado totalmente en estado sólido. Más adelante, M.E. Noguez, G. Salas y J. Ramírez [15] publicarían resultados en una simulación, mostrando que es posible obtener aleaciones Au-Pt por difusión en estado sólido, a una temperatura más baja.



Figura 3. Microestructura de un fragmento de nariguera de oro-platino sinterizado (790x) [10, 11].

El aporte de Scott es muy amplio, en la arqueología y las ciencias afines. También desarrolló el aspecto metalúrgico. Inicia su investigación tomando el proceso de Bergsøe, como base para interpretar las microestructuras, usando diversas herramientas metalúrgicas. Con el transcurso de los años, al ir enriqueciendo su conocimiento con sus propias investigaciones y las de otros, se abrió a la existencia de otras alternativas para el proceso de sinterizado sin partir, necesariamente, con el oro fundido. Relacionó la estructura con el procesamiento y con el comportamiento.

3.3. N. Bustamente, L. Garzón, A. Bernal y C. Hernández (2006)

Este grupo trabajó en dos aspectos: 1. Utilizó los análisis químicos semicuantitativos (por fluorescencia de rayos X) de un lote de 30 piezas del Museo del Oro de la región Tumaco – La Tolita, realizados por el Departamento Técnico Industrial del Banco de la República, en Colombia, agrupándolas por su color en: blancas, blanco-amarillas (con diferentes tonos de amarillo) y blanco rosadas, para tratar de encontrar una correlación y, con ella, mostrar la clara intención, por parte de los antiguos orfebres, de buscar colores específicos en las piezas; y 2. El grupo realizó ensayos experimentales con aleaciones Au-Pt y estudió comparativamente las microestructuras obtenidas con las de piezas blancas, por su alto contenido en Pt, buscando establecer las técnicas empleadas por los orfebres precolombinos.

Dentro del primer aspecto, al exhibir la composición química de las piezas, el grupo de trabajo presenta los valores de las relaciones entre contenidos de elementos, $(\%Pt)/(\%Au)$ y entre combinaciones de elementos, $(\%Pt+\%Ag)/(\%Au+\%Cu)$ y $(\%Au)/(\%Ag+\%Au)$, que los autores plantean como adecuadas para entender el color.

Para el caso de las piezas de color blanco, se señala -basándose en los contenidos de plata y de hierro- que fueron fabricadas con oro y platino aluvial. El grupo explica el color con la relación $(\%Pt+\%Ag)/(\%Au+\%Cu)$ que da un alto contenido relativo de elementos blancos, explicando que aportan color blanco a la aleación, aunque también, dicen, los contenidos de hierro y platinoides encontrados se atribuyen a su presencia en el platino aluvial [12]. Reporta, además, pequeñas fisuras en las piezas.

En materia de las piezas de color blanco-amarillas el grupo señala que, al igual que las blancas, se fabricaron con oro y platino aluviales y, en cuatro de ellas, con cobre añadido intencionalmente,

dos con 1% y dos con 4%. Se indica que el color amarillo se explica por la relación $(\%Pt)/(\%Au)$ cuyos valores oscilaron entre 0,2 y 0,8. Estas relaciones se asocian a una preselección de la cantidad de platino aluvial en la aleación que facilitará la obtención de un matiz amarillo. Es de notarse que poca cantidad relativa de Pt blanquea al Au.

Las piezas blanco-rosadas tienen que ver con la relación $(\%Pt+\%Ag)/(\%Au+\%Cu)$, cuyos valores están en un rango de 0,1 y 0,3, indicando bajos contenidos de metales inductores de blancura, al tiempo que los altos contenidos intencionales de cobre, entre 12 y 31% imparten los tintes rosados.

En relación con el segundo aspecto, ellos parten del procesamiento propuesto por Bergsøe y Scott, para ver el efecto del calentamiento. El grupo explica que hizo tres aleaciones con oro y platino aluviales -50%Au-50%Pt-; el oro conteniendo 17%Ag y el platino 8%Fe y platinoides, manteniendo la temperatura a 1100 °C, para mantener al oro fundido, durante diferentes tiempos: 10 minutos para una, 2 y 13 horas para las otras dos. El producto de la primera aleación *fue una masa de consistencia frágil y color no uniforme, en donde el oro fundido envolvía los granos de platino sin fundir*. El grupo indica que el análisis microestructural realizado reveló *dos fases, una amarilla homogénea que es la matriz [de oro] y otra blanca correspondiente a las inclusiones de platino en forma de granos grandes con fracturas y porosidad extensiva*. Se resaltan dos hechos: *El calentamiento fractura las partículas de platino (Fig. 4) y que, una vez rotas, comienza una disgregación desde la superficie de contacto del grano de platino hacia la matriz, en forma de pequeños glóbulos que se difunden dentro de la aleación de oro (Fig. 5)*.

El producto de las otras dos fue un botón amarillo pálido, cuyas sus microestructuras son similares a la primera: *“grandes poros y la matriz con inclusiones de glóbulos pequeños de platino disgregado*.

En el mismo sentido, a algunas de las piezas del lote se les realizó una metalografía. La Fig. 6 muestra la microestructura de una nariguera con 59%Au, 31%Pt, 3%Ag y 6%Fe, que, al *revelarla descubrió características propias del sinterizado de oro y platino. No se aprecian granos grandes de platino; los glóbulos indican la dirección de flujo del metal debido al trabajo a que fue sometida la pieza. La ausencia de granos grandes sugiere que el calentamiento para su elaboración fue prolongado*.

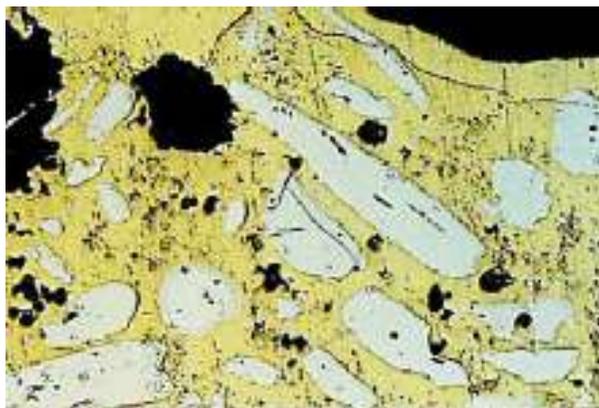


Figura 4. Microestructura de una aleación Au-Pt fabricada por Bustamante et al. (40x), calentada por 10 min [12].

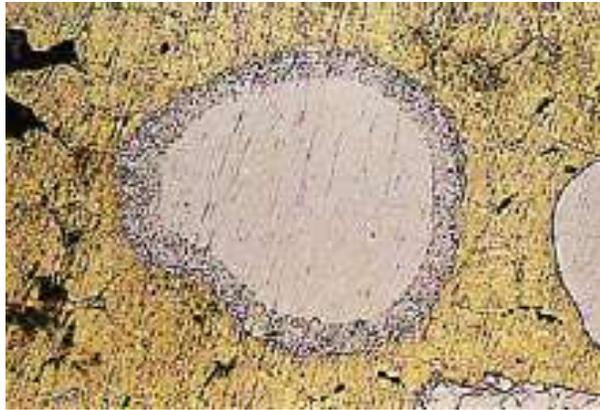


Figura 5. Detalle de la disgregación observada en la muestra de aleación Au-Pt fabricada por Bustamante et al. (400x), calentada por 10 min [12].

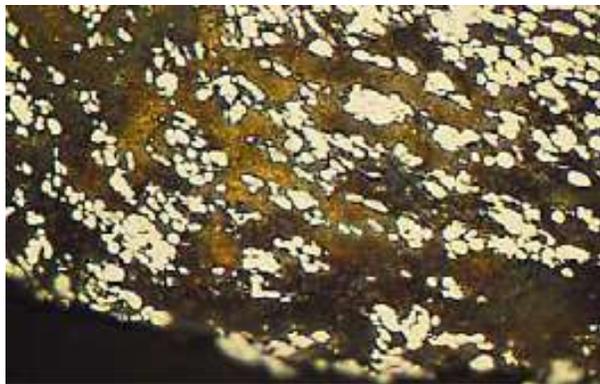


Figura 6. Microestructura de una nariguera mostrando la distribución del platino (100x) [12].

La segunda (Fig. 7) es de otra nariguera con 40%Au, 35%Pt, 7%Ag, 4%Cu y 5%Fe, su microestructura, además de las dos fases propias del sinterizado presenta la forma en que se rompen los granos de platino dejando pequeños glóbulos que migran dentro de la matriz, indicando con esto un tiempo de calentamiento prolongado. Se señala que en la aleación se encontró adición intencional de cobre [12].



Figura 7. Microestructura del fragmento de una segunda nariguera (100x) [12].

Para apreciar el efecto de la variación de la proporción relativa (%Pt)/(%Au) en la facilidad de efectuar trabajo mecánico, se hicieron mezclas con 70 y 80% de platino, después se calentaron durante dos horas (sin indicar la temperatura). La aleación que contiene 50%Pt, descrita anteriormente, presentó un botón de color homogéneo y con poca porosidad; en los casos con 70 y 80%Pt se obtuvieron superficies irregulares con algunas partículas de platino sin recubrir. La de 80% era muy frágil y se deshacía muy fácilmente. Se señala que, en las piezas de la colección analizada, el máximo contenido de platino encontrado fue de 47% en una pieza blanca.

El efecto de la cantidad de trabajo sobre la aleación se evaluó con el botón mantenido 2 horas en el oro fundido para fabricar la aleación. Martillando en frío se redujo su espesor en 30, 50 y 70%, alternando con recocidos a 800 °C (Fig. 8). Al deformar hasta 30% el trabajo mecánico era absorbido por la matriz. A mayores deformaciones, las partículas de platino de tamaño más grande primero se orientaban y luego se aplanaban, se supone que no se fracturaron pues nada se menciona al respecto (Fig. 9); con las deformaciones mayores (50 y 70%) aumentaba la fragilidad y la dureza, deduciéndose que el trabajo admitido era muy poco. Se señala que se encontraron piezas del lote que mostraban gran cantidad de trabajo mecánico, por no tener porosidades, presentar una deformación fuerte (una lámina) y una marcada orientación en la dirección de flujo del metal.



Figura 8. Microestructura de un botón de aleación Au-Pt fabricado por sinterizado con oro líquido, con 30% de reducción de espesor (40x) [12].



Figura 9. Microestructura de un botón de aleación Au-Pt sinterizado con oro líquido con 50% de reducción de espesor (80x) [12].

Además de los otros aspectos interesantes de este trabajo, enriquece mucho la presentación de las composiciones químicas del lote de muestras y su relación con el color, así como las metalografías de algunas de ellas. Es de hacerse notar que los aspectos de la relación de la CIM fueron tomados en cuenta en varios casos. El enfoque principal estuvo en el procesamiento y su relación con las

microestructuras, aunque era deseable haber ampliado más el aspecto de las propiedades y su relación con los comportamientos. También es valiosa la observación respecto a que la máxima presencia de platino en las piezas antiguas es de 47%, lo que habla de lo expertos que eran los antiguos orfebres sudamericanos.

3.4. C. Handwerker, H. Letchman, R. Marineko, D. Bright y D. Newbury (1991)

Con el objeto de explicar cuáles procesamientos pudieron producir las microestructuras de las piezas arqueológicas, este grupo analizó algunos objetos de lámina martillada que les fueron prestados por el Museo Arqueológico del Banco Central del Ecuador [14]. Su interés fue encontrar la máxima temperatura que pudieron haber sufrido los objetos durante su fabricación y dilucidar si el oro fue fundido o no durante su elaboración.

Para lograr esto, observaron las microestructuras y la distribución de los elementos en las aleaciones de las piezas antiguas y las compararon con las correspondientes a las de piezas obtenidas por la simulación de dos procesos: 1. el sinterizado con fase líquida temporal, en el que el oro se funde pero vuelve a solidificar a medida que cambia la composición del líquido al formarse la aleación y; 2. el sinterizado en fase líquida, en el que el oro líquido está presente durante todo el proceso. Luego ubicaron las composiciones obtenidas en estas simulaciones sobre el diagrama de fases correspondiente para determinar las posibles temperaturas de fabricación.

El grupo encontró una gama de colores en los objetos antiguos. En su microestructura encontraron partículas de platino de tamaño y forma variable, dependiendo de la composición química de la materia prima y del grado de deformación del sólido sinterizado. También identificaron zonas de una interdifusión limitada entre la matriz rica en oro y las partículas de platino.

A diferencia de lo reportado por Bergsøe y por Scott, el grupo de piezas estudiado presentó una composición química más bien uniforme -determinada por espectroscopía de absorción atómica, promediando 70%Au, 15%Pt, 10%Ag y 5%Cu. La poca plata contenida por el oro hizo que se conservara el color amarillo, mientras que el platino presentaba algo de hierro e iridio, siendo de color blanco plateado. El cobre es el elemento con más variación en su ubicación: en algunos objetos estaba en la matriz de oro y en otros estaba uniformemente distribuido en todo el material.

La composición para la fabricación de piezas simuladas, 85%Au-15%Pt, se determinó tratando de reproducir las de los objetos antiguos, pero considerando los contenidos de plata y cobre en ellos como si fueran oro, argumentando la similitud que presentan los diagramas de fases Ag-Pt, Cu-Pt y Au-Pt. No consideraron las implicaciones que esto tiene sobre la difusión en estado sólido, ni el número y tipo de los componentes. Sus probetas consistieron en alambres finos de oro enrollados alrededor de un alambre de platino más grueso, que se torcieron y deformaron para conseguir piezas más compactas. La primera se calentó hasta los 1100 °C en 2 min, se mantuvo a esa temperatura por 3 min y se enfrió en agua. La segunda muestra fue calentada hasta 1200 °C en 2 min, mantenida a esa temperatura por 7 min y enfriada en agua. La microestructura de la primera pieza reveló las partículas de Pt y restos de dendritas con alto contenido de Pt dentro de granos de oro, los cuales tenían una composición de 3%Pt, cercana a la del líquido de equilibrio a esa temperatura. Recurrieron al diagrama de fases Au-Pt para explicar estos resultados. Indican que existen *varios procesos cinéticos* (difusión) que ocurren antes de alcanzar el equilibrio a esta temperatura: el oro se funde al alcanzar los 1064 °C y luego, mientras la temperatura se eleva de 1064 a 1100 °C, las composiciones del líquido y del sólido y las cantidades relativas de sólido y líquido cambian. Lo mismo sucede en el enfriamiento, hasta la total solidificación. Al equilibrio, las composiciones del

líquido y el sólido deberían ser de 3 y 6%Pt, respectivamente. A este proceso se le conoce como sinterizado con fase líquida transitoria. La segunda muestra presentó dendritas completas en su microestructura, cuyos bordes coincidían con los límites de grano (la estructura característica de las soluciones sólidas). Las partículas de Pt estaban rodeadas de una capa gruesa con composiciones entre 83 y 90%Pt en la interfase con las regiones de más bajo contenido de Pt. Las dendritas presentaron una composición máxima de 18%Pt mientras que la concentración del Pt en los espacios interdendríticos es, a lo mucho, de 2%Pt.

La microestructura y la distribución de oro y platino resultante para cada proceso son diferentes. Los autores remarcaron la presencia de la zona ancha en la que *el oro difunde en el Pt* (más bien, en la que interdifunden) que solo se presenta en la pieza llevada a los 1200 °C. Al calentar la muestra a esta temperatura, los autores explican que el oro se funde y las partículas de platino se disuelven hasta alcanzar las composiciones y cantidades relativas al equilibrio, a esta temperatura. Este proceso se conoce como sinterizado en fase líquida.

Su aporte fue el haber utilizado dos temperaturas altas para el sinterizado y haber comparado el tipo de microestructuras obtenidas con las de las piezas antiguas y determinar que el posible procesamiento usado para fabricarlas se llevó a cabo a no más de 1100 °C y sin presencia de líquido. Con esto, este grupo de trabajo relacionó el proceso a la estructura, fundamentado en el uso del diagrama de fases.

3.5. M.E. Noguez, G. Salas y J. Ramírez (2006 con R. García, 2013)

Los autores se enfocaron en fabricar aleaciones oro-platino sinterizadas, como réplicas de las de oro-platino prehispánicas, usando metales de pureza comercial, con el objeto de ampliar las alternativas de modelos metalúrgicos empleados en su fabricación.

En el primer trabajo [13], se siguió el método de Bergsøe en la preparación de dos aleaciones, una de 60%Pt y otra de 12%Pt. Partieron de pedazos de oro y platino puros del tamaño de la arena: 0,023-2,0 mm. Después de la fusión del oro alrededor del platino, procedieron a trabajar las muestras combinando ciclos de forja en caliente y en frío con permanencia en el horno a una temperatura de 950°C, hasta conseguir el equilibrio bifásico en la aleación con alto contenido de platino (granos dorados de solución sólida con 30%Pt y partículas platinadas con 91%Pt) y la homogeneización como solución sólida en la otra (12%Pt). Usaron el microanálisis de rayos x en microscopía de barrido para dar seguimiento a la homogeneidad y el equilibrio (Figs. 10 y 11). Los tiempos totales empleados fueron 304 h con 1410 golpes en en la primera y 192 h con 240 golpes en la segunda. Se resalta que en ningún momento se observó la fractura en el platino ni tampoco las formas redondeadas de éste, reportadas en otros trabajos, por lo que se considera que estos efectos deben ser causados por los aleantes del platino aluvial. Los investigadores relacionaron estructura con procesamiento ayudados por el diagrama de fases binario.

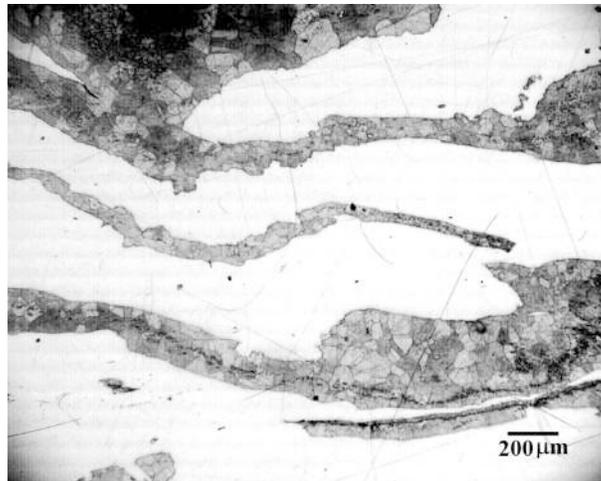


Figura 10. Microestructura de la aleación con 60%Pt, casi al final del tratamiento termomecánico (303 h y 1317 golpes en total). La solución sólida rica en platino aparece en blanco mientras que las grises corresponden a la solución sólida rica en oro [13].

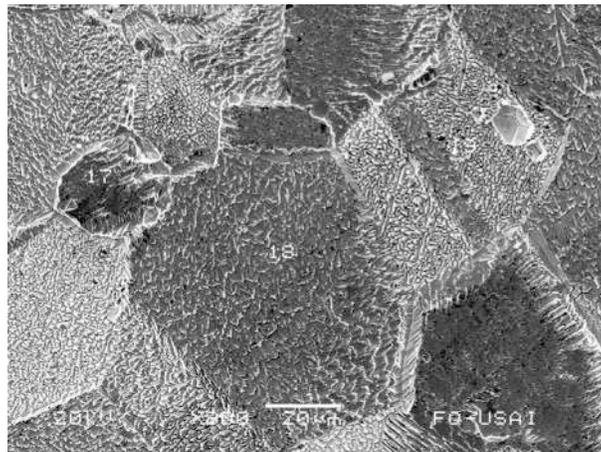


Figura 11. Microestructura de la aleación con 12%Pt después del tratamiento termomecánico (192 h y 240 golpes totales). Se observa una sola fase, la solución sólida rica en oro [13].

En el segundo trabajo [15] estudiaron el método de fabricación por sinterizado y otros de recubrimiento o bimetálicos, como en la sinterización de oro con platino y platino con platino, todo exclusivamente en estado sólido a 950 °C y con tamaño de partícula similar al del trabajo anterior. Los autores proporcionan fundamentos teóricos para considerar la difusión en estado sólido como un método de procesamiento adecuado. Respecto al sinterizado oro-platino, reportan el desarrollo exitoso de la aleación de 18%Pt, mediante ciclos de calentamiento-forja en caliente, sin rebasar los 950 °C. Se necesitaron 44 h con aproximadamente 200 golpes para alcanzar la homogeneidad macroscópica y el doble, 88 h, con 472 golpes, para alcanzar la homogeneidad microscópica (Fig. 12). Proponen este proceso como otro modelo alternativo para la fabricación de aleaciones Au-Pt prehispánicas. El trabajo se realizó también apoyado en microanálisis de rayos x en microscopio electrónico de barrido.

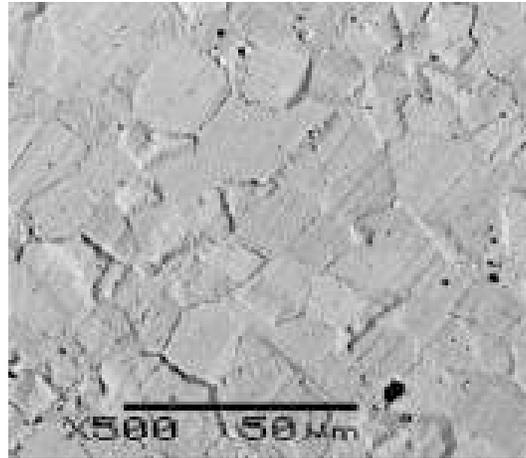


Figura 12. Microestructura de la aleación 18%Pt mostrando homogeneidad y algunas maclas. La pieza fue trabajada totalmente en estado sólido [15].

Estos trabajos relacionan estructura-procesamiento mediante bases metalúrgicas de la difusión y diagrama de fases. Su propuesta de sinterizado de oro-platino usando exclusivamente difusión en estado sólido fue corroborada experimentalmente.

4. NUEVA INTERPRETACIÓN, BASADA EN LOS DIAGRAMAS DE FASE, PARA LOS COMPORTAMIENTOS DE LAS ALEACIONES Au-Pt.

El oro y el platino puros son muy resistentes a la corrosión, lo que puede deducirse al ver que se ubican en el extremo de la tabla de valores de potencial de reducción estándar, en el grupo de los metales más inertes. Además, tienen una estructura cristalina cúbica centrada en las caras por lo que son dúctiles y maleables. Sin embargo, al alearse entre ellos la situación cambia, ya que al formar una solución sólida se incrementa su resistencia mecánica. Este tipo de diagrama (Fig. 13) es llamado isomorfo, indicando que el oro y el platino son solubles entre ellos al estar líquidos (área L) y también cuando están sólidos, área (Au,Pt); y que su microestructura -granos dendríticos equiaxiales- será similar para todas las aleaciones.

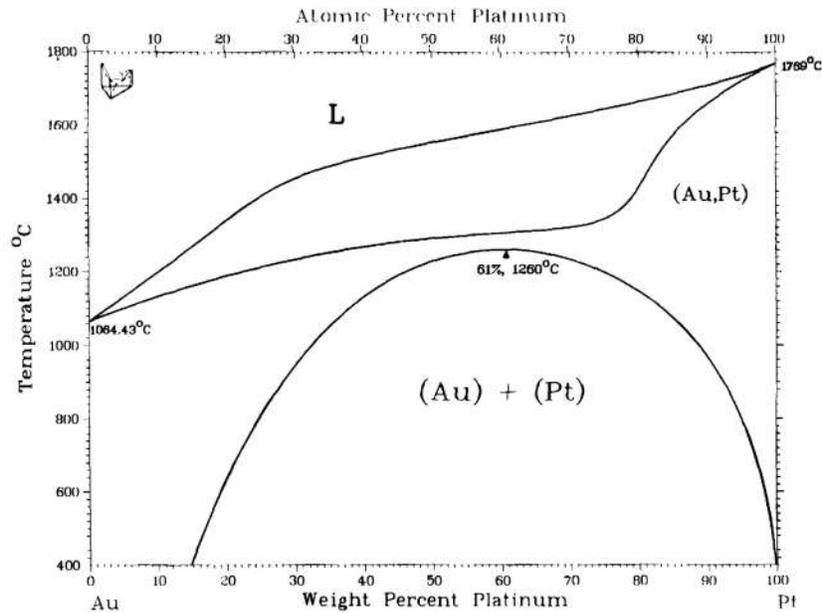


Figura 13. Diagrama de fases para el sistema Au-Pt [16].

La solubilidad entre estos metales representa la sustitución de átomos en la red cristalina del oro, por átomos de platino, si el oro está mayoritariamente en la aleación y, viceversa, si el platino es el mayoritario.

Sin embargo, el diagrama también indica -con una línea curva, como si fueran dos líneas de *solvus* unidas en un punto máximo que se encuentra en la composición de 61%Pt, a 1260 °C, muy cercano a la línea de *solidus*- que comienza una transformación que separará la solubilidad de la solución sólida (Au,Pt) para obtener dos fases en forma de granos equiaxiales, una solución sólida rica en oro (Au) y otra solución sólida rica en platino (Pt) -área (Au) + (Pt)- y que el rango de composición de estas va aumentando durante el enfriamiento, hasta abarcar desde 15 hasta 100%Pt. La línea indica que la estructura de cualquier aleación que la cruce durante el enfriamiento, sufrirá una interdifusión de átomos de oro y de platino para que unos granos se enriquezcan de oro y pierdan platino, mientras que otros se enriquezcan de platino y pierdan oro, para que al final de la transformación se obtenga una microestructura con dos tipos de granos en diferente proporción, dependiendo de la aleación. También se puede observar que dentro del área de la separación de la miscibilidad existe una línea discontinua, similar en forma a la de la separación de la solubilidad; esta indica la ocurrencia de una transformación llamada descomposición espinodal, llevada a cabo a nivel cristalino, cuyo producto solo es visible a través de microscopía electrónica de transmisión [17]. Para que se lleve a cabo, las aleaciones que la atraviesen deben de ser sometidas a tratamientos especiales, como los de endurecimiento y envejecimiento por precipitación. La descomposición espinodal es un resultado de la separación de la solubilidad, pero su estructura tiene características diferentes: presenta una mezcla homogénea de dos fases, con granos mucho más finos, lo que hace que durante la deformación las dislocaciones interactúen con ellos y se incrementen las resistencias mecánicas hasta llegar a la fragilización de la aleación, con la posibilidad de que se formen fracturas, si no se intercalan calentamientos de homogeneización a lo largo del proceso.

4.1. Las aleaciones Au-Pt con Cu, analizadas a partir de los diagramas binarios respectivos

Cuando las aleaciones Au-Pt contienen cobre se obtiene una solución sólida ternaria. El cobre también tiene una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo y forma una solución sólida total tanto con el platino (Fig. 14) como con el oro (Fig. 15). Si los tres pares de aleaciones forman diagramas isomorfos el diagrama ternario formado entre los tres elementos aleantes será un isomorfo ternario. Las soluciones sólidas ternarias presentan mayores resistencias mecánicas que las binarias.

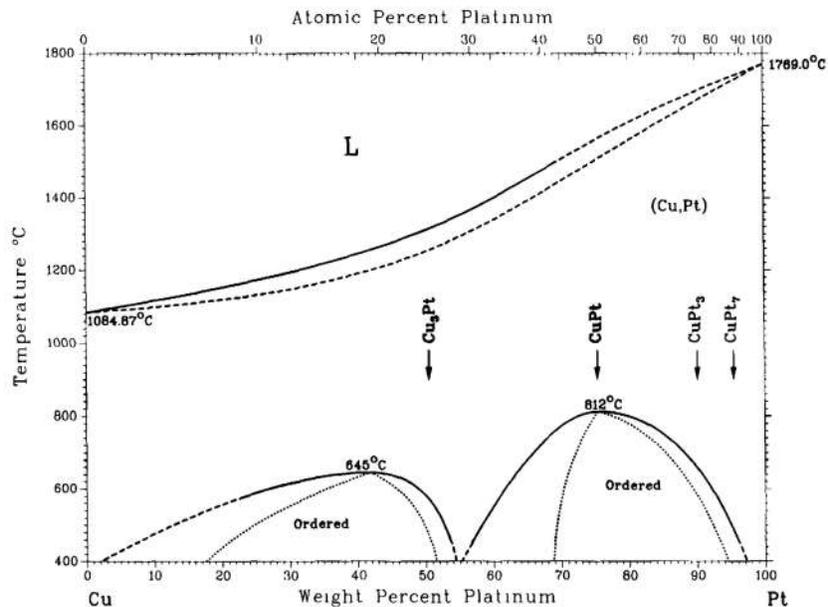


Figura 14. Diagrama de fases para el sistema Cu-Pt [16].

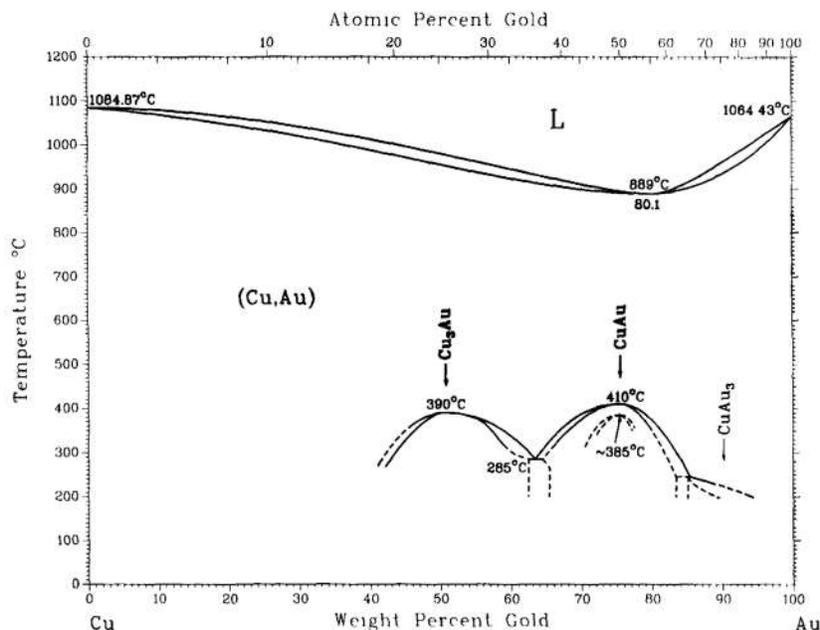


Figura 15. Diagrama de fases para el sistema Au-Cu [16].

Los diagramas binarios Cu-Pt y Au-Cu, a relativas bajas temperaturas, muestran transformaciones del tipo *orden-desorden*, las cuales dan por resultado compuestos llamados *superestructuras*. Para el primero (Fig. 13), durante el enfriamiento de la solución (Cu-Pt), la cual tiene sus átomos desordenados (al azar), las aleaciones que se encuentran en el rango de 10-50%Pt se ordenarán en el compuesto Cu_3Pt y las que se ubican en el rango 55-90%Pt, se ordenarán formando un compuesto CuPt . Para el segundo diagrama (Fig. 14) también, durante el enfriamiento de la solución (Au,Cu), la cual también tiene sus átomos desordenados, las aleaciones que se encuentran en el rango de 5-18%Cu se ordenarán en un compuesto Au_3Cu , las que se ubican en el rango 20-30%Cu, se ordenarán formando un compuesto AuCu y aquellas del rango 40-60%Cu, se ordenarán para formar el compuesto AuCu_3 . Si en ambos diagramas se lleva a cabo alguna de estas transformaciones, es alta la probabilidad de que, en la aleación, por lo menos alguno de sus compuestos esté en la microestructura; como ya se mencionó, los compuestos metálicos no tienen estructuras cristalinas simples, por lo que tienen pocos o ningún sistema de deslizamiento, lo que los hace duros y frágiles, endureciendo y fragilizando, a su vez, a la aleación. Por lo tanto, en las aleaciones ternarias, existirá la posibilidad de que existan compuestos binarios, ternarios o ambos, producto de las transformaciones orden-desorden entre los tres elementos, incrementando los efectos en el endurecimiento, la fragilización y la formación de grietas.

4.2. Las partículas de platino aluvial

Un aspecto tocado en varios de los trabajos presentados en esta revisión y que llama la atención, tiene que ver con los señalamientos de que las partículas de platino se fracturan durante el sinterizado o al estar en contacto con el oro líquido, de que varias de las figuras antiguas presentan grietas y de que el hierro endurece al platino, fragilizándolo y endureciendo a su vez a la aleación. Intentando encontrar aquí alguna luz sobre esos señalamientos, hay que tomar en cuenta dos aspectos; el primero es que el platino aluvial contiene aleados elementos platinoides (Ru, Rh, Os, Pd e Ir) y que su presencia lo endurece al interactuar con las dislocaciones; y segundo, que también contiene Fe. El diagrama de fases Fe-Pt (Fig. 16) presenta la formación de varios compuestos, superestructuras producto de tres transformaciones orden-desorden; entonces se usaron los resultados de los análisis químicos publicados en el trabajo de Bustamente *et al.* [12] respecto a los contenidos de hierro y platino para las piezas arqueológicas. Considerando que el hierro proviene casi en su totalidad del platino aluvial, se decidió calcular la relación (% Fe)/(%Pt) para las 28 aleaciones sin cobre. Una vez hecho el cociente, se calculó el %Pt equivalente que lo satisfacía (Tabla 1). Las aleaciones correspondientes se ubicaron en el diagrama Fe-Pt, encontrando que la mayoría de ellas, veintiuna, se encuentran en el rango de composiciones del compuesto FePt_3 ; dos en el del compuesto FePt ; tres en la zona de solución sólida con alto contenido de platino; y 2 en la de alto contenido de hierro. Igual que en el caso de los diagramas con Cu, en este diagrama se encuentran compuestos que pueden explicar también los aumentos en dureza y fragilidad reportados.

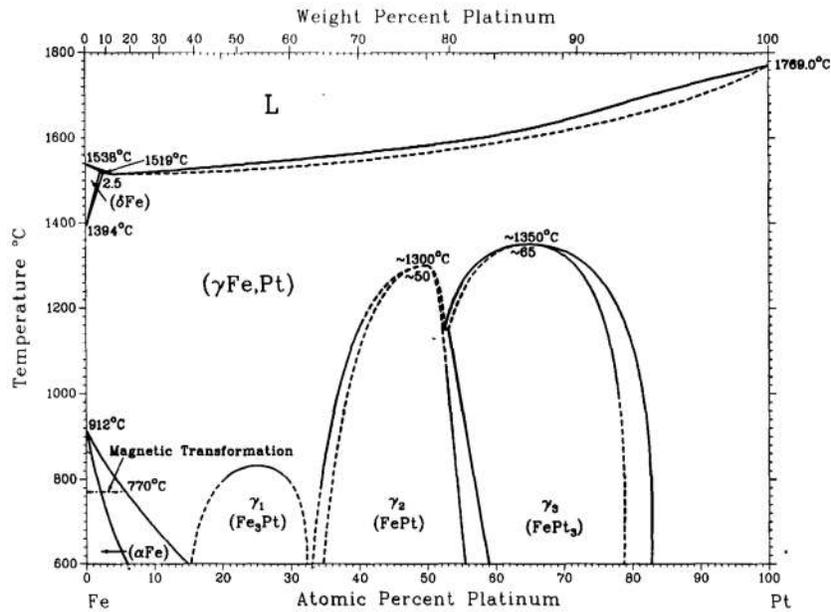


Figura 16. Diagrama de fases para el sistema Fe-Pt [13].

Entonces, la presencia de los productos de la transformación de la descomposición espinodal -las partículas muy finas de las soluciones sólidas de oro y de platino, al nivel de la estructura cristalina- como los de las transformaciones de orden-desorden -los distintos compuestos que pueden obtenerse entre los elementos presentes en las aleaciones Au-Pt, de manera natural o agregados por el hombre- permiten entender el gran incremento de las resistencias mecánicas, la fragilización y la fractura de las piezas formadas con estas aleaciones, señaladas en el texto.

Tabla 1. Relación (% Fe)/(Pt) para las aleaciones Au-Pt sin cobre, reportadas por Bustamante et al. [12].

Muestra	(% Fe)/(Pt) en la aleación	(Pt) equivalente*	Muestra	(% Fe)/(Pt) en la aleación	(Pt) equivalente*
MO22765	0,06	94	MO3387	0,17	85,5
MO2114	0,10	91	MO9515	0,07	93,5
MO5142	0,18	85	MO32841	0,16	86
MO5141	0,14	88	MO13719	0,19	84
MO20696	0,09	92	MO7021	0,06	94
MO19460	0,04	96	MO4729	0,09	92
MO29090	0,08	93	MO15788	0,14	88
Colección particular	0,24	80.5	MO18618	0,05	95
MO18619	0,12	89	MO 21840	0,11	90
MO2111	0,08	93	MO25152	0,05	95
Pieza S/N	0,07	93.5	MO33447	4,00	20
MO4725	0,29	77.5	MO02290	2,50	28,5
MO4291	0,07	93.5	MO29253	0,17	85,5

*Calculado a partir de la relación (Fe)/(Pt) en la aleación y transportado en %Pt al diagrama de fases.

5. COMENTARIOS FINALES

La ciencia e ingeniería metalúrgica, que se basa en la relación proceso-estructura-propiedades-comportamiento, es un camino necesario y adecuado para enfrentar el estudio de metales y aleaciones antiguas. El uso de esta relación alienta el uso de un pensamiento amplio, sin prejuicios, con el que se obtienen buenos resultados. Hacerlo en forma sistemática, con profundidad y minuciosidad, requiere de una labor multidisciplinaria, como lo es en sí el trabajo científico en nuestro tiempo. Estamos lejos de los tiempos de Bergsøe, en los que una sola persona con capacidad podía abarcarlo todo.

En este trabajo sobre las aleaciones Au-Pt, nos hemos quedado un poco alejados de mirar el conjunto y de tener suficientes fundamentos y datos, que aparentemente podrían parecer demasiado detallados -como la necesidad de realizar siempre análisis puntuales en la estructura, o el acudir a otras disciplinas o subdisciplinas no metalúrgicas para profundizar-. Los trabajos se han centrado más en la relación proceso y estructura, quizá visualizando levemente todavía la relación entre otras propiedades, como el color y la resistencia a la penetración, que con los comportamientos y los usos.

Estas aleaciones tienen mucho que contar sobre las culturas, las personas y las épocas en que se realizaron. Sabemos que hay más estudios realizándose y por realizar. Estamos todos, de diferentes nacionalidades y disciplinas dispuestos, con placer, a aprender y compartir lo que descubrimos.

6. REFERENCIAS

- [1] Tarjeta postal publicada por el Museo Nacional del Banco Central del Ecuador, Quito.
- [2] Banco de la República-Fondo de Cultura Económica, eds., “Museo del oro. Patrimonio milenario de Colombia”, Treviso, Skira, p. 50, 2007.
- [3] Benner, L., Suzuki, T., Meguro, K. and Tanaka, T. “Precious Metals Science and Technology”, USA: International Precious Metals Institute, 1991.
- [4] Valdez, F., Gratuze, B., Yépez, A. y Hurtado, J., “Evidencia temprana de metalurgia en la Costa Pacífica ecuatorial”. Boletín Museo del oro, Banco de la República, vol. 53, pp. 1-9, 2005.
- [5] Brady, G.S. and Clauser, H.R., “Materials Handbook”. 12th edition, Singapore, Mc Graw-Hill, pp. 366-368, 1989.
- [6] Ramsey, T.H., “Metallurgical Behavior of Gold Wire in Thermal Compression Bonding”. Solid State Technology, vol. 16, pp. 43-47, 1973.
- [7] Tawara, T., Y. Matsukawa, and M. Kiritani, “Defect structure of gold introduced by high-speed deformation”. Materials Science and Engineering A, vol. 350, pp. 70-75. 2003.
- [8] Bergsøe, P. “The Metallurgy and Technology of Gold and Platinum Among the Pre-Columbian Indians”. Ingenior Videnskabelige Skifter, No. A46, Copenague, DNKS, 1937.
- [9] Scott, D.A. and W. Bray. “Ancient Platinum Technology in South America”. Platinum Metals Review, vol. 24, pp. 147-157, 1980.
- [10] Scott, D. A., “The La Tolita-Tumaco Culture: Master Metalsmiths in Gold and Platinum”, Latin American Antiquity, vol. 22, No. 1, pp. 65-95, 2011.
- [11] Scott, D.A. and Bray, W., “Pre-Hispanic Platinum Alloys: Their Composition and Use in Ecuador and Colombia”, in Archaeometry of Pre-Columbian Sites and Artifacts David A. Scott and Pieter Mayers, Eds., Los Angeles, Getty Conservation Institute, pp. 285-322, 1994,
- [12] Bustamante, N., Garzón, L., Bonilla, Bernal, A. y Hernández C., “Tecnología del Platino en la Fabricación de Piezas de Orfebrería Precolombina”. Boletín del Museo del Oro, Banco de la República, vol. 54, pp. 26-45, 2006.
- [13] Noguez, M.E., García, R., Salas, G., Robert, T. and Ramírez, J. “About the Pre-Hispanic Au-Pt ‘Sintering’ Technique for Making Alloys”. *JOM*, vol. 58, pp. 38-43, 2006.
- [14] Handwerker, C.A., Letchman, H., Marinenko, R., Bright D. and Newbury. D. “Fabrication of Platinum–Gold Alloys in Pre-Hispanic South America: Issues of Temperature and Microstructure Control”. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc*, vol. 185, pp. 649-664, 1991.
- [15] Noguez, M.E., Salas G. and Ramírez, J. “Pre-Hispanic Au-Pt Alloys Experimental Simulation Using Solid State Diffusion”. *Journal of Metallurgical Engineering (ME)*, vol. 2, pp. 39-47, 2013.
- [16] Massalski, T., Ed. in chief. “Binary Alloy Phase Diagrams”, 1 ed. USA, ASM International, 1990.
- [17] Lughlin, D. and A. Soffa, W. “Spinodal Structures”. *Metals Handbook*, 9th ed, USA, American Society for Metals, vol 9, pp. 652-654, 1985,