



# La difusión en estado sólido y su papel en el trabajo de las aleaciones innovadoras de oro para aplicaciones en joyería

Por: María Eugenia Carmona Arango, Asdrúbal Valencia Giraldo y Jairo Ruiz Córdoba  
Docentes e Investigadores grupo Materiales y Preciosos- MAPRE



## RESUMEN

La difusión es el flujo natural de energía o materia desde una zona de mayor concentración a otra de menor, que sigue la tendencia de producir una distribución homogénea. Así la difusión en los sólidos empezó a modelarse a principios del siglo XX, con Fick como el gran pionero, pues reconoció que la difusión se podía describir con las mismas bases matemáticas que la ley de conducción del calor de Fourier o la conducción eléctrica descrita en la ley de Ohm (Askill, 1970).

En este caso, el fenómeno de la difusión fue utilizado para diseñar dos procesos en la producción de aleaciones de oro, uno de los objetivos principales del grupo de investigaciones en Materiales y Preciosos (MAPRE), en su labor de darle valor agregado a los metales preciosos que produce nuestro país.

Con el control cuidadoso de los procesos difusivos en la aleación, la fusión y el tratamiento termoquímico se logró la producción de gemas exóticas de oro, producto innovador a nivel mundial en proceso de patente. Fue determinante el tratamiento termoquímico de oxidación sistemática, donde los parámetros de la difusión fueron fundamentales, pues de acuerdo con la temperatura y el tiempo, determinados por las leyes del fenómeno mencionado, se lograron gemas de alto quilataje de colores hermosos, exclusivos o no tradicionales, productos únicos que se obtienen por primera vez. Esto constituye la primera parte de este trabajo.

La segunda parte se apoya, igualmente, en la aplicación de las leyes corregidas de la difusión en el estado sólido, con el fin de estudiar los parámetros principales de la antiquísima técnica japonesa conocida como Mokume-gane; ello con el fin de lograr la interacción y la soldadura de la plata y el cobre con el oro. Se experimentó con varios sistemas de láminas constituidas por combinaciones de plata - oro - cobre, de altísima pureza, a temperaturas entre 600 y

800 °C, tiempos de difusión entre 30 y 120 minutos y aplicando presiones a cada sistema entre 43,5 y 145 PSI, antes del tratamiento de difusión. Se obtuvieron placas perfectamente soldadas de los metales indicados, caracterizándose por SEM-EDS, metalografía y microdureza. Partiendo de los mencionados sistemas, fueron obtenidos varios prototipos o joyas de Mokume-gane, de alto valor agregado, innovadores desde el punto de vista del diseño y los materiales, combinados con gemas exóticas de oro de colores, como sustitutos o acompañantes de las piedras preciosas. Todo ello con el fin de interactuar con el sector joyero colombiano y potenciar su competitividad a nivel nacional e internacional.

**Palabras clave:** difusión; gemas exóticas; Mokume-gane; tratamiento termoquímico.

## ABSTRACT

Diffusion is the natural flow of energy or matter from a zone of higher concentration to another with lesser one, which follows the tendency to produce a homogeneous distribution. Thus, diffusion in solids started to be modeled during the XX century, with Fick as the great pioneer, since he recognized that diffusion could be described with the same mathematical basis as the heat conductivity laws of Fourier or the electric conduction described by Ohm's law.

In the present case diffusion phenomena was used to design two processes in gold alloy production; one of the main objectives of MAPRE group in its work of give aggregated value to the precious metals produced in Colombia.

With the careful control of the diffusion processes in alloy and melting and thermochemical processing it was possible to produce exotic gems of gold, globally innovative product, in patent process. Main part was the thermochemical treatment of systematic oxidation,



where diffusion parameters were capital, since according to temperature and time, determined by the laws aforementioned, high carat gems were obtained with beautiful and diverse colors, unique products obtained for the first time. This is the first part of this work.

The second part is also based in the application of corrected diffusion laws for solid state, with the aim of studying the principal parameters of the ancient Japanese technique known as Mokume-gane; this was done to obtain the interaction and welding of silver and gold. Work was done with several systems of high purity silver–gold–copper sheets, which were subject to temperatures between 600 to 800o C for times from 30 to 120 minutes under pressures between 43.5 and 145 Psi, before the diffusion treatment of each system. That way, perfectly welded plates were obtained which were characterized by SEM-EDS, metallography and microhardness. With those materials, several jewelry prototypes were made, with high aggregated value, very innovative in design and material, combined with exotic gems of colored gold, as substitutes of precious stones. All this in order to interact with the Colombian jewelry sector and strengthen its competitiveness at national and international level

**Key words:** diffusion; exotic gems; mokume-gane; thermochemical treatments.

## INTRODUCCIÓN

El oro es un metal con características únicas que brinda sensaciones de riqueza, estatus, prestigio y belleza. Apreciado por ser escaso en la corteza terrestre, por lo complejo de su extracción, intenso brillo metálico, resistencia a la oxidación y corrosión, y por ser el metal más dúctil y maleable que existe. Esta última propiedad hace imposible utilizarlo puro, por lo tanto, es necesario alearlo con otros metales que le proporcionen diferentes propiedades físicas y químicas, además de una variedad de colores tradicionales como amarillo, blanco y

rosado. También, mediante procesos de alta metalurgia con un alto componente de innovación se pueden obtener colores exóticos no tradicionales: amarillo intenso o dorado envejecido, verde, azul, morado, rojo, fucsia, magenta, entre otros. Estos colores varían según los aleantes agregados, la técnica utilizada, los procesos de enfriamiento y solidificación y los tratamientos termoquímicos implementados.

El grupo de investigación MAPRE, adscrito al Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales de la Universidad de Antioquia, ha venido trabajando en la línea de investigación y desarrollo que propende por agregarle valor al oro, en la cadena productiva oro-joya. Se han trabajado varios proyectos, donde se han obtenido y caracterizado varias aleaciones de oro de colores no tradicionales y diferentes texturas, con el fin de potencializar, acompañar y transferir estas tecnologías al sector productivo colombiano, mediante alianzas con el sector público, las agremiaciones de joyeros y los comercializadores de joyería fina.

Tanto el proceso de producir las aleaciones de colores innovadores como las aleaciones por la técnica del Mokume-gane, involucran alta tecnología y conocimiento metalúrgico, ya que para ello se utilizan ciertos elementos aleantes que no son compatibles electrónicamente con el oro. En este punto es donde se genera el gran reto de la investigación, pues logra transformar el tradicional color amarillo del oro, en el caso de las gemas exóticas, y consigue otras texturas y acabados en el caso de la técnica del Mokume-gane.

Las gemas exóticas de oro de colores provienen de aleaciones cuyo principal componente es el oro, más otros elementos altamente reactivos, los cuales permiten obtener las capas de óxidos superficiales coloreados. Las gemas fueron elaboradas y debidamente caracterizadas en los laboratorios de la Universidad de Antioquia.

La técnica del Mokume-gane permite obtener uniones por difusión de varios metales en estado puro, entre ellos, el oro, la plata y el cobre; para lograr esto fue necesario un estudio exhaustivo de los modelos matemáticos existentes para dicho tema y ajustarlos a las condiciones del proceso en estudio.

Actualmente, en Colombia no se trabajan estas aleaciones especiales de oro, fundamentalmente porque no son fáciles de obtener, pues requieren de tecnologías sofisticadas que garanticen atmósferas controladas y de un estricto seguimiento de todos los procesos de elaboración, además de sólidos conocimientos en metalurgia física.

El grupo MAPRE ha interactuado con el sector productivo de los municipios de Santa Fe de Antioquia y Medellín, tanto con los joyeros dedicados a la producción de joyas por la técnica de la filigrana como a la joyería lisa, y ha obtenido prototipos únicos y de alto valor agregado de gran aceptación por parte del público conocedor de joyería fina. Esto ha sido confirmado por un estudio de aceptación y mercadeo realizado por una firma especializada de la ciudad de Medellín.

## MARCO TEÓRICO

### Aleaciones de oro tradicional y no tradicional

Las aleaciones de oro forman una gran familia integrada por las tradicionales y no tradicionales. En este trabajo se desarrollaron algunas pertenecientes a las no tradicionales o innovadoras: las gemas exóticas de oro de colores y las aleaciones especiales obtenidas por la técnica del Mokume-gane.

Las aleaciones de oro de colores se clasifican en varias categorías metalúrgicas: solución sólida del sistema Au-Ag-Cu, compuestos intermetálicos y solución sólida del sistema oro (Au) más otros elementos reactivos, la

cual produce, al ser sometida a un tratamiento termoquímico de difusión, coloraciones hermosas y novedosas, por capas de óxidos superficiales; este es el caso 1 de este trabajo (figura 1). El caso 2 es la soldadura por difusión de varios metales entre ellos el oro, con el fin de obtener bloques compactos; estos se procesan mediante taladros y buriles para producir formas caprichosas que pueden ser geométricas o asimétricas, las cuales proporcionan, mediante laminación, la textura final del material (figura 3).

### ALEACIONES DÚCTILES Y FRÁGILES

Otra clasificación metalúrgica son las llamadas aleaciones dúctiles y frágiles, estas son definidas a continuación (Avner, 1974).

**Aleaciones dúctiles.** En este grupo se incluyen las llamadas convencionales, las cuales son muy maleables. Entre estas se encuentran las del sistema ternario Au-Ag-Cu y las obtenidas por la técnica Mokume-gane (caso 2 de este trabajo). Ambas son muy apropiadas para la industria de la joyería, por ser fácilmente deformables en frío. Se pueden obtener en tonalidades que van desde el amarillo propio del oro puro hasta el oro blanco, rosado y verdoso, y también con diferentes texturas y apariencias, como los jaspeados que se obtienen en el Mokume-gane. El contenido de oro varía desde 58,3 hasta 95,8%, es decir, de 14 a 23 quilates.

**Aleaciones frágiles.** En general, estas aleaciones ofrecen muy pocas posibilidades de forjado, laminado, trefilado y estampado. Pero, en muchos casos, permiten la obtención de piezas fundidas que pueden ser talladas, limadas y lapidadas. En esta clasificación se encuentran las aleaciones formadas por compuestos intermetálicos y las de capas de óxidos superficiales (caso 1 de este trabajo). Este grupo está conformado por las aleaciones de oro que tienen colores no convencionales o innovadores y que pueden ser utilizadas como piedras preciosas, lo cual de por sí se constituye en algo de gran

valor artístico, innovador, estético y comercial. Para el trabajo de estas aleaciones se necesita una tecnología apropiada y un gran control metalúrgico, ya que los elementos aleantes que se utilizan no son muy afines con el oro y esto genera algunos inconvenientes que hay que resolver con inteligencia y conocimientos de alta metalurgia.

### MATERIALES Y MÉTODO

**Caso 1:** la aleación de las gemas exóticas de oro de colores. Es importante resaltar que no hay información disponible sobre los tratamientos termoquímicos de difusión, procesos de deformación, tratamientos térmicos de alivio de tensiones y recocido, y el comportamiento de los diferentes elementos aleantes. Se abordó la búsqueda desde la literatura existente relacionada con aleaciones ferrosas, consultando en bases de datos, patentes, publicaciones electrónicas, libros, revistas, tesis y expertos en los temas de metalurgia física (Valencia, 1992).

**Caso 2:** las aleaciones obtenidas por la técnica de Mokume-gane. Sí se tienen antecedentes; en algunos países se trabaja de forma artesanal, sin tener ningún control metalúrgico de los procesos. En este trabajo se aplicó alta metalurgia para esta técnica, con base en las formulaciones matemáticas de la difusión, en los diagramas de fase para los diferentes sistemas y determinando las siguientes variables: temperatura, tiempo, distancia de difusión y concentración.

### PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE LAS DIFERENTES ALEACIONES

El procedimiento para la obtención de las diferentes aleaciones se describe en los siguientes ítems:

#### **Caso 1: gemas exóticas de oro de colores (productos en proceso de patente).**

**Selección de la materia prima:** para la preparación de la aleación estudiada, se debe partir de oro de alta pureza,

refinado químicamente. Asimismo, antes del proceso de fusión se analizaron los elementos aleantes por espectrometría de emisión óptica y fluorescencia de rayos X.

**Fusión de los elementos:** este proceso se realiza en un horno especial que garantiza la temperatura y la atmósfera adecuada, con el fin de prevenir la pérdida de masa; además, debe controlarse rigurosamente el enfriamiento y la solidificación de la aleación.

**Pulido de la aleación:** después de la fusión, la gema obtenida tiene una apariencia rugosa conocida en fundición como estado as-cast, por lo tanto, se debe obtener un acabado espejo mediante lapidación fina, utilizando para ello limas diamantadas, paños especiales y otras herramientas de joyería.

**Tratamiento termoquímico de difusión para obtener la coloración superficial:** una vez pulida la gema hasta acabado espejo, es tratada en una mufla a temperaturas y tiempos debidamente determinados, con el propósito de lograr las diferentes transformaciones por capas de óxido superficial y obtener así los diferentes colores innovadores.

**Caracterización de la gema:** esta etapa es de suma importancia, ya que se determinan las propiedades finales de la aleación, como microdureza, microestructura, color por espectrofotometría y composición química final por SEM-EDS y microcopelación.

**Recubrimiento final de la gema:** para proteger la coloración de la gema, se le aplica una resina protectora de alta densidad, completamente transparente, para garantizar su brillo en el tiempo.

#### **Caso 2: control difusional del proceso Mokume-gane.**

**Caracterización de la materia prima:** la materia prima utilizada para la obtención de los bloques es debidamente analizada por fluorescencia de rayos X, para garantizar una alta pureza de oro, plata y cobre.



**Obtención de las láminas:** los materiales antes descritos se laminan hasta un espesor de 0,5 mm y se cortan según las dimensiones preestablecidas, en este caso de 2 x 3 cm.

**Preparación de las láminas:** las láminas son recocidas a 200 °C durante media hora para aliviar las tensiones de los procesos anteriores, luego se lavan en soluciones ácidas para eliminar óxidos y suciedades.

**Montaje del sistema:** con la ayuda de un sistema de sujeción fabricado en acero inoxidable, se montan allí las láminas de los diferentes metales formando los sistemas deseados, por ejemplo Au-Cu-Ag-Cu-Au, se aplica la presión previamente determinada, según el espesor y área de las láminas.

**Tratamiento térmico de difusión del sistema:** el sistema es sometido a las temperaturas y tiempos determinados en los modelos matemáticos ajustados para las condiciones del proceso en estudio, con el fin de obtener los bloques o productos semielaborados (figura 3).

**Deformación del bloque:** luego de obtener el bloque, es sometido a perforaciones en diferentes sentidos y formas; posteriormente se procesa por laminación para obtener los acabados y texturas con apariencia de vetas.

**Fabricación del prototipo:** con la lámina lista se procede a la fabricación del prototipo o joya, que puede ser un dije, arete, anillo, etc. En la figura 4 se muestran algunas de estas piezas, las cuales fueron fabricadas por joyeros especializados de la ciudad de Medellín.

## ANÁLISIS Y RESULTADOS

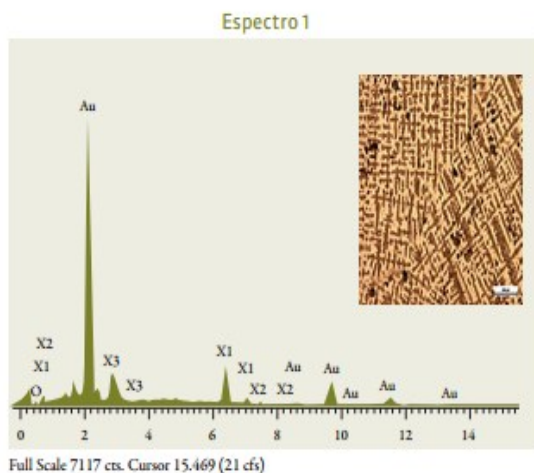
Mediante los diferentes tratamientos termoquímicos de difusión se obtuvo un hermoso abanico de gemas de oro de colores exóticos como azul, fucsia, verde, morado, rojo, magenta, que fueron engastadas en preciosas joyas de filigrana y de diseño liso, como se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Gemas de oro azul zafiro, rojo, verde, fucsia, azul cobalto y magenta, obtenidos por capas de óxido superficial en los laboratorios de la Universidad de Antioquia, engastados en prototipos elaborados por joyeros de Santa Fe de Antioquia y Medellín.

El análisis metalográfico revela la microestructura dendrítica obtenida en una de las muestras. Los análisis por microcopelación y SEM-EDS (figura 2 y 5) determinaron altos contenidos de oro, tanto para las gemas como para el Mokume-gane, en un rango de 18 a 22 quilates, lo que resalta la elevada finura de estas aleaciones. Las gemas producidas presentaron pesos constantes con relación al balance másico antes y después de la fusión, comprobándose el excelente comportamiento del horno especial de fundición y las buenas prácticas de operación en el proceso.

Igualmente, se realizaron ensayos para determinar el color mediante el análisis por espectrofotometría, estipulándose así los colores referidos. En relación a la microdureza, el valor promedio obtenido es de 134 HV, lo que corresponde a una estructura dendrítica (figura 2). Esto se ajustó a lo esperado según los elementos aleantes empleados y el proceso de solidificación.



**Figura 2.** Ensayo SEM-EDS y micrografía que muestra estructura dendrítica en una de las gemas de oro de colores.

En el control difusional para la técnica Mokume-gane fueron utilizados varios de los principios matemáticos, tales como: la segunda ley de Fick para flujos no estacionarios, la ecuación de Arrhenius, el efecto de Kirkendall y el análisis de Darken. Estos principios tratan sobre la variación del coeficiente de difusión con la temperatura y la concentración y la diferencia del flujo de átomos de un metal a otro. Se encontró que estos se ajustaron perfectamente en este trabajo experimental, obteniéndose muy buenos resultados. Es decir, se logró una soldadura perfecta por difusión de las diferentes láminas (ver figura 3), lo que permitió la elaboración de una muestra variopinta de prototipos únicos e innovadores, incluyendo un girasol con gema exótica de oro de colores (figura 4). Adicionalmente se presenta un ensayo SEM-EDS para el sistema cobre, plata, oro, cobre, obtenido por difusión (figura 5).

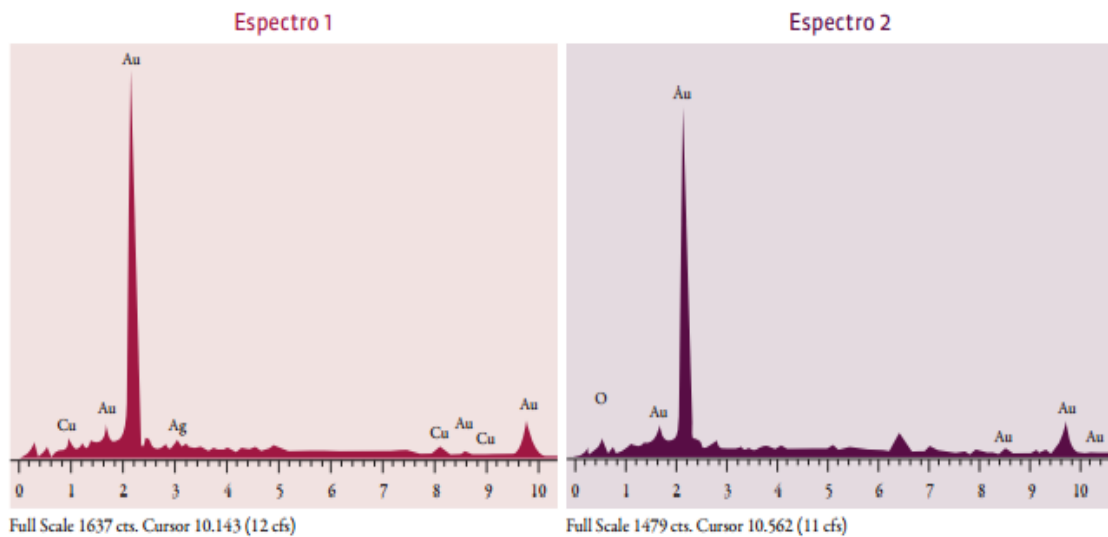


**Figura 3.** Bloques de metales oro-plata-cobre obtenidos por difusión, deformados y con los jaspeados correspondientes, listos para elaborar las piezas de joyería.



**Figura 4.** Prototipos de Mokume-gane elaborados por joyeros de Medellín, obtenidos de bloques soldados por difusión en los laboratorios de la Universidad de Antioquia.





**Figura 5.** Ensayo SEM-EDS para el sistema cobre, plata, oro, cobre, obtenido por difusión

## CONCLUSIONES

- Mediante procesos cuidadosamente controlados metalúrgicamente, se han logrado materiales de hermosa apariencia y excelentes propiedades químicas, físicas y mecánicas, que sin duda son un aporte no solo al mejor conocimiento y control de las aleaciones de oro, sino que, sobre todo, contribuyen a darle valor agregado a este metal noble.
- Las posibilidades de aplicación de estas gemas exóticas de oro apenas se están explorando y se espera que en el futuro inmediato, al obtenerse la patente correspondiente, impacte efectivamente la industria, los artesanos y la economía. Igual ocurre con la técnica del Mokume-gane para la obtención de los prototipos de joyería, únicos e innovadores.
- En todos estos procesos es esencial el fenómeno de la difusión, el cual fue estudiado desde su fundamentación matemática y adecuado a cada situación particular.
- Se abre un gran abanico de oportunidades dada la aproximación actual al estudio holístico de los minerales en nuestro país, especialmente los metales preciosos, máxime cuando se tiene el compromiso y el aporte de la Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, mediante investigaciones pertinentes y con calidad. Por lo tanto, las aplicaciones de los metales preciosos, tanto las tra-

dicionales como las innovadoras, se constituyen en un vasto mundo de oportunidades para el mejoramiento de la calidad de vida de nuestra sociedad.

## REFERENCIAS

1. Askill, John (1970). Tracer diffusion data for metals, alloys, and simple oxides. New York.
2. Avner, Sidney (1974). Introducción a la metalurgia física. 2ª edición. Tokio.
3. Valencia, Asdrúbal (1998). Introducción a la metalografía. Medellín.
4. Valencia, Asdrúbal (1992). Tecnología del tratamiento térmico de los metales. Medellín, pp. 432-433.

## SOBRE LOS AUTORES

- **María Eugenia Carmona Arango** es ingeniera metalúrgica, catedrática e investigadora del grupo MAPRE de la Universidad de Antioquia. Correo electrónico: meca5@hotmail.es
- **Asdrúbal Valencia Giraldo** es ingeniero metalúrgico, magíster en Ingeniería Metalúrgica e investigador del grupo MAPRE de la Universidad de Antioquia.
- **Jairo Ruiz Córdoba** es ingeniero metalúrgico, magíster en Ingeniería Metalúrgica y de Materiales, docente e investigador del grupo MAPRE de la Universidad de Antioquia.

Jairo Isaza Photographer by Pixel



• Taller y Joyería  
**El Diamante**  
*Una joya para siempre*



*Tradicción - Elegancia - Buen gusto*

Centro comercial el Diamante  
Calle 51 No. 73 - 120 Local 2424  
Tels. (4) 230 90 21 - 260 40 04 Cel. 317 640 69 44  
[www.joyeriaeldiamante.com.co](http://www.joyeriaeldiamante.com.co)



# DAYCUPER JOYAS

Asesoría Personalizada

La Empresa DAYCUPER JOYAS nació hace 40 años como producto del espíritu emprendedor de su propietario, el Sr. DAYRO H. CUADROS PEREZ.

Joyero empírico mayormente, pero en permanente búsqueda de capacitación en nuevas técnicas, cree en la fortaleza que dan las agremiaciones, por lo que ha pertenecido a Prodes, asociaciones y es cofundador de la actual Corporación Joyera Valle de Aburrá, (CORPOJOVA) de la Ciudad de Medellín.

Ha participado y sido finalista en varios concursos de diseño, debido a la calidad de sus innovaciones, además de obtener el Primer puesto en la rama de Joyería Fina, año 2013, con un diseño de los íconos representativos de Antioquia, joya que fue fabricada en Platino y Oro Puro, y tallada a mano por completo.

Certificado desde 2005 por ICONTEC y Artesanías de Colombia con el Sello de Calidad "Hecho a Mano".

Se trabajan los materiales: Platino, Oro, Plata, Titanio además de Piedras Preciosas.



[www.daycuperjoyas.com](http://www.daycuperjoyas.com)

Teléfonos: (4) 2601850 - 2603843 CITA PREVIA  
Calle 44A 68 A-21 / Barrio: Florida Nueva  
Email: [daycuper@daycuperjoyas.com](mailto:daycuper@daycuperjoyas.com)

