

Integración de la impresión 3D en el proceso de cera perdida para la producción de joyas, con fines de estandarización

Integration of 3D printing in the process of lost wax for the production of jewelry, for standardization purposes

Leidy Yaneth Vega-Rodríguez¹
Laura Muñoz-Mesa²

¹Servicio Nacional de Aprendizaje SENA; (Colombia); correo: lyvega@sena.edu.co

²Servicio Nacional de Aprendizaje SENA; (Colombia); correo: lauramma@gmail.com

Recibido: 12-12-2018 Aceptado: 01-04-2019

Cómo citar: Vega, L. Y.; Mesa, L. M. (2019). Integración de la impresión 3D en el proceso de cera perdida para la producción de joyas, con fines de estandarización. *Informador Técnico*, 83(1), 51-65.
<https://doi.org/10.23850/22565035.1933>

Resumen

Las resinas poliméricas son las más utilizadas en la impresión 3D. Estas experimentan diferentes comportamientos y no pueden ser empleadas bajo las mismas condiciones de proceso que cuando se utiliza cera en el proceso de cera perdida. Con este estudio se buscó definir las condiciones estandarizadas para obtener piezas finales de joyería con acabados de calidad, a partir de un proceso de cera perdida combinado con la tecnología de impresión 3D para la elaboración de prototipos. La selección y comprensión de diversas variables y parámetros de proceso es uno de los principales desafíos para la optimización. Diferentes autores consideran que la etapa de quemado es la más crítica y crucial. Por ello, se proponen cuatro curvas de quemado con el fin de evaluar el comportamiento de dos resinas (B9-Emerald y Tepic 2000) e intentar disminuir el tiempo de quemado, sin afectar la calidad de la pieza. Se obtuvieron piezas de mejor calidad al aplicar una curva con tres rampas de temperatura: 150, 455 y 750 °C, mantenidas durante 40, 30 y 20 min, respectivamente, con un tiempo total de 4,5 h.

Palabras clave: cera perdida; resinas poliméricas; impresión 3D; estandarización; tiempo de quemado; calidad.

Abstract

Polymer resins are the most used in 3D printing. These resins have a different behavior than wax (used in the lost wax process) and cannot be used with the same conditions. This study aims to define the standardized conditions for obtaining final pieces of jewelry with good finishes, from a casting process combined with 3D technology for prototypes making. The selection and understanding of the various variables and condition of the process are one of the main challenges for the optimization. Different authors consider that the burning stage is the most critical and crucial. For this reason, four burn curves are proposed, in order to evaluate the behavior of two resins (B9-Emerald and Epic 2000) and try to reduce the burning time, without affecting the quality of the piece. Parts with better quality were obtained by applying a curve with three temperature ramps: 150, 455 and 750 °C, maintained for 40, 30 and 20 min, respectively with a total time of 4.5 h.

Keywords: lost wax; polymer resins; 3D printing; standardization; burn time; quality.

Introducción

El proceso de cera perdida es la técnica mediante la cual, una pieza maestra o prototipo hecho a mano en cera se recubre con material cerámico (yeso) llamado investimento, el cual, resiste altas temperaturas y una vez endurecido adopta la geometría exacta de la pieza deseada. Luego, el molde se coloca en un horno donde el prototipo de cera se elimina por fusión o combustión, dejando una cavidad hueca dentro del molde por donde se vierte el metal fundido para obtener la joya (Pattnaik; Karunakar; Jha, 2012; Singh; Singh, 2016).

Respecto a la elaboración de los prototipos en cera hechos artesanalmente a mano, el joyero moldea bloques de cera por medio de cuchillas y herramientas para tallar hasta lograr la forma deseada: anillo, serpiente, caja para piedras, entre otros (Underhill, 2017). Este proceso es 100 % manual, demanda la atención total del joyero y la calidad obtenida depende de las habilidades del artesano, por lo cual, es difícil lograr todos los detalles, simetrías, peso o grosor exacto como están descritos en el diseño. En caso de requerirse una copia, el prototipo deberá ser tallado de nuevo (Campos; Romeiro, 2013; Muñoz-Mesa; Sánchez, 2016).

En los últimos años, el proceso de cera perdida ha experimentado una evolución considerable con el desarrollo de equipos, materiales y la adopción de nuevas tecnologías, lo que ha permitido abrir nuevas oportunidades para la integración entre el diseño y los procesos de producción. Actualmente, se está utilizando la impresión 3D para crear prototipos más complejos y personalizados, con un nivel de detalle mayor, características minuciosas e intrincadas y precisión dimensional, con menos defectos y en menos tiempo, contando, además, con la facultad de hacer evaluaciones y modificaciones de diseños y especificaciones de manera eficiente y predecir errores (Campos; Romeiro, 2013; Pattnaik *et al.*, 2012; Redwood, s.f. a).

Con esta investigación se pretendió establecer y definir las condiciones estandarizadas para obtener piezas de joyería con excelentes acabados, utilizando la impresión 3D para la elaboración de prototipos. De esta manera, el sector joyero nacional resultaría beneficiado con la reducción de compras de equipos innecesarios, la reducción de reprocesos, la disminución significativa de los tiempos de entrega y con una mejora considerable en productividad y competitividad (Berman, 2012; Huang; Liu; Mokasdar; Hou, 2013). Es por esto que la comprensión de la relación entre los diversos parámetros controlables involucrados en el proceso de cera perdida es un punto clave para la optimización del ciclo y para lograr un alto grado de confiabilidad en la calidad del producto final. El plan experimental propuesto permitió evaluar la incidencia de la etapa del quemado, específicamente el tiempo y la calidad final del producto, considerando que esta etapa es la más crítica y crucial.

Marco teórico

Fundición a la cera perdida

El proceso de cera perdida es utilizado ampliamente en diferentes industrias y aplicaciones ingenieriles que incluyen piezas de joyería, componentes de precisión de la industria médica, de hidroplantas, de defensa, automotriz y otras herramientas como equipos domésticos y comerciales (Singh *et al.*, 2016). Su principal ventaja es su flexibilidad y versatilidad para satisfacer las especificaciones exigentes de los clientes, desde detalles muy finos y secciones delgadas hasta formas intrincadas, utilizando herramientas y materiales que son eficientes a largo plazo (Singh; Singh, 2015). Así mismo, se logra una alta precisión en las piezas, con tolerancias de $\pm 0,005$ pulgadas, con un excelente acabado superficial (Pattnaik *et al.*, 2012; Singh *et al.*, 2016; Singh; Singh, 2016).

El proceso de cera perdida está plenamente establecido como el principal proceso de producción de joyería y como una herramienta importante en la joyería fina, artística y la orfebrería, y no hay señales de ningún proceso alternativo que pueda desplazarla. En la Figura 1 se muestra una breve descripción de las diferentes etapas del proceso de fundición a la cera perdida de acuerdo con autores como Pattnaik *et al.* (2012) y Singh y Singh (2016), quienes explican los pasos básicos de este proceso.

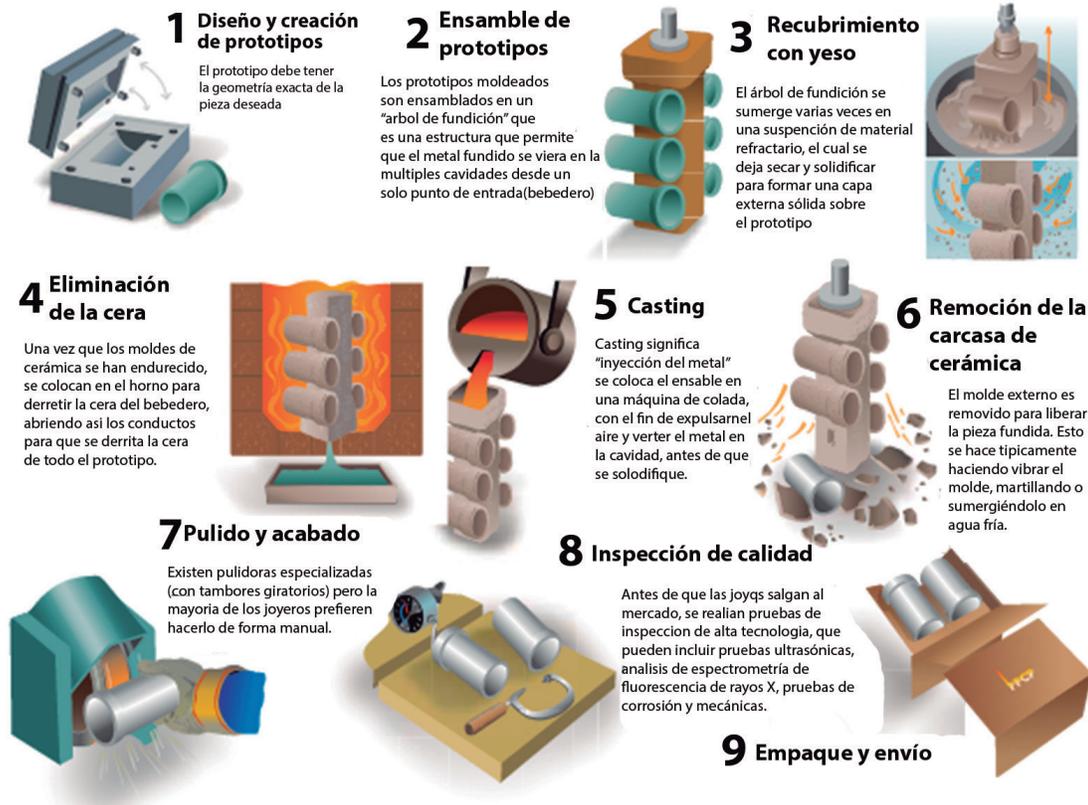


Figura 1. Etapas involucradas en la fabricación de joyas mediante el proceso de cera perdida.
Fuente: adaptado de Pennsylvania Precision Cast Parts (PPCP)

El primer paso para producir una pieza única, es crear un concepto y un diseño. La idea creativa y la tecnología se fusionan perfectamente en el diseño para enfatizar la personalización y el arte. En algunos casos los diseñadores crean una representación integral mediante el diseño asistido por computadora, (*CAD - Computer-Aided Design*) (Campos; Romeiro, 2013). Algunos de los softwares más conocidos son: *RhinoCeros*, *Rhino Gold* y *Matrix*.

Una vez se tiene un diseño establecido, se continúa con la creación del prototipo o pieza maestra. Antiguamente, la elaboración de prototipos se hacía moldeando un material blando, típicamente cera, arcilla o yeso (Hoffman, 2016), usando herramientas para tallar, que permiten transformar un simple bloque de cera en un modelo exacto al de las joyas finas que se crearán (Underhill, 2017). El prototipo obtenido debe tener tolerancias dimensionales para compensar su propia contracción volumétrica, así como la contracción por solidificación del metal fundido en el molde de yeso (Pattnaik *et al.*, 2012). De igual forma, el prototipo debe estar libre de defectos e imperfecciones, como rasguños, burbujas de aire y líneas de unión distintas, para que estos no se reproduzcan en la pieza final (Sias, 2005).

Dependiendo de las joyas elaboradas, los prototipos moldeados o impresos son ensamblados en un "árbol de fundición". Dependiendo del tamaño, peso y metal a ser vertido, dos o más prototipos se adjuntan a una estructura vertical conocido como bebedero, que permite que el metal fundido fluya en las múltiples cavidades desde un solo punto de entrada (Sias, 2005; Singh; Singh; Hashmi, 2016). Finalmente, los árboles son ubicados en una base circular de caucho e insertados en un tarro de acero inoxidable o aluminio, ya que son materiales preferidos por tener alta conductividad térmica (Singh; Singh, 2016). En seguida, se preparan los moldes con investimento, en donde el *gesso* de París es uno de los materiales predilectos para la elaboración de joyas en oro y aleaciones de plata. De acuerdo a las medidas del recipiente de acero inoxidable se hace una mezcla de agua:yeso, esta mezcla se vacía hasta superar la altura del árbol, se deja secar y solidificar hasta formar una capa externa sólida uniforme, que reproduce cada detalle del prototipo (Prasad, 2012). Así pues, el secado completo de la mezcla para el molde puede durar de 16 a 48 h, lo que permite que el recubrimiento cure (endurezca) y se

obtenga un molde lo más fuerte posible (Corti, 2010; Prasad, 2012). Sin embargo, se debe tener en cuenta que el yeso no puede ser utilizado para el *casting* de metales con puntos de fusión superiores a 1000 °C, debido a que el yeso comienza a degradar compuestos sulfurados, principalmente, sulfato de calcio, con temperaturas de fundición entre 1100 y 2000 °C (Beeley; Smart, 1995; Sias, 2005).

Por otra parte, una vez que los moldes de yeso se han curado por completo, se retira la base de caucho y se colocan los recipientes en un horno para que la cera se derrita y/o vaporice, dando como resultado una cavidad. El molde debe calentarse de manera que las capas superficiales de cera se derritan y de esta forma, evitar agrietamiento e incluso destrucción del molde, lo que podría ocasionarse por el diferencial de expansión térmica entre la cera y el yeso (Pattnaik *et al.*, 2012; Prasad, 2012). Generalmente, en el horno se establecen diferentes etapas de calentamiento, con una temperatura que no supere 800 °C especialmente cuando se utiliza yeso, ya que a temperaturas más altas, la reacción entre el sulfato de calcio y el sílice provoca la ruptura de la inversión, al generar CaSiO_3 (Mohd; Ismail; Ahmad; Isa, 2015; Sias, 2005). Esta etapa puede tardar de 12 a 16 h, dependiendo del tamaño y cantidad de los árboles insertados en el horno, del tamaño de los tarros metálicos y de los materiales usados para la elaboración de prototipos.

Posteriormente, al eliminarse toda la cera del molde de yeso comienza la fundición del metal o *casting*, para lo cual, el tarro metálico es colocado en una máquina de colada con asistencia al vacío. Esto facilita la impulsión y expulsión del aire a través del yeso y el vertimiento del metal en la cavidad antes de que se solidifique. El metal o su aleación se funde en un crisol, con lo que se garantiza que se sobrerregule la viscosidad, lo que permite rellenar los detalles finos de la cavidad (Campos; Romeiro, 2013; Singh *et al.*, 2016). La temperatura de vertido no debería ser muy alta, porque podría romper el molde de yeso y no debería ser muy baja, porque se producirían piezas defectuosas (Singh *et al.*, 2016).

Luego, el yeso es removido para liberar la pieza mediante un golpe mecánico, sumergiéndolo en agua fría, aplicándole un chorro de agua a alta presión (6-10 ksi) o disolviéndola químicamente con nitrógeno líquido congelado a 195 °C o hidróxido de sodio fundido entre 482 y 537 °C (Corti, 2010; Prasad, 2012). Una vez se haya removido la pieza de joyería se corta del árbol de fundición. Una de las mayores ventajas del proceso de cera perdida es que se producen piezas que normalmente requieren poco o ningún trabajo de acabado, lo que ahorra tiempo, reduce costos y agiliza la producción (Pattnaik *et al.*, 2012).

Fabricación aditiva o impresión 3D

El término fabricación aditiva o impresión 3D abarca una gran cantidad de procesos y tecnologías que ofrecen un espectro completo de capacidades para la producción de piezas y productos sólidos mediante la unión de materiales (cera, polvo o plástico), generalmente capa sobre capa a partir de datos del modelo 3D, a diferencia de las metodologías de fabricación sustractiva como el mecanizado tradicional ASTM F2792-12a. (ASTM International, 2012), (Mellor; Hao; Zhang, 2014). La impresión 3D alcanza unas notorias ventajas respecto a otras técnicas derivadas por su capacidad de producción, personalización del cliente y desarrollo de productos con estructuras complejas (Schniederjans, 2017; Stansbury; Idacavage, 2016). Otras ventajas incluyen: alta flexibilidad en la fabricación de piezas, asequibilidad y evaluación rápida de diseños, capacidad para facilitar la optimización de parámetros de moldeo, ahorro de material mediante reducción de procesos de fabricación sustractivos y ahorros de tiempo de entrega en el desarrollo de herramientas para producción de alto volumen (Berman, 2012; Holmström; Partanen; Tuomi; Walter, 2010; Pattnaik *et al.*, 2012; Petrovic *et al.*, 2009).

Actualmente, existe un mercado diversificado que requiere la fabricación de productos personalizados, por lo que la impresión 3D se está utilizando para elaborar piezas médicas y dentales, piezas de repuesto para productos electrónicos y electrodomésticos, modelos topográficos, piezas de aviones más livianos, dispositivos protésicos personalizados, entre otros (Kearney, 2014; Bhandari; Regina, 2014; Petrick; Simpson, 2013; Ramya; Vanapalli, 2016; Schniederjans, 2017). También, está siendo utilizada por diseñadores de moda y de joyas para la elaboración de prototipos, productos personalizados y piezas artísticas (Kearney, 2014; Yap; Yeong, 2014).

Etapas del proceso de impresión 3D

La impresión 3D consta de dos fases: una fase virtual (modelado y simulación) y una fase física (fabricación). Para transformar un diseño 2D (boceto) en un diseño 3D, se utiliza un software de diseño asistido por computadora (3D-CAD) para crear un modelo digital, que luego es dividido virtualmente en muchas capas finas horizontales necesarias para completar la pieza modelo (Vanderploeg; Lee; Mamp, 2017).

Las etapas del proceso de impresión son esquematizadas en la Figura 2.

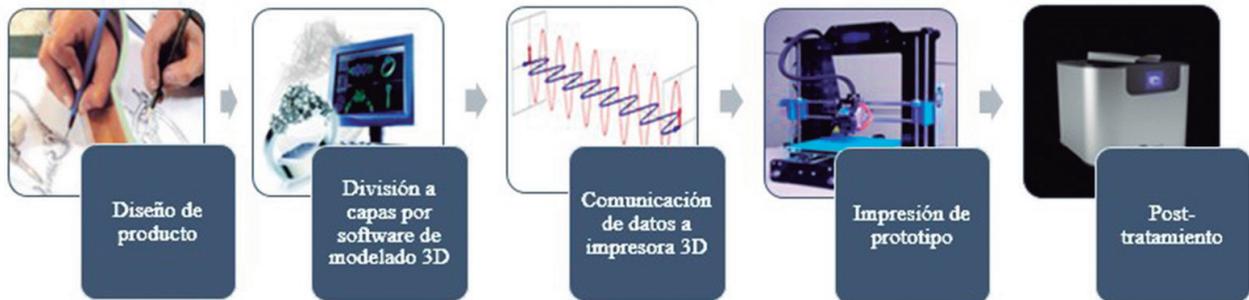


Figura 2. Etapas del proceso de impresión.

Fuente: elaboración propia a partir de (Chua; Leong; Lim, 2010; Vanderploeg; Lee; Mamp, 2017).

El primer paso de la impresión 3D es la generación de un modelo sólido digital o de superficie imprimible en 3D (tridimensional), que describa y represente matemáticamente la geometría externa de un objeto (Gibson; Rosen; Stucker, 2015). Este modelo se genera mediante un software de diseño asistido por computadora (CAD), utilizando servicios en línea proporcionados por plataformas de impresión 3D (*Thingiverse*, *Shapeways* o *Sculpteo*) o generando un modelo digital de un objeto existente mediante escáner 3D, el cual, luego se divide en miles de capas (según la resolución) a través de un software de preparación (Gao *et al.*, 2015; Rayna; Striukova, 2016). Rhino 3D es uno de los programas más utilizados en el modelado de diseño 3D para productos de vestuario y joyería, que permite trabajar con superficies curvas complejas (Yap; Yeong, 2014).

Posteriormente, las superficies externas cerradas del modelo CAD se representan mediante formato de lenguaje de triangulación estándar por sus siglas en inglés (*STL - Standard Tessellation Language*), este formato se importa a un programa de segmentación que lo convierte en código G, el cual, es un lenguaje de programación de las máquinas que trabajan con Control Numérico Computarizado (CNC) y que proporciona instrucciones de movimiento paso a paso para la impresora (Balletti; Ballarin; Guerra, 2017; Redwood, s.f. b). El archivo *STL* se envía a la impresora y de acuerdo con las capas que se han obtenido, se corta el modelo en secciones transversales (Chua; Leong; Lim, 2010). La impresión de la pieza puede tardar de varios minutos a varias horas en completarse dependiendo del tamaño y la complejidad del modelo y del tipo de máquina utilizada.

Tecnologías de impresión

Las tecnologías que se pueden usar para construir capas sucesivas son variadas y en diferentes niveles de desarrollo. Los procesos de impresión 3D pueden ser directos e indirectos.

Los procesos directos, derriten selectivamente el lecho de polvo de metal usando una fuente de energía como un rayo láser o electrones, para fabricar las partes metálicas directamente (Yap; Yeong, 2014). La tecnologías 3D de este grupo son fusión selectiva por láser por sus siglas en inglés (*SLM*) y fusión por haz de electrones por sus siglas en inglés (*EBM*), que generalmente se pueden emplear para la producción de volumen medio a alto (Cheah; Chua; Lee; Feng; Totong, 2005).

Por otro lado, la impresión 3D indirecta no produce las partes finales directamente en el metal; en cambio, se usa un prototipo fabricado a partir de materiales estándares con propiedades conocidas como la resina, que luego son utilizados para la fundición por inversión (Cheah *et al.*, 2005; Gebhardt, 2012; Yap; Yeong, 2014). Así pues, la calidad del molde depende principalmente de la calidad del prototipo. Algunas de las tecnologías de este tipo son: estereolitografía laser (SLA por sus siglas en inglés), modelado de deposición fusionada (FDM por sus siglas en inglés) y procesamiento de luz digital (DPL por sus siglas en inglés) (Cheah *et al.*, 2005; Guo; Leu, 2013).

Aplicación de impresión 3D en la fabricación de prototipos

Actualmente, para la creación de joyas se combina la tecnología de impresión 3D moderna con la fundición tradicional de metales. Para ello, se comienza con la impresión de un modelo 3D en resina. Las estructuras de soporte se imprimen junto con el prototipo para asegurarse de que este no se rompa. Seguidamente, se eliminan las estructuras de soporte y se limpia el prototipo. Luego, se continúa con el proceso tradicional de cera perdida. En la Figura 3 se presenta el proceso completo.

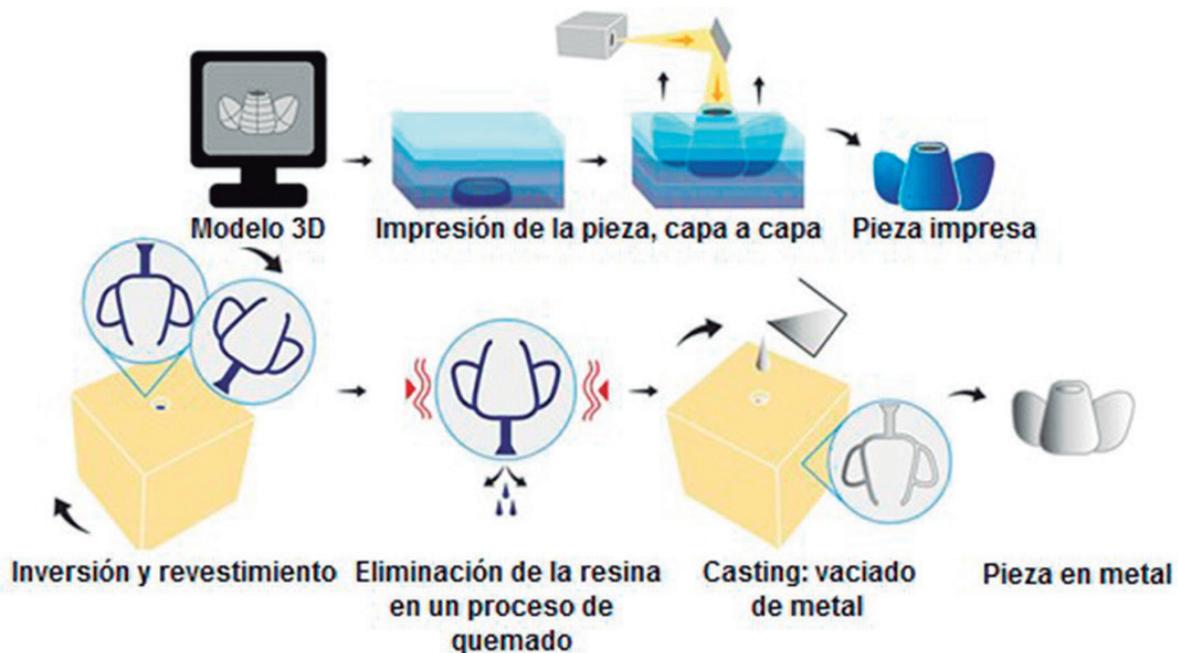


Figura 3. Etapas del Proceso de cera perdida con patrones impresos en 3D. Cortesía de Sculpteo
 Fuente: cortesía Sculpteo Sculpteo. (n.d.). Sculpteo. Retrieved October 20, 2018, from <https://www.sculpteo.com/en/glossary/3d-printed-wax/>

La impresión 3D integrada al proceso de cera perdida permite la creación de prototipos muy complejos y personalizados; producción de múltiples diseños en una sola impresión; producción de piezas con un nivel muy alto de detalle; reducción significativa de los tiempos de entrega y el costo en comparación con las técnicas tradicionales de fabricación de prototipos (CNC en cera, moldes de aluminio para fundición, entre otros); mejoramiento de la calidad y precisión; minimización de errores; flexibilidad de producción al eliminar los problemas de equilibrio de línea y los cuellos de botella de producción y, lograr control y monitoreo más precisos de los procesos (Campos; Romeiro, 2013; Huang *et al.*, 2013; Muñoz-Mesa; Sánchez, 2016; Redwood, s.f. a). De esta forma, la impresión 3D se ha convertido en una herramienta útil para la creación de prototipos y el desarrollo de diseños de una manera económica y efectiva en menor tiempo (Redwood, s.f. c). Así pues, gracias a la variedad de material es posible fabricar la joya completa con impresión 3D; sin embargo, el principal esfuerzo se ha concentrado en encontrar materiales con los que no se presenten problemas de agrietamiento en el yeso, combustión incompleta o presencia de ceniza residual después de la etapa de quemado (Marwah; Sharif; Zainol; Ibrahim; Mohamad, 2013).

Empresas joyeras a nivel mundial están utilizando esta nueva tecnología, como es el caso de *Tripsion, Sharebot, American Pearl, Lupeon y Makebu*, que no solo se benefician de la impresión 3D en la etapa de producción, sino también como estrategia de marketing (Muñoz-Mesa; Sánchez, 2016).

Metodología

Selección del diseño y elaboración de prototipos

El diseño de la pieza de joyería que se seleccionó tiene una superficie compleja, con superficies curvas y planas, con texto pequeño y letras formadas por travesaños muy delgados y difíciles de reproducir; por lo que se consideró como una pieza intrincada que requiere estándares de calidad exigentes. El diseño se presenta en la Figura 4.



Figura 4. Modelo CAD del anillo para impresión 3D.
Fuente: elaboración propia

Para la impresión, se seleccionaron dos resinas poliméricas: Emerald verde (proporcionada por B9 Creator) y Epic 2000-verde (fabricada por Jamghe MSDS). La impresión se realizó en una impresora B9 Creator V1.2 y una impresora Makex Model U50 para las resinas mencionadas, respectivamente. Para la etapa de curado se utilizó una cámara de curado UV LED de alta intensidad (40 mW/cm²).

Preparación de investimento

En la preparación del investimento se utilizó una relación de 1 g (o mL) de agua por 2,5 g de yeso, la cual es considerada por Actis Grande, Forno, Klotz y Tiberto (2011) como la más óptima. Se utilizaron tarros de acero inoxidable de 38,1 mm x 63,5 mm (1,5 in de diámetro x 2,5 in de alto).

Etapa de quemado y casting

En esta etapa, se probaron diferentes condiciones de quemado como se presentan en la Figura 5.

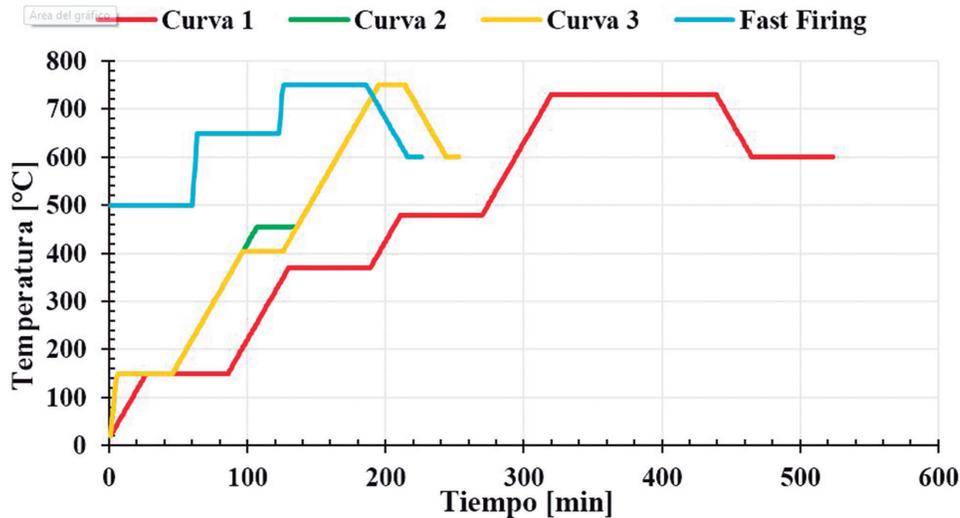


Figura 5. Curvas de quemado testeadas.
Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, se pudo evidenciar que la **curva 1** (curva convencional): consiste en cuatro rampas a 150, 370, 480 y 732 °C, con una velocidad de calentamiento de 5 °C/min mantenida por 1 h. La última etapa fue mantenida por 2 h. Esta curva fue probada con las dos resinas seleccionadas.

La **curva 2**: consistió en tres rampas diferentes a 150, 455 y 750 °C. Desde temperatura ambiente se incrementó la temperatura hasta 150 °C, a 30 °C/min y se mantuvo durante 40 min. Desde 150 hasta 455 °C se usó una velocidad de calentamiento de 5 °C/min, que fue mantenida en las últimas etapas. Esta temperatura fue sostenida por 30 min y luego se incrementó hasta 750 °C, permaneciendo constante por 20 min. Esta curva fue probada con las dos resinas seleccionadas.

La **curva 3**: consistió en tres rampas diferentes a 150, 405 y 750 °C. Desde temperatura ambiente se incrementó la temperatura hasta 150 °C, a 30 °C/min y se mantuvo durante 40 min. Desde 150 hasta 405 °C se usó una velocidad de calentamiento de 5 °C/min, que fue mantenida en las últimas etapas. Esta temperatura fue sostenida por 30 min y luego se incrementó hasta 750 °C, permaneciendo constante por 20 min. Esta curva fue probada solo con la resina Epic 2000.

La **curva 4**: fue un ciclo *fast-firing* (quemado rápido). Los recipientes se colocaron en el horno directamente a 500 °C. Después de 60 min de sostenimiento, la temperatura del horno se incrementó rápidamente hasta 650 °C y se mantuvo durante 60 min, 5 min antes de cumplir ese tiempo, los tarros se retiraron del horno para inyectarles aire comprimido. Luego se insertaron nuevamente en el horno para seguir con un calentamiento rápido hasta 750 °C. Esta curva fue probada con las dos resinas.

Al final, los recipientes fueron enfriados hasta 600 °C y se mantuvieron en esa temperatura durante 10 min, excepto en la curva 1 donde esta temperatura fue mantenida durante 1 h.

La etapa de quemado se desarrolló en un horno con sistema *Venturi Neyvulcan 3-550 A* y para vaciado del metal se utilizó un *Vacuum* de marca *Lamicol* con especificaciones de succión de 10 a 30 Pa (pascales).

Resultados y discusión

Los prototipos de resina son difíciles de quemar completamente cuando se usa una curva de quemado utilizada tradicionalmente para cera. Es por ello que las piezas producidas bajo esas condiciones tienen un acabado superficial pobre y requieren un trabajo de pulido extenso, por lo que resulta más provechoso realizar una repetición de la pieza modificando

las condiciones de proceso. La elección del ciclo del quemado adecuado para las resinas utilizadas se basa en la calidad de la pieza final. En este caso, se seleccionaron las condiciones de quemado con las cuales se logró un equilibrio de la calidad obtenida en las partes gruesas y delgadas de la pieza fundida. La inspección visual fue la primera prueba de calidad que se les realizó a las piezas, seguido del uso de un microscopio Motic SMZ168 Stereo Zoom, que tiene un rango de ampliación de 7,5 a 50x, en el que se examinaron las piezas, para así, garantizar un mayor nivel de detalle las mismas.

Las piezas fundidas obtenidas del quemado de las resinas bajo la curva convencional-curva 1, lucieron una superficie rugosa y áspera (ver Figura 6). Adicionalmente, presentaron perforaciones y huecos.

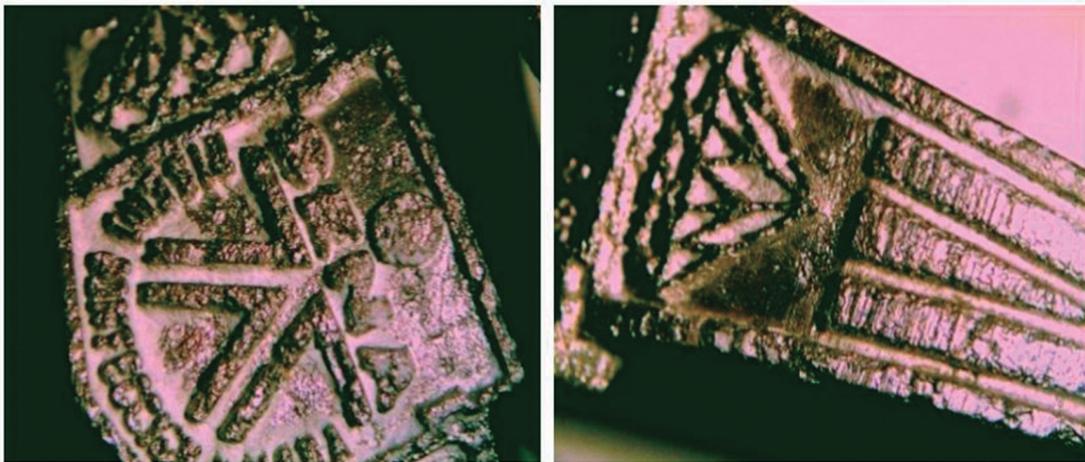


Figura 6. Detalles de la superficie de las piezas fundidas impresas con resina B9-Emerald bajo condiciones de quemado convencional (Curva 1).
Fuente: elaboración propia

Resultados similares se obtuvieron con la resina Epic 2000, cuya pieza también presentó una superficie irregular con poros y perforaciones muy visibles, como se muestra en la Figura 7.

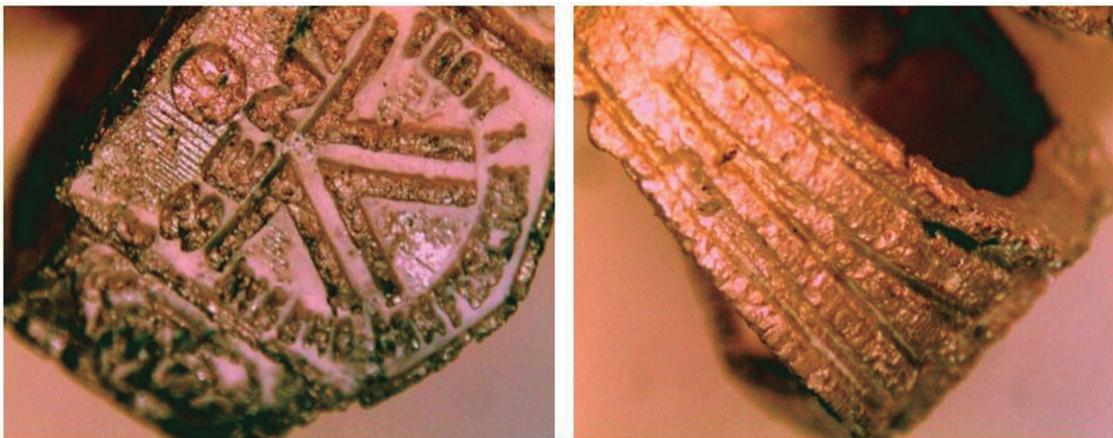


Figura 7. Detalles de la superficie de las piezas fundidas impresas con resina Epic 2000 bajo condiciones de quemado convencional (Curva 1)
Fuente: elaboración propia

Respecto a la curva 2, en la cual se disminuyó el tiempo de sostenimiento en las diferentes etapas, se evidenció un mejor equilibrio entre las partes gruesas y los detalles de la pieza. La rugosidad de la superficie mejoró para la resina B9-Emerald, comparado con los resultados obtenidos en la curva 1 como se aprecia en la Figura 8.

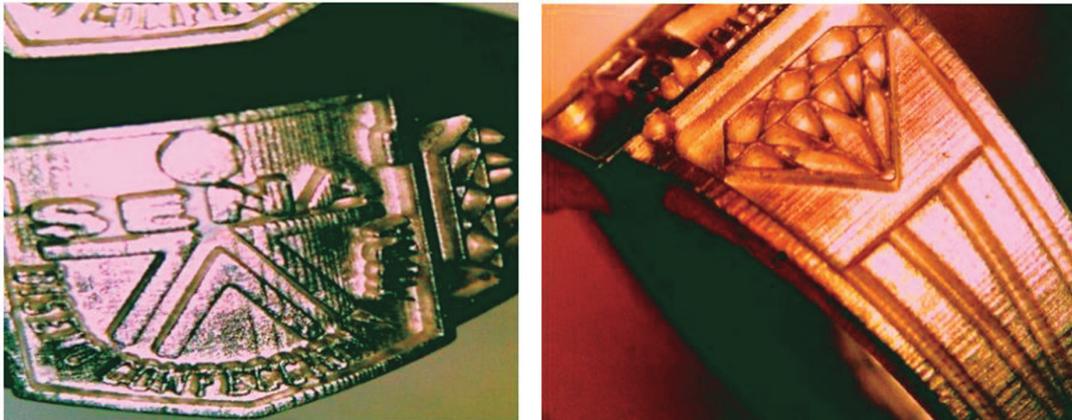


Figura 8. Detalles de la superficie de las piezas fundidas impresas con resina B9-Emerald bajo condiciones de quemado de curva 2
Fuente: elaboración propia

En el caso de las piezas impresas en Epic 2000, se aprecia presencia de poros en la parte frontal de la pieza, específicamente en la parte superior de la palabra “confección” (ver Figura 9).



Figura 9. Detalles de la superficie de las piezas fundidas impresas con resina Epic 2000 bajo condiciones de quemado de Curva 2
Fuente: elaboración propia

Las piezas obtenidas bajo las condiciones de curva 2, presentan un buen acabado, por lo que se requeriría un pulido normal para eliminarlas. La curva 3, solo fue probada con la resina Epic 2000. Como se muestra en la Figura 10, se pudo evidenciar la presencia de grietas y perforaciones en la superficie, posiblemente relacionadas con las fuertes tensiones térmicas que experimenta el yeso. Incluso, en una de las piezas es posible apreciar poros grandes y alineados que podrían haberse generado por una burbuja existente en el molde de yeso, que al romperse generó poros internamente unidos. No obstante, las letras presentaron buena apariencia y las líneas de impresión son visibles.

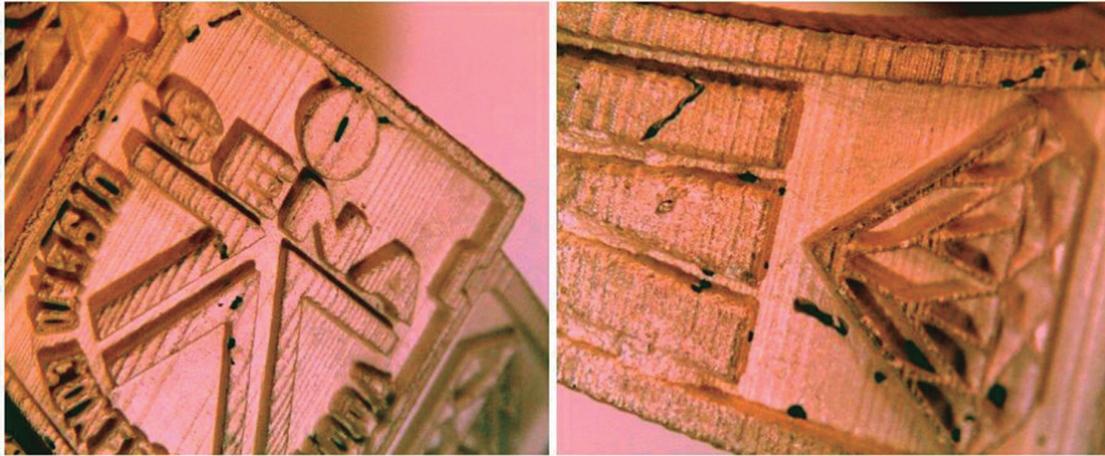


Figura 10. Detalles de la superficie de las piezas fundidas impresas con resina Epic 2000 bajo condiciones de quemado de Curva 3
Fuente: elaboración propia

Por otra parte, la curva 4 de quemado rápido se probó con el fin de determinar si el yeso toleraría un tratamiento similar, y si se podría obtener una pieza con excelente acabado en el menor tiempo posible. No obstante, la inmersión del tarro en el horno a 500 °C, seguido de calentamiento a 730 °C, no fue beneficiosa para mejorar la calidad de los vaciados de piezas de joyería. La pieza fundida, cuyo prototipo fue elaborado con resina Epic 2000, presentó más daños y superficie más rugosa comparada con la pieza obtenida de resina B9-Emerald. (Ver Figuras 11, 12).



Figura 11. Detalles de la superficie de las piezas fundidas impresas con resina B9-Emerald bajo condiciones de quemado rápido
Fuente: elaboración propia

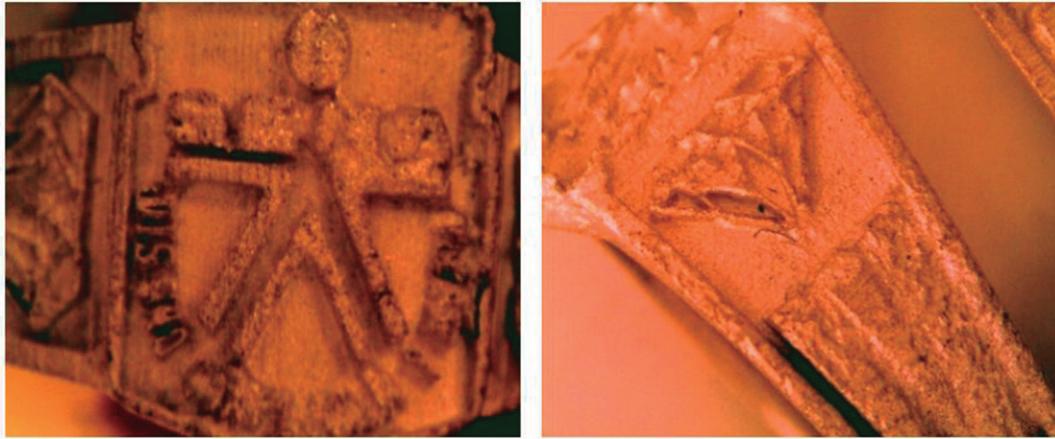


Figura 12. Detalles de la superficie de las piezas fundidas impresas con resina Epic 2000 bajo condiciones de quemado rápido
Fuente: elaboración propia

De acuerdo con los expertos técnicos consultados, la mayoría de las piezas de joyería obtenidas lucen con baja calidad, debido a la presencia de poros, grietas, cúmulo de materia, prominencia, alta rugosidad y letras ilegibles.

Conclusiones

La impresión 3D ha ido adquiriendo importancia y se ha convertido en una tecnología con potencial disruptivo, debido a su versatilidad para la producción directa de objetos físicos a partir de datos de diseño digital, brindando beneficios en términos de costo, capacidad de cumplir con soluciones de diseño complejas y ahorro de tiempo. La industria de la joyería es un ejemplo de su aplicación en la que se necesita libertad de diseño, para crear piezas con un alto grado de innovación y personalización, con especificaciones y dimensiones exactas, sin los altos excedentes que se generan por ser de fabricación única. Para promover el uso generalizado de piezas de resinas en el proceso de cera perdida es importante no alterar el proceso y mantenerlo lo más tradicional posible, permitiendo a las empresas de joyería beneficiarse de las bondades que ofrece el uso de impresión 3D.

En términos generales, se obtuvieron resultados satisfactorios con una curva que cuenta con tres rampas a 150, 455 y 750 °C, mantenidas durante 40, 30 y 20 min, respectivamente. Sin embargo, las piezas presentaron detalles que afectan su calidad, por lo que es difícil decir con exactitud qué variable del proceso tuvo mayor incidencia. Por ello, es importante analizar otras variables como: composición del yeso, relación agua:yeso, tiempo de fraguado, ubicación de los bebederos, tipo de horno utilizado, temperatura real de los moldes, entre otros. Así mismo, para fortalecer esta investigación es necesario hacer un análisis de la interacción entre las resinas y el yeso, teniendo en cuenta las condiciones de quemado.

Bibliografía

- Actis Grande, M.; Forno, I.; Klotz, U.; Tiberto, D. (2011). Quality Excellence in the Direct Casting of RP Resins : Reality or Fiction ? In *The Santa Fe Symposium on Jewelry Manufacturing Technology*. Politecnico di Torino & Research Institute for Precious Metals and Metals Chemistry (FEM).
- ASTM International. (2012). Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (Withdrawn 2015) (ASTM F2792-12a).
- ATKearney. (2014). *3D Printing: A Manufacturing Revolution*, 1–16. Recuperado de: <https://www.atkearney.com/documents/10192/5992684/3D+Printing+A+Manufacturing+Revolution.pdf/bf8f5c00-69c4-4909-858a-423e3b94bba3>

- Balletti, C.; Ballarin, M.; Guerra, F. (2017). 3D printing: State of the art and future perspectives. *Journal of Cultural Heritage*, 26, 172–182.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.02.010>
- Beeley, P.; Smart, R. (1995). *Investment casting*. London: Institute of Materials.
- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162.
<https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
- Bhandari, S.; Regina, B. (2014). 3D Printing and Its Applications. *International Journal of Computer Science and Information Technology Research*, 2(2), 378–380.
- Campos, J. C.; Romeiro, E. (2013). Implementation of Rapid Manufacturing Systems in the Jewellery Industry in Brazil. In Information Resources Management Association (Ed.), *Industrial Engineering: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications* (817–837). USA: Engineering Science Reference.
<https://doi.org/10.4018/978-1-4666-1945-6.ch046>
- Cheah, C. M.; Chua, C. K.; Lee, C. W.; Feng, C.; Totong, K. (2005). Rapid prototyping and tooling techniques: A review of applications for rapid investment casting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(3–4), 308–320.
<https://doi.org/10.1007/s00170-003-1840-6>
- Chua, C. K.; Leong, K. F.; Lim, C. S. (2010). *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltda.
- Corti, C. (2010). Jewelry Manufacturing Technology. In C. Corti & R. Holliday (Eds.), *Gold: Science and applications* (pp. 191–212). Taylor & Francis Group.
- Gao, W.; Zhang, Y.; Ramanujan, D.; Ramani, K.; Chen, Y.; Williams, C. B.; Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65–89.
<https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- Gebhardt, A. (2012). Understanding Additive Manufacturing Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing. *Carl Hanser, München*, 591.
<https://doi.org/10.3139/9783446431621>
- Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. Second Edition, New York: Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- Guo, N.; Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: Technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3), 215–243.
<https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>
- Hoffman, A. (2016). *Better Diamond Initiative: Different Processes in Jewelry Manufacturing*. Recuperado de: <https://betterdiamondinitiative.org/different-processes-manufacturing-jewelry/>
- Holmström, J.; Partanen, J.; Tuomi, J.; Walter, M. (2010). Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 21(6), 687–697.
<https://doi.org/10.1108/17410381011063996>

- Huang, S. H.; Liu, P.; Mokasdar, A.; Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: A literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(5–8), 1191–1203. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5>
- Marwah, O. M. F.; Sharif, S.; Zainol, M. A.; Ibrahim, M.; Mohamad, E. J. (2013). 3D Printer Patterns Evaluation for Direct Investment Casting. *Applied Mechanics and Materials*, 465–466(December 2013), 1400–1403. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.465-466.1400>
- Mellor, S.; Hao, L.; Zhang, D. (2014). Additive manufacturing: A framework for implementation. *International Journal of Production Economics*, 149, 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.07.008>
- Mohd Nor, S. Z.; Ismail, R.; Ahmad, S.; Isa, M. I. N. (2015). The effect of dewaxing and burnout temperature in block mold process for copper alloy casting. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(5), 1905–1915.
- Muñoz-Mesa, L.; Sánchez, J. (2016). El impacto de la impresión 3D en la joyería. *Lampsakos*, 16, 89–97. <https://doi.org/10.21501/21454086.2219>
- Pattnaik, S.; Karunakar, D. B.; Jha, P. K. (2012). Developments in investment casting process - A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(11), 2332–2348. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003>
- Petrick, I. J.; Simpson, T. W. (2013). 3D Printing Disrupts Manufacturing. *Research Technology Management*, 56(6), 12-16. <https://doi.org/10.5437/08956308X5606193>
- Petrovic, V.; Haro, J. V.; Jordá, O.; Delgado, J.; Blasco, J. R.; Portolés, L. (2009). Additive Layer Manufacturing: State of the art in industrial applications through case studies. *International Journal of Production Reserach*, 25.
- Prasad, R. (2012). Progress in Investment Castings. In *Science and Technology of Casting Process* (pp. 25–72). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/50550>
- Ramya, A.; Vanapalli, S. I. (2016). 3D Printing Technologies in Various Applications. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 7(3), 396–409.
- Rayna, T.; Striukova, L. (2016). From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.023>
- Redwood, B. (s.f. a). *3D HUBS: Jewelry 3D Printing Applications*. Recuperado de: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/jewelry-3d-printing-applications>
- Redwood, B. (s.f. b). *3D HUBS: The Additive Manufacturing Process*. Recuperado de: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-process>
- Redwood, B. (s.f. c). *3D HUBS: The Advantages of 3D Printing*. Recuperado de: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/advantages-3d-printing>
- Schniederjans, D. G. (2017). Adoption of 3D-printing technologies in manufacturing: A survey analysis. *International Journal of Production Economics*, 183(Part A), 287–298. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.11.008>

- Sias, F. R. (2005). *Lost-wax Casting: Old, New, and Inexpensive Methods*. Pendleton, South Carolina: Woodsmere Press. Recuperado de:
https://books.google.com.co/books?id=e_09Enaf4tIC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Singh, R., Singh, S.; Hashmi, M. S. J. (2016). Investment Casting. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* (pp. 1–18).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04163-1>
- Singh, S.; Singh, R. (2016). Precision investment casting: A state of art review and future trends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(12), 2143–2164.
<https://doi.org/10.1177/0954405415597844>
- Stansbury, J. W.; Idacavage, M. J. (2016). 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dental Materials*, 32(1), 54–64.
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.09.018>
- Underhill, R. (2017). *Jewelry Designs: Wax Carving*. Recuperado de:
<https://jewelrydesigns.com/jewelry/jewelry-making/wax-carving/>
- Vanderploeg, A.; Lee, S.-E.; Mamp, M. (2017). The application of 3D printing technology in the fashion industry. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 10(2), 170–179.
<https://doi.org/10.1080/17543266.2016.1223355>
- Yap, Y. L.; Yeong, W. Y. (2014). Additive manufacture of fashion and jewellery products: a mini review: This paper provides an insight into the future of 3D printing industries for fashion and jewellery products. *Virtual and Physical Prototyping*, 9(3), 195–201.
<https://doi.org/10.1080/17452759.2014.938993>