

Determinación de un sustituto mejorado de cera ferris en la elaboración de joyas, mediante variación de procesos y materiales

Determination of an improved substitute for ferris wax in jewelry elaboration, by variation of processes and materials

Ana Vásquez^{1*}, Jamila Fernández¹, Kevin Molina¹, José Miguel Cordero¹

¹ Centro de Investigación de Ingeniería en Producción y Operaciones (CIPO), Facultad de Ciencia y Tecnología. Universidad del Azuay, Av. 24 de mayo 7-77 y Hernán Malo, Cuenca, Ecuador

*anavasquez@uazuay.edu.ec

Recibido: 28-02-2018. Aceptado después de revisión: 30-05-2018

Resumen: Se plantea una modificación al método de moldeo a la cera perdida que busca superar algunas de las barreras existentes en la elaboración de joyas. Esta modificación propone sustituir la cera, como material del modelo en diseños de caras planas, por un material que pueda ser mecanizado por corte láser. Se analizó el tiempo de ejecución del proceso y la condición superficial de piezas, elaboradas a partir de modelos de acrílico, tablero aglomerado de fibras de madera (MDF) y tablero de madera de balsa. La condición superficial se estudió mediante análisis microscópico de imágenes. Con los resultados obtenidos se comprobó que el acrílico es el mejor sustituto de la cera permitiendo la reducción del tiempo de ejecución del proceso, mejora en la condición superficial y diversificación de diseños de caras planas.

Palabras claves: acrílico, automatización, cera perdida, joya, metalúrgico.

Abstract: This research proposes a change for the lost wax method that aims to overcome some of the barriers present in the jewelry elaboration. This change focuses on the wax substitution, as the model's material for flat-surface designs, for other material that may be obtained by laser cutting methods. The analysis was based on the process time execution and the superficial condition of pieces made from acrylic, medium density fiber board, and boat wood board models. The superficial condition was studied by microscopic image analysis. The results proved that acrylic is the best substitute for wax because it allows to reduce the process time execution, improves the superficial condition, and diversify the flat-surface designs.

Key words: acrylic, automation, jewel, lost wax, metallurgical.

1. Introducción

En la provincia del Azuay, la orfebrería es una actividad económica de gran importancia, que últimamente está perdiendo mercado por su escasa competitividad frente a las grandes industrias joyeras, que importan sus productos [1]. El sector artesanal no logra mantener su posición en el mercado debido a que se cree que el trabajo artesanal implica únicamente trabajo manual. Para conservar su posición en el mercado, la automatización debe ser parte del proceso de elaboración de las joyas y debe implementarse de tal manera que permita conservar la diversidad de los diseños, mientras otorga importantes ahorros en el tiempo de fabricación.

Una de las técnicas más empleadas para la elaboración artesanal de joyas es el *Moldeo a la Cera Perdida*, esta combina el conocimiento de las propiedades de metales, cera, arcilla y otras resinas para producir objetos tridimensionales [2]. El método parte de un modelo tallado en cera a partir del cual se genera un molde de material refractario, que permitirá dar forma al metal [3]. La mayor parte de investigaciones existentes, que buscan mejorar el método, se enfocan en cambiar el material del molde y del modelo. Trabajos previos analizan las implicaciones de estos cambios, a un nivel artístico [4], [5], [6]. Otras publicaciones cambian el material del modelo con el fin de obtener ventajas en el proceso de modelado [3], [7].

A pesar de la gran importancia del método de *Moldeo a la Cera Perdida* y su gran utilización en la joyería, las investigaciones no se han enfocado en obtener una mejora al método que permita incrementar la competitividad de los artesanos y simplificar los trabajos posteriores en base a una disminución del tiempo de ejecución del proceso.

El objetivo de esta investigación es proponer una mejora, a través de la sustitución del proceso de tallado de la cera, en el método de *Moldeo a la Cera Perdida*, por un proceso de mecanizado por corte láser. Para esto, se debe encontrar un material que pueda ser sometido a este tipo de mecanizado y que, posteriormente, permita obtener piezas que conserven o mejoren las características superficiales que brinda la cera. Cabe recalcar que, al proponer un método de mecanizado por corte láser, el proyecto se limita al estudio de diseños de caras planas, sin embargo, los resultados obtenidos pueden extrapolarse a piezas de formas más complejas a través métodos de modelado en los materiales que se encuentren como sustitutos adecuados (p.e. inyección en polímeros o mecanizado por control numérico computarizado en madera).

2. Materiales y métodos

2.1 Métodos

2.1.1 Método de Moldeo a la Cera Perdida tradicional

El método de *Moldeo a la Cera Perdida* tradicional (FCP) consiste en la fabricación de un modelo de cera, alrededor del cual se vierte un material refractario con mayor punto de fusión, dejando cavidades a través de la cual puede extraerse la cera e ingresar el material de fundición [5]. En la Figura 1 se puede apreciar la manera en que se ejecuta tradicionalmente el proceso.

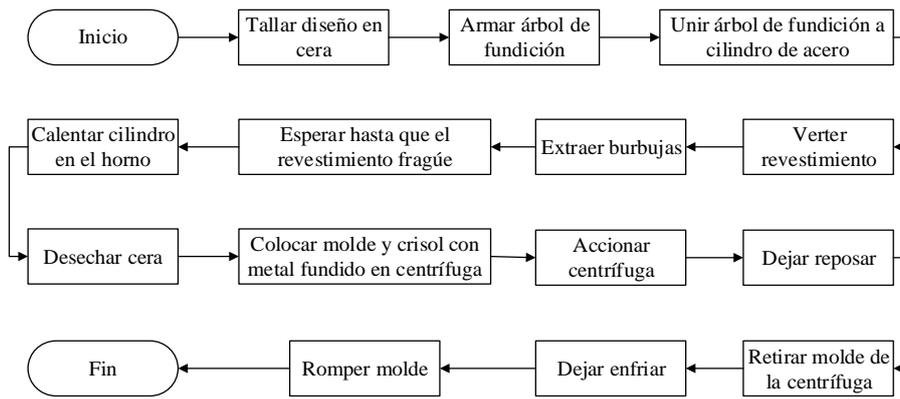


Figura 1. Método de Moldeo a la Cera Perdida Tradicional.

2.1.2 Método Propuesto

El método propuesto modifica la primera actividad del FCP tradicional y resulta en el proceso descrito en la Figura 2.

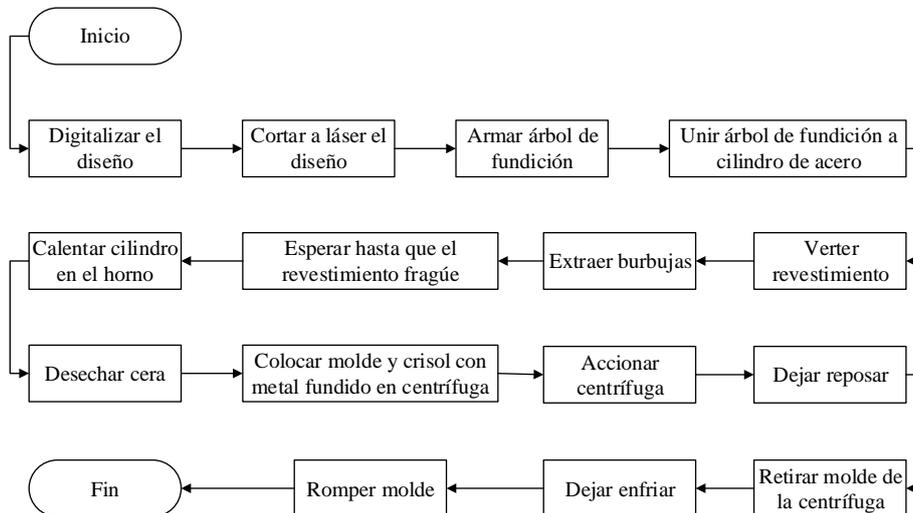


Figura 2. Método Propuesto

2.1.3 Método de elaboración de modelos

Se elaboraron modelos en MDF, acrílico y balsa siguiendo el proceso descrito en la Figura 2. Adicionalmente, se elaboró una pieza mediante el método descrito en la Figura 1, a fin de que pueda ser utilizado como medio de verificación de mejoras en la condición superficial.

Para que el estudio no se vea influenciado por la forma del modelo, todos deben tener la misma forma. Además, a fin de no alterar los resultados mediante probetas, que excluyan formas y diseños diversos, la pieza debe tener una forma tal que, si se finaliza el proceso de elaboración de la joya, esta pueda convertirse en una. Las formas de los modelos empleados en este estudio se encuentran disponibles en el Apéndice 2.

En todos los casos, los conductos para el transporte, que resultan de las ramificaciones del árbol de fundición, continuaron siendo de cera, es decir, únicamente se modificó el material del modelo.

2.1.4 Método de medición

El análisis se ejecutó a través de la comparación de las condiciones superficiales observadas en imágenes obtenidas de un microscopio metalúrgico. Para el cálculo se emplearon, como indicadores de la condición superficial, las siguientes variables:

- Área ocupada (a_1): proporción del área en la imagen de la pieza en la que se observa, de manera evidente, material metálico.
- Área vacía (a_0): proporción del área en la imagen de la pieza en la que no se observa, de manera evidente, material metálico. A partir de esto, se define:

$$a_0 = 1 - a_1 \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

a_1 = área ocupada

a_0 = área vacía

Los valores de ambas variables se obtuvieron mediante software especializado en análisis de imagen. Se considera como la pieza con mejor condición superficial, aquella en la que a_0 sea significativamente menor.

2.1.5 Método de análisis de variables

Para asegurar la representatividad de la muestra, se dividió a cada una de las piezas en doce secciones, descartando posteriormente, las cuatro secciones correspondientes a las esquinas, debido a que presentaron un tamaño considerablemente menor al de las demás secciones. Esto dio como resultado 20 mediciones para cada uno de los modelos, 80 observaciones en total. A continuación, se detalla el procedimiento utilizado:

- 1) Se ejecutó una prueba piloto inicial, donde se seleccionaron, basados en muestreo aleatorio simple, cuatro secciones, de las cuales se capturaron cuatro imágenes seleccionadas a través de muestreo no aleatorio por cuotas.
- 2) A partir del análisis de las imágenes obtenidas se estableció la variabilidad de los datos y se calculó el número secciones y el número de capturas que deben estudiarse para obtener la proporción media de área vacía del total de cada pieza, con un nivel de confianza del 95% y un error de 10%, considerando que el tamaño poblacional del número de secciones es conocido e igual a 8^a y el tamaño poblacional del número de capturas es desconocido.
- 3) Se tomaron las capturas correspondientes en las secciones.
- 4) Una vez tomados los datos se realizó un análisis de varianza unidireccional (ANOVA) con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, para conocer si existían diferencias entre las proporciones medias de área vacía de las piezas elaboradas, a partir de modelos de diferente material.
- 5) Dado que el análisis de varianza indicó que existían diferencias entre las medias, se plantearon seis hipótesis para analizar si el porcentaje de área vacía de una pieza es, significativamente, menor al de otra. El nivel de significancia utilizado fue de $\alpha = 0.08$.

^a Por lo explicado al inicio de la Sección 2.3

2.2 Materiales

A continuación, se presentan las fichas técnicas estándar de los materiales empleados para los modelos. Se pueden emplear como proveedores aquellos citados en las siguientes tablas (Ver Tabla 1 [8], Tabla 2 [9], Tabla 3 [10]).

Tabla 1. Especificaciones del acrílico

Nombre empleado en la investigación	Acrílico
Nombre técnico	Polimetilmetacrilato (PMMA)
Propiedades Generales	
Tipo	Polímero
Sub-Tipo	Termoplástico
Clasificación	Ester-Amorfo
Color	Incoloro
Grosor utilizado	3 mm
Propiedades Mecánicas	
Dureza	M:92 Rockwell (Alta)
Resistencia a la tracción	2400 N/mm ² a 3300 N/mm ² (Alta)
Resistencia al impacto	16 J*m ⁻¹ a 32 J*m ⁻¹ (Alta)
Propiedades Térmicas	
α	70x10 ⁻⁶ K ⁻¹ a 77x10 ⁻⁶ K ⁻¹
Temperatura de trabajo	-40 °C a 90 °C . Según frecuencia
Propiedades Físicas	
Densidad	1.2 g/cm ³
Cantidad utilizada	1.16 g

Tabla 2. Especificaciones de la balsa

Nombre empleado en la investigación	Balsa
Nombre técnico	Ochroma lagopus
Propiedades Generales	
Familia	Malvaceae (Bombacoideae) Frondosa
Color	Entre blanco-crema y rosa parduzco
Grosor utilizado	3 mm
Propiedades Mecánicas	
Dureza	0.2. Madera muy blanda
Resistencia a la tracción	26 kg/cm ²
Resistencia a la compresión	100 kg/cm ²
Resistencia a la flexión	190 kg/cm ²
Módulo de elasticidad	26800 kg/cm ²
Propiedades Físicas	
Densidad	150 g/m ³
Cantidad utilizada	0.099 g

Tabla 3. Especificaciones del MDF

Nombre empleado en la investigación	MDF
Nombre técnico	Tablero de Fibras de Densidad Media
Propiedades Generales	
Grosor utilizado	3 mm
Propiedades Mecánicas	
Resistencia a la tracción	$1 \pm 20 \text{ N/mm}^2$
Resistencia a la flexión	$45 \pm 10 \text{ N/mm}^2$
Propiedades Físicas	
Densidad	$820 \pm 50 \text{ kg/m}^3$
Cantidad utilizada	0.92 g

Los datos físicos y químicos de la cera utilizada no están disponibles, se utilizó cera ferris azul para joyería, este material se encuentra disponible en [11], [12].

3. Resultados

3.1 Tiempo de ciclo de la elaboración del modelo

Los diferentes tiempos de elaboración del modelo se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Tiempo de elaboración de modelos.

Material	Método	Tiempo [min]
Acrílico	Corte láser	1
Balsa	Corte láser	2
MDF	Corte láser	1
Cera	Tallado manual	121

Se observa una clara diferencia entre los tiempos de elaboración de los modelos obtenidos por mecanizado láser, y el tiempo de elaboración del modelo tallado en cera. A pesar de esto, el método no es utilizado actualmente en el sector joyero debido a la barrera cultural creada existente, entre la tecnología y lo artesanal. Además, los artesanos requieren digitalizar sus diseños lo que implica desarrollo en habilidades informáticas; una vez superadas estas barreras las mejoras podrían implementarse y se podrán conseguir reducciones en tiempo, de aproximadamente dos horas a un minuto.

3.2 Porcentajes promedio de área vacía por sección

Mediante la prueba piloto realizada se estableció la necesidad de tomar 4 capturas en cada sección, para 5 secciones. Una vez analizadas las imágenes se obtuvieron los porcentajes promedio de área vacía para cada pieza, como se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Porcentajes promedio de área vacía por pieza.

Porcentaje de medio de área vacía [%]				
Sección	Balsa	Acrílico	MDF	Cera
1	47.91	38.18	59.42	42.24
2	51.27	33.70	55.56	59.29
3	57.11	34.25	50.98	51.64
4	67.16	37.87	53.55	56.79
5	60.91	28.69	58.68	22.79
Promedio	56.87	34.54	55.64	46.55

3.3 Dispersión y variabilidad de los datos

En la Figura 3 puede apreciarse, de manera gráfica, la dispersión y la variabilidad existente entre las diferentes secciones de la pieza y sus valores extremos, según el material empleado en el modelo.

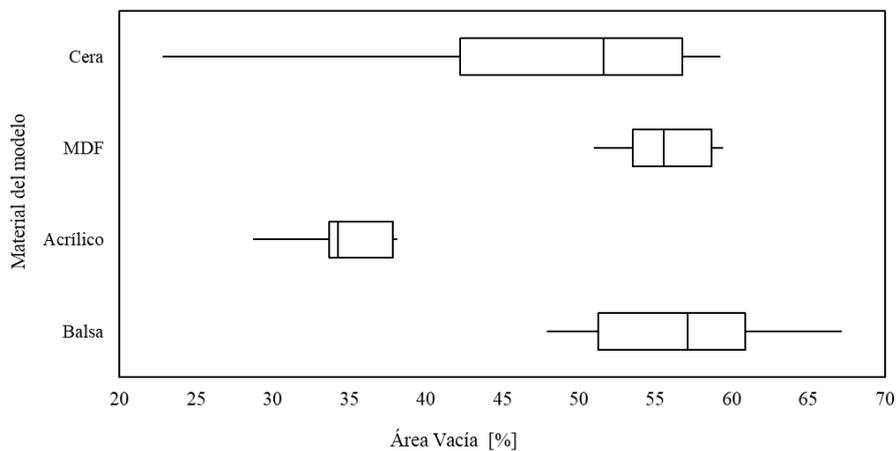


Figura 3. Diagrama de caja para análisis de porcentaje de área vacía por pieza

A nivel general, puede apreciarse que el acrílico presenta el menor porcentaje de área vacía, ya que, a pesar de que en la cera existen valores menores, la dispersión es considerablemente mayor.

3.4 Análisis de varianza

Se plantearon las siguientes hipótesis:

- $H_0: \mu_{Acrílico} = \mu_{Balsa} = \mu_{MDF} = \mu_{Cera}$
- $H_1: \text{Al menos una de las medias de área vacía es diferente}$

En ellas μ representa la media de los datos para cada pieza. El nivel de significancia utilizado fue $\alpha = 0.05$. Los resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Análisis de varianza unidireccional.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor_P	Valor crítico para F
Entre grupos	1598.35	3	532.78	6.99	0.0032	2.71
Dentro de los grupos	1218.68	16	76.17			
Total	2817.04	19				

A partir del análisis se puede establecer $Valor\ p < \alpha$, por tanto, no existe evidencia estadística suficiente para establecer H_0 , por tanto, a un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ las medias de las áreas vacías son diferentes.

3.5 Pruebas de hipótesis

Una vez realizado el análisis de varianza y comprobado que las medias de área vacía promedio son diferentes, se procedió a distinguir cuál de estas es menor. Para ello se plantearon seis hipótesis, con un nivel de significancia $\alpha = 0.08$, las cuales pueden observarse junto a sus resultados en la Tabla 7.

Tabla 7. Pruebas de diferencias entre muestras.

Hipótesis	H ₀	H ₁	Resultado de la muestra	Desviación conjunta	Error estándar	Límite inferior	Resultado
1	$\mu_{(Acrílico)} - \mu_{(Balsa)} = 0$	$\mu_{(Acrílico)} - \mu_{(Balsa)} < 0$	-22.33	6.05	3.83	-6.60	Área vacía de acrílico es significativamente menor a la de balsa
2	$\mu_{(Acrílico)} - \mu_{(MDF)} = 0$	$\mu_{(Acrílico)} - \mu_{(MDF)} < 0$	-21.10	3.69	2.33	-4.02	Área vacía de acrílico es significativamente menor a la de MDF
3	$\mu_{(Acrílico)} - \mu_{(Cera)} = 0$	$\mu_{(Acrílico)} - \mu_{(Cera)} < 0$	-12.01	10.81	6.84	-11.78	Área vacía de acrílico es significativamente menor a la de cera
4	$\mu_{(MDF)} - \mu_{(Balsa)} = 0$	$\mu_{(MDF)} - \mu_{(Balsa)} < 0$	-1.24	5.95	3.76	-6.49	No existe diferencia significativa entre el área vacía de MDF y balsa
5	$\mu_{(Cera)} - \mu_{(Balsa)} = 0$	$\mu_{(Cera)} - \mu_{(Balsa)} < 0$	-10.32	11.78	7.45	-12.83	No existe diferencia significativa entre el área vacía de cera y balsa
6	$\mu_{(Cera)} - \mu_{(MDF)} = 0$	$\mu_{(Cera)} - \mu_{(MDF)} < 0$	-9.09	10.76	6.80	-11.72	No existe diferencia significativa entre el área vacía de cera y MDF

Se puede ver concordancia entre los resultados de las pruebas de hipótesis y lo presentado en la Figura 3.

4. Discusión

A partir del análisis realizado, se han identificado tres aspectos que permiten justificar la sustitución de la cera por otro material en el método de *Moldeo a la Cera Perdida*: reducción del tiempo de ejecución del proceso, mejora de la condición superficial tras la fundición y diversificación de diseños de caras planas, tal como se planteó en los objetivos.

Adicional a esto, se pueden esperar mejoras económicas debido a la reducción de costos de mano de obra, por la introducción de mecanizado por corte láser y la aceleración en el ritmo de producción. No se presentan medidas o indicadores de impacto económico, debido a que la realidad del sector joyero, sobre todo en el ámbito artesanal, depende de diversos factores que requieren otro tipo estudio para ser cuantificados. Por otra parte, el método propuesto permite mejorar la condición superficial y obtener mayor diversidad en los diseños de piezas de caras planas, debido a la mayor precisión de los equipos de mecanizado, como se establece en [13].

Una de las posibles fuentes de error del experimento es la determinación del tiempo de tallado, ya que esta consideró un solo tallador como sujeto de prueba. Otros estudios podrían profundizar más en este aspecto y ampliar el detalle en análisis de tiempos a

diferentes talleres y talladores. De igual manera, resultaría interesante variar las formas de los modelos y analizar cómo puede influir esta variable.

Resulta importante destacar el método de análisis de la condición superficial de las piezas, empleado a lo largo de este estudio; ya que, a diferencia de este, métodos de medición convencionales, como rugosímetros, pueden estar limitados al análisis de superficies ininterrumpidas.

Los resultados obtenidos pueden vincularse con los de [4], [5] y [6], a través de la posibilidad de elaborar formas que demandan una mayor pericia, por su complejidad. El trabajo realizado es comparable al de [7] y [3], sin embargo, la mejora en el tiempo que se ha conseguido es significativamente superior.

Es posible desarrollar investigaciones futuras que extrapolen los resultados obtenidos, bajo la referencia de que los polímeros plásticos son los sustitutos más adecuados para el modelo, a fin de superar la limitación de diseños de caras planas mediante procesos de impresión 3D.

5. Conclusiones

Una vez analizadas las piezas se puede concluir lo siguiente:

- La Figura 3, respaldada en la evidencia estadística obtenida mediante el experimento realizado, permite establecer que el mejor sustituto de la cera es el acrílico por las siguientes razones:
 - La pieza elaborada a partir del modelo de este material presenta una menor variabilidad y una mejor condición superficial en más del 75% de las zonas analizadas, comparada con la pieza elaborada a partir del modelo de cera.
 - El acrílico permite obtener una reducción de tiempo significativa en la obtención del modelo.

Referencias

- [1] Diario el Mercurio, «La economía de los joyeros, amenazada», 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.elmercurio.com.ec/438847-bajon-en-la-compra-de-anillos-de-grado/>.
- [2] M. N. Levine, *Ceramic Molds for Mixtec Gold : a New Lost-Wax Casting Technique from Prehispanic Mexico*, 2018.
- [3] C. Codina, *Aula de Joyería: Modelado y Fundición*, 1ra ed. Barcelona, España, 2009.
- [4] L. Petrillo, «La cascarilla cerámica como material escultórico», 2012.
- [5] C. Quisaguano, «Estudio de las reacciones de la intercara cera cerámico y su Influencia en los acabados en las piezas en bronce obtenidas por el método a la cera perdida y, obtención de la imagen de la mascota de la ingeniería mecánica en bronce por el mismo método», 2010.
- [6] J. C. González, A. González, y I. Rodríguez, «Fundición a la cera perdida: Cellini y la magnetita», vol. 4, pp. 13–28, 2006.
- [7] I. M. Lozano, «Nuevos Modelos Gasificables Aplicados a la Técnica de la Cascarilla Cerámica: Uso de Pinturas Refractarias», p. 401, 2011.
- [8] Emac Complementos, «Ficha Técnica Metacrilato», 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.emac.es/bd/archivos/archivo8271.pdf?nocache=0.527846>. [Consultado: 25-may-2017].
- [9] Gobierno Vasco, «Balsa». [En línea]. Disponible en: <http://normadera.tknika.net/es/content/ficha/balsa>. [Consultado: 29-may-2017].
- [10] Masisa, «Catálogo MDF». [En línea]. Disponible en: http://www.greyforestal.com/uploads/4/6/1/8/46180617/ficha_tecnica_mdf_masisa.pdf. [Consultado: 29-may-2017].
- [11] ComraShop, «Cera Modelar Bloque Azul Cortado, Ferris», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://comrashop.es/modelado-en-cera/895-cera-modelar-bloque-azul-cortado-ferris.html>. [Consultado: 13-may-2018].
- [12] Dentared Odontology Services, «Bloque de cera odontológica Ferris». [En línea]. Disponible en: <https://www.dentaltix.com/ferris/bloque-cera-odontologica-ferris>. [Consultado: 13-may-2018].
- [13] L. Plaza, «Joyería para Millennials», 2017.

Apéndices:

Apéndice 1: Abreviaturas y términos empleados

- FCP: Se refiere al método de *Moldeo a la Cera Perdida*, también conocido como Fundición a la Cera Perdida.
- Modelo: es el prototipo de la pieza, elaborado originalmente en cera, a partir del cual se obtiene la pieza metálica.
- Molde: pieza hueca, elaborada de material refractario a partir del prototipo, en la que puede fundirse la pieza metálica.
- MDF: madera de tablero de fibra de densidad media.
- Balsa: tablero de madera de balsa
- Condición de la superficie: según la proporción de área ocupada y de área vacía^b.
- Modelado/Moldeado: proceso a través del cual se transforma un material en el prototipo de una joya.
- Árbol de Fundición: estructura hecha de cera, a la cual se adhieren los modelos.
- Revestimiento: Material refractario que cubre el árbol de fundición y que, posteriormente formará el molde. Para esta investigación el revestimiento será yeso para joyería.
- Cera: Cera ferris azul para modelado de joyería.
- Pieza: Objeto que resulta de la colocación de metal fundido en un molde y que, después de ser pulido se transformará en una joya.

Apéndice 2: Modelos



Modelo de Cera



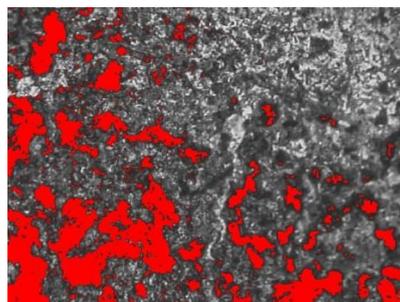
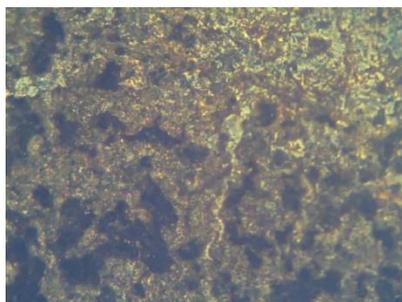
De derecha a izquierda: Modelo de Acrílico, MDF y Balsa

Apéndice 3: Árbol de fundición.

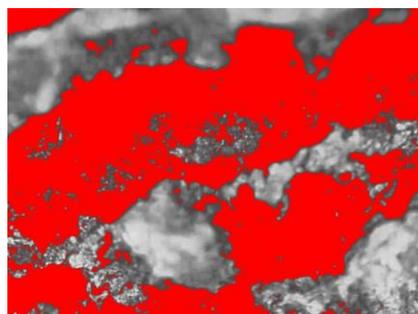
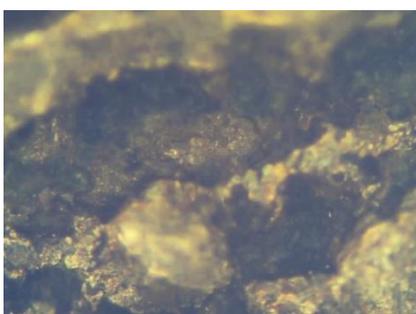


^b Área ocupada y área vacía son las variables del estudio estadístico, se encuentran definidas en la Sección 2.2

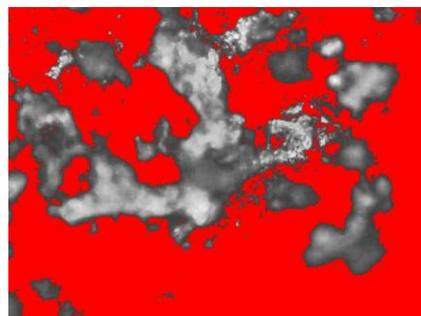
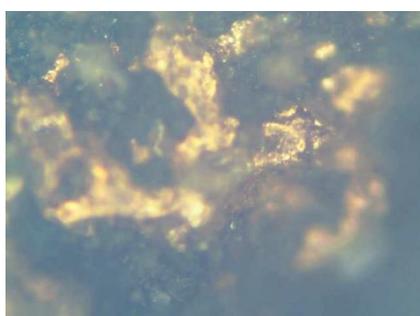
Apéndice 4: Muestra de capturas microscópicas y análisis de imagen.



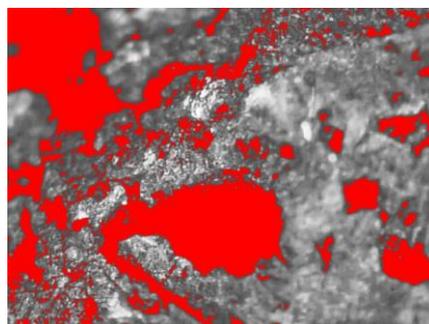
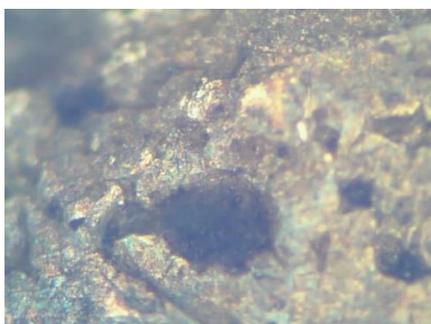
Acrílico



Balsa



MDF



Cera