



LIBRO BLANCO DE FORMLABS:

Fabricación de piezas de metal mediante impresión 3D

Contenido

Introducción	3
Bases de la fundición	4
Fundición directa a la cera perdida	6
Creación de modelos con la Form 2	7
Diseño de soportes internos para una impresión y un quemado con éxito	8
Preparación de la impresión de tu modelo	9
Preparación del modelo impreso para la fundición	10
Drenaje y ventilación de un modelo de impresión directa ..	10
Creación de la cáscara cerámica	11
Ejemplo de programa de quemado	12
Fundición indirecta a la cera perdida	13
Utillaje impreso en 3D y soportes de montaje para procesos de trabajo de fundición	15
Moldeado en arena	16
Conclusiones	18

Introducción

Aunque un enorme porcentaje de las piezas de los productos con los que interactuamos a diario están hechas de plástico, muchas aplicaciones siguen requiriendo la resistencia y la durabilidad a largo plazo de los metales.

El estampado, el fresado, el torneado y la extrusión son procesos de fabricación de piezas de metal de eficacia probada, pero son más caros y menos flexibles que las opciones de desarrollo disponibles para las piezas de plástico.

Se ha fomentado la impresión 3D directa del metal como una forma de crear rápidamente piezas con conformado semifinal usando materiales resistentes como el titanio, pero el alto coste del equipo, la necesidad de técnicos con formación específica y una variedad limitada de aleaciones ha supuesto que el uso de esta tecnología haya sido limitado excepto para las aplicaciones más caras y extravagantes.

Los ingenieros y diseñadores pueden aprovechar la velocidad y la flexibilidad de la impresión 3D sin el coste de impresoras de metal directas mediante procesos de trabajo de fundición. Para usos en los que las piezas requieran detalles finos o geometrías complejas, la fundición sigue siendo un proceso de fabricación rentable y muy efectiva, que produce componentes esenciales para aplicaciones aeroespaciales, automotrices o médicas.

Aunque existe la percepción de que las impresoras 3D de estereolitografía (SLA) sirven principalmente como herramientas para crear piezas de plástico, su alta precisión y su amplia oferta de materiales las hacen adecuadas para procesos de trabajo de fundición que produzcan piezas de metal a bajo coste, con una mayor libertad de diseño y en menos tiempo que con los métodos tradicionales.

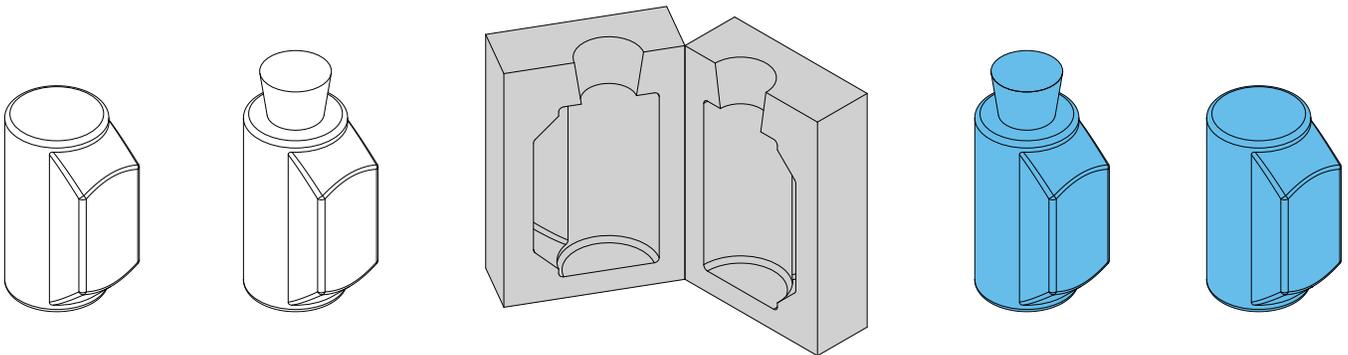
Este libro blanco indica cómo fabricar piezas de metal mediante procesos de moldeo en arena y fundición a la cera perdida con las impresoras 3D y resinas de Formlabs.

Bases de la fundición

La fundición del metal se remonta como mínimo al año 3200 a. C. y ha pasado por muchos ciclos de innovación hasta convertirse en el proceso moderno y fiable que es la actualidad. Hoy en día, los procesos de fundición de metal industriales se usan para fabricar de todo, desde implantes de rodilla hasta piezas de tractor.

El proceso básico de fundición para crear piezas de metal tiene unos pasos que comparten distintas técnicas:

1. Un fabricante crea un modelo que representa la pieza, sea como un elemento amovible que deja una impronta en un material como la arena o como un elemento que permanece dentro del material de moldeo y acaba quemado o fundido.
2. En ambos casos, queda una cavidad con la forma del modelo y se vierte en ella metal fundido.
3. El metal fundido se enfría y el molde se abre o se rompe para obtener la pieza.
4. Las piezas fundidas conservan vestigios del proceso en los puntos en los que había salidas de aire, canales y mazarotas que dirigen los gases y el metal fundido durante la fundición. Para darle el acabado a las piezas fundidas, un trabajador de la fundición recorta el material sobrante y lima, desbasta, mecaniza o lija las piezas para conseguir la geometría y los requisitos de superficie finales. En algunos casos, las piezas fundidas reciben también un tratamiento térmico.



Diseño original

Patrón

Molde

Vaciado

Vaciado terminado

En cualquier proceso de fundición hay que fabricar dos formas básicas: el modelo y un molde de algún tipo. El modelo es esencialmente una versión ligeramente modificada de la pieza que se va a producir.

El diseño del modelo difiere de la geometría de la pieza final en algunos aspectos:

- Los modelos se realizan a mayor escala para compensar la contracción que tiene lugar durante la fundición.
- Los modelos a menudo contienen elementos relevantes para el proceso de fundición que no estarán presentes en la pieza final (por ejemplo, canales de colada para que el metal fluya a un ritmo controlado, salidas de aire para expulsar los gases, etc.)

- Hay determinados elementos de los modelos que se pueden sobredimensionar o rellenar para facilitar operaciones secundarias que crean zonas con muy escasa tolerancia (perforaciones, sangrías, etc.)

Los modelos suelen realizarse en madera, espuma, plástico o cera. A veces, el diseño del modelo incorpora elementos relacionados con el proceso de fundición, como canales para que fluya el metal fundido.

Un molde incluye el negativo del modelo, junto con bebederos, canales, salidas de aire, mazarotas y otros elementos para controlar el flujo del metal y los gases durante la fundición.

Los moldes se fabrican a partir de diversos materiales (por ejemplo, cerámica, grafito, yeso, arena, etc.) y deben ser capaces de soportar las altas temperaturas y los esfuerzos mecánicos del proceso de fundición.

Fundición directa a la cera perdida

El proceso de fundición directa a la cera perdida pasa directamente de crear el modelo a rodearlo del material de revestimiento. Dado que el método de crear un modelo mediante la inyección de cera requiere varios pasos, se considera indirecto.

El mejor uso de la fundición directa a la cera perdida es la fabricación de pequeños lotes de piezas o pruebas iniciales de un concepto de pieza, ya que cada pieza impresa requerirá algunos pasos de acabado. La fundición directa a la cera perdida también es una buena elección para piezas grandes o piezas que tienen una sección transversal de mucho grosor y pueden ser más difíciles de moldear con éxito en cera por la deformación y la contracción.

La fundición directa a la cera perdida es de gran valor a la hora de producir piezas con geometrías demasiado complejas para moldearlas o piezas con amplios socavados y detalles finos en la textura de su superficie, en las que el moldeo es posible, pero conlleva altos costes de utillaje.

Tradicionalmente, los modelos para la fundición directa a la cera perdida se esculpían a mano o a máquina si la pieza es única o se espera que solo se produzca un puñado de unidades.

Con la llegada de la impresión 3D, los ingenieros empezaron a experimentar con la impresión directa de modelos para conseguir plazos de producción más cortos y una libertad geométrica que superara los límites de fabricabilidad de los procesos de moldeo.

Piezas fundidas a partir de modelos de SLA impresos en una Form 2 con Clear Resin.



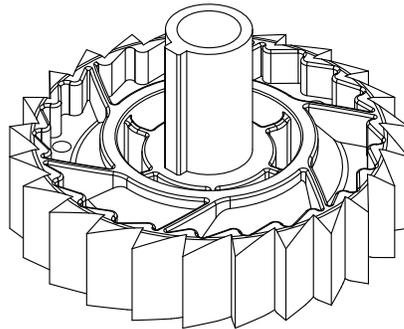
Creación de modelos con la Form 2

Hay dos métodos típicos para imprimir modelos de fundición directa a la cera perdida con resinas de Formlabs. La elección del método más adecuado para la aplicación que deseas depende del tamaño, la complejidad y la geometría de la pieza.

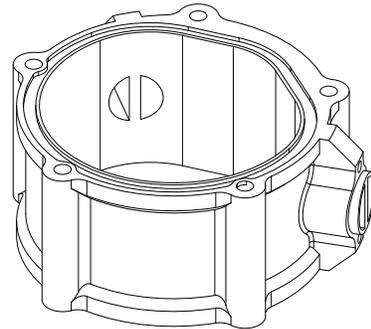
Las piezas pequeñas con paredes finas tienen mejor resultado cuando se imprimen como piezas sólidas con Castable Wax, usando una caja de moldeo de revestimiento. Se siguen esencialmente las mismas directrices del proceso que con la [fundición para joyería](#).

Las piezas más grandes con secciones transversales considerables se deben diseñar para imprimirse como carcasas de paredes finas con pocos soportes y usar un proceso de fundición con cáscara cerámica.

La expansión térmica de modelos grandes y sólidos de resina impresos mediante SLA puede provocar grietas en el material del revestimiento de la cáscara cerámica. Para imprimir con éxito modelos grandes, recomendamos crear una carcasa para el modelo con un grosor de la pared exterior de 0,5-0,8 mm. En general, las paredes finas funcionan mejor, pero podría ser necesario aumentar el grosor para obtener la rigidez adecuada, especialmente con piezas grandes.



Pequeña rueda dentada
(volumen de la pieza: 5,4 cm³)



Envoltorio de bomba de 10 cm de diámetro
(volumen de la pieza: 84,2 cm³)

Una pieza hueca necesitará por lo general soportes internos para imprimirse con éxito y mantener la precisión dimensional. Esas estructuras de soporte internas se deben diseñar para ser tan pequeñas como sea posible, para que se rompan con facilidad durante el quemado y no retengan resina sin curar.

Modelos de SLA impresos con soportes internos en una Form 2 con Clear Resin.



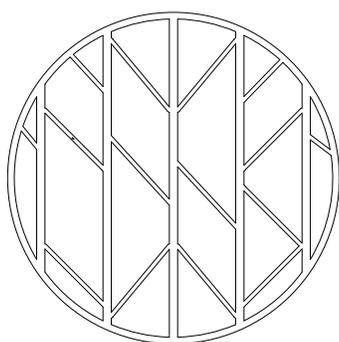
Lava a conciencia el modelo impreso con alcohol isopropílico según los requisitos del material y permite que se seque por completo antes de realizar un poscurado final, si [las especificaciones del material](#) lo requieren. La resina sin curar puede provocar problemas durante la fundición, de modo que presta especial atención durante la limpieza para asegurarte de que no queden pequeños depósitos de material sin curar. Clear Resin de Formlabs suele ser el material preferido para esta aplicación porque permite mirar dentro del modelo impreso y verificar que la geometría interna esté completamente limpia, sin que quede resina sin curar.

Diseño de soportes internos para una impresión y un quemado con éxito

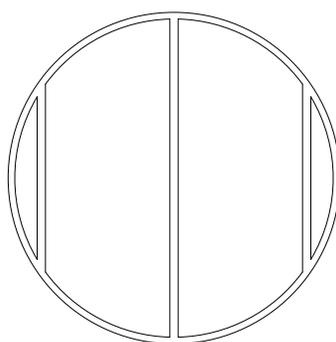
La ubicación y la orientación de las estructuras de soporte de una impresión 3D son consideraciones de diseño importantes para lograr un quemado y una fundición con éxito a partir de modelos impresos.

Los modelos para fundición necesitan soportes internos **(A)** tanto para imprimirse con éxito como para proporcionar la suficiente rigidez y resistencia para soportar el peso del material del revestimiento a medida que se construye la carcasa.

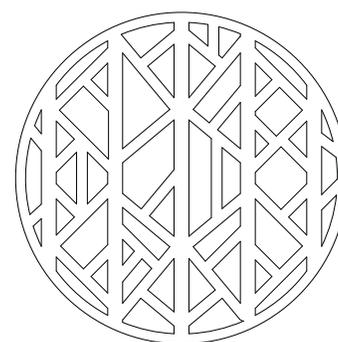
Si tiene demasiado poco soporte **(B)**, el modelo se deformará y se romperá antes de que la cáscara cerámica haya alcanzado toda su resistencia, y con demasiado soporte **(C)**, el modelo no se derrumbaría como se desea, lo que podría agrietar la carcasa cerámica durante el quemado/eliminación de la cera.



(A)



(B)

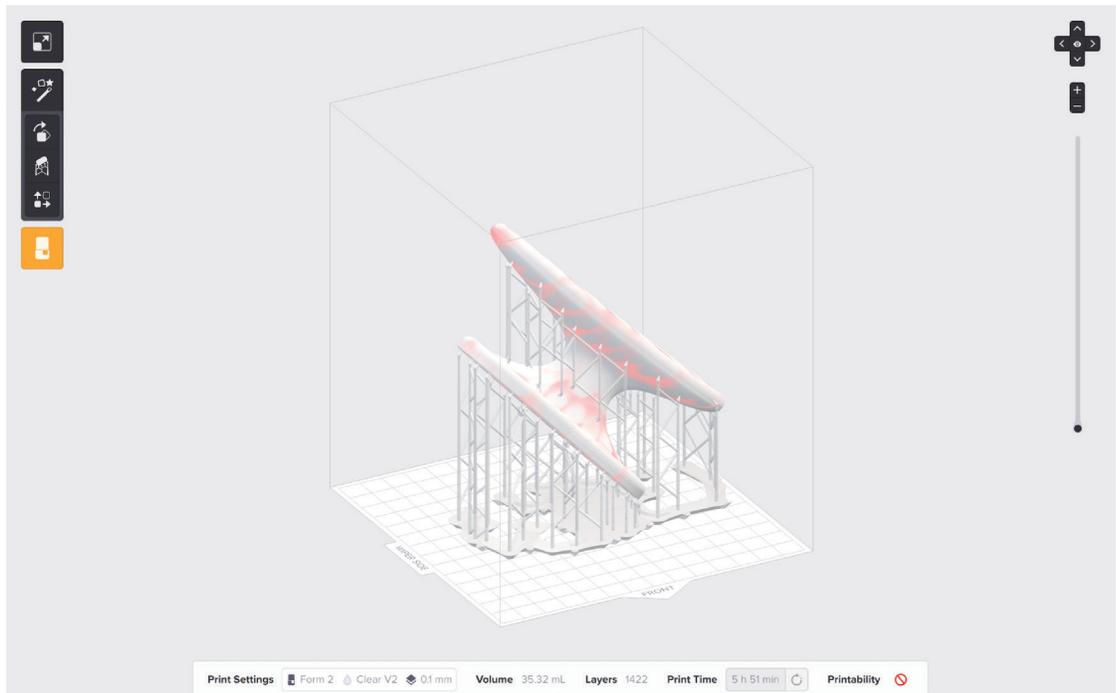


(C)

PreForm, el software de preparación de impresiones de Formlabs, genera estructuras de soporte internas sencillas. Si deseas un enrejado más complejo, algunas de las opciones de software más comunes a las que puedes recurrir con nTopology, MeshMixer y Materialise TetraShell.

Incluye un pequeño agujero de sangría que atraviese la carcasa exterior del modelo para extraer cualquier resina líquida sin curar que quede dentro de la pieza tras la impresión.

Preparación de la impresión de tu modelo



Preparación de un patrón con forma de concha para su impresión en PreForm. La sección que se muestra en la imagen de abajo muestra las paredes exteriores delgadas de la pieza, con escasos soportes internos generados por PreForm.

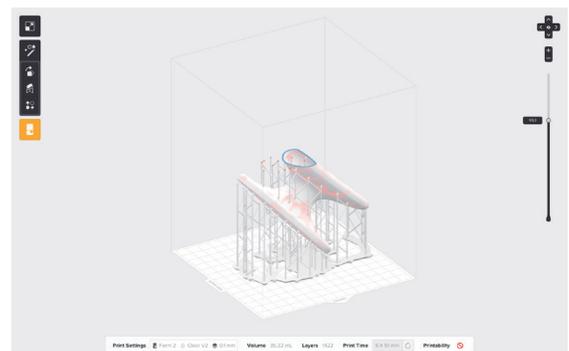
Soportes internos generados desde otro programa:

Cuando el modelo cuente con su carcasa y hayas generado las estructuras de soporte internas, guarda el archivo en un formato STL u OBJ, que puede leer PreForm. Abre el archivo en PreForm y usa las herramientas de orientación y organización para situar las piezas antes de añadir soportes.

Generación de soportes internos dentro de PreForm:

Para usar estructuras de soporte internas generadas por PreForm, comienza con un archivo STL o un OBJ de tu modelo que ya cuente con una carcasa con el grosor deseado de la pared externa.

Orienta la pieza, teniendo en cuenta cómo afectarán los soportes que generes a la descomposición del modelo durante el quemado/eliminación de la cera.



A partir de ahí, puedes elegir generar estructuras de soporte para tu modelo de forma manual o automática. Incluso si usas la función de soportes automáticos de PreForm, los soportes generados se pueden modificar y se pueden añadir o eliminar soportes uno a uno según sea necesario.

Preparación del modelo impreso para la fundición

Limar o lijar las piezas debería eliminar cualquier resto de los soportes externos y crear superficies lisas e igualadas. La calidad de la superficie de la pieza final la determina en gran medida la superficie del modelo. En algunos casos, se puede aplicar un recubrimiento, como una cera fina, a los modelos impresos para mejorar la adhesión de la mezcla del revestimiento.

Drenaje y ventilación de un modelo de impresión directa

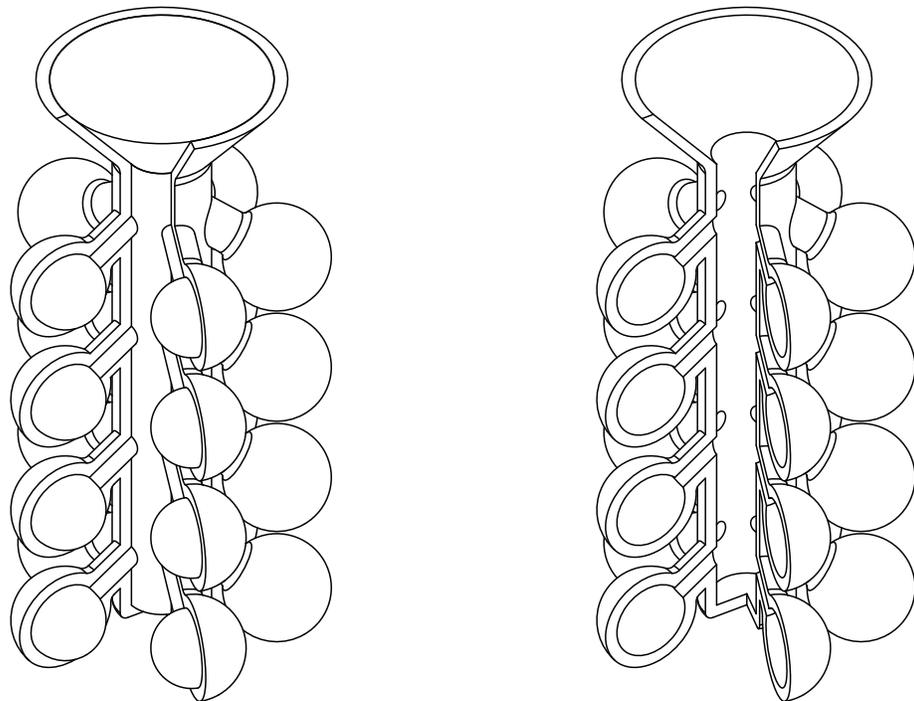
Los modelos impresos suelen estar conectados con cera al resto del árbol, un conjunto de piezas unidas a una columna central, típicamente de cera.

Durante el quemado o eliminación de la cera, la columna central se derrite junto con cualquier otra cera presente y actúa como el principal canal de distribución del metal fundido durante la fundición.

Según tu proceso de fundición y tu diseño del modelo, podrías llegar a necesitar márgenes para que el residuo procedente de los modelos degradados salga del molde. Hacer circular aire comprimido o agua por el molde vacío ayuda a limpiar la ceniza que quede del proceso de quemado o eliminación de la cera.

En esta etapa es importante considerar qué relación hay entre la orientación del modelo y el flujo del material. El metal fundido debe poder fluir con facilidad, con la mínima turbulencia posible, mientras llena la cavidad del molde.

Orienta los modelos de forma que el metal fluya desde secciones gruesas de las piezas a secciones delgadas y añade ventilación a las zonas en las que pueda quedar aire atrapado durante la fundición. Los requisitos de ventilación serán distintos en función de los metales, los materiales específicos del molde y el proceso de fundición utilizado.



Izquierda: Sección de un árbol en la que se muestra la geometría del patrón;

Derecha: Sección de la parte en cerámica después del quemado del material para crear el patrón.

Creación de la cáscara cerámica



Cáscara cerámica tras el quemado de modelos impresos mediante SLA con Clear Resin.

Cuando los modelos, salidas de aire, mazarotas y canales estén unidos al árbol, baña el árbol en la mezcla del revestimiento y recúbrelos con un material refractario para conformar todo su grosor. Usar una carcasa ligeramente más gruesa para los modelos impresos mediante SLA que la usada para modelos de cera tradicionales reducirá la probabilidad de que aparezcan grietas durante el quemado/eliminación de la cera.

Después de que el modelo esté cubierto del material de revestimiento para crear un grosor adecuado, hay que quemar el modelo y cualquier elemento de cera, como bebederos y mazarotas. Añade ventilación a los modelos de SLA huecos a través de la cáscara cerámica para asegurar una descomposición y quemado completos de los modelos.

Marca los lugares de ventilación, penetra en esas superficies hasta alcanzar el modelo y perfora las paredes de los modelos con una herramienta de metal calentada o un alambre. También puedes crear orificios de ventilación atravesando los modelos con un taladro.

Si la piel del modelo no tiene perforaciones, los gases que haya en su interior pueden expandirse de forma excesiva y agrietar la cáscara cerámica.

Después de que el modelo se haya quemado con éxito, hay que tapar los agujeros creados para generar la ventilación durante el quemado. Normalmente, el proceso consiste en sellar primero la cáscara cerámica con una pequeña cantidad de sellado y a continuación, usar un compuesto de sellado encima de la cera que refuerce la cáscara cerámica. Este orden de

operaciones evita que el material de sellado entre en la cavidad del modelo, donde podría crear inclusiones u otros defectos en las piezas fundidas.

Ejemplo de programa de quemado

El programa de quemado óptimo para modelos de impresión directa medianos y grandes que usan un proceso de cáscara cerámica varía en función de tu equipo, el material de la carcasa y otras variables externas.

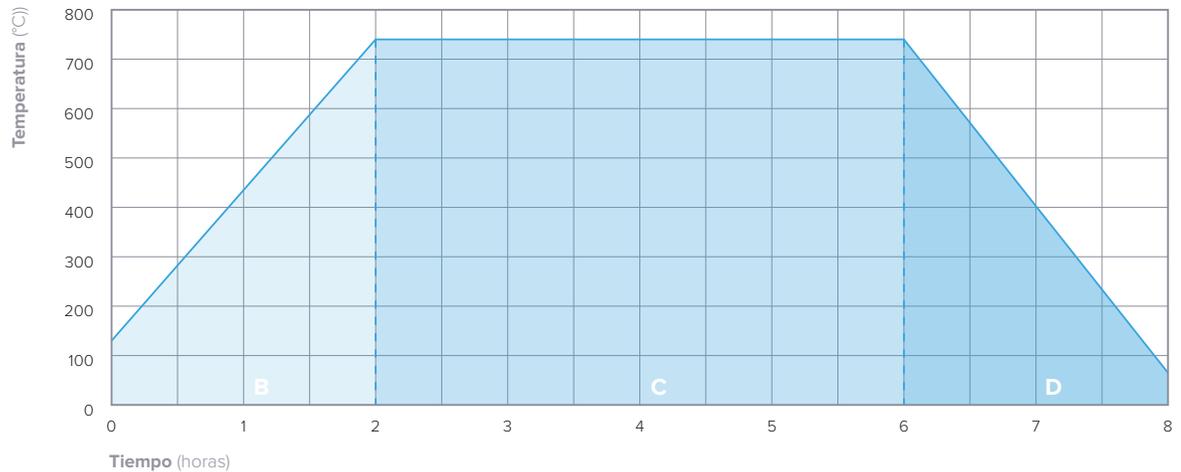
Aquí mostramos un ejemplo de un programa de quemado/eliminación de cera usado por Artcast, un cliente de Formlabs, para producir las piezas de la cornamusa para barcos y el picaporte mostrados en este libro blanco:

Eliminación de la cera mediante vapor

FASE	TIEMPO	PSI
Vapor	30 min	80-90

Quemado tras la eliminación de la cera

	FASE	TIEMPO	TEMPERATURA °C	TEMPERATURA °F
A	Inicio	0 h	130 °C	266 °F
B	Rampa	2 h	hasta 740 °C	1364 °F
C	Mantenimiento	4 h	740 °C	1364 °F
D	Enfriamiento		65 °C	149 °F



Fundición indirecta a la cera perdida

El proceso de creación de modelos a partir de moldes o utillaje se denomina fundición indirecta a la cera perdida porque requiere crear moldes para producir los modelos además de los moldes de fundición finales.

Los moldes rígidos para cera (a menudo denominados útiles), se suelen fabricar sometiendo aluminio o acero a un proceso de mecanizado. La producción de moldes de metal mecanizado cuesta miles de dólares y hacen falta semanas de trabajo de mecanizado y acabado para poder hacer las primeras pruebas y evaluar las piezas de modelo en un proceso de fundición.

Al imprimir directamente el utillaje, los ingenieros y los diseñadores pueden reducir el tiempo entre el concepto y las primeras pruebas desde semanas a cuestión de días.

Los moldes para producir modelos de cera se pueden imprimir con High Temp Resin. Para obtener un acabado de la superficie óptimo para las piezas moldeadas, da un tratamiento de lijado y de pulido a las superficies interiores del molde o un tratamiento de chorreado con microesferas de vidrio si deseas un aspecto mate uniforme.



Molde para inyección de cera impreso con Clear Resin

Para asegurarte de que las piezas finales tienen la precisión dimensional necesaria, compensa la contracción agrandando el molde impreso. El grado de contracción exacto de la cera y el proceso de fundición se pueden obtener de las especificaciones del proveedor.

Aunque las piezas moldeadas deben seguir las reglas de diseño para ser moldeables (p. ej., no tener socavados, dejar un mayor ángulo de desmoldeo es positivo, etc.), puedes conseguir una mayor complejidad de los modelos usando un soporte de montaje para combinar múltiples componentes en una única estructura.

Utillaje impreso en 3D y soportes de montaje para procesos de trabajo de fundición

La High Temp Resin de Formlabs tiene la capacidad de soportar altas temperaturas, lo que la hace adecuada para la producción de herramientas para la fundición a la cera perdida. Puedes usar High Temp Resin para producir moldes para la inyección de cera, sujeciones de montaje y herramientas personalizadas para trabajar la cera.

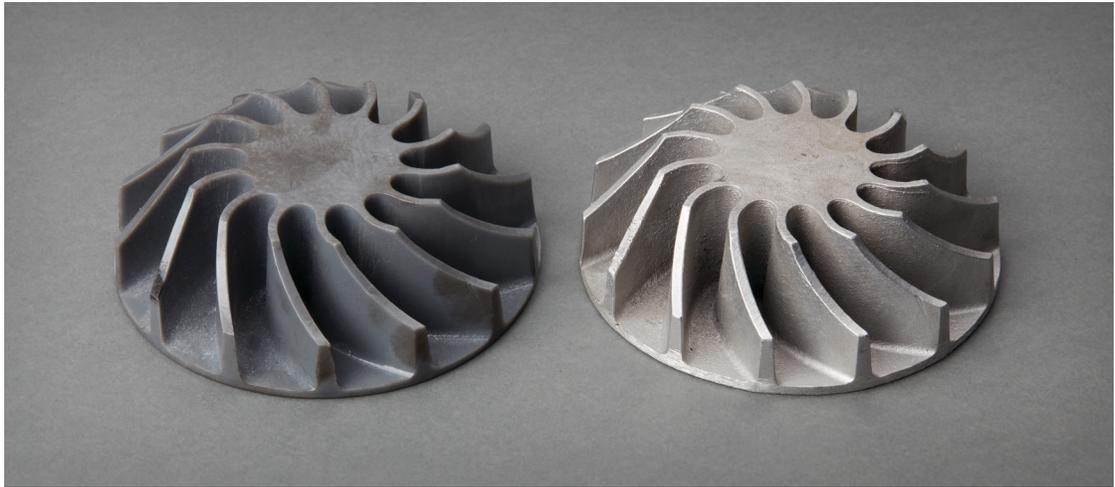
Si los moldes pasan rápidamente por sus ciclos, las piezas de cera recién moldeadas pueden seguir blandas y ser propensas a la deformación. Puedes transferir piezas desde el molde "caliente" que se utiliza para la inyección a un molde frío que actúa como soporte para las piezas mientras se enfrían.

Otro uso de High Temp Resin en la producción de modelos de cera es la creación de soportes y dispositivos de sujeción para la modificación y el montaje de componentes fáciles de producir y que soportan el calor continuo de las herramientas sin los altos costes de fabricación de los metales. La naturaleza aislante de High Temp Resin también ayuda a proteger el resto de la pieza de trabajo del exceso de calor.

Moldeado en arena

En el proceso de moldeado en arena, un trabajador de la fundición llena recipientes conocidos como cajas de moldeo con una mezcla de arena y aglutinante. A continuación, compacta la arena alrededor del modelo. Se retira el modelo para dejar una huella negativa de él y se vierte metal fundido en la cavidad.

Se puede usar un molde abierto para piezas con relieves y rasgos en un único lado. Las piezas con relieves en múltiples superficies requieren moldes de cavidad cerrada, con cajas de moldeo superiores e inferiores.



Modelo impreso con Grey Resin y fundición de aluminio acabada a partir de un molde de arena abierto.

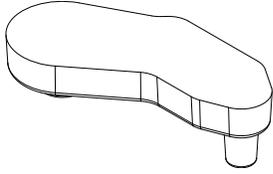
En un molde cerrado, el metal fluye por un sistema de canales hasta alcanzar la cavidad de la pieza. Este sistema de canalización está cuidadosamente diseñado para minimizar las imperfecciones estructurales y estéticas provocadas por un flujo incorrecto del metal.

Los moldes de arena de cavidad cerrada usan machos suspendidos para crear cavidades internas en la fundición final, como es el caso de un bloque motor o un cárter de bomba.

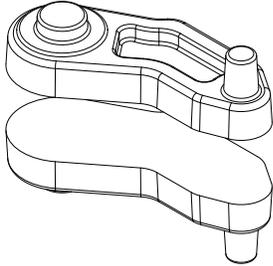
Existen varios estilos básicos de modelos para moldeado en arena, entre los que se encuentran los de tipo abierto, los de tipo partido, los que tienen caja de moldeo superior e inferior y los que usan placas portamodelos.

Comparación de métodos de creación y fundición de modelos

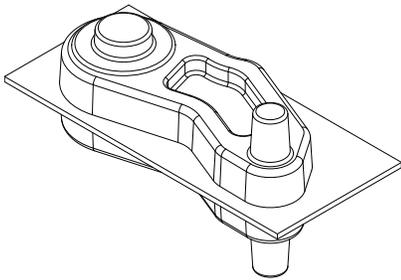
	PIEZAS PEQUEÑAS	PIEZAS GRANDES	RELIEVES PEQUEÑOS/ ACABADO DE SUPERFICIE LISTO EN LA PIEZA	LIBERTAD GEOMÉTRICA
Fundición a la cera perdida: modelos impresos directamente con Castable Wax Resin	Sí	No	Sí	Alta
Fundición a la cera perdida: modelos impresos directamente con Clear Resin	No	Sí	Sí	Alta
Fundición a la cera perdida: modelo indirecto (molde impreso)	Sí	Sí	Sí	Media
Moldeado en arena: modelos impresos directamente con cualquier resina dura	Sí	Sí	No	Baja



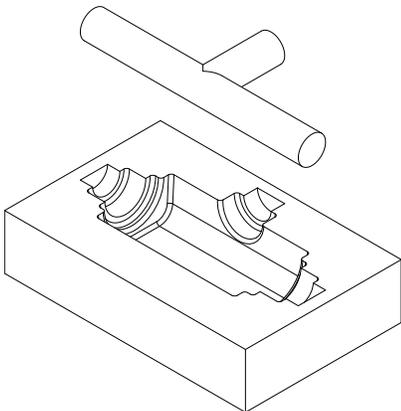
Un tipo abierto quiere decir un estilo de molde abierto, en el que el metal se vierte en una única cavidad dejada por la impresión de la huella de un modelo y la retirada del mismo.



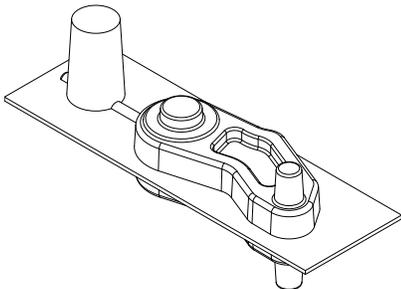
Un **modelo partido** parte toda la geometría de la pieza a lo largo de una línea divisoria. Una mitad de la pieza queda incluida en la parte superior y la otra en la parte inferior.



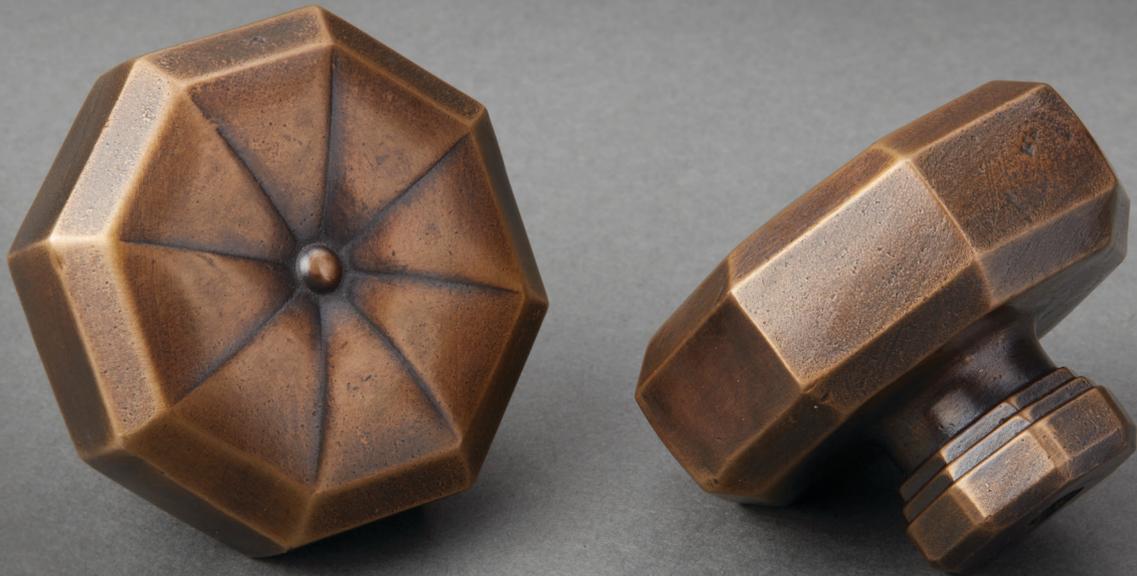
Los modelos de placa portamodelo tienen un enfoque similar al del modelo partido, pero incluye el uso de placas con relieve. La placa suele fabricarse con metal o madera, pero en el caso de un modelo impreso, puede integrarse en la geometría del modelo.



Las cajas de machos se usan para moldear piezas de arena que conforman las cavidades interiores de las piezas finales (p. ej., el espacio vacío en una fijación de fontanería) que no se pueden hacer solo con un modelo para moldeado en arena. Estos machos quedan suspendidos dentro de la cavidad del molde creada por los elementos del modelo. Se vierte metal fundido en torno a ellos y cuando dicho metal se enfría, la parte del macho se rompe y se retira de la pieza fundida.



Los modelos que contemplan cajas de moldeo superior e inferior son una evolución del concepto de la placa portamodelos. Además de la placa portamodelos, un modelo que contempla cajas de moldeo superior e inferior incorpora mazarotas, canales y otros componentes del proceso de fundición. Esto reduce el trabajo manual asociado a preparar la caja de moldeo de arena compactada para la fundición y limita las variaciones en las piezas fundidas que pueda provocar moverlas de un operador a otro.



Conclusiones

La impresoras SLA de sobremesa proporcionan a las fundiciones diversas soluciones útiles para la producción de modelos y la creación rápida de herramientas, con la precisión que exigen los diseños modernos de piezas de fundición. Al añadir la impresión 3D a los procesos de trabajo de fundición tradicionales, los fabricantes pueden responder de forma más rápida y efectiva a las peticiones de los clientes, retrasar las inversiones en herramientas especializadas y validar los diseños de forma rentable. Además, el uso creciente de la optimización topológica en la ingeniería y el desarrollo de productos supone una mayor demanda de geometrías que se puedan obtener mediante la impresión directa de modelos.

Descubre más sobre la impresión 3D para la fabricación

Consultas de ventas en Norteamérica
sales@formlabs.com
+1 617-702-8476
[formlabs.com](https://www.formlabs.com)

Consultas de ventas en Europa
eu-sales@formlabs.com
+34 955 00 33 40
[formlabs.com](https://www.formlabs.com)

Consultas de ventas internacionales
Encuentra un distribuidor en tu región:
[formlabs.com/find-a-reseller](https://www.formlabs.com/find-a-reseller)