

Fundición artística de objetos complejos impresos en 3D con PLA (ácido poliláctico) como alternativa al modelo de cera¹

M. Drago Díaz-Alemán²; Cecile Meier³; Itahisa Pérez-Conesa⁴; J. Luis Saorín⁵

Recibido: 18 de julio de 2018 / Aceptado: 28 de enero de 2019

Resumen. En este trabajo se abordan las estrategias que permiten la introducción de modelos diseñados por ordenador como sustitutos de los modelos de cera utilizados tradicionalmente en la fundición artística. Estos modelos digitales se fabrican mediante impresión 3D en ácido poliláctico (PLA), material que por sus propiedades se presenta como un sustituto viable a la cera, dentro de los procesos de fundición artística mediante cascarilla cerámica (Ceramic Shell casting). Para comprobar la viabilidad se han diseñado dos modelos complejos y difícilmente realizables con técnicas tradicionales. En concreto, un busto figurativo hueco y una síntesis figurativa de formas vegetales con una solución estructural de gradiente. Además se hizo un estudio con diferentes técnicas para unificar la textura de capas que presentan los objetos fabricados mediante impresión 3D. Se comprueba que es viable introducir los modelos de PLA en el proceso de fundición a menor coste y menor tiempo que con técnicas tradicionales. Además se pueden fundir formas en metal que no son posibles de crear con técnicas manuales.

Palabras clave: PLA; fundición artística; impresión 3D; cera; escultura.

[en] Artistic casting of complex 3D printed objects with PLA as an alternative to the wax model

Abstract. This paper addresses strategies that allow the introduction of computer-designed models as substitutes for the wax models used traditionally in artistic casting. These digital models are manufactured by 3D printing in polylactic acid (PLA), material that due to its properties is a viable substitute to wax, within the processes of artistic casting using Ceramic Shell Casting. To check the viability there have been designed two complex models that are difficult to achieve with traditional techniques. In particular, a hollow figurative bust and a figurative synthesis of plant forms with a gradient structural solution. In addition, a study was made with different techniques to unify the texture of layers presented by the objects manufactured by 3D printing. It is proven that it is feasible to introduce PLA models in the smelting process at lower cost and less time than with traditional techniques. In addition you can melt metal shapes that are not possible to create with manual techniques.

Keywords: PLA; artistic casting; 3D printing; wax; sculpture.

¹ Convocatoria: Programa estatal de investigación, desarrollo e innovación orientada a los retos de la sociedad 2017. “Fundición artística de micro esculturas diseñadas por ordenador, mediante el desarrollo de técnicas de impresión 3D basadas en el procesamiento digital de luz” Referencia: HAR2017-85169-R.

² Universidad de La Laguna, Departamento de Bellas Artes (España)
E-mail: madradi@ull.es

³ Universidad de La Laguna, Departamento de Bellas Artes (España)
E-mail: cemeier@ull.edu.es

⁴ Universidad de La Laguna, Departamento de Bellas Artes (España)
E-mail: iperecon@ull.edu.es

⁵ Universidad de La Laguna, Departamento de Técnicas y Proyectos en Ingeniería y Arquitectura (España)
E-mail: jlsaorin@ull.edu.es

Sumario: 1. Introducción. 2. Antecedentes. 2.1. Fabricación Aditiva. 2.2. Impresoras 3D de cera. 2.3. Impresoras 3D de metal. 2.4. Impresoras 3D de bajo coste. 3. Materiales y métodos 3.1. Software. 3.2. Fabricación del modelo. 3.3. Proceso post impresión. 4. Proceso de fundición mediante Ceramic shell casting de los modelos impresos en PLA. 5. Resultados. 6. Conclusiones. 7. Futuros trabajos. Referencias.

Cómo citar: Díaz-Alemán, M.D.; Meier, C.; Pérez-Conesa, I.; Saorín, J.L. (2019) Fundición artística de objetos complejos impresos en 3D con PLA (ácido poliláctico) como alternativa al modelo de cera. *Arte, Individuo y Sociedad* 31(3), 543-556.

1. Introducción

La fundición se define como el proceso de formar objetos de metal, fundiéndolo y vertiéndolo en un molde creando objetos complejos en un solo paso y con gran variedad de formas y tamaños (Groover, 1997; Heine, Loper, & Rosenthal, 1955). Existen otros métodos para dar forma al metal como el mecanizado, forjado, soldadura, estampado, trabajo en caliente, etc. (Kalpakjian & Schmid, 2002). Las diferentes técnicas se usan según las características del modelo a construir y normalmente se combinan varios métodos a la vez para crear un objeto final.

Existen cinco tipos de procedimiento de fundición; La fundición en arena (Guharaja, Haq, & Karuppanan, 2006), donde se compacta arena sobre un modelo de cualquier material, a continuación se extrae ese modelo dejando un hueco por donde se vierte el metal. La fundición con moldes gasificables (Iowa Patente nº US3157924A, 1964), en la que se usa un modelo de poliestireno expandido en un molde de arena. Al verter el metal caliente sobre el poliestireno, éste se gasifica y desaparece y el metal ocupa su lugar en el molde. La fundición por coquilla (Alting & Boothroyd, 1990), donde se emplea moldes duros esculpidos en piedra u otros materiales con un punto de fusión más alto que el del metal a reproducir. La técnica de fundición a la cera perdida (Benavente, 1992), que consiste recubrir una pieza de cera con varias capas de material termoresistible. Dicho material se calienta para derretir la cera, obteniendo un molde vacío que posteriormente se llena con el metal fundido. Y por último la microfusión (Krekeler, 1971), una variante de la cera perdida, que consiste en introducir el modelo en un cilindro en el cual se vierte también el material refractario. Los moldes se calientan en un horno para eliminar la cera y cocerlos. Por último se vierte el metal en los cilindros aún calientes.

Actualmente en la fundición artística se utiliza la técnica a la cera perdida denominada “Ceramic Shell Casting” o Cascarilla Cerámica que es una variante del material refractario que se usa para crear el molde de fundición (Petrillo, 2013). Se emplea en empresas o centros artesanos que se dedican a hacer estatuaria, monumentos, trofeos o trabajos personales para artistas y también se usa en ambientes de educación artística. La técnica de la cascarilla cerámica se desarrolló en los años cuarenta en la industria aeronáutica para fundir piezas complejas de metal (Marcos Martínez, 2001). Esta técnica fue rescatada de la industria por David Reid (Reid) químico industrial, considerado como introductor y divulgador de esta técnica en Europa. Posteriormente fue divulgada en España por Juan Carlos Albaladejo (Albaladejo, 2003).

Con la aparición de la de fabricación aditiva surge la idea de sustituir los modelos de cera por modelos fabricados mediante impresoras 3D de bajo coste en el material

PLA (ácido poliláctico). Este material, es un poliéster termoplástico biodegradable, procedentes de recursos renovables como el almidón de maíz, un material no tóxico que tiene un punto de fusión similar a la cera (Serna & Albán, 2011). Los modelos diseñados por ordenador permiten una complejidad mayor que la que se puede conseguir con el uso de técnicas tradicionales de modelado a mano. La creación de piezas huecas, las variación de escalas en los modelos y la realización de variantes en formas prediseñadas, suponen un mínimo esfuerzo en modelos digitales, si los comparamos con los realizados de manera tradicional (Micallef, 2015). Además, la estandarización en el uso de impresión 3D de bajo coste hace accesible la incorporación de estas tecnologías a talleres de fundición artística.

Para comprobar la viabilidad se diseñan dos piezas complejas; Un busto figurativo hueco de pequeño tamaño, y una síntesis figurativa de formas vegetales con una geometría estructural de gradiente. El objetivo final, es calibrar los espesores y resoluciones óptimos de impresión 3D y su viabilidad como partes fundidas para obtener esculturas de metal con el proceso de la cascarilla cerámica. Además se investigan diferentes tratamientos de la superficie de los modelos impresos en 3D para suavizar la textura por capas que presentan las piezas creadas mediante fabricación aditiva.

2. Antecedentes

La creación de piezas de metal existe desde el año 6000 a.C. donde se trabajaba el material a base de martillazos. La técnica de fundir el metal, vaciando la colada sobre moldes abiertos de piedra o barro cocido, fue perfeccionada aproximadamente 4000 años a.C. (Benavente, 1992). El inicio de la fundición a la cera perdida se estima alrededor del año 3000 a.C. (Echavarría, 2016; Stefanescu, Davis, & Destefani, 1988).

La fundición a la cera perdida es un proceso que tiene como primer objetivo, obtener una pieza metálica por medio de un proceso arduo y en ocasiones lento, que consiste, como su nombre indica “a la cera perdida” (ing, *lost wax casting*), en hacer desaparecer la cera para convertir su rastro en metal.

Se conocen dos métodos de fundición a la cera perdida, el directo y el indirecto (Langland, 1999), el primero consiste en recubrir la cera modelada con materiales refractarios que soportan las altas temperaturas del metal, a continuación se funde la cera, dejando un molde hueco por el que se vierte el metal fundido. Desde el siglo III se conoce el método indirecto o molde por piezas (Midgley, 1993) consiste en sacar una copia mediante un molde de una pieza original de cualquier material, posteriormente vaciado en cera, posibilitando así la reproducción en serie (Wittkower, 1987). La técnica de la cera perdida fue llevada al máximo esplendor por los griegos en el año 500 a.C. cuando se descubre la fundición de estatuas huecas mediante el vertido de cera por capas en un molde. Esto permite crear obras grandes a un peso menor y con menos gasto de metal (Langland, 1999; Martínez Corredor, 1999).

El uso de la cera para crear modelos de fundición no ha cambiado mucho desde sus inicios hasta ahora, siendo uno de los dominantes métodos en la de fundición artística. Sin embargo, en algunas zonas de África antiguamente se sustituía la cera por resinas vegetales o raíces (McCreight, 1991). Actualmente existen estudios para utilizar materiales sustitutivos a la cera como la parafina o resina colofonia (Kohl, y

otros, 2003). La utilización de la cera para la fundición se debe a que su textura, dúctil y blanda, permite modelar con facilidad y añadir o quitar elementos con gran detalle. Además que otros materiales sustitutivos no alcanzan la misma calidad (Bird, 1979).

Otra técnica es modelar en materiales como por ejemplo la arcilla, preferido por la mayoría de escultores. Al crear una obra en un material que no es la cera, es necesario crear un molde para reproducir el objeto en cera y así poder continuar con el proceso de fundición. Crear un molde a un objeto puede ser un proceso largo y costoso pero permite obtener una o varias réplicas iguales al original (Langland, 1999). Los moldes se pueden hacer de varios materiales, de escayola que crea un molde único o de materiales maleables como la silicona que permite crear un molde reutilizable. Dependiendo de la pieza a reproducir el molde es de una pieza en el caso de un relieve o de muchas piezas según la complicación del modelo original (Midgley, 1993).

2.1 Fabricación Aditiva

Aunque la cera permite gran detalle al modelar y se trabaja con facilidad, es imposible llegar con ella a ciertos detalles que se pueden conseguir con procesos asistidos por ordenador. Una opción para la fabricación por máquinas, de piezas escultóricas, son las impresoras 3D. Que, a partir de ficheros digitales, permiten generar objetos tridimensionales mediante adición de material (Canessa, Fonda, & Zennaro, 2013).

La impresión 3D o fabricación aditiva, es un proceso mediante el cual se elabora un objeto sólido tridimensional a partir de un modelo digital. Éste es un proceso aditivo, donde se colocan las capas sucesivas de material adaptándose a las formas requeridas, predefinidas en un fichero digital 3D (Wong & Hernández, 2012). Esta tecnología se diferencia de las técnicas de mecanizado tradicionales que, en su mayoría, se basan en la eliminación de material por métodos tales como cortar o perforar (procesos sustractivos). La fabricación aditiva puede fabricar objetos a partir de muchos materiales. El más utilizado en las impresoras 3D de bajo coste es el PLA.

2.2 Impresoras 3D de cera

Existen impresoras 3D que producen objetos directamente en cera, estas máquinas están integradas en la fundición industrial y en los procesos de creación de joyería, donde han revolucionado la producción (Muñoz-Mesa & Sánchez-Trujillo, 2017). Las impresoras 3D profesionales de cera varían en precio desde 25.000 dólares hasta 55.000 dólares. También existen impresoras de bajo coste alrededor de 500 euros que imprimen en cera, sin embargo el precio de los fungibles para la fabricación aditiva en cera es elevado y el tamaño de impresión suele ser reducido. Debido al precio y el tamaño, su incorporación en empresas artesanas o centros artísticos resulta poco viable.

2.3 Impresoras 3D de metal

Una tecnología de impresión 3D establecida a niveles industriales es la “sinterización selectiva por láser” (SLS), que construye los objetos directamente en metal. Funciona superponiendo finas capas de polvo de material que son solidificadas por

un rayo láser. El material puede ser poliestireno, nylon, vidrio, cerámica, metales como el acero inoxidable, titanio, aluminio y diversas aleaciones como el bronce. Cuando los dispositivos SLS se utilizan para producir directamente objetos de metal el proceso también se llama “Direct Metal Laser Sintering” (DMLS) (Khaing, Fuh, & Lu, 2001). Los objetos metálicos creados por este tipo de impresora tienen aproximadamente un 99,99 por ciento densidad, y por lo tanto se pueden utilizar en lugar de las piezas metálicas tradicionales en la gran mayoría de aplicaciones (Kruth, Mercelis, Van Vaerenbergh, Froyen, & Rombouts, 2005). En cualquiera de estos casos, el coste del modelo impreso es extremadamente elevado, de tal manera que no son una alternativa viable en la fundición artística y de hecho no es un procedimiento estándar en este ámbito, quedando relegado su uso a la fundición industrial avanzada.

2.4 Impresoras 3D de bajo coste

Tanto las impresoras que generan modelos en cera como las que fabrican piezas directamente en metal suelen ser inviables en pequeñas empresas, centros artesanos, talleres de fundición artística o entornos educativos. Sin embargo, existen impresoras 3D de bajo coste que cuestan entre 250 y 2500 euros. Estas máquinas son generalmente del tipo FDM (modelado por deposición fundida) y utilizan un filamento de plástico asequible que alimenta una boquilla caliente de extrusión. Actualmente se utilizan diversos materiales plásticos con esta tecnología, incluyendo entre otros, el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), policarbonato (PC), polietileno de alta densidad (HDPE) y el ácido poliláctico (PLA).

El PLA es un material que por sus propiedades se presenta como un sustituto viable a la cera, dentro de los procesos de fundición. Hay investigaciones en las que se usan piezas de PLA fabricadas en impresoras 3D de bajo coste para sustituir otros materiales, entre ellos la cera, en los procesos de fundición.

En la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Ecuador) se ha usado modelos impresos en 3D mediante máquinas de bajo coste para realizar un proceso de fundición en arena, donde se requiere un modelo preciso. Normalmente los modelos están hechos en madera en un proceso artesanal, que además poseen el problema de hinchamiento por absorción de humedad (Macas Montaña & Pilco Llerena, 2016). En la investigación se han obtenido buenos resultados y es viable usar piezas creadas en impresoras 3D.

Mendonsa y Shenoy (2014) han comprobado que se reduce el coste y tiempo en los procesos de fundición de piezas al usar modelos de PLA. Presentan dos técnicas, por un lado la fundición en moldes de arena y otra usando la técnica de microfusión donde se introduce la pieza de impresa en 3D en un cilindro que se rellena con material termoresistente. A continuación se pasa por el proceso del descere y a la fundición con metal.

En otras investigaciones se confirma que los modelos impresos en 3D tanto en PLA como en ABS se pueden utilizar en el proceso de fundición a la cera perdida. Incluido las piezas con forma irregular y huecas que se pueden fundir con una precisión suficiente (Olkhovik, Butsanets, & Ageeva, 2016). Reiser y Bruce (2017) o Gil-Plazas y Herrera (2015) también usan piezas impresas en 3D en los procesos de fundición a la cera perdida. Sin embargo en todos los casos mencionados se tratan de piezas relacionadas con la ingeniería.

A diferencia de esas investigaciones, en los trabajos descritos en este artículo, se aborda el uso de modelos impresos en PLA para y su adaptación a los procesos de fundición artística mediante la técnica de *Ceramic Shell Casting*. Por un lado se realizan pruebas con una escultura de formas orgánicas, un busto realista, objeto habitual que se trabaja en la fundición artística. Por otro lado se fabrica una pieza escultórica con geometrías detalladas, muy complicadas de modelar a mano.

3. Materiales y métodos

3.1 Software

Para poder imprimir un modelo con una impresora 3D, primero se necesita el modelo digital. Estos se obtienen mediante software especializado de modelado 3D o mediante la digitalización 3D a través de escáneres o la fotogrametría. Hay muchos programas de modelado 3D que se adaptan a disciplinas específicas. En el campo del modelado artístico existe software cuyo funcionamiento reproduce, en gran medida, los procesos de modelado real en arcilla, aunque también permite el modelado geométrico. En la actualidad existen distintos programas, algunos de ellos gratuitos, que permiten este modo de trabajo, como ZBrush, Sculpttris, Mudbox, Meshmixer, 3D Coat, Blender, etc.

La digitalización 3D mediante escáneres y fotogrametría procede del mundo de la topografía y estaban basadas en aplicaciones orientadas a la creación de modelos digitales del terreno. Actualmente existen aplicaciones móviles gratuitas que crean modelos tridimensionales a partir de la fotogrametría y los escáneres 3D son cada vez más accesibles con resultados aceptables aunque con menos resolución que las herramientas profesionales (Camba, Bonnet de León, de la Torre-Cantero, Saorín, & Contero, 2016).

Una vez obtenido nuestro modelo digital, y para poder ser impreso en 3D, necesitaremos la ayuda de un programa que traduzca la geometría resultante de nuestro modelado a código de control numérico que puede ser interpretado por una impresora 3D. Existen numerosos programas, algunos gratuitos, que cumplen esta función, como Cura, Slic3R, Repetier, Octoprint, etc. Mediante este tipo de programas, se editan todos los parámetros que afectan al proceso de impresión 3D. Entre ellos los más importantes son el control de la altura de capa, el número de capas del perímetro de la pieza, la densidad del relleno interior, la temperatura de extrusión, la ubicación y la densidad de los soportes.

Para esta investigación se plantearon dos diseños diferenciados. El primero de ellos consiste en un busto figurativo cuya función es representar una tipología habitual de trabajo propia de un taller de fundición. Este modelo se creó con el programa ZBrush esculpiendo la arcilla digital. Como singularidad, se realizó un desfase superficial para conseguir un modelo hueco (Fig. 1A).

El segundo de los modelos se planteó como síntesis figurativa de formas vegetales y se optó por una solución estructural de gradiente. Su objeto es calibrar los espesores y resoluciones óptimos de impresión 3D y su viabilidad como partes fundidas. Este modelo se realizó con el plugin de edición de topologías denominado "*Weaverbird*" dentro del programa Rhinoceros (Fig. 1B). En el caso de los modelos que se detallan en esta investigación, se utilizaron programas de uso no gratuito, debido a que se

disponía de licencia de los mismos. Sin embargo, para obtener modelos semejantes, esto no es imprescindible. Se podrían conseguir resultados similares mediante programas gratuitos como por ejemplo Sculpttris y Meshmixer.

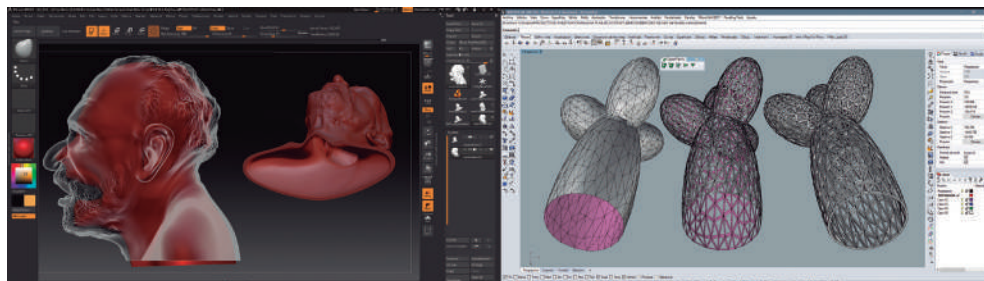


Figura 1A. Busto figurativo hueco en el programa ZBrush esculpiendo la arcilla digital. Donde se muestra el resultado de aplicar un desfase en superficie. Figura 1B. Síntesis figurativa de formas vegetales en el programa Rhinoceros donde se muestra el plugin de edición de topologías denominado “Weaverbird”. (Fuente: Fotografía del autor).

Estos dos objetos son complejos de realizar mediante técnicas manuales tradicionales. En la fundición se realizan las piezas huecas mediante el vertido de cera por capas en un molde realizado previamente a un modelo. Esto permite crear obras a un peso menor y con menos gasto de metal, pero requiere un proceso complejo y largo. Sin embargo dicho proceso se consigue automáticamente con un comando de desfase superficial en un programa de modelado 3D. La segunda pieza posee una geometría de muy difícil modelado manual, debido a su nivel de detalle y a los espesores requeridos, pero se puede fabricar sin dificultad mediante una impresora 3D.

3.2 Fabricación del modelo

Tabla 1. características de impresión 3D.

<p>Modelo A: busto figurativo (Fig. 2A) Dimensiones: 99 x 134 x 93 mm. Espesor de la pieza entre: 5 - 1,5 mm. Impresora: BQ, Witbox Material: PLA gris de 1,75 mm Altura de capa: 0,1 mm Contorno: 2 capas Infill: 12% Soportes: 40% Temperatura: 210°C Velocidad de impresión: 70 mm/s Tiempo de impresión: 16 horas y 30 minutos Peso: 123,23 gr. Coste del material: 5,67 €</p>	<p>Modelo B: síntesis figurativa (Fig. 2B) Dimensiones: 159 x 83 x 79 mm. Espesor de la pieza: 1,2 - 1,3 mm. Impresora: BQ, Witbox Material: PLA gris de 1,75 mm Altura de capa: 0,1 mm Contorno: 2 capas Infill: 12% Soportes: 40% Temperatura: 210°C Velocidad de impresión: 70 mm/s Tiempo de impresión: 8 horas y 50 minutos Peso: 11,08 gr. Coste del material: 0,51 €</p>
--	---

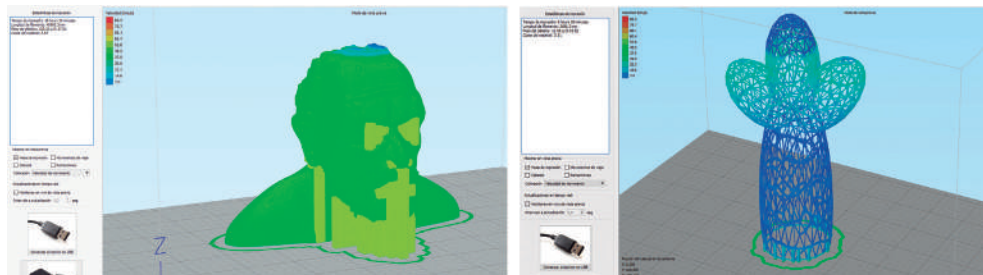


Figura 2A. Características de impresión 3D del busto figurativo. Figura 2B. Características de impresión 3D de la síntesis figurativa. (Fuente: Fotografía del autor).

3.3. Proceso post impresión

La pieza de PLA resultante del proceso de fabricación aditiva mediante una impresora posee un alto nivel de detalle, sin embargo, a pesar de que en los ejemplos realizados se ha utilizado la mínima altura de capa posible, es visible la estructura de capas que es inherente al modo de fabricación (Fig. 3A). Para eliminar esta textura por capas se han sometido las piezas a procedimientos para suavizar esta textura, que si no se elimina, quedaría registrada en el molde cerámico y por consiguiente en la pieza de bronce resultante. En el marco de esta investigación se abordaron cinco tratamientos de homogenización de la textura con la intención de corregir y pulir la superficie. El resultado de dicho tratamiento se puede observar en la figura 3.

1. Mediante imprimación controlada por brocha de las superficies impresas con disolvente (Tetrahidrofurano). Esta solución intermedia parece ser la más adecuada para un uso generalizado como procedimiento de homogenización de textura ya que permite la aplicación controlada por zonas y no añade material, lo que evita la posibilidad de deformación puntual (Fig. 3B).
2. Mediante imprimación controlada por brocha de las superficies impresas con disolvente (Acetato de Etilo). Aunque el modo de aplicación es el óptimo, este disolvente no actúa con la inmediatez adecuada y su capacidad para disolver el PLA es menor que el Tetrahidrofurano (Fig. 3C).
3. Mediante pulido de superficie por condensación controlada de disolvente (tetrahidrofurano y acetato de etilo). Este procedimiento dio buenos resultados ya que se produce un pulido de manera gradual y homogénea, pudiendo ser controlado. Sin embargo, puede deformar la pieza por el aumento local de temperatura y ambos son componentes inflamables y tóxicos (Fig. 3D).
4. Mediante adición o imprimación de cera o parafina a la superficie. Esta estrategia da resultados óptimos, pero plantea dificultades para controlar la cantidad de material aplicado. La inmersión de la pieza en cera caliente y líquida puede deformar la pieza de PLA o puede ocultar detalles significativos del diseño (Fig. 3E).
5. Por chorro abrasivo. Se utilizó, bicarbonato armex y corindón blanco con granulometría de entre 0,4 y 0,6 mm. Aunque este procedimiento es efectivo en la unificación de superficies blandas, planteó un problema irresoluble al ser

aplicada sobre modelos impresos debido a que los procedimientos abrasivos tienden a destruir la capa más superficial dejando visible el interior hueco y la pieza presenta desperfectos, con un aspecto “descascarillado” (Fig. 3F).

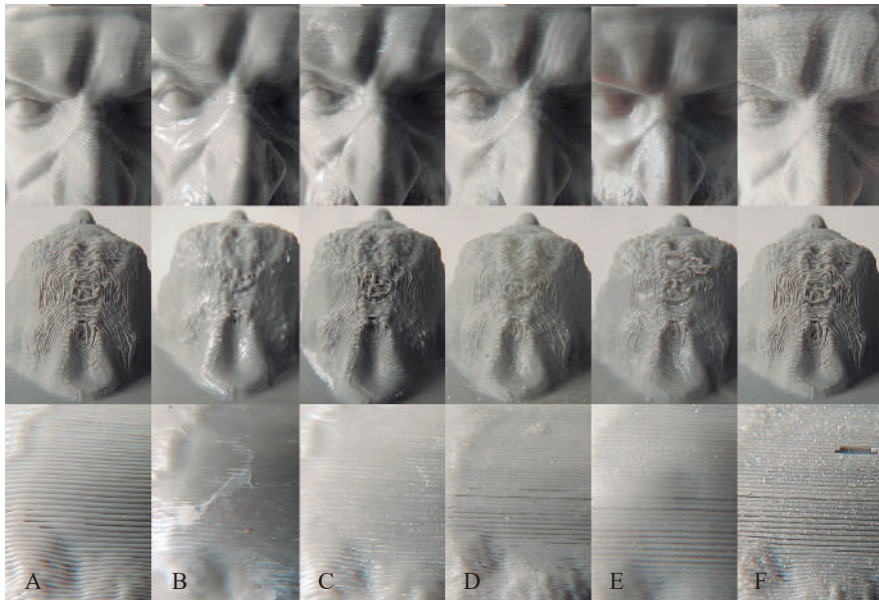


Figura 3. De izquierda a derecha: 3A: Impresión 3D original sin tratamiento; 3B: Tratamiento 1, (Imprimación con Tetrahidrofurano); 3C: Tratamiento 2 (Imprimación por brocha con Acetato de etilo); 3D: Tratamiento 3 (pulido de superficie por condensación controlada de disolvente); 3E: Tratamiento 4 (adición o imprimación de cera o parafina); 3F: Tratamiento 5 (Por chorro abrasivo). (Fuente: Fotografía del autor).

4. Proceso de fundición mediante Ceramic shell casting de los modelos impresos en PLA

Para fundir la pieza de PLA en bronce se ha usado la técnica de Ceramic Shell Casting, se sigue el mismo procedimiento que se emplea normalmente con piezas de cera.

Primero se procede a realizar el árbol de fundición con sus bebederos y crisol que generará un conjunto mixto de ambos materiales, cera y PLA (Fig.4A). El denominado árbol de fundición es un sistema de riego por donde sale la pieza derretida y por donde entra el metal, que varía en función del peso, volumen, morfología y tipología de colada del metal. El árbol de colada con los bebederos y el crisol no se construye en PLA debido a que esa parte no requiere detalles y el proceso sería más lento y costoso desde un punto de vista económico.

La compatibilidad de cera y ácido poliláctico en relación a sus propiedades de adherencia son óptimos para el desarrollo de la técnica. La adherencia de ambos materiales es casi perfecta debido al bajo punto de fusión de PLA, la plasticidad

grasa y las especificidades termofusibles de la cera que actúan como aglutinante. Al conjunto híbrido se le aplica una solución de gomalaca en escama y alcohol como aglutinante compuesta por una mezcla de grafito en polvo y sílice coloidal Hispasil (Tamaño de molécula 7h) al 50% de su volumen de ambas partes. Esta primera capa actúa como antioxidante y facilita el desmoldeo.

A continuación, se prepara una mezcla con moloquita de grano fino (harina -200) y sílice coloidal como aglutinante, disminuyendo su densidad a medida que va aumentando el número de capas. A modo de baño, se cubre el conjunto alternando un espolvoreado de moloquita de mayor granulometría. Quedando un molde a base de superposición de capas de la siguiente manera:

1. Recubrimiento: Moloquita en harina (granulometría -200) + SiO₂ coloidal (15% Sílice). Estucado: Grano Fino 50/80M.
2. Recubrimiento: Moloquita en harina (granulometría -200) + SiO₂ coloidal (30% Sílice). Estucado: Grano Fino 50/80M.
3. Recubrimiento: Moloquita en harina (granulometría -200) + SiO₂ coloidal (40% Sílice). Estucado: Grano Grueso 16/30M.

Los tiempos de secado para la deshidratación de las capas es de aproximadamente 3 horas entre las capas, acelerando el proceso mediante ventilación artificial para generar una temperatura constante.

Una vez se termina y se seca el recubrimiento (Fig. 4B), se somete al modo de descere rápido o choque térmico, que consiste en introducir la pieza en un horno precalentado a 600°C y 800°C y derretir la cera o en este caso el PLA. Una vez hueco el molde y reparado posibles fisuras provocadas por el choque térmico, se procede a la carga del metal en el crisol y a la fusión del mismo llenando el molde vacío con el metal fundido. Al usar un modelo en PLA esta técnica deberá denominarse fundición al PLA perdido (lost-PLA casting).



Figura 4A. Modelo en PLA con el árbol de fundición con sus bebederos y crisol que generará un conjunto mixto de ambos materiales (cera-PLA); Figura 4B. Piezas con el recubrimiento de la cascarilla cerámica. (Fuente: Fotografía del autor).

5. Resultados

Se han obtenido dos piezas en bronce fundido (Fig. 5A y 5B) que serían muy complejos o imposibles de realizar mediante técnicas tradicionales. Se ha realizado un busto hueco con una operación sencilla y directa en un programa de modelado 3D, que mediante procedimientos tradicionales necesita de un proceso complejo de creación de moldes y llenados por capas. La pieza de la síntesis figurativa de formas vegetales con una solución estructural de gradiente es una operación sencilla en un programa de modelado digital, pero casi imposible de realizar a mano.

Se ha comprobado, en los modelos diseñados, que la mejor forma de eliminar o suavizar el rastro que provoca la fabricación aditiva es mediante imprimación controlada por brocha de las superficies impresas con disolvente (Tetrahidrofurano). Esta solución parece ser la más adecuada para un uso generalizado como procedimiento de homogenización de textura ya que permite la aplicación controlada por zonas y no añade material, lo que evita la posibilidad de deformación puntual (Fig. 5C y 5D).



Figura 5A. Busto figurativo, realizado con fundición de PLA-perdido; Figura 5B. Síntesis figurativa realizada con fundición de PLA-perdido; Figura 5C. Detalle de superficie con tratamiento de homogenización; Figura 5D. Detalle de superficie sin tratamiento. (Fuente: Fotografía del autor).

6. Conclusiones

La posibilidad de crear diseños complejos mediante herramientas de modelado y creación 3D es posible y cada vez más barato (incluso gratuito) con el avance de las nuevas tecnologías. Se pueden crear modelos más detallados y de manera más rápida que aquellos realizados a mano, como por ejemplo en el caso de las piezas huecas. Además, en el entorno digital se pueden hacer infinitas variaciones y copias diferentes sin esfuerzo y sin tener que intervenir en la pieza original.

Por otro lado, a la hora de producir una pieza mediante fabricación aditiva se puede variar la escala sin problema, mientras que mediante técnicas manuales requiere una inversión de tiempo considerable. Sin embargo, en los modelos impresos mediante

fabricación aditiva, se crea una textura de capas visible que pueda afectar al resultado final de la pieza fundida.

Después del trabajo realizado podemos concluir que es factible introducir modelos diseñados por ordenador y fabricados mediante PLA en una impresora de bajo coste en el proceso de la fundición artística. El tratamiento de homogenización realizado con disolvente, permite eliminar texturas sin perder detalle de la pieza y el procedimiento utilizado habitualmente en la fundición a la cera perdida mediante Ceramic Shell Casting no presenta ningún inconveniente al introducir el PLA. Los modelos testeados en esta investigación ofrecen una complejidad que su realización resulta difícil mediante métodos tradicionales.

Por lo tanto, el método descrito en este artículo, representa una alternativa de bajo coste a la impresión directa en metal, que aunque existe a nivel industrial, es un proceso muy costoso que queda lejos de las posibilidades económicas reales de la mayoría de los usuarios de la fundición artística.

7. Futuros trabajos

A continuación de este estudio se pretende incorporar la creación de piezas de PLA como alternativa de la cera en la asignatura de “Fundición Artística” de la Universidad de La Laguna. Se pretende comprobar la viabilidad en un aula con alumnos y medir la aceptación/satisfacción del alumnado al trabajar con nuevas tecnologías.

Por otro lado se propone investigar sobre los procesos y herramientas que permiten la fundición de micro-esculturas realizadas con fotopolímero, mediante la impresión 3D por fotopolimerización con luz ultravioleta adaptadas a las necesidades de la microfusión artística. Se intentará conseguir la máxima resolución en el menor tamaño posible.

Referencias

- Albaladejo, J. C. (2003). *Fundición a la cera perdida*. Santa Cruz de Tenerife, España: Departamento de Pintura y Escultura. Universidad de La Laguna.
- Alting, L., & Boothroyd, G. (1990). *Procesos para ingeniería de manufactura*. México: Alfaomega.
- Benavente, J. A. (1992). *Fundición a la cera perdida (Microfusión)*. Barcelona: Alsina.
- Bird, J. (1979). Legacy of the stingless bee. *Natural history*, 88 (9): 49-51.
- Camba, J., Bonnet de León, A., de la Torre-Cantero, J., Saorín, J. & Contero, M. (2016). Application of low-cost 3D scanning technologies to the development of educational augmented reality content. *IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)* (págs. 1-6). Erie, PA, USA: IEEE.
- Echavarría, A. (2016). Breve historia del proceso de fundición a la cera perdida. *Revista Informetal*(59), 61-72.
- Gil-Plazas, A. & Herrera, L. (2015). Obtención de geometrías complejas mediante fundición de metales aplicando ingeniería asistida por computador. *Manufactura flexible*, 97-108.
- Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Lehigh: Pearson Educación.

- Guharaja, S., Haq, A. & Karuppanan, K. (2006). Optimization of green sand casting process parameters by using Taguchi's method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30(11-12), 1040-1048.
- Heine, R., Loper, C. & Rosenthal, P. (1955). *Principles of Metal Casting*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education.
- Kalpakjian, S. & Schmid, S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Pearson Educación.
- Khaing, M., Fuh, J. & Lu, L. (2001). Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 113 (1-3), 269-272.
- Kohl, R., Alcoba, M., Bruno, M., Varela, P., Contella, N. & Radewich, O. (2003). Fundición a la cera perdida: materiales para modelo. *Jornadas SAM/ CONAMET/ Simposio Materia* (págs. 50-52). Río Negro: Simposio Materia. Recuperado de: <https://studylib.es/doc/5336471/50-fundici%C3%B3n-a-la-cera-perdida--materiales-para>
- Krekeler, K. (1971). *Microfundición. Fundición con modelo perdido*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Kruth, J., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L. & Rombouts, M. (2005). Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid prototyping journal*, 11(1), 26-36.
- Langland, T. (1999). *From Clay to Bronze. A studio guide to figurative sculpture*. New York: Watson-Guption Publications.
- Macas Montaña, C. & Pilco Llerena, K. (2016). Construcción de un modelo de fundición mediante la utilización de tecnología de impresión 3D. *Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*.
- Marcos Martínez, C. (2001). Fundición a la cera perdida: técnica de la cascarilla cerámica. *Tesis doctoral*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Martínez Corredor, J. (1999). *Técnicas de fundición artística*. Granada: Universidad de Granada.
- McCreight, T. (1991). *Tire complete melalmsmillr*. Worcester: Davis Publications.
- Mendonsa, C. & Shenoy, V. (2014). Additive Manufacturing Technique in Pattern making for Metal Casting using Fused Filament Fabrication Printer. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, 1(1), 10-13.
- Micallef, J. (2015). What's possible with 3D printing? En *In Beginning Design for 3D Printing* (págs. 1-30). Berkeley, CA: Apress.
- Midgley, B. (1993). *Guía completa de escultura, modelado y cerámica: Técnicas y materiales* (Vol. 35). Madrid: AKAL.
- Muñoz-Mesa, L. & Sánchez-Trujillo, J. (2017). El impacto de la impresión 3D en la joyería. *Lámpsakos*, 1(16), 89-97.
- Olkhovik, E., Butsanets, A. & Ageeva, A. (2016). Use of additive technologies for practical working with complex models for foundry technologies. *Materials Science and Engineering* (págs. Vol. 140, No. 1, p. 012013). IOP Publishing.
- Petrillo, L. (2013). La cascarilla cerámica como material escultórico. *Tesis doctoral*. Barcelona, España. Recuperado de <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/35441>
- Reid, D. (s.f.). *The Reid Technique and Research*. Recuperado de: <http://home.c2i.net/metaphor/>.
- Reiser, S. & Bruce, R. (2017). Lost-PLA casting: hands-on material science. *1st Annual ACM Symposium on Computational Fabrication* (págs. 14-15). Massachusetts: ACM.
- Serna, L. & Albán, F. (2011). Ácido poliláctico (PLA): Propiedades y aplicaciones. *Ingeniería y competitividad*, 5(1), 16-26.

- Smith, T. (1964). *Iowa Patente n° US3157924A*. Recuperado de: <https://patents.google.com/patent/US3157924>
- Stefanescu, D., Davis, J. & Destefani, J. (1988). *Metals Handbook, Vol. 15 "Casting"*. USA: ASM International.
- Wittkower, R. (1987). *La escultura: procesos y principios*. Madrid: Alianza.
- Wong, K. & Hernández, A. (2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 1-10. doi:doi:10.5402/2012/208760