

Rapid casting y nuevas tecnologías en el proceso de microfundición

Rapid casting and new technologies in investment casting

Claudia Marcela Sánchez R.¹ y Carlos Julio Cortés R.²

RESUMEN

Siendo el prototipado rápido un método de fabricación diferente de los tradicionales en que no remueve o deforma material sino que lo agrega para obtener las piezas que se han diseñado, es utilizado no solamente en la fabricación de productos terminados sino también en la elaboración de herramientas para agilizar diferentes procesos de manufactura. Este artículo introduce el prototipado rápido como técnica de apoyo al proceso de microfundición. Se hace una descripción corta de las diferentes técnicas que se han implementado hasta el momento y los materiales que sirven para elaborar los artículos de las diversas etapas del proceso en las que prototipado rápido interviene.

Palabras clave: prototipado rápido, microfundición (fundición de precisión), ceras, ABS.

ABSTRACT

Rapid prototyping is a manufacturing process which is different to traditional methods as material is not removed or formed but added to obtain the designed pieces. It is not just used for manufacturing finished products but in manufacturing tooling for speeding up other manufacturing processes. This paper introduces rapid prototyping as a support technique for the lost wax process (investment casting). It gives a brief description of the different techniques implemented to date and materials used for making articles as part of the lost wax process.

Keywords: rapid prototyping, lost wax process (investment casting), waxes, ABS.

Recibido: junio 15 de 2005

Aceptado: enero 23 de 2006

Introducción

La tecnología del prototipado rápido (Rapid Prototyping) ha estado disponible comercialmente desde hace dos décadas. Ha sido usada en una amplia variedad de aplicaciones. Durante los últimos ocho años el uso de tecnologías de prototipado rápido en la industria de la fundición ha jugado un papel importante en el desarrollo de nuevos materiales y sistemas que apuntan a la fundición en sus diferentes formas (Tromans, 2002), debido a que permite la producción de prototipos de geometrías complejas en poco tiempo, y más recientemente, permitiendo la construcción de figuras partiendo de modelos de programas CAD en 3D sin el uso de moldes. La clave del prototipado rápido radica en que hay una conexión directa entre el modelo de CAD y los objetos sólidos, permitiendo rápidamente fabricar piezas hechas a la medida que el cliente requiere, o partes únicas, como en el caso de las aplicaciones protésicas.

En este artículo se muestran las diferentes técnicas de prototipado rápido que hoy en día están siendo usadas en diversos lugares como parte del proceso de fundición de precisión (Investment Casting).

Proceso de microfundición

Este proceso es uno de los más antiguos de las técnicas metalúrgicas. En términos sencillos, es un proceso de fundición en el cual se utiliza un patrón de cera o material similar para ser recubierto por una mezcla cerámica. Después el molde es secado, el patrón se funde y extrae, y el metal fundido es vertido en el molde. Se puede decir que es una técnica que requiere una habilidad considerable para su ejecución.

¹ Ingeniera mecánica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Asesora del Programa Nacional de Desarrollo Tecnológico Industrial y Calidad. Colciencias. cmsanchezr@unal.edu.co, cmsanchez@gmail.com

² Ingeniero mecánico, M.Sc. materiales y procesos de manufactura, Comisión de Estudios de Doctorado en Manufactura, Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. cjcortesr@unal.edu.co.

Los pasos básicos para la obtención de una pieza por microfundición, son: 1. La obtención de un modelo a partir del cual se genera un molde para inyección de ceras. 2. Inyección de la cera en el molde a fin de obtener los patrones de la pieza. 3. Preparación de la mezcla cerámica, que se compone de polvo refractario y un sistema de pegante coloidal; el patrón se introduce en la mezcla (baño húmedo) y después se hace aspersión de polvo cerámico (baño seco), para luego ser secado. Esta operación se repite hasta que se tiene el espesor requerido de la cáscara o molde cerámico. 4. Descerado, proceso en el cual se usan métodos para remover el patrón de cera; normalmente, se utiliza autoclave. 5. Vertido parte del proceso en el que las cáscaras son quemadas, precalentadas y llenadas con el metal fundido el cual se solidifica dentro de la cáscara. 6. Remoción de la cáscara una vez se ha solidificado el metal, la cáscara cerámica se remueve a través de métodos químicos o mecánicos (Sánchez, 2003).

Prototipado rápido

El prototipado rápido, conocido también como fabricación libre de sólidos, tiene relación con "La fabricación de una parte física tridimensional, de forma geométrica arbitraria, partiendo directamente de una base de datos CAD por un proceso rápido altamente automatizado y totalmente flexible". (Des Egan, 2000).

Los primeros modelos fabricados por esta técnica fueron frágiles y tenían tolerancias medianamente inexactas. Hoy en día el prototipado rápido se define como la tecnología de manufactura generativa o manufactura por capas. Es un método de fabricación diferente de los tradicionales en que no remueve o deforma material para obtener las piezas que se han diseñado.

En todo proceso de PR se parte de la construcción de un modelo computacional usando herramientas como los sistemas de CAD/CAM. El modelo construido debe estar definido por un volumen limitado. Posteriormente, se convierte el modelo en un archivo de formato STL (STereolithography), que es un formato estándar que describe la geometría CAD usada en el sistema de PR. Este formato aproxima la superficie del modelo por medio de polígonos para llegar al objeto real. Finalmente, la máquina fabrica el prototipo construyéndolo capa por capa y formando el modelo en tres dimensiones por solidificación de líquidos o polvo según la técnica de PR aplicada. Los rangos de las capas están entre 25 a 250 micrones.

Tecnologías de prototipado rápido

Actualmente hay más de 30 tecnologías de PR disponibles para modelos de producción basadas en el principio de fabricación aditiva (Chen, 2001), algunas de ellas son: estereolitografía (Stereolithography SLA), sinterización selectiva con láser (Selective Laser Sintering SLS), modelado por deposición fundida (Fused Deposition

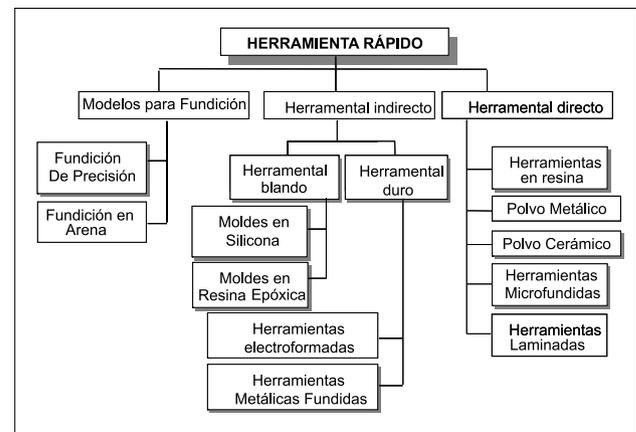


Figura 1. Clasificación de Herramental Rápido (Rapid Tooling).

Fuente: Rosochowski y Matuszak 2000

Modeling FDM), Laminated Object Manufacturing (LOM), impresión en tres dimensiones (3D Printing), Extrusión Freeform Fabrication (ACR, NASA), modelado por Inkjet (Inkjet Modeling)

Los elementos que hacen diferencia entre estas tecnologías son dos: el material usado y la técnica de construcción de las partes. Los materiales usados en PR deben poderse, enarenar, maquinar, unir, manipular, pintar y ser baratos.

Clasificación de las técnicas de prototipado rápido

Por la forma inicial de los materiales que se utilizan, se pueden clasificar los procesos de PR como:

- Base líquida: Un material de base líquida se le hace un proceso de curado, del cual resulta el sólido que se estaba buscando (p. eje., SLA, SGC, SOUP, etc.).
- Base sólida: abarca todas las formas de material sólido tales como hilo, en enrollado, en lámina y en aglomerados (p. eje., LOM y FDM, etc.).
- Base de polvos: el material que se encuentra en granos pequeñísimos se somete a un proceso de unión o compactado para producir el sólido que se diseñó (p. eje., SLS y 3DP, etc.).

Por principios de generación de capas, los procesos se clasifican como: polimerización (p. eje., estereolitografía), fundición y resolidificación (p. eje., sinterizado por láser, recubrimiento por láser, extrusión), pegado (p. eje., impresión en 3D (3D-Printing)), corte (p. eje., manufactura de capas laminadas).

La generación de capa en el plano se hace con diferentes herramientas (Tabla 1).

Tabla 1 Técnica de Prototipado vs. Herramienta

| Proceso | Herramienta de Contorno |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Estereolitografía | Láser |
| Sinterizado | Láser |
| Modelado por laminación de capas | Láser, Cortador, Milling |
| Impresión en 3D (3D Printing) | Dispositivo Multi boquillas |
| Modelado por Deposición Fundida | Dispositivo de boquilla |

Prototipado rápido en el proceso de microfundición

Estereolitografía (SLA)

Desarrollada en 1986 por 3D Systems. El principio que adopta es el siguiente: los objetos se logran polimerizando una resina líquida de baja viscosidad, sección por sección. La forma y dimensiones de las partes son transferidas directamente de un programa CAD de 3D al equipo, donde un rayo láser (por lo general He-Cd o Ar) polimeriza las diferentes secciones. Una computadora controla que el láser dibuja el fondo, la sección transversal hacia la superficie de un polímero líquido. El polímero se endurece en el lugar donde es golpeado por el láser. La figura es escaneada por un sistema óptico y controlada por un mecanismo de elevación que baja la capa que ha sido fabricada (Cheng y Shu-Hung, 1992). La próxima sección transversal es directamente arrastrada encima de la anterior. Esto se repite hasta que la parte es terminada. Finalmente, la parte se retira del recipiente y es curada en un aparato especial (Figura 2) (Jacobs, 2000).

SLA en microfundición

Desde los primeros días del desarrollo de esta técnica el proceso de microfundición ha usado patrones construidos en máquinas de SLA. Los materiales utilizados para la fabricación de patrones son especiales para este proceso, pero no las ceras que se usan en el proceso de microfundición.

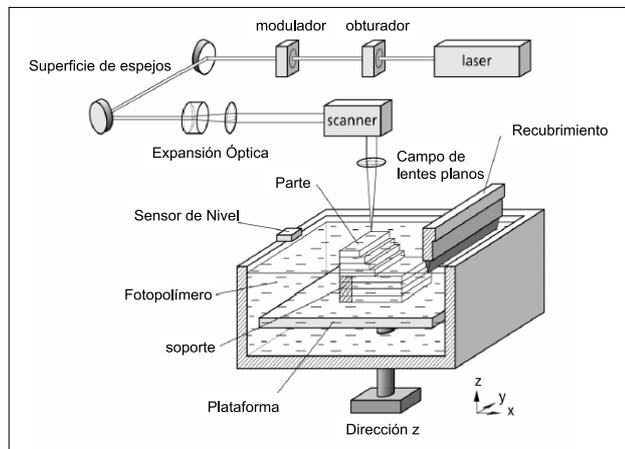


Figura 2. Proceso de SLA. Fuente: Klocke y Freyer, 1999

Características del proceso

Tabla 2. Características de SLA

| Variables | Valores |
|-----------------|---|
| Materiales | Polímeros basados en acrílico, vinilo o resinas epóxicas. |
| Exactitud | $\pm 0.05 - 0.1$ mm ($1.9 \cdot 10^{-3}$ in – $3.9 \cdot 10^{-3}$ in) |
| Espesor de capa | $0.1 - 0.5$ mm ($3.9 \cdot 10^{-3}$ in- $1.9 \cdot 10^{-2}$ in) |
| Max. dimensión | 600 mm x 600 mm x 400 mm (23.62in x23.62 inx15.74 in) |

Por cuanto la resina epóxica que se utiliza en el SLA es un material termoendurecido, que no funde como las ceras, la cáscara puede romperse durante el proceso de descerado. Cuando una cáscara cerámica con un patrón de resina epóxica es colocado en un autoclave, está sujeta a altas temperaturas, expansión térmica y grandes esfuerzos. Debido a que la diferencia de coeficientes de expansión entre el material del patrón y el de la cáscara tienen divergencia de más de un orden de magnitud, los patrones imprimen considerables esfuerzos sobre esta (Yaoa et al., 2000).

Los primeros pasos en el desarrollo de los patrones llevaron a problemas, puesto que el acrílico de las piezas de SLA se expandía durante el descerado, rompiendo la cáscara cerámica; además, se presentaba también expansión térmica en modelos construidos para recubrimiento sólido. Por esta y otras razones, como la pérdida de muchos patrones y el amplio uso del recubrimiento sólido, se desarrolló un nuevo método en la técnica de estereolitografía llamado Quickcast. Por tal método debían manufacturarse piezas con propiedades que permitieran que los patrones modelo pudieran quemarse más fácilmente y así eliminar la expansión del modelo y evitar la fractura de la cáscara cerámica o daños en el recubrimiento sólido.

El método de Quickcast crearía una pieza con redes internas, con una serie de espacios vacíos interconectados que permitirían drenar a la resina, que tiene una viscosidad más baja que la usada en otros métodos, generando así una pieza semihueca que produce el quemado y la evacuación del material más fácilmente. Por este método se elimina el 95% de la masa interna de la parte hecha de resina epóxica (Rosochowski y Matuszak, 2000). Los patrones producidos por dicho este método requieren de un tratamiento especial: si las resinas permanecen atrapadas en la red de Quickcast, estas paredes se solidificarán en el lugar de la depresión y durante el quemado y descerado pueden expandirse excesivamente y romper la cáscara cerámica. Para evitar este inconveniente se desarrolló una resina epóxica de baja viscosidad. Se han estado llevando a cabo investigaciones para establecer cuál es la configuración de red adecuada para evitar que durante el descerado las piezas elaboradas por Quickcast colapsen antes de que la cáscara cerámica se sobrecargue. Adicionalmente, sólo se produce una pequeña cantidad de ceniza (Rosochowski y Matuszak, 2000).

Los prototipos de resina epóxica fabricados por SLA se usan también como herramientas de resina (herramental directo, Figura 1). Se han utilizado moldes para inyección de cera en la fabricación de los patrones que se utilizan en el proceso de microfundición. Con esta técnica se tiene la ventaja de tener una temperatura de transición vítrea de la resina de 80°C (176°F) que es mayor que el punto de fusión de muchas ceras (50 + 55°C) (122 + 131°F). La presión de inyección que se utiliza para este mole es de 3,5 Mpa (5,07 KPsi) (Rosochowski y Matuszak, 2000).

Sinterización selectiva con láser (SLS)

Proceso desarrollado por DTM Corporation en 1992. En el proceso de SLS un rayo láser de CO_2 modulado sigue la forma de un objeto generado en un programa CAD. El objeto es trazado en un recipiente que contiene un polvo del material que se va a procesar (de magnitudes del orden de $50 \mu\text{m}$), calentando las partículas de manera que se fundan o sintericen entre sí. La construcción de la pieza es hecha capa por capa. Cada capa de la figura contiene la sección transversal de una o varias partes. La siguiente capa se genera directamente en la parte superior de la ya sinterizada después de que una capa adicional de polvo es depositada por medio de un mecanismo de rodillo en la superficie de la capa formada anteriormente (Figura 3) [Handout et al., on line. www.Ee.Cityu.Edu.Hk/~Shc/]

SLS en microfundición

Sistemas populares de PR como SLS y FDM, son capaces de construir directamente patrones de cera, aunque un problema que presenta el SLS es que el acabado superficial de este proceso es más rugoso que muchos otros procesos de prototipado rápido, lo cual influye en el acabado superficial de la pieza que se va a fundir. Sin embargo, se ha encontrado una solución para la aplicación en el proceso de microfundición que consiste en mejorar los patrones cubriéndolos con cera antes de hacer el recubrimiento con cáscara cerámica.

En la industria automotriz se ha utilizado esta técnica para la fabricación, junto con la fundición de precisión, de partes metálicas para realizar sobre estas piezas ensayos mecánicos. Se utiliza SLS para la elaboración del patrón de cera, utilizando como material poliestireno, el cual puede ser evacuado colocando el molde cerámico en autoclave. Esta combinación de procesos es recomendable por costos, para cantidades superiores a 30 piezas (Wiedemann y Jantzen, 1999).

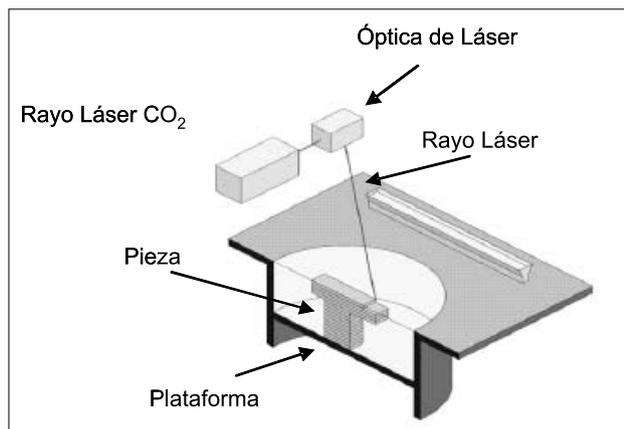


Figura 3. Proceso de SLS. Fuente: Klocke y Freyer, 1999

Características del proceso

Tabla 3. Características de SLS

| Variables | Valores |
|-----------------------|--|
| Materiales | Termoplásticos, ceras de modelado, metales, polvos metálicos, arena, cerámicos; polvo plástico como poliestireno, policarbonato, PVC, metales y ceras para microfundición. |
| Exactitud dimensional | $\pm 0.1 - 0.2 \text{ mm}$ ($3.9 \cdot 10^{-3} \text{ in} - 7.8 \cdot 10^{-3} \text{ in}$) |
| Espesor de capa | $0.1 - 0.2 \text{ mm}$ ($3.9 \cdot 10^{-3} \text{ in} - 7.8 \cdot 10^{-3} \text{ in}$) |
| Max. dimensión | $350 \times 350 \times 600 \text{ mm}^3$ ($13.77 \text{ in} \times 13.77 \text{ in} \times 23.62 \text{ in}$) |

Desde 1999 se está trabajando en el Instituto Tecnología de la Producción (IPT) de Fraunhofer una variación de esta técnica para realizar la producción directa de cáscaras en el proceso de fundición de precisión usando polvo cerámico, particularmente silicato de circonio. Para realizar este proceso se genera la geometría de la cáscara usando los datos de un programa CAD para posteriormente producir en la máquina de SLS por fundición del polvo cerámico la pieza. Usando esta técnica se elimina la necesidad de tener patrón de cera, y por lo tanto, el paso de descerado es también eliminado, de manera que el tiempo de proceso de precalentado y limpiado de la cáscara toma sólo algunas horas, optimizando el tiempo de producción sobre las técnicas convencionales con ventaja de días o incluso semanas.

Con una producción de piezas como bombas y artículos para aeronaves se encontró que el proceso podía reducir inclusive en dos semanas (Klocke y Freyer, 1999) la producción de un artículo. Así, el proceso de SLS de cáscara cerámica en microfundición es una alternativa superior para producir rápidamente prototipos de cualquier material fundible. Actualmente se están llevando a cabo trabajos para encontrar la manera de proveer beneficios al desarrollo de gran cantidad de aplicaciones industriales para este proceso.

Materiales específicos utilizados para modelos de fundición de precisión

El uso de patrones para la microfundición fue realizado por primera vez en 1992 (Tromans, 2002.) En ese entonces se utilizó cera para manufactura de los patrones, pero presentó dificultades porque los patrones que produjo el proceso fueron muy frágiles, lo que representaba un problema para el manejo y transporte de estas piezas. Posteriormente, se utilizó el policarbonato. Este presentó tan buenas propiedades que reemplazó totalmente el uso de ceras en SLS para microfundición. En 1995 se comenzó a utilizar un material desarrollado por DTM conocido como TrueFormTM, que era un copolímero que contenía poliestireno y polimetil metacrilato, materiales que hacían que el patrón tuviera excelente acabado superficial, mayor exactitud debido al tamaño pequeño de las partículas y de formas esféricas. Este material permitió que

hubiera secciones de pared más pequeñas para fundición porque la expansión térmica del material es casi cero.

Se desarrolló después un nuevo material llamado CastFormPS, que mejoraba las condiciones de espesor de pared permitiendo espesores para fundiciones del orden de 1,14 mm (0.045 in) con menor contenido de cenizas. Adicionalmente, reducía el tiempo de fundición, ya que las temperaturas usadas para la remoción del patrón son mucho menores que con los otros materiales y no se requiere que el molde cerámico esté totalmente seco. Tanto el CastFormPS como el EOS que se introdujo posteriormente pueden ser usados en el proceso de recubrimiento con cáscara.

Modelado por deposición fundida (FDM)

Este proceso sigue el principio de los tres ejes de una maquina de control numérico. Una boquilla controlada por un computador a lo largo de los tres ejes guía el material específico que se funde por calor. El material deja la boquilla en forma líquida, la cual se endurece inmediatamente a temperatura ambiente. Por ello es fundamental en el proceso de FDM que la temperatura del material líquido, para el modelo esté balanceada justo por encima del punto de solidificación. Construyendo el objeto que se desea, el material se extruye y deposita en capas superdelgadas desde una máquina FDM de poco peso (Figura 5).

Características del proceso

Tabla 4. Características de FDM

| Variables | Valores |
|-----------------------|--|
| Materiales | Plásticos como PA, PE, ABS, cera de modelado, polvos, Termoplásticos |
| Exactitud dimensional | ± 0.127 mm (0.005 in) |
| Espesor de capa | 0.025 - 1.27 mm (9.8*10 ⁻⁴ in- 0.05 in) |
| Max. dimensión | 254 x 254 x 254 mm ³ (10x10x10 in ³) |

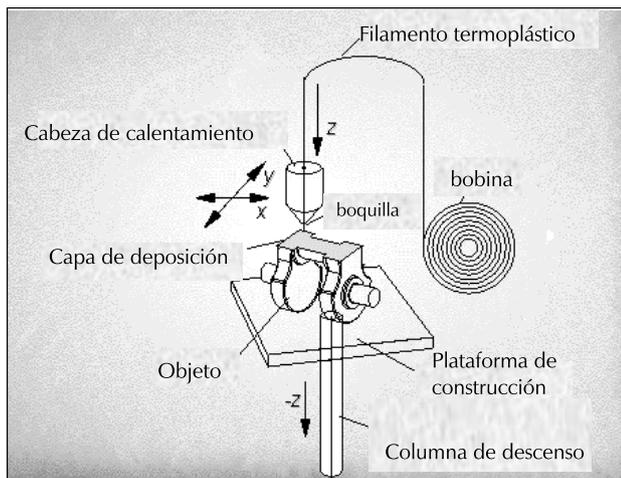


Figura 4. Proceso de FDM. Fuente: www.ame.arizona.edu/ame412a/slides/12.RapidProto.pdf

FDM en microfundición

El acabado superficial de las partes fabricadas por FDM es generalmente mejor que en el proceso SLS, pero estas son un poco porosas. El parecido con las ceras convencionales de microfundición permite que las partes FDM sean usadas sin modificar el proceso tradicional de microfundición.

Materiales específicos utilizados para modelos de fundición de precisión

El primer material utilizado para esta técnica aplicada a microfundición fue la cera, material que aún es utilizado para manufacturar los patrones de la máquina directamente. Pero al igual que en el proceso anterior, los patrones fabricados resultaron muy frágiles. Para reemplazar la cera se desarrolló el ABS, el cual, aunque es usado en la técnica FDM, se introdujo hace poco en el proceso de microfundición. Con ABS se consiguió buena resistencia del modelo y adicionalmente la posibilidad de producir espesores de pared muy delgados, permitiendo que las partes sean limpiadas más fácilmente debido a la baja tasa de expansión de este material.

Los modelos de ABS para esta aplicación tienen que ser quemados de la cáscara cerámica de la misma manera que la mayoría de los modelos producidos por sistemas prototipado rápido, que usan un horno en lugar de autoclave debido a las relativamente bajas temperaturas usadas en el proceso del autoclave, y la alta temperatura de fusión del ABS.

En la actualidad, en lugares como la Michigan State University utilizan ceras como ICW05 (Investment Casting Wax) para permitir al operador modelar a través de la máquina, procesar y crear un patrón de cera con características semejantes a las del proceso de microfundición, es decir, sin cambiar el proceso de descerado tradicional, con contenidos de ceniza bajos y bajos niveles de viscosidad que permiten que la cera deje la cavidad fácilmente sin dejar residuos.

Manufactura de objetos laminados (LOM)

Desarrollado por Helisys Inc. en 1991. Las partes se construyen capa por capa, laminando y uniendo con láser los materiales que son enviados en forma de hoja. Se usa un láser para fabricar los modelos; los cortes del láser construyen las capas consecutivas que se unen a la capa previamente cortada por pegado, polimerizado, o soldadura por difusión (Figura 6). Este proceso se emplea en la fabricación de modelos para fundición en arena. También pueden usarse en la hechura de modelos para el proceso de microfundición. La aplicación de esta técnica es amplia en equipos de industrias como la automotriz y aeroespacial, así como para artículos médicos. Es utilizada también para diseño, construcción de análisis y pruebas funcionales de prototipos.

En cuanto a los materiales utilizados en LOM se tiene que, por lo general, se utilizan papel, plásticos, y en algunas ocasiones, cerámicos y metal. Por lo general las propiedades de las piezas son anisotrópicas debido a que en el plano x-y son diferentes del plano z y no se pueden comparar con los materiales de ingeniería existentes.

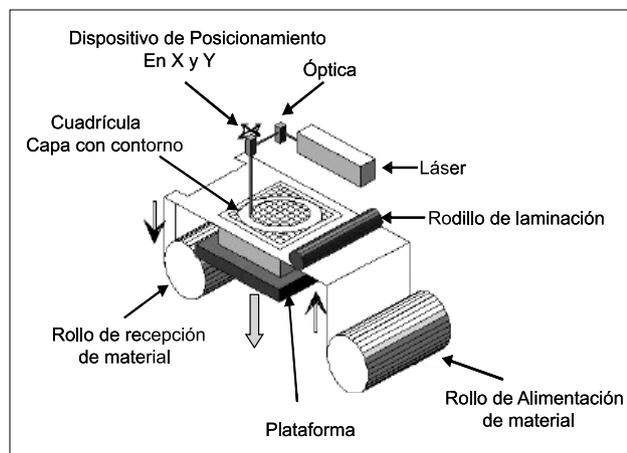


Figura 6. Proceso de LOM. Fuente: Klocke y Freyer, 1999

LOM en microfundición

La aplicación de esta técnica al proceso de microfundición se puede ver reflejada en la Tabla 6. En algunas industrias este proceso es utilizado para la generación de moldes blandos, que son utilizados como molde para inyección de ceras. En particular para microfundición se utiliza la generación del molde primario que permitirá fabricar el modelo patrón.

Tabla 5. Campos de aplicación para LOM (Mueller y Kochan, 1999)

| Rama | Proceso | Modelo LOM | | Función de los modelos LOM |
|-------------------------|-------------------------|------------|----------|---|
| | | Positivo | Negativo | |
| Moldeo de Plásticos | -Fundición en vacío | X | | -Patrón para moldes de silicona |
| | -Inyección de moldes | X | | -Patrón para Herramienta |
| | -Moldeo por soplado | X | | -Patrón para Herramienta |
| | -Laminado | | X | -Molde de laminado |
| | | | | X |
| | -Conformado en vacío | | | |
| Tecnología de Fundición | -Fundición en arena | X | | -Patrones para moldeo en arena |
| | -Fundición de Precisión | X | | -Patrón para molde de inyección de cera |
| | | | | X |
| | | X | | -Patrón para molde de yeso |
| Industria Cerámica | -Baja Presión | X | | -Patrón para molde de yeso |
| | -Inyección de Moldes | X | | -Molde / Insertos para el molde |

Se ha podido ver en casos experimentales que la inyección de la cera se puede realizar en moldes hechos por este proceso con características de presión de 0,2 a 0,4 MPa (29 a 58,01 Psi) y de temperatura de a 70°C (158°F). El control de los esfuerzos por presión y temperatura en el molde y del proceso de enfriamiento del patrón de cera es problemático (Mueller y Kochan, 1999).

Sería posible aplicar LOM para la fabricación del modelo patrón, aunque en este caso el sistema debe utilizar su propio material de prototipado, que sería papel. El inconveniente que presenta tal material es que al quemarlo, aunque presenta baja expansión, podría dejar alto contenido de ceniza en el molde. Sin embargo, en investigación se está trabajando en el desarrollo de materiales con bajo contenido de ceniza.

Impresión en tres dimensiones (3D PRINTING)

Fue inventada en MIT en 1994. Como en los otros procesos de PR, la impresión en tres dimensiones crea partes mediante un proceso de manufactura por capas. La máquina esparce una capa de polvo de una caja alimentadora para cubrir la superficie del pistón de construcción. El sistema entonces imprime una solución adhesiva al polvo base, formando la primera sección transversal. Cuando el adhesivo es depositado, el polvo se une. El polvo que queda permanece como base y soporta la capa que será impresa sobre él. Cuando la sección transversal se completa, el pistón se baja despacio, se coloca una nueva capa de polvo sobre su superficie y se repite el proceso. Finalmente, el pistón es elevado y el polvo base evacuado, dejando ver la parte completa. Una vez una construcción se completa, el exceso de polvo se retira y las partes se levantan del lugar de construcción (Figura 7). Esta es una de las técnicas más flexibles de prototipado rápido. El proceso puede generar piezas de cualquier geometría. El hecho de tener una extensa superficie de polvo extra permite crear salientes o cavidades internas. La impresión en tres dimensiones también tiene flexibilidad en los materiales que maneja y que puede conformar cualquier material que se pueda obtener como polvo, es decir, casi cualquiera (Robinson, 1996).

3D Printing en microfundición

Uno de los procesos desarrollados por 3D Printing con Soligen Technologies Inc., es la producción directa de cáscara cerámica (DSPC), tecnología que se usa para producir moldes cerámicos en el proceso de fundición de precisión. Compañías como Caterpillar Inc. y automotrices han sido capaces de utilizar este sistema para producir piezas funcionales en tiempos de fabricación muy cortos (Ashley, 1995).

Producción directa de la cáscara de fundición (DSPC) (Tromans, 2002)

Este proceso de impresión en tres dimensiones se diferencia de los demás en que se fabrican las cáscaras cerámicas

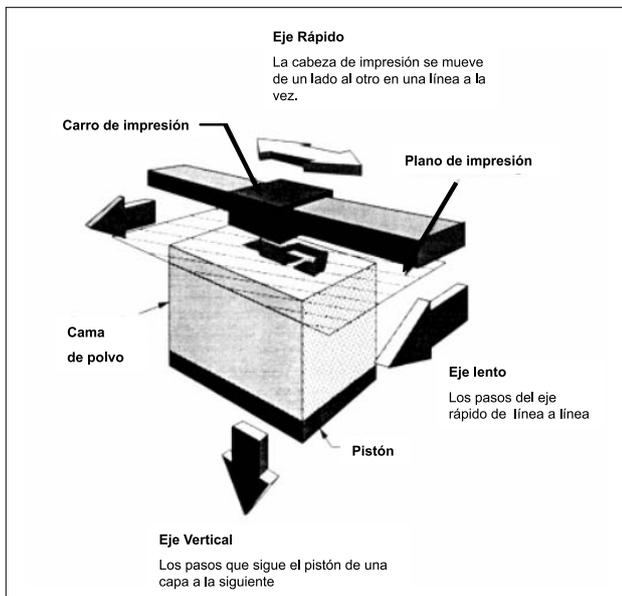


Figura 6. Proceso de Impresión en 3D. Fuente: Robinson, 1996

micas directamente de datos provenientes de programas de CAD. Se puede usar DSPC para producir partes prácticamente de cualquier forma geométrica. La característica de estos moldes es que son similares a los producidos por el método de sumergido (cáscara cerámica). Es más eficiente y barato que los procesos de sinterizado.

El uso de este proceso permite tener borradores del negativo de la pieza, sin líneas de partición y con la posibilidad de no imprimir las partes vacías, es decir los agujeros. Por lo general en el modelo virtual del molde se incluye el sistema de alimentación y machos internos para partes huecas. Una vez finalizado el diseño, este modelo virtual es usado directamente en el proceso de 3DP.

El sistema trabaja con un tipo de cabeza de impresión que se mueve encima de una capa de polvo de alúmina fina y deposita gotas diminutas de sílice coloidal en el polvo en un modelo como el de la sección transversal de la parte. La siguiente capa de polvo es aplicada y el proceso se repite hasta que la cáscara esté completa. Cuando esto ocurre, el polvo suelto es alejado y la cáscara se pone en el fuego, el polvo que no se quema se retira y se vierte el metal. El molde resultante se usa para producir partes para cualquier aleación que sea posible fundir (Rosochowski y Matuszak, 2000). Se afirma que a través de este proceso se fabrican partes metálicas en días, en lugar de tomar semanas o meses de producción.

Modelado por Inkjet (Maffezzoli, 2000)

El modelado de Inkjet usa una combinación de tecnología de impresión que produce prototipos de una cera que se usa como modelo en fundición de precisión. El sistema de ploteado es un ploter inkjet de líquido-a-sólido con entrada del eje z separada. El subsistema utiliza dos cabezas móviles: una para depositar el material termoplástico formado, y la otra para colocar la cera de

soporte para salientes y cavidades durante el ciclo de formado. Las cabezas inkjet depositan los materiales de construcción y de apoyo hacia el sustrato de la figura como una serie uniformemente espaciada de "micro-gotas". Los materiales de soporte y de la pieza son de diferente color, de manera que puedan diferenciarse entre sí. El modelo terminado se sumerge en un baño solvente para disolver la cera de apoyo y lo deja listo para la microfundición sin la necesidad de pasos de postproceso.

El material formado puede ser colocado en autoclave para sacar la cera de la cáscara de fundición de la misma manera que es removida la cera en microfundición. El método de los modelos construidos con capas de un espesor de 12,7 micrones produce una buena superficie, de tal forma que es superior a cualquier otra técnica de prototipado.

Las ventajas de este proceso son las excelentes tolerancias dimensionales, el acabado superficial y la alta exactitud. Adicionalmente, las desventajas serían el tamaño y la velocidad de construcción limitados debido a que las capas que utiliza son muy delgadas y por lo tanto el tiempo que se utiliza en dar forma a la pieza es mayor, por lo cual también el proceso se hace más costoso.

Características del proceso

Tabla 6. Características de FDM

| Variables | Valores |
|-----------------------|---|
| Materiales | Cera |
| Exactitud dimensional | ± 0.013 mm ($5.1 \cdot 10^{-4}$ in) sobre 229 mm (9.01 in) en el eje Z y superior a ± 0.025 mm ($9.8 \cdot 10^{-4}$ in) sobre 76 mm (2.99 in) en los ejes X&Y |
| Espesor de capa | 0.013 mm a 0.13 mm ($5.1 \cdot 10^{-4}$ in a $5.1 \cdot 10^{-3}$ in) |
| Max. dimensión | 304.8 x 152.4 x 228.6 mm ³ (12 x 6 x 9 in ³) |

Prototipado rápido congelado (RFP)

Rapid Freeze Prototyping (FRP) es una técnica novedosa que permite generar patrones de hielo en tres dimensiones con buena exactitud dimensional y flexibilidad directamente de modelos en CAD en corto tiempo. Hay dos maneras como se pueden generar los sólidos tridimensionales, por deposición continua y por deposición demandada gota a gota. En el proceso de deposición continua el agua se extruye desde una boquilla a la superficie del sustrato o de la capa construida previamente. En el proceso gota a gota el agua es expulsada gota a gota sólo si se necesita. La figura 8 muestra los principios de este proceso.

El ambiente de construcción se mantiene a baja temperatura, bajo la temperatura de congelamiento del agua. El agua utilizada para el proceso es pura o con color. Esta es depositada sobre la superficie de hielo previamente

solidificada. El agua depositada es enfriada por el ambiente a través de convección y por la superficie del hielo con la que está en contacto por conducción. Como resultado, el material depositado se congela rápidamente y se adhiere a la capa previa firmemente a través de adhesión de hidrógeno. Después de que una capa es terminada, la boquilla se eleva hasta alcanzar el espesor de una capa, se espera un tiempo determinado hasta que la solidificación se complete y se deposita agua nuevamente para construir otra capa. El proceso se repite hasta que la parte esté completamente fabricada (Liu et al., 2002).

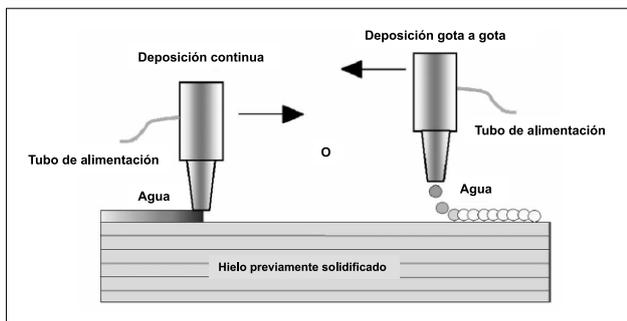


Figura 8. Proceso FRP. Fuente: Rosochowski y Matuszak, 2000.

Las ventajas más importantes de RFP incluyen: es un proceso más barato y limpio, suficiente adhesión entre capas, no se presenta encogimiento y tiene grandes facilidades para compensación de material. Algunas variables del proceso se muestran en la tabla a continuación. En este momento dicha técnica se encuentra en proceso de investigación con el fin de sacarla al mercado.

RFP en microfundición

La utilización de esta técnica dentro del proceso de fundición de precisión se conoce como proceso de fundición congelado (FCP). El FCP comienza con la construcción de un patrón de hielo, el cual es sumergido en una mezcla refrigerada de silicato etílico y estuco. Después de repetir la operación y de secar el modelo, la cáscara cerámica es colocada a temperatura ambiente y se le permite al patrón fundirse, drenarse y secar.

Las ventajas que presenta el FCP son costos bajos, alta calidad, superficies en rugosidades superficiales finas, procesos de operación sencillos, y no produce problemas de ruptura de cáscara.

Síntesis de la aplicación de RP en microfundición

La Figura 9 ilustra los pasos del proceso de microfundición haciendo énfasis en las partes del proceso en que puede intervenir el prototipado rápido.

Finalmente, en la Tabla 9 se muestra la técnica de prototipado rápido relacionándola con el paso del proceso de microfundición (Investment Casting) para el cual se fabrica la pieza.

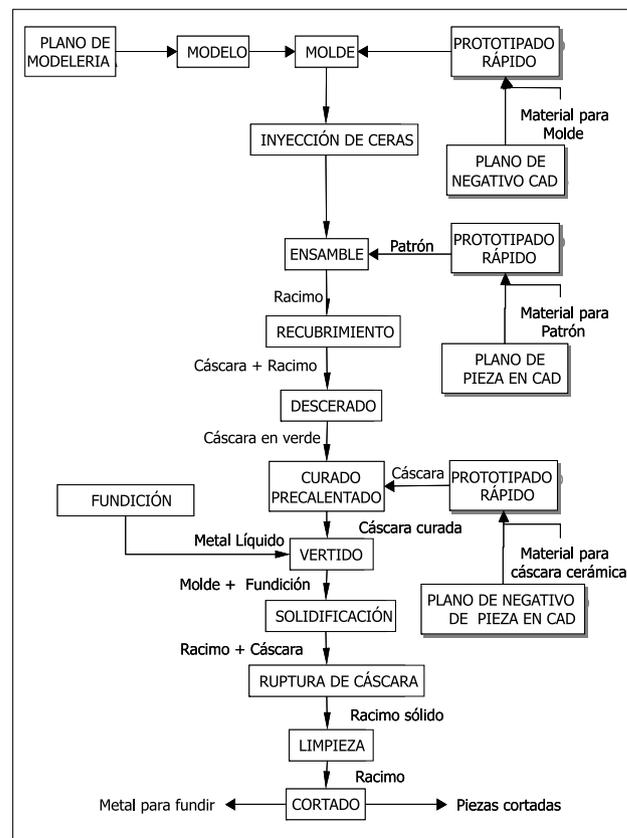


Figura 8. Técnica de Prototipado en el paso del proceso IC en que participa

Tabla 7. Técnica de Prototipado vs. Parte del proceso de IC en que participa

| Técnica PR | Producción para Microfundición de | Material |
|-----------------|---|--|
| SLA (QUICKCAST) | Patrones Moldes para inyección de cera (Patrones) | Resina Epóxica Resina Epóxica |
| SLS | Patrón de Cera Cáscaras Cerámicas | Poliestireno Silicato de Zirconio |
| FDM | Patrones de Cera | ICW05 (Investment Casting Wax) ABS |
| LOM | Generación del molde primario (para inyección del modelo) Patrón | Plástico, Materiales compuestos Papel |
| 3D Printing | Producción directa de Cáscara Cerámica | Alumina y Sílice Coloidal |
| Ink jet | Patrones de Cera | |
| RFP | Patrón | Hielo |

Conclusiones

Por ser una técnica de copiado de forma, directamente del archivo de CAD, el prototipado rápido es utilizado de manera eficiente como herramienta para facilitar el proceso de microfundición.

El prototipado rápido puede ser utilizado en la generación del molde para inyección de ceras, los patrones de cera o las cáscaras cerámicas directamente, disminuyendo el tiempo de producción, y dependiendo de la cantidad de piezas, disminuyendo también los costos de fabricación.

Bibliografía

- Ashley, S., Rapid Prototyping is Coming of Age, In: Mechanical Engineering, Vol. 117, No. 7, 1995.
- Colton, J.S., Manufacturing Processes and Engineering, Georgia Institute of Technology.
- Chen, Y., Computer-Aided Design for Rapid Tooling: Methods for Mold Design and Design-for-Manufacture, Georgia Institute Of Technology, 2001.
- Des Egan, Aug, Designers Guide To Rapid Prototyping In Product Design And Manufacture, 2000.
- Ferreira, J.C. and Mateus, A., A numerical experimental study of fracture in RP Stereolithography patterns and ceramic shell for investment casting, Journal of Materials Processing Technology, 2003.
- Gebhardt, A., Materials in Rapid Prototyping: Today's Limits and Future Possibilities, CP-Centrum für Prototypenbau, Erkelenz / Düsseldorf Trieste, Italy, 2002.
- Hitchiner Manufacturing Co., Inc., An Introduction to the Investment Casting Process Technical Updated.
- Jacobs, P.F., Rapid Prototyping and Manufacturing, SME, Dearborn, Usa, 1992.
- Jones, S. and Yuan, C., Advances in shell moulding for investment casting. In: Journal of Materials Processing Technology, 2003.
- Jolly, M., Cox, M., Gebelin, J., Jones, S. and Cendrowicz, A., Modelling the Investment Casting Process, Fundamentals of Investment Casting (FOCAST) IRC in Materials, University of Birmingham, UK American Foundry Society, 2001.
- Klocke, F., and FREYER, C., Rapid Prototyping & tooling industrial applications Fraunhofer Institute of Production Technology IPT, Aachen, The Tooling Network Research Group European Community, No 2, 1999.
- Liu, Q., Sui G., and Leu, M.C., Experimental study on the ice pattern fabrication for the investment casting by rapid freeze prototyping (RFP), In: Computers in Industry, 2002.
- Maffezzoli, A., Rapid Prototyping: An Overview, University Of Lecce, Italy, 2000.
- Mueller, B. and Kochan, D., Laminated object manufacturing for rapid tooling and patternmaking in foundry industry, In: Computers in Industry, 1999.
- Prasad, K.D.V, Yarlagadda, and Sianghock, T., Statistical Analysis on Accuracy of Wax Patterns Used in Investment Casting Process, In: Journal of Material Processing and Technology, 2003.
- Robinson, D. W., Integration of Rapid Prototyping and Reverse Engineering for Complex 3D Shape Design, Massachusetts Institute of Technology (MIT), 1996..
- Rosochowski, A. and Matuszak, A., Rapid tooling: the state of the art, In: Journal of Materials Processing and Technology, 2000.
- Sánchez, C., Conceptos de Diseño para Manufactura DFM de piezas microfundidas para aplicación en Dispositivos Biomecánicos, Proyecto de grado presentado a la Universidad Nacional de Colombia, para optar por el título de Ingeniera Mecánica, 2003.
- Shu-Hung, H., HD RP Handout, CHUNG, University of Hong Kong..
- The Legacy of Investment Casting, Hitchiner Manufacturing Co., Inc., April-1998.
- Tromans, G., State Of The Art Report, Rapid Casting, 2002.
- Tu, J. S., Foran, R. K., Hines, A. M., and AIMONE, P R., An Integrated Procedure for Modeling Investment Castings, In: JOM (Minerals Metals and Materials Society publication), <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/jom.html> [on line].
- Wiedemann, B., and Jantzen, H. A., Strategies and applications for rapid product and process development in Daimler-Benz AG, In: Computers in Industry, 1999.
- Yao, W.L., Ming, U. and LEUB, C., Analysis and design of internal web structure of laser stereolithography patterns for investment casting, In: Materials and Design, 2000.

SITIOS WEB

- <http://www.ame.arizona.edu/ame412a/slides/12.RapidProto.pdf> Presented by Ranji Vaidyanathan Advanced Ceramics Research Tucson.
- <http://cdr.stanford.edu/html/DD/PEARL/home.html>
- <http://r-curtis.umds.ac.uk/cz0326/TIT.HTM>
- <http://www.hitchiner.com/home.html>
- <http://www.northernprecision.com/facts.htm>
- <http://www.sfsa.org/sfsa/dsgmtlcr.html>
- http://www.efunda.com/processes/metal_processing/Investmet_Casting.cfm
- http://www.kp.dlr.de/WB-RS/Erstarrung/web_eng/herstell_eng.html

http://www.ccbda.org/publications/pub13e/Investment_Casting.html

<http://www.rugergolf.com/titanium.htm>

<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/jom.html>

http://www.me.iastate.edu/me324_bahadur/Section%202.2/2_1.htm

<http://www.ee.cityu.edu.hk/~shc/>

<http://www.me.psu.edu/lamancusa/RapidPro/primer/chapter2.htm>

http://www.cs.hut.fi/~ado/rp/tableofcontents3_1.html

<http://www.udri.udayton.edu/rpdl/papers.htm>

<http://www.bmpcoe.org/bestpractices/external/index.html>

<http://www.solidconcepts.com/index.html>----evas tecnologí

Instituto de Extensión e Investigación - IEI
Facultad de Ingeniería- Universidad Nacional de Colombia

Objetivo del IEI

Fortalecer su función como ente de apoyo, desarrollo y promoción de la investigación y la extensión, estimulando el desarrollo interdisciplinario del conocimiento y permitiendo su gestión, socialización y desarrollo. Asegurar, además, su articulación con el entorno e integrar la investigación con la extensión y la docencia. Crear vínculos con el sector externo para generar procesos de innovación y desarrollo tecnológico.

Servicios especializados por áreas

Ingeniería Agrícola

Máquinas y Mecanización Agrícola
Postcosecha de Frutas y Hortalizas
Postcosecha de Granos
Riegos
Control y Automatización en Agrícola
Sistemas de Información Geográfica

Ingeniería Civil

Laboratorio de Ambiental
Laboratorio de Hidráulica
Laboratorio de Geotécnia
Laboratorio de Hidráulica

Ingeniería Eléctrica

Módulo de Alta Tensión (AT - 02)
Módulo de Alta Corriente (TER -03)
Módulo de Iluminación (IL - 04)
Módulo de Metrología (MTR - 05)

Ingeniería Mecánica

Laboratorio de Motores de Combustión Interna
Laboratorio Taller de Máquinas. Herramientas
Laboratorio de Plantas Térmicas
Laboratorio de Transferencia de Calor
Laboratorio de Metrología
Sala CAD
Laboratorio de Metalurgia

Ingeniería Química

Laboratorio de Electroquímica y Corrosión
Laboratorio de Combustibles y Lubricantes
Laboratorio de Planta Piloto y Operaciones Unitarias

Ingeniería de Sistemas

Computación Gráfica
Desarrollo de Software
Geomática
Informática
Microprocesadores
Programación y Métodos Numéricos
Programación Lineal y Métodos
Redes y Comunicaciones

Cada uno de los laboratorios mencionados es dirigido por un ingeniero especializado quien atiende los requerimientos específicos de los clientes, suministra la información pertinente y planea la ejecución de los trabajos.

Mayor información:

Instituto de Extensión e Investigación – IEI. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
Tel: (57 1) 3165000 Ext. 13302, 13303, 13304 E-mail: insei_bog@unal.edu.co