



Trabajo Final de Grado de Ingeniería Mecánica

USO DE LA IMPRESIÓN 3D EN LA FABRICACIÓN DE PIEZAS DE GEOMETRÍA COMPLEJA MEDIANTE FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA.

Use of 3D print in complex geometry fabrication through lost wax.

Ús de l'impressió 3D en la fabricació de peces de geometria complexa mitjançant fosa a la cera perduda.

Valencia, diciembre de 2020

Autor: Alejandro Gallego Molner

Tutor: Miguel Ángel Pérez Puig

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer el gran apoyo a mi familia, mayormente a mis padres, en estos años de carrera.

Agradecer también a Miguel Ángel Pérez, tutor de este trabajo, por toda su ayuda durante la elaboración del mismo. A Pascual Guillamón, por hacer que tanto yo como muchos otros alumnos nos interesáramos por la ciencia de materiales.

A Blanca Serra, por el apoyo moral y por sus tan útiles conocimientos en joyería.

Un agradecimiento especial a mi padre por inculcarme desde que era pequeño el amor por la ciencia y la ingeniería.

Os estaré siempre agradecido.

ÍNDICE

1.	RESUMEN/ <i>ABSTRACT</i>	4
2.	INTRODUCCIÓN	5
2.1.	Comparativa de técnicas de fundición	5
2.2.	La técnica de colada a la cera perdida	7
2.2.1.	Método de artista tradicional	11
2.3.	La impresión 3D.....	13
2.3.1.	Máquinas.....	17
2.3.2.	Filamentos.....	20
2.3.3.	Aspectos técnicos.....	28
3.	OBJETIVO.....	32
4.	PIEZAS A FABRICAR, MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
4.1.	Requisitos.....	33
4.1.1.	Requisitos de impresión 3D.....	33
4.1.2.	Requisitos fundición	33
4.2.	Elección de los filamentos.....	33
4.3.	Elección de las impresoras 3D.....	37
4.4.	Elección del metal	38
4.5.	Elección de la pieza	39
5.	EQUIPO.....	44
6.	PRÁCTICA EXPERIMENTAL.....	52
6.1.	Parámetros de impresión.....	52
6.1.1.	Parámetros Prusa i3 Hephestos - PLA	52
6.1.2.	Parámetros Zortrax M200 - HIPS.....	55
6.1.3.	Parámetros Form 3-Clear	58
6.2.	Molde previo y pruebas de temperatura.....	60
6.3.	Molde de goma vulcanizada	63
6.4.	Moldes de escayola	69
7.	ESTUDIO ECONÓMICO	76
7.1.	Coste de ejecución	76
7.1.1.	Costes derivados del uso de las instalaciones.....	76
7.1.2.	Costes derivados de consumibles	78
7.1.3.	Costes derivados de la mano de obra	78
7.1.4.	Coste total proyecto.....	79
		2

7.2.	Coste por impresora-consumible	80
7.2.1.	Coste Prusa i3 Hephestos	80
7.2.2.	Coste Zortrax M200.....	80
7.2.3.	Coste Form 3	80
7.2.4.	Coste cera perdida	81
7.2.5.	Coste total técnicas	82
8.	COMPARATIVA DE LAS TÉCNICAS	83
8.1.	Comparativa visual	83
8.2.	Comparativa con rugosímetro	83
8.3.	Comparativa con microscopio.....	85
9.	CONCLUSIONES	89
10.	PLIEGO DE CONDICIONES.....	91
10.1.	Recomendaciones generales.....	91
10.2.	Seguridad en las máquinas del taller.	92
10.3.	Hornos y muflas.....	92
10.3.1.	Referencias legales.....	93
10.4.	Impresoras 3D	93
10.5.	Equipos de protección individual.....	94
10.5.1.	Gestión de los equipos de protección individual (EPI).....	95
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	96
12.	ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	99
13.	ÍNDICE DE TABLAS	102
14.	ANEXOS	103
14.1.	Ficha técnica PLA.....	103
14.2.	Ficha técnica HIPS.....	104
14.3.	Ficha técnica resina	106
14.4.	Ficha técnica Prusa i3	107
14.5.	Ficha técnica Zortrax M200.....	108
14.6.	Ficha técnica Form3	109
14.7.	Piezas previas	111
14.8.	Molde fallido de goma vulcanizada.....	112
14.9.	Molde de escayola.....	113
14.10.	Valores de rugosímetro	115

1. RESUMEN/ABSTRACT

El objetivo de este trabajo es estudiar la viabilidad económica y técnica de crear estructuras tridimensionales complejas o árboles de piezas en cera mediante diferentes calidades y tipos de impresoras 3D para ser usadas en el proceso de fundición a la cera perdida evitando el tradicional molde de silicona o caucho vulcanizado y hacer una comparativa de la calidad final del producto. Una vez hecho esto, se concluirá en base a estos experimentos que opción se considera más adecuada.

Palabras clave: Impresión 3D, fundición, cera perdida, Zinc, molde.

The objective of this project is to study the economic and technical viability of creating complex three-dimensional structures or trees of pieces in wax by different qualities and types of 3D printers to be used in the process of lost wax casting avoiding the traditional silicon or vulcanized rubber mould and to make a comparison of the final quality of the product. Once this has been done, it will be concluded based of these experiments which option is considered to be the most suitable.

Key words: 3D printing, casting, lost wax, Zinc, mould.

L'objectiu d'aquest treball és estudiar la viabilitat econòmica i tècnica de crear estructures tridimensionals complexes o arbres de peces en cera mitjançant diferents qualitats i tipus d'impressores 3D per a ser usades en el procés de fosa a la cera perduda evitant el tradicional motle de silicona o cautxú vulcanitzat i fer una comparativa de la qualitat final del producte. Una vegada fet això, es conclourà sobre la base d'aquests experiments que opció es considera més adequada.

Impressió 3D, fosa, cera perduda, Zinc, motle.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Comparativa de técnicas de fundición

Para el proceso de fundición necesario para que las diferentes técnicas de impresión 3D puedan transformar el objeto de impresión 3D a metal hay ciertos requerimientos. Es necesario un buen acabado superficial, para que la comparativa entre diferentes impresoras se vea menos alterada por la técnica de fundición y se consiga un resultado estéticamente bonito ya que para piezas pequeñas de joyería o similar es fundamental. Además, es importante que el proceso acepte diseños de formas complejas ya que en definitiva es el objetivo del presente trabajo. Adicionalmente, la precisión dimensional es importante ya que para enganches de joyería o piezas con detalles pequeños si no se consiguen unas medidas bastante precisas puede que no encajen los minerales o elementos complementarios.

A modo de comparativa se ha extraído una tabla con las diferentes cualidades de cada proceso. En ella se muestran los valores cuantitativos de peso, acabado superficial y espesor de la sección (máximo y mínimo) y los valores cualitativos de complejidad de las formas geométricas del modelo que admite el proceso y la precisión dimensional resultante. Para los valores cualitativos la calificación es 1 para el mejor y 5 para el peor. Según el autor de la tabla estas calificaciones son solo generales y pueden variar dependiendo de los métodos utilizados. [1]

Proceso	Material a fundir	Peso (kg)	Acabado superficial (μm)	Complejidad de forma	Precisión dimensional	Espesor de la sección
Arena	Todos	0.05- ∞	12.5-25	1-2	3	3 - ∞
Moldeo en cáscara	Todos	0.05-1000	6.3	2-3	2	2
Modelo desechable	Todos	0.05- ∞	5-20	1	2	2 - ∞
Molde de yeso	No férrico	0.05- 50	1-2	1-2	2	1
Cera perdida	Todos	0.005-100	1.9	1	1	1 - 75
Molde permanente	Todos	0.5-300	2-3	3-4	2	2 - 50
Troquel	No férrico	0.05-50	1-2	3-4	1	0.5 - 12

Tabla 1. Técnicas de fundición

Al analizar los resultados de la tabla vemos que hay grandes diferencias entre las diferentes técnicas. Con respecto al acabado superficial las mejores técnicas son molde de yeso, fundición a la cera perdida y troquel, teniendo todos unos valores comprendidos entre 1 y 2 μm . En cuanto a la complejidad de formas geométricas de la pieza que admite el proceso de fundición se observa que los mejores, es decir, los que en la escala cualitativa han obtenido valores de 1 o de 2 y por lo tanto admiten formas geométricas más complejas son moldeo en arena, modelo desechable, molde de yeso y fundición a la cera perdida. En lo relativo a la precisión dimensional que se obtiene al final del proceso todos los procesos analizados obtienen buenos resultados excepto el moldeo en arena.

Si se resaltan en color azul claro las celdas de los valores que son adecuados para la elaboración del presente estudio quedaría así la tabla:

Proceso	Material a fundir	Peso (kg)	Acabado superficial (μm)	Complejidad de forma	Precisión dimensional	Espesor de la sección
Arena	Todos	0.05- ∞	12.5-25	1-2	3	3 - ∞
Moldeo en cáscara	Todos	0.05-1000	6.3	2-3	2	2
Modelo desechable	Todos	0.05- ∞	5-20	1	2	2 - ∞
Molde de yeso	No férrico	0.05- 50	1-2	1-2	2	1
Cera perdida	Todos	0.005-100	1.9	1	1	1 - 75
Molde permanente	Todos	0.5-300	2-3	3-4	2	2 - 50
Troquel	No férrico	0.05-50	1-2	3-4	1	0.5 - 12

Tabla 2. Técnicas de fundición 2

Visualmente se aprecia que hay dos técnicas que destacan entre el resto, estas son el moldeo en yeso y la fundición a la cera perdida ya que ambas tienen muy buenos resultados tanto en acabado superficial como en complejidad de forma del modelo y precisión dimensional. Si bien las técnicas de modelo desechable y troquel han obtenido buena puntuación en dos de las tres características requeridas, en la otra obtienen resultados bastante malos por lo que también se descartan. Para decidir qué proceso de fundición se va a emplear se pone la tabla anterior pero solo comparando el molde de yeso y la fundición a la cera perdida.

Proceso	Material a fundir	Peso (kg)	Acabado superficial (μm)	Complejidad de forma	Precisión dimensional	Espesor de la sección
Molde de yeso	No férrico	0.05- 50	1-2	1-2	2	1
Cera perdida	Todos	0.005-100	1.9	1	1	1 - 75

Tabla 3. Técnicas de fundición 3

En la tabla siguiente se va a comparar entre las dos técnicas en cada uno de los apartados y poniendo un \checkmark para la mejor opción de las dos y una \times para la peor. En caso de empate se pondrá un - a ambos.

Proceso	Material a fundir	Peso (kg)	Acabado superficial (μm)	Complejidad de forma	Precisión dimensional	Espesor de la sección
Molde de yeso	\times	-	-	\times	\times	\times
Cera perdida	\checkmark	-	-	\checkmark	\checkmark	\checkmark

Tabla 4. Técnicas de fundición 4

Tras crear esta tabla se ve claro que hay una superioridad de cualidades para la creación de este proyecto en el proceso de fundición a la cera perdida frente al molde de yeso. Principalmente la

diferencia está en la complejidad de forma que admite la fundición a la cera perdida que es ligeramente superior al molde de yeso y en la precisión dimensional de la pieza final en la que la fundición a la cera perdida también está por encima del molde de yeso. Adicionalmente el molde de yeso no serviría para materiales férricos ya que el proceso no admite temperaturas demasiado altas. También comentar que el espesor de la pared de la pieza final se ve restringido en valores en torno a 1 mm por el proceso de molde de yeso mientras que en la fundición a la cera perdida hay mayor libertad de diseño.

En las demás características tampoco hay demasiada diferencia ya que: el acabado superficial es muy similar en ambas técnicas; el peso máximo y mínimo no influye demasiado en este aspecto ya que se va a hacer una pieza de peso bajo, pero bastante superior al mínimo.

En conclusión y por todos los motivos anteriormente expuestos se selecciona la fundición a la cera perdida como método para transformar una pieza de impresión 3D a metal.

2.2. La técnica de colada a la cera perdida

La cera perdida es una antigua técnica en la que se emplea un modelo de cera sobre el que se vierte metal fundido; la cera se quema durante el proceso, de ahí la expresión cera perdida.

En el sector de la joyería, la cera perdida es, generalmente, un servicio realizado por profesionales muy cualificados y que utilizan equipamientos especiales. El joyero a partir de una idea propia o basada en algún elemento de la naturaleza genera un boceto

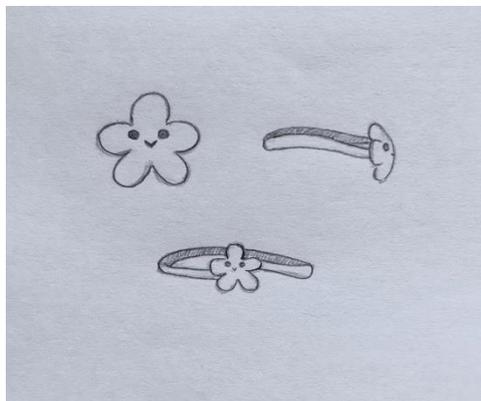


Ilustración 1. Boceto del anillo

del cual se basa para realizar un modelo de cera que talla con limas y otras herramientas manuales como posteriormente se detalla.



Ilustración 2. Anillo de cera perfil



Ilustración 3. Anillo de cera frontal

O bien, si ya existe una pieza física que se desea replicar, el proceso se simplifica notablemente ya que con dicha pieza física se puede elaborar un molde evitando así el boceto y la generación manual del modelo a copiar. Cabe mencionar que el uso de moldes es más frecuente para tiradas de un número considerable de piezas.

Hay dos tipos principales de moldes de fundición a la cera perdida. Uno es el molde frío de silicona; el otro es el molde vulcanizado, en el que se somete el caucho a calor y presión para crear un molde recio y reusable. El uso de moldes de silicona es muy útil con materiales blandos o demasiado delicados para tolerar la presión generada por la vulcanizadora. Los moldes vulcanizados son los más usados en joyería porque son muy duraderos. Sin embargo, la vulcanizadora es una máquina bastante cara, por lo que los moldes vulcanizados suelen ser un servicio privativo de las empresas de fundición. El objeto a vulcanizar debe ser capaz de soportar el calor y la presión a la que estará sometido, así que lo normal es que sea un objeto de metal. Los moldes se usan en conjunción con un inyector de cera, aparato que consta de una cámara en la que se calienta la cera, un sistema de presurización y una boquilla que inyecta la cera. Hay que estudiar el objeto para determinar la disposición de los bebederos, que

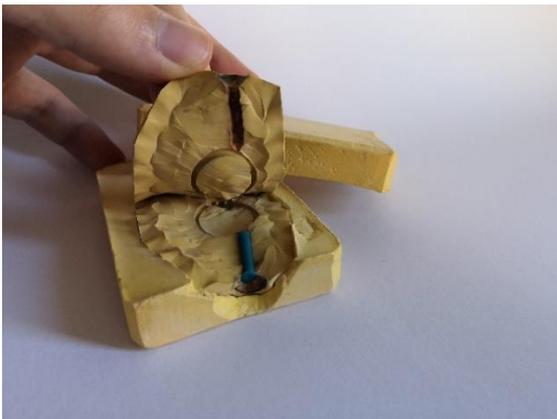


Ilustración 4. Molde abierto



Ilustración 5. Molde cerrado

son los canales por los que se une el tronco del árbol a las piezas y distribuye el metal para el llenado de la pieza. Para un objeto simple basta un bebedero; las piezas más complicadas

pueden requerir uno o dos bebederos adicionales. La colocación del bebedero suele ser un compromiso entre la discreción visual en relación con el objeto y la eficacia en cuanto a la fundición. La anchura del bebedero dependerá del tamaño de la boquilla del inyector de cera que se use para verter la cera en el molde. Para utilizar este molde, conviene espolvorear ligeramente el interior del molde con polvos de talco; de este modo la cera no se pegará.



Ilustración 6. Árbol

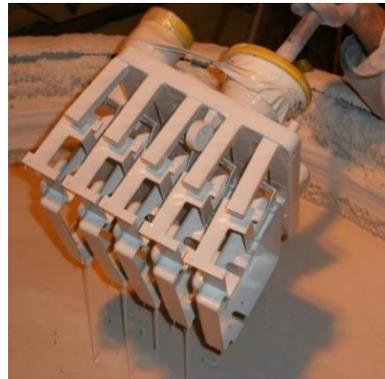


Ilustración 7. Baño cerámico

A continuación, se inserta la boquilla del inyector en el molde y se permite la entrada de cera caliente. Algunos inyectores se detienen de forma automática mientras que con otros hay que confiar en la experiencia para determinar cuándo ha entrado suficiente cera. Una vez inyectada la cera, hay que sujetar el molde unos segundos mientras la cera se endurece. Por último, se abre el molde y se extrae el modelo en cera. El fundidor suelda todos los modelos de cera a una pieza cónica, también de cera, llamada árbol, por su forma al incluirle los bebederos. Un fundidor experto conoce el mejor modo de unir los objetos y el orden en que hay que situarlos.

Una vez montado, el árbol se coloca boca abajo en un recipiente, con la base del tronco hacia arriba. El frasco se llena con una escayola especial para fundición.



Ilustración 8. Vertido de metal

Cuando la escayola cuaja, el recipiente se coloca en un horno para quemar la cera (la cera de joyero se quema a una temperatura bastante baja y no deja residuos). Así se crea un molde de

escayola que está listo para recibir el metal fundido, el cual se calienta a la temperatura óptima para la fundición y se vierte en el molde. El éxito de la fundición depende del perfecto conocimiento de la dinámica de flujo que tiene el fundidor, quien debe saber verter el metal fundido en el molde de manera que el material llene todos los huecos.

En algunos casos de geometría de molde más compleja se pueden emplear las fuerzas de inercia centrífugas creadas por la rotación. Esta fuerza centrífuga lanza el metal líquido contra las paredes del molde y aumenta su presión consiguiendo que el metal fundido alcance todos los rincones del molde. Las máquinas de fundición modernas tienen una cámara de vacío que inyecta todo el metal en el molde de forma menos espectacular.



Ilustración 9. Rotura del molde

Después, el recipiente se sumerge en agua fría o aceite, dependiendo de las características de dureza que queramos obtener, la escayola se rompe y aparece el árbol de metal con todos los elementos fundidos.



Ilustración 10. Anillo sin pulir frontal



Ilustración 11. Anillo sin pulir perfil

Las piezas de metal del árbol se recortan para convertirlas en piezas individuales y el fundidor guarda el metal sobrante del árbol para aprovecharlo en otras fundiciones. Las piezas no salen terminadas, sino que queda un trozo de bebedero que después se elimina en el taller, además el acabado es rugoso y mate.



Ilustración 12. Anillo pulido frontal



Ilustración 13. Anillo pulido perfil

Para finalizar el proceso se cortan los bebederos y después se lija y se pule la pieza para darle el acabado brillante. [2] [3]

2.2.1. Método de artista tradicional

El material principal que se necesita es, obviamente, la cera. Actualmente se venden en distintas durezas, formas y tamaños para que el artista coja el trozo que necesita y modele, mediante rebajado, la pieza. Se vende tanto en bloques sólidos de cera como con un hueco circular en medio del tamaño aproximado de un dedo que son específicos para generar anillos, ya que, aunque con el bloque sólido de cera también se pueden hacer resulta más trabajoso.

Si el artista decide trabajar con el bloque grande de cera, el sólido, primero tiene que serrar la parte que vaya a emplear del bloque con una hoja de sierra fina, cuanto más fina, menos material se desperdicia y más limpio es el corte resultante. Cuando ya tiene el trozo de cera necesario, empieza a dibujar por encima de él la pieza que quiere crear para saber por dónde empezar a tallarla con ayuda de una gubia con diferentes cabeceros para ir vaciando la pieza. Habitualmente, el artista se ayuda de una vela encendida para calentar los objetos que le sirven para trabajar la cera, ya que con un cúter caliente es más fácil cortar la cera y con una aguja caliente es más sencillo perforar la cera para crear agujeros. Cuando talla una cara pasa a la siguiente y así va completando el proceso. Si el diseño requiere caras inclinadas o algunos tipos de geometría se pueden conseguir con diferentes tipos de limas (planas circulares, triangulares...). Una vez se tiene el diseño más o menos terminado se utiliza papel de lija de diferente gramaje para darle un mejor acabado. [2]



Ilustración 14. Método artista

Una vez vista la técnica que suele emplear el joyero o artista tradicional se procede a comentar algunas piezas y geometrías que le generarían problemas o que incluso serían prácticamente imposibles de realizar a mano. [2]

En general, cualquier tipo de pieza con espesores de pared finos es complicada de trabajar para el artista, ya que la cera es un material que se rompe con facilidad. Adicionalmente, los arcos de circunferencia también son una geometría problemática ya que es difícil que se consiga un arco perfecto.

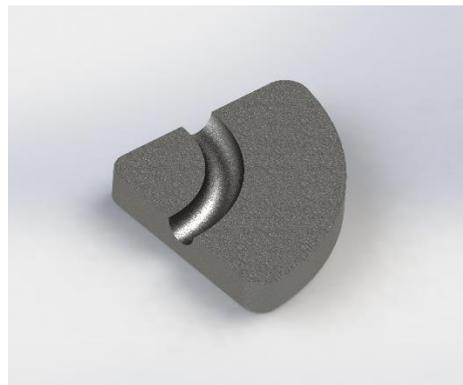


Ilustración 15. Pieza difícil

Sin embargo, hay algunas geometrías que son prácticamente imposibles de realizar. Especialmente conflictivos son los túneles huecos internos con formas curvas ya que no se pueden realizar con herramientas tradicionales.

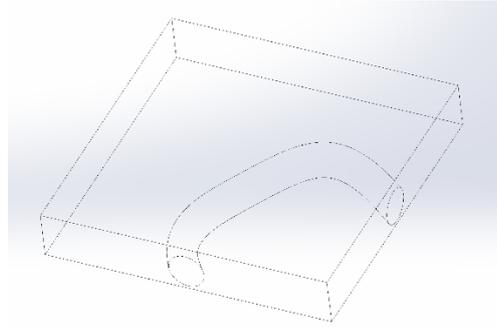


Ilustración 16. Pieza difícil 2

También, hay ciertos objetos ornamentales que debido a su compleja geometría se hacen en la práctica imposibles de realizar por un artista empleando la técnica de la cera perdida, como el mostrado en la imagen siguiente.



Ilustración 17. Pieza difícil 3

Debido a todas estas dificultades, quedan bastante limitadas las opciones de piezas que se pueden fabricar con esta técnica. Para aumentar el número de elementos fabricables, se recurre a la impresión 3D ya que es capaz de generar geometrías muy complejas.

2.3. La impresión 3D

Antes de la creación de las técnicas de impresión 3D que conocemos actualmente tan solo había básicamente cuatro formas de generar una pieza [4].

- **Quitar material.** Este método consiste en sustraer paulatinamente material de un bloque hasta formar la pieza final. Algunas de las técnicas más usadas de este método son por esculpido, talla, fresado, torneado o perforación.
- **Deformar el material.** Este tipo de técnicas se basa en deformar la materia prima para darle la forma final deseada. Algunas técnicas de este tipo son moldeado o plegado.

- **Combinar materiales.** Este método consiste en unir dos piezas de material mediante elementos de fijación desmontables o no desmontables. Entre estas técnicas está la soldadura y la unión con tornillos, clavos u otros elementos de fijación.
- **Fundir el material.** Este método consiste en calentar una pieza sólida de metal hasta convertirla en líquido y luego mediante moldes de arena o de escayola, dependiendo de la técnica, darle forma y dejar enfriar. Las técnicas más conocidas son la fundición a la cera perdida y la fundición por moldeo en arena.

Normalmente, en la fabricación de una gran cantidad de las piezas en la industria se combinan alguno de estos cuatro procedimientos, lo que exige la utilización de numerosas herramientas y el empleo de diferentes materiales.

La impresión 3D funciona de modo completamente distinto: la pieza se crea en un solo paso, capa por capa, a un ritmo medio aproximado de unos dos centímetros de altura por hora (en el caso de las impresoras de filamento fundido de gama media). El objeto creado puede constar de mecanismos internos, formas complejas y entrelazadas, o incluso de huecos y curvas, cosa que costaría numerosas horas y distintas máquinas para poder hacerlas en la industria tradicional.

Si bien existen numerosos procesos de impresión 3D, todos se basan en que los objetos se producen a base de superposición de capas sucesivas. Estas técnicas reciben el nombre de fabricación aditiva, pues se lleva a cabo mediante la adición de materia: el objeto va cobrando forma a medida que las capas se solidifican.

Principalmente hay tres tipos de técnicas [5][6]:

- **Modelado por deposición fundida (FDM).** Este sistema de impresión 3D lo inventó Scott Crump en la década de 1980. Este método de impresión 3D calienta el polímero, que está enrollado en una bobina, hasta fundirlo y extruye, mediante una boquilla, un hilo muy fino de material plástico depositándolo sobre una base de impresión plana. Dependiendo de cómo definen cada punto hay diferentes tipos: cartesiana, delta y polar. Es el tipo de técnica más extendido con una gran diferencia tanto en impresoras 3D domésticas como en las de uso profesional debido a su bajo coste tanto de la propia máquina como del filamento y a la amplia variedad tanto de materiales como de colores disponible.



Ilustración 18. FDM

- **Estereolitografía (SLA).** Sus siglas provienen de **StereoLithogrAphy**. Fue inventada a principios de la década de 1980. Este proceso utiliza el principio de fotopolimerización para crear modelos 3D a partir de resinas sensibles a los rayos ultravioleta.

El rayo láser barre la superficie de la resina líquida siguiendo las instrucciones del modelo 3D digital. Una vez que la primera capa de material ha solidificado, la plataforma baja un escalón, correspondiente al grosor de una capa. Una vez impreso, se limpia la pieza con disolvente para quitar el excedente de resina que no ha solidificado. Como sucedía con la FDM también se generan soportes para los voladizos que posteriormente se han de quitar. El acabado de la pieza es vitreo y tiene la ventaja de que deja una calidad superficial bastante mejor que la FDM. Tiene como inconveniente el pequeño volumen de producción y que se necesitan usar diversos químicos tanto para el curado como la limpieza de las piezas, lo que hace que se necesite mascarilla y buena ventilación, lo que la hace complicada de tener en un domicilio.



Ilustración 19. SLA

- **Sinterizado selectivo por láser (SLS).** Como otras de las técnicas, esta también nació en los Estados Unidos en la década de 1980. Este método de impresión 3D, común en la manufactura industrial, es similar a la tecnología SLA con la salvedad de que la anterior utiliza rayos ultravioleta para solidificar el material mientras que esta utiliza un rayo láser para fusionar el material en forma de polvo, capa por capa. Las máquinas con esta tecnología suelen tener una excelente calidad en las piezas que fabrica, pero un elevado coste lo que la hace prohibitiva para un usuario standard.



Ilustración 20. SLS

- **Sinterizado láser de metal (SLM).** Esta tecnología es muy similar a la SLS, pero utilizando polvos metálicos como el aluminio o metales más costosos como la plata o el oro. Se trata de, mediante un láser, ir fundiendo los polvos metálicos creando así geometrías complejas capa a capa que no sería posible generar con otros métodos. Es una tecnología que en el futuro se prevé que ahorre mucho tiempo y dinero a nivel industrial pero actualmente tanto las máquinas como el polvo metálico resultan bastante costosos para que salga rentable en la mayoría de aplicaciones. Se utiliza mayoritariamente para joyería y para piezas metálicas que de otra forma serían imposibles de fabricar. Un ejemplo de ello sería la fabricación de la refrigeración de machos en moldes de inyección de plástico.

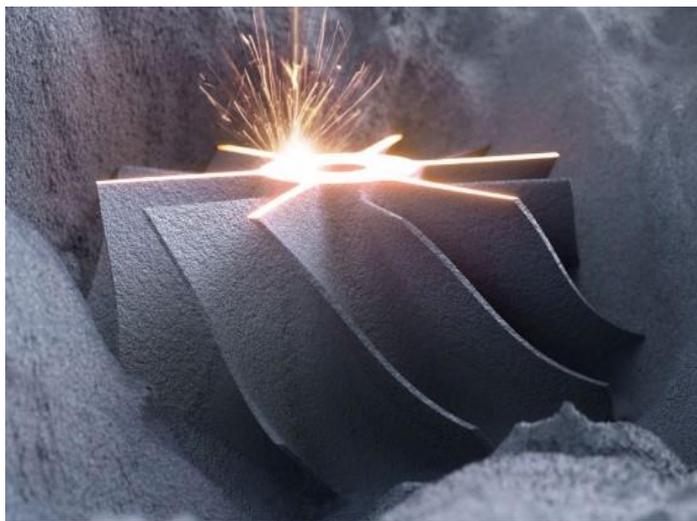


Ilustración 21. SLM

2.3.1. Máquinas

En el mundo de la impresión 3D, como en casi todos los ámbitos industriales actuales, existen maquinarias de diferentes calidades. Estas diferencias se basan en los diferentes componentes que llevan, los cuales incluyen nuevas funcionalidades. Evidentemente, las máquinas más modernas y con más funciones suponen que el coste de la máquina sea superior. A continuación, se explican las diferentes partes que componen una impresora 3D, haciendo hincapié en las de filamento fundido o FDM, como el tipo de software que utilizan haciendo remarcar si suponen un coste extra o si por el contrario la diferencia de precio es pequeña [7].

- **Marco.** Uno de los factores que definen el precio de una impresora 3D es el material del marco. Un marco de metal, generalmente acero o aluminio, le da mucha integridad estructural a la impresora, por lo que se reducen las vibraciones y la probabilidad de rotura de alguna de las piezas o del propio marco por vibraciones. En cambio, un marco de plástico es más barato, aunque con propiedades mecánicas significativamente peores.
- **Autonivelación.** Una de las grandes diferencias de coste de una impresora barata a una cara es si tiene o no autonivelación. Antes de cada impresión, para asegurar que la placa de impresión está totalmente horizontal, se ha de nivelar la placa. En las máquinas baratas, esta nivelación se hace de forma manual, mediante métodos mecánicos, mientras que en las máquinas de mayor coste este proceso se hace automáticamente mediante un motor eléctrico.
- **Cama caliente.** La cama caliente es una base de impresión calefactada mediante, normalmente, una resistencia eléctrica. Al estar caliente la base, la adherencia aumenta y hace que se despegue menos el filamento de la base, cosa que es absolutamente necesaria dependiendo de si se utiliza un filamento u otro. Obviamente, el hecho de tener una cama caliente aumenta el coste de la impresora.
- **Ejes.** Las impresoras 3D se mueven en los tres ejes, de ahí el nombre. Normalmente la base suele ser la que sube y baja a lo largo del eje z mientras que el extrusor es el que se desplaza a lo largo de los ejes x e y. También es bastante común que el extrusor sea el que se mueva a lo largo del eje z mientras que la cama es la que lleva el movimiento en el plano x e y. Mediante motores paso a paso se controla el movimiento de los ejes. Los materiales suelen ser muy similares entre todas las impresoras por lo que no hay prácticamente ninguna diferencia de precio en este aspecto entre los diferentes tipos de impresora.
- **Extrusor.** El extrusor es un componente de la impresora 3D que se encarga de coger el filamento de la bobina para primero, reducir su diámetro y hacer más sencillo su manejo y finalmente fundirlo y depositarlo sobre la base de impresión. Se compone de diversos elementos, aquí se explican los más relevantes:
 - **Motor paso a paso:** Es el primer componente del extrusor y es el encargado de suministrar la potencia para empujar el filamento desde la bobina hasta la boquilla que lo deposita en la cama base.

- **Hot end.** Se trata de una de las piezas más importantes ya que si funciona mal casi con total seguridad no se imprimirá una buena pieza. Este componente, similar a un tubo vertical, es el encargado de aplicar calor y fundir el filamento.
- **Nozzle.** Esta pieza conocida en castellano como boquilla de salida es la parte final del extrusor, es un componente con forma de cono en la que el plástico caliente sale por una pequeña abertura en su parte inferior para depositarlo en la base de impresión.

Las impresoras más costosas incluyen dos extrusores ya que por uno puede salir el filamento principal y por el otro puede salir algún filamento para hacer soportes. Otro posible uso es para hacer piezas de dos colores, lo cual para decoración o moda puede ser un uso muy interesante. El hecho de tener dos extrusores aumenta notablemente el precio.

- **Placa de impresión.** La placa de impresión, también conocida como cama o base, es una superficie recta y horizontal (normalmente de cristal) que sirve para depositar el filamento fundido y construir la pieza sobre ella. No hay grandes diferencias de precio entre unas bases de impresión y otras.
- **Carcasa exterior.** Hay impresoras que tienen una carcasa exterior que protege a la pieza durante la impresión evitando así cambios de temperatura y las corrientes de aire que pueden producir que la pieza se desprege de la base de impresión. Además, tiene una función estética y de protección de los componentes contra la suciedad exterior. Las impresoras de mayor coste suelen incluir carcasa mientras que no es usual en las de coste medio o bajo.
- **Volumen de impresión.** Se llama volumen de impresión al volumen máximo que se podría imprimir en la impresora 3D. Este volumen se consigue multiplicando las dimensiones máximas de impresión en x, y, z. Las impresoras baratas suelen tener un volumen de impresión más reducido que las impresoras 3D caras.
- **Archivo final.** Este apartado es común para las impresoras caras y baratas. Al diseñar la pieza se genera un archivo, el problema es que cada diseñador diseña en un programa, por lo que el archivo es diferente y muchas veces no son compatibles los unos con los otros. Para solucionar esto y que la impresora entienda las órdenes que se le dan, se pasa este archivo por un programa en el que aparte del diseño que ya existía se le configuran parámetros como la velocidad de impresión, temperatura, relleno, etc. Este archivo tiene la extensión GCODE, que la impresora entiende perfectamente y que funciona de forma similar a una máquina de control numérico (cnc) clásica como podría ser una fresadora.

Una vez conocidas las diferentes partes de una impresora 3D se muestran unos ejemplos de diferentes modelos existentes en el mercado. Concretamente tres de tecnología FDM y una de tecnología SLA.

Marca	Modelo	Precio
Anet	A8	265 €
bq	Witbox 2	1420 €
Leon3D	Lion 2X	3450 €
Elegoo	Mars	250€

Tabla 5. Precios impresoras 3D

- **Anet A8.** Es una de las impresoras más baratas del mercado con las que se puede imprimir a una resolución útil, ya que hay alguna más barata, pero con resoluciones que no son aceptables casi para ninguna pieza. Tiene lo básico que se necesita para imprimir, sin extras.

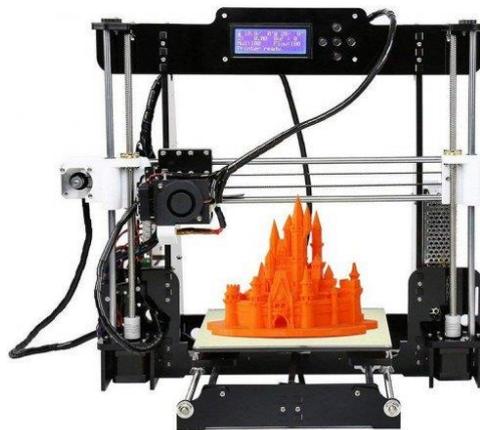


Ilustración 22. Anet A8

- **bq Witbox 2.** Se trata de una impresora que tiene una alta cuota de mercado ya que es sencilla de utilizar debido a que tiene auto nivelación y una carcasa que protege del exterior. Además, posee un volumen de impresión y una resolución que la hacen apta para el ámbito industrial.



Ilustración 23. Witbox 2

- **LEON Lion 2X.** Es una impresora de uso profesional. Tiene todos los componentes propios de una impresora de alta gama como son auto nivelación, carcasa exterior y amplio volumen de impresión. Aunque sus mayores cualidades son su gran resolución de impresión y que cuenta con dos extrusores.



Ilustración 24. Lion 2X

- **Elegoo Mars.** En este caso se trata de una impresora de resina, una SLA, de gama baja lo que la hace asequible para el usuario standard. Sus principales puntos fuertes son su resolución y su pequeño tamaño. Como desventajas tiene las propias de la tecnología SLA (uso de diversos químicos).



Ilustración 25. Elegoo Mars

2.3.2. Filamentos

Uno de los factores a tener en cuenta en la impresión 3D de tipo FDM es el tipo de hilo o filamento que se va a utilizar en el proceso ya que hay una amplia variedad y cada uno de ellos tiene ciertas propiedades y características que pueden ser más o menos interesantes dependiendo de la aplicación final. Otro factor a tener en cuenta es que el tipo de filamento puede condicionar el tipo de impresora 3D que será necesario utilizar.

A continuación, se explican las características más relevantes de cada uno de los filamentos [8][9].

- **ABS.** Acrilonitrilo butadieno estireno. Es un termoplástico muy utilizado en el ámbito de la impresión 3D, especialmente en la industria, ya que su coste es bastante bajo, cosa muy a tener en cuenta en el mundo empresarial. Fue el primer material que se extendió para el uso en impresión 3D. Al terminar la impresión usando este filamento nos queda un acabado que se puede mejorar ligeramente con ayuda de una lija o con acetona. Además, a posteriori es sencillo pegarlo o pintar sobre él para usos artísticos o de decoración de las piezas. Pero no todo es bueno con respecto a este material, un aspecto negativo de este filamento es que al ser fundido produce gases nocivos para el ser humano por lo que la impresora debe estar en el exterior, cosa muy poco habitual, o en un ambiente muy bien ventilado. Entre sus múltiples usos se encuentran ciertas partes de carrocerías de automóviles, bloques de LEGO y flautas dulces entre otros.

Se muestran a continuación unas imágenes, una de una bobina de filamento ABS, otra de una pieza y de la estructura química del ABS.



Ilustración 26. Filamento ABS



Ilustración 27. Pieza ABS

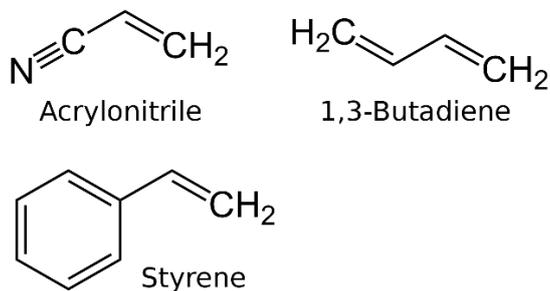


Ilustración 28. Estructura ABS

- PLA.** Ácido poliláctico. Este filamento es un termoplástico de origen natural, ya que está fabricado a partir de almidón de maíz, en Estados Unidos, de yuca, en Asia, o de caña de azúcar, en el resto del mundo. Por esto mismo este material es biodegradable. Otro aspecto positivo es su facilidad al imprimir ya que proporciona un buen acabado y no necesita elementos como la cama caliente ni ningún tipo especial de extrusor, además de que no emite gases tóxicos para el ser humano ni los animales. Esto hace que su uso sea muy popular a nivel industrial, pero sobre todo a nivel usuario, es decir, en casa. Tanto es así, que el PLA actualmente es el filamento más usado del mercado de impresión 3D. En cuanto a sus usos cabe destacar que la variedad de piezas hechas con PLA es casi infinita, se usa tanto en prototipado como en decoración, incluso se utiliza en batas de cirujano. Otro gran motivo para que su uso esté tan extendido es su bajo precio en comparación con el resto de filamentos y su gran variedad de colores.

En las imágenes que se muestran a continuación, se ve la gran variedad de colores de filamentos de PLA, algunas piezas fabricadas con esos colores y la estructura química del PLA.



Ilustración 29. Filamento PLA



Ilustración 30. Piezas PLA

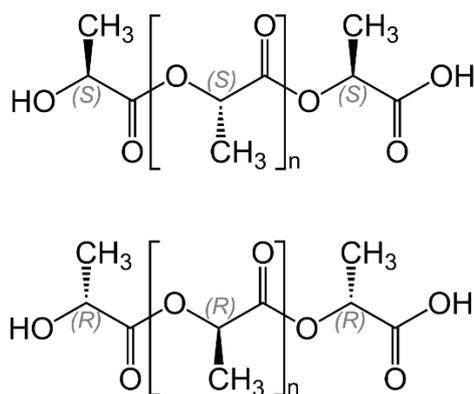


Ilustración 31. Estructura PLA

- PVA.** Alcohol polivinilo. Este material es resistente al aceite, grasas y disolventes. No emite gases tóxicos en el momento de la impresión y no emite olores. Tiene unas buenas propiedades mecánicas. El principal inconveniente de este material es que todo esto depende en una gran medida de la humedad ya que es soluble en agua. Su principal uso es la creación de apoyo para objetos en ABS y PLA, aunque cabe destacar que su coste económico es elevado. Para la retirada de estas estructuras de apoyo una vez finalizada la impresión bastará con dejar la pieza en remojo durante unas horas.

Las imágenes abajo mostradas enseñan un rollo de filamento de PVA, una pieza con forma de espiral hecha con soportes de PVA antes y después de haberla sumergido en agua y la estructura química del PVA.



Ilustración 32. Filamento PVA



Ilustración 33. Pieza con soportes PVA

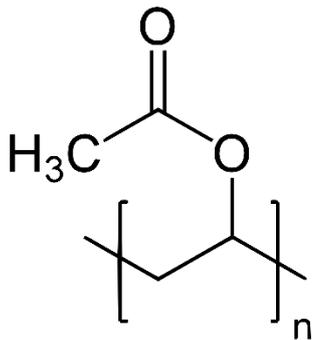


Ilustración 34. Estructura PVA

- HIPS.** Poliestireno de alto impacto. Es un termoplástico obtenido por polimerización para mejorar la resistencia al impacto del poliestireno, se consigue adicionando polibutadieno y acrilonitrilo a la mezcla. Es un material utilizado como material tanto de impresión como de soporte en impresiones 3D de PLA o ABS. En cuanto a las propiedades mecánicas es bastante similar al ABS, sin embargo, su solubilidad en Limoneno, un disolvente natural extraído del aceite de la cáscara de los cítricos, es muy interesante ya que permite realizar formas que de otra forma serían imposibles. Una vez realizada la pieza se sumerge en Limoneno, quedando la pieza sin ningún soporte y con una buena calidad superficial. Es un material indicado para realizar piezas técnicas ligeras y de alta calidad. Es resistente a los aceites y grasas, pero no a los rayos ultravioletas por lo que no es especialmente recomendable para su uso en exteriores. En las imágenes que se muestran a continuación se ven por un lado tres bobinas de HIPS de los tres colores que habitualmente se venden, una pieza con soportes de HIPS antes y después de haberla sumergido en Limoneno y por último su estructura química.



Ilustración 35. Filamento HIPS



Ilustración 36. Pieza con soportes HIPS

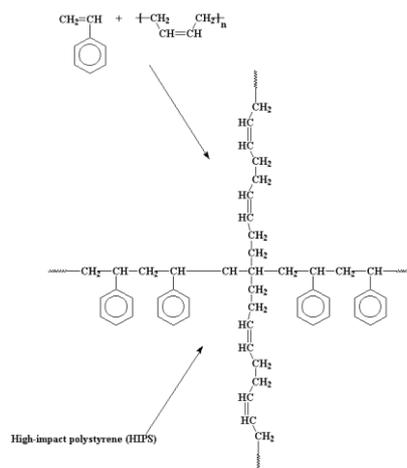


Ilustración 37. Estructura HIPS

- PC. Policarbonato.** Se trata de un filamento poco usado en impresión 3D pese a que tiene una alta resistencia, una gran rigidez y resistencia al impacto. Hay dos motivos para que se use poco este material, el primero, es que se necesita que el extrusor alcance una temperatura de 270°C, cosa que no es sencillo en una impresora doméstica, además, necesita una cama caliente (a unos 110°C). El otro motivo es que el policarbonato tiene que estar en un ambiente al vacío ya que absorbe bastante humedad del ambiente lo que hace que el acabado final una vez impreso sea malo si no se evita esto. Tanto es así, que antes de vender el filamento, lo meten en un horno para quitarle la mayor cantidad de humedad posible.

A continuación, se muestran unas imágenes que muestran una bobina de filamento de PC, un tornillo y una tuerca hecha de PC y la estructura química de este material.



Ilustración 38. Filamento PC



Ilustración 39. Pieza PC

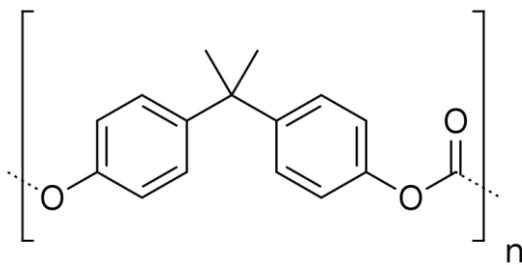


Ilustración 40. Estructura PC

- **Filamentos flexibles.** Hay diversos tipos como el filamento *Soft PLA*, Filaflex, TPU, Ninjaflex, etc. Sus diferencias se basan en la flexibilidad y la dureza que queda después de la impresión. El *Soft PLA* es un filamento flexible con unas propiedades y apariencia de goma duradera. Es útil para realizar piezas que necesiten ser flexibles, que no se rompan al doblarse (resistente) y además sean duraderas. El PLA estándar es muy rígido y no se dobla bien, por el contrario, el *Soft PLA* es flexible lo que lo hace resistente a los impactos y adecuado para muchas aplicaciones industriales y domésticas. Se utiliza desde productos tan variados como neumáticos o juguetes de niños. Los filamentos flexibles suelen tener una dureza Shore 85A pudiendo llegar a Shore 92A.

El *Soft PLA* se imprime parecido al PLA estándar. La principal diferencia de impresión es que se debe imprimir a menos velocidad que con el PLA estándar para obtener buenos resultados, así como una mayor temperatura de cama.

En este caso se muestran imágenes de la flexibilidad del filamento y de la flexibilidad de una pieza ya fabricada.

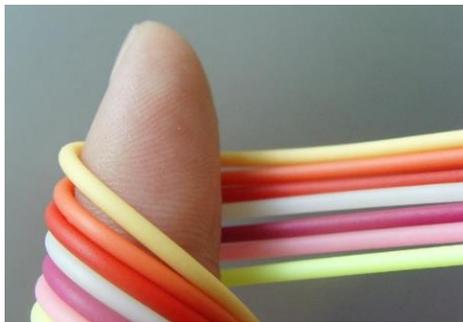


Ilustración 41. Filamento *Soft PLA*



Ilustración 42. Pieza *Soft PLA*

- **Materiales híbridos.** Existen diferentes tipos de materiales híbridos, que son aquellos que mezclan una base de algún filamento, normalmente PLA, y después incluyen polvos que dan un color o acabado diferente a los tradicionales. Están compuestos aproximadamente de un 70% de PLA y de un 30% por el material híbrido. Se pueden encontrar en el mercado filamentos a base de PLA al que se le ha añadido polvos de bambú, corcho, madera, etc. La presencia de estos materiales dentro del filamento hace que el resultado final sean piezas con una textura más orgánica, sin excesivas propiedades mecánicas interesantes. Este estilo de piezas está más orientado a la decoración que a su uso como pieza resistente para la industria.

Cabe decir que si bien hay algunas empresas que comercializan una mezcla de PLA con fibras de carbono o metales, como cobre o bronce, para incrementar sus propiedades mecánicas todavía esta en una fase que casi se podría entender como experimental, por lo que no los tendremos en cuenta para el presente trabajo.

Abajo se muestran dos imágenes que muestran la bobina de filamento y unos búhos fabricados con este material. No se puede añadir una imagen de su estructura química ya que, por muy pequeñas que sean las partículas que se le añaden al PLA, seguirá siendo una mezcla heterogénea.



Ilustración 43. Filamento materiales híbridos



Ilustración 44. Pieza materiales híbridos

Una vez conocidos los principales filamentos utilizados en impresión 3D de tipo FDM se colocan las características técnicas de los mismos en una tabla a modo de resumen indicando:

Temperatura de fusión del filamento para la impresión (en grados Celsius); temperatura a la que debe estar la plataforma para evitar que se desprege la pieza(en grados Celsius); si el material es biodegradable a medio plazo; la densidad (en g/cm³)del filamento; el coste del filamento (en €/Kg) teniendo en cuenta que el precio ha sido obtenido extrapolando ya que las bobinas en los materiales de mayor coste suelen ser de 300 g, 500 g, ó 750 g no de 1 Kg; la cuota de mercado de cada uno de los filamentos expresada de forma cualitativa (Alta/Media/Baja).

Debido a la gran variedad de materiales híbridos que hay, no se pueden dar las características mecánicas de estos, ya que serían diferentes dependiendo qué fibra se le hubiera añadido, cambiando así la densidad y la temperatura de fusión entre otros.

Propiedad	ABS	PLA	PVA	PC	Filamentos flexibles	HIPS
Temperatura de fusión	215-250 °C	190-210 °C	190-210 °C	250 -285 °C	215-250 °C	230-235 °C
Temperatura de la plataforma	95 °C	Ambiente	50 °C	110 °C	Ambiente	100 °C
Biodegradable	NO	SI	NO	NO	SI	SI
Densidad	1.05 g/cm ³	1.2-1.4 g/cm ³	1.2-1.25 g/cm ³	1.2 g/cm ³	1.12-1.23 g/cm ³	1.04g/cm ³
Coste filamento	19.35 €/Kg	17.90 €/Kg	103.8 €/Kg	49.20 €/Kg	55.80 €/Kg	42.6 €/Kg
Cuota de mercado	ALTA	ALTA	BAJA	BAJA	BAJA	MEDIA

Tabla 6. Datos de los filamentos

2.3.3. Aspectos técnicos

Hay varios aspectos de los que depende el coste, el acabado final y el tiempo de fabricación de una pieza impresa en 3D, aquí vamos a abordar los más relevantes. Existen otros factores que condicionan el coste final como pueden ser el coste de la luz para el funcionamiento de la impresora, la laca o el producto necesario para la correcta adherencia a la base, el coste de mantenimiento y de puesta a punto. Eso sin olvidar que, para la industria, suele haber un recargo en el precio para cubrir las pérdidas por las piezas que salen con fallo o taras irreparables[10].

- **Velocidad de impresión.** La velocidad de impresión es la velocidad lineal, medida generalmente en milímetros por segundo (mm/s), a la que se desplaza el extrusor mientras va depositando el material fundido del filamento que se haya seleccionado. La elección de esta velocidad es un compromiso entre la rapidez y la calidad, a mayor velocidad menos tiempo se tardará en completar la impresión, pero, si la velocidad es demasiado alta se perderá calidad de impresión. De hecho, si la velocidad es excesiva puede estropearse la impresión y hacer que se tenga que volver a empezar el proceso de nuevo.

La velocidad de relleno es la velocidad a la que se desplaza el cabezal mientras se rellena el interior de la pieza. Esta velocidad puede ser más alta ya que la calidad del relleno no es tan relevante como el acabado exterior.

La primera capa normalmente se realiza a una velocidad más lenta que el resto de capas para que la adherencia con la base sea la mayor posible.

También se puede dar el caso en que no importe el aspecto de las paredes interiores así que para acortar el tiempo de impresión se eleva la velocidad de impresión de la pared interior y se mantiene la velocidad en el resto de la pieza.

- **Temperatura de impresión.** La temperatura de impresión es la temperatura a la que sale el filamento ya fundido por la punta del *hot end*. Evidentemente esta temperatura depende del filamento que se utilice. Si la temperatura marcada es demasiado baja el filamento puede no estar totalmente fluido y producir atascos en el extrusor, lo que produciría tener que para la maquinaria y hacer mantenimiento e incluso tener que cambiar la pieza en el peor de los casos, por el contrario, si la temperatura de impresión es demasiado alta podemos llegar a quemar el filamento y que el acabado final sea malo. La decisión de subir o bajar la temperatura tiene ventajas y desventajas y dependiendo de la pieza que se vaya a realizar, se tomará la decisión. Si se aumenta la temperatura, al estar más fluido el filamento, se podrá aumentar la velocidad de impresión y se aumentará la adherencia entre capas. En cambio, si lo que se hace es bajar la temperatura de impresión será más sencilla la creación de voladizos.
- **Volumen.** El volumen de la pieza determina la cantidad de filamento que se utilizará y las horas que se emplearan en la impresión. Cuanto mayor sea su tamaño, mayor peso tendrá la pieza y mayor espacio ocupará en el área de impresión, por lo que su coste será más elevado que una pieza de menor peso y tamaño.

Además, hay que tener en cuenta el tamaño de la base de impresión, ya que no se pueden hacer objetos que superen las dimensiones máximas de ésta.

- **Relleno.** La cantidad de relleno que tendrá la pieza determinará su densidad. Menos material en el interior de la pieza supone menos material utilizado y por tanto tiene un precio más económico y menor tiempo de impresión. Sin embargo, a menor relleno, menor resistencia frente a golpes, torsiones y tracciones.

El porcentaje de relleno puede ser interesante de cara a que la pieza final pueda flotar en agua o hundirse.

- **Altura de capa.** Para obtener una mayor calidad final y unos detalles más visibles, el acabado superficial debe ser alto, es decir, un espesor fino de las capas. Esto implica que el tiempo de impresión aumentará notablemente.

La orientación de la pieza a la hora de imprimir también puede determinar el acabado final de la pieza ya que dependiendo del ángulo formado por la pieza y la horizontal, la diferencia por cada capa será mayor o menor por lo que serán más o menos visibles los escalones que se forman.

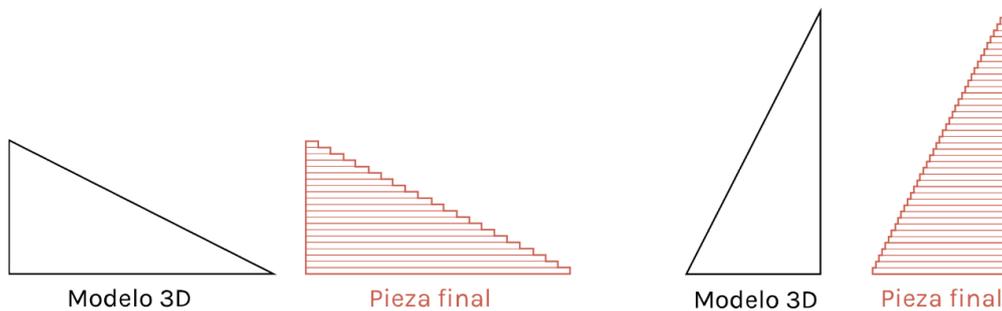


Ilustración 45. Altura de capa

- **Grosor de pared.** Hay veces en que queremos aportar cierta rigidez a la pieza sin recurrir a rellanarla, esto se puede hacer aumentando el grosor de la pared. El grosor o espesor de la pared es la distancia que hay entre una superficie del modelo y la superficie opuesta contigua. Para obtener un buen resultado y un producto resistente, es recomendable que este grosor no sea inferior a 1 mm.

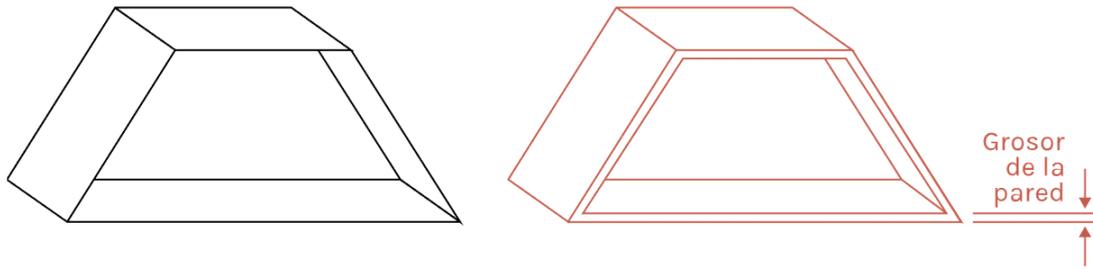


Ilustración 46. Grosor de la pared

- **Soportes.** Los soportes son estructuras que se imprimen junto al modelo pero que no son parte del diseño original y sirven para soportar temporalmente las partes que sobresalen del modelo que exceden aproximadamente los 45°. Como no forman parte del modelo real que se ha diseñado, se eliminan una vez que se haya completado la impresión y se desechan.

Por lo general, los voladizos de hasta 45° se pueden imprimir sin perder calidad. Esto se debe a que cada nueva capa tiene suficiente soporte para permanecer intacta y hacer posible la impresión.

Si se superan los 45°, es decir, se acerca a la horizontal, el modelo se vuelve difícil de imprimir. Dichos voladizos suelen curvarse, caerse, o simplemente, ni se realizan, por lo que es necesario que se añadan soportes. El uso de estos soportes provoca que el acabado superficial sea más rugoso.

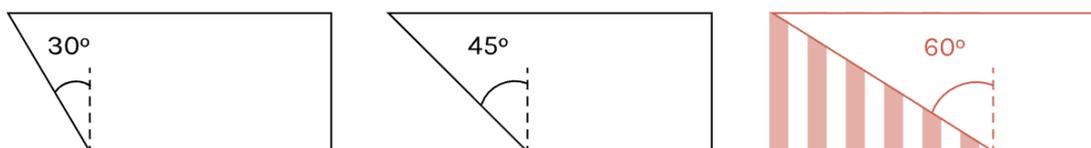


Ilustración 47. Soportes

- **Skirt, brim, raft.** El objetivo de estas tres formas es aumentar la superficie de contacto con la base de impresión y mejorar la adherencia.

El *skirt*, que se podría traducir como falda, el *brim*, que se podría traducir como reborde y el *raft*, que se podría traducir como balsa, son anglicismos comúnmente usados a la hora de realizar la impresión. Especialmente utilizado en piezas con una gran esbeltez. Son métodos muy similares, pero con sutiles diferencias entre ellos: el *skirt* consiste en realizar una copia del contorno de la pieza a imprimir, purgando el extrusor antes de empezar a fabricar la pieza evitando así errores al inicio; el *brim* imprime un pequeño área alrededor del objeto para aumentar la superficie de contacto con la base de impresión en la primera capa; el *raft* crea una superficie horizontal entre la pieza

imprimir y la base de la impresora. Como esta superficie tiene más área de contacto con la base que la propia pieza, la adherencia aumentará, aunque también lo hará el tiempo de impresión.

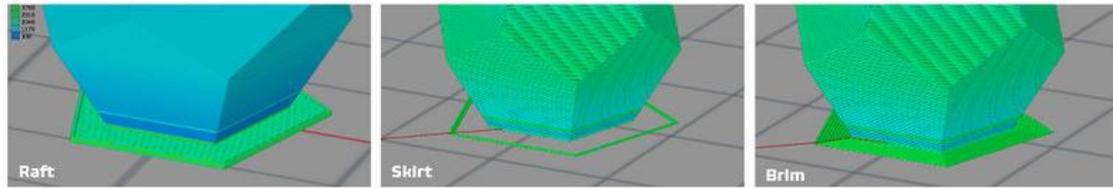


Ilustración 48. Raft, skirt, brim

3. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es estudiar la viabilidad económica y técnica de crear estructuras tridimensionales complejas o árboles de piezas en cera mediante la impresión 3D para ser usadas en el proceso de colada a la cera perdida evitando el tradicional molde de silicona o caucho vulcanizado.

4. PIEZAS A FABRICAR, MATERIALES Y MÉTODOS

Una vez hecha la introducción para aclarar los conceptos, se procede a la parte más de toma de decisiones en cuanto a materiales, se hará una elección razonada de los filamentos, del metal a utilizar y de las impresoras 3D. Asimismo, se mostrarán imágenes y planos de los diseños en 3D.

4.1. Requisitos

Para poder fabricar una pieza que finalmente se convierta mediante fundición en metal se necesitan ciertas condiciones para facilitar el proceso o para abaratar costes. Las condiciones se pueden dividir en condiciones de impresión 3D y en condiciones de fundición.

4.1.1. Requisitos de impresión 3D

Para la parte de impresión 3D se necesita un filamento que tenga un coste bajo, ya que se intenta que el coste no suponga un impedimento frente a otros métodos; que la máquina sea lo más asequible posible mientras se mantenga una buena calidad de impresión ya que abarataría la inversión inicial.

4.1.2. Requisitos fundición

En cuanto a la parte de fundición los requisitos son que el material se funda a una temperatura baja para ahorrar la mayor cantidad de energía eléctrica posible y abaratar la maquinaria, ya que no todos los hornos son capaces de llegar a temperaturas de fusión elevadas; que deje la menor cantidad de residuos al fundirse ya que de lo contrario puede obstruir los canales del molde de escayola.

4.2. Elección de los filamentos

Una vez tenemos claras las necesidades tanto de impresión 3D como de fundición, se elige el filamento haciendo una comparación entre los diferentes materiales que se han descrito en la introducción teórica.

En la siguiente tabla se valorarán del 1 al 3 cada una de las propiedades siendo 1 el peor de los casos y 3 el mejor de ellos. Posteriormente se sumarán los puntos y los materiales que más puntos obtengan serán los que se elijan para realizar los experimentos ya que serán los más adecuados para las necesidades del presente proyecto.

En la primera fila de la asignación de puntos se valora el bajo coste del filamento, se puntuará con 3 puntos si el filamento tiene un coste por kilogramo igual o inferior a 20€/Kg, con 2 puntos si cuesta entre 20 y 60 y con 1 punto si el coste del filamento es superior a 60 €/Kg.

En la segunda fila se valora la temperatura de fusión del material, si la temperatura de fusión está por debajo de 210°C se le otorgan 3 puntos, 2 puntos si funde entre 210 y 250 °C y 1 punto si la temperatura de fusión es superior a 250°C.

En la tercera línea se valora la biodegradabilidad del material a medio plazo, en este caso la votación es binaria, 3 puntos si es biodegradable y 1 punto si no lo es.

En la cuarta línea se valora si es necesaria la utilización de cama caliente y la potencia gastada por esta. Estos conceptos se pueden valorar mediante la temperatura necesaria de la placa de impresión. Se otorgan 3 puntos si no es necesaria la cama caliente, es decir, la placa de impresión puede estar a temperatura ambiente, con 2 puntos si la placa de impresión se calienta entre 40 y 80 °C y con 1 punto si se ha de calentar la placa de impresión a más de 80°C.

En la quinta línea se valora el acabado final, este apartado es cualitativo de modo que se valorará con 3 puntos si el acabado es muy bueno, con 2 puntos si el acabado es bueno y con 1 punto si el acabado es medio.

En la sexta línea se hace el sumatorio de puntos totales de cada filamento a fin de posteriormente poder elegir.

Adicionalmente, sería interesante valorar la cantidad de residuos que van a dejar los filamentos al fundirse, pero no es posible ya que no se dispone de suficiente información.

A modo de resumen se ha elaborado la siguiente tabla:

Propiedad	3 Puntos	2 Puntos	1 Punto
Coste filamento	$X < 20 \text{€}/\text{Kg}$	$20 < X < 60 \text{€}/\text{Kg}$	$X > 60 \text{€}/\text{Kg}$
Temperatura de fusión	$T < 210^\circ\text{C}$	$210 < T < 250^\circ\text{C}$	$T > 250^\circ\text{C}$
Biodegradable	Si	-	No
Temperatura de la plataforma de impresión	Temperatura ambiente	$40 < T < 80^\circ\text{C}$	$> 80^\circ\text{C}$
Acabado	Muy bueno	Bueno	Medio

Tabla 7. Aspectos a valorar

Propiedad	ABS	PLA	PVA	PC	Filamentos flexibles	HIPS
Coste filamento	3	3	1	2	2	2
Temperatura de fusión	2	3	3	1	2	2
Biodegradable	1	3	1	1	3	3
Temperatura de la plataforma de impresión	1	3	2	1	3	1
Acabado	2	2	1	2	1	3
TOTAL	8	14	8	7	11	11

Tabla 8. Puntuación de los filamentos

A la vista de los resultados obtenidos se ve claramente que el filamento más adecuado para la realización del presente trabajo es el PLA ya que ha obtenido más puntos que el resto de filamentos y además no hay ninguno de los requisitos en los que no funcione adecuadamente.

Adicionalmente, tanto los filamentos flexibles como el HIPS han obtenido un empate en segundo lugar con 11 puntos. Vemos en sus respectivas puntuaciones que la única diferencia está en la temperatura de la plataforma de impresión y en el acabado. Hecho el empate se ha de decidir por una opción o la otra por lo que se comparan ambas. Si se pone en una balanza el acabado final de la pieza y un poco más de consumo de energía por parte de la base de impresión parece claro que para este proyecto el acabado superficial es más importante. Además, parece más complicado trabajar con los filamentos flexibles ya que es mucho más complicado imprimir con ellos.

Por ello, se eligen tanto el PLA como el HIPS como materiales de técnica FDM.

Dado que hay varios filamentos con una calidad suficiente para el presente trabajo, se compararán tres escenarios posibles: una impresora de bajo coste con un filamento de bajo coste, replicando el equipamiento de un usuario estándar; una impresora de calidad media-alta con un filamento de coste medio-alto replicando las condiciones que podría tener una empresa para realizar algunos prototipos y una impresora de resina con una resina standard como la que podría tener una empresa para replicar piezas decorativas con un gran acabado superficial.

En vista de los filamentos de PLA con más cuota de mercado la elección que se toma para la realización de la parte de laboratorio es el de la marca española bq, que tiene un precio de 17,90€ la bobina de 1Kg.

Como se ve en las imágenes de abajo las bobinas son de 1 Kg y aunque hay una gran diversidad de colores, se utilizarán diversos colores indistintamente ya que las propiedades mecánicas y su comportamiento térmico son prácticamente iguales.



Ilustración 49. Bobina PLA rojo



Ilustración 50. Bobinas PLA bq

Las características físicas y mecánicas del filamento se detallan en la ficha técnica proporcionada por el fabricante en el anexo 1.

En vista de los filamentos de HIPS con más cuota de mercado la elección que se toma para la realización de la parte de laboratorio es de la marca Zortrax, al igual que la impresora que se va a emplear. Al tener que usar esta marca para el HIPS la bobina sube un poco de precio con lo anteriormente pensado, ya que esta bobina cuesta unos 67€/Kg.

En la imagen de abajo se ve una bobina de Z-HIPS de 800 gramos. Se comercializa en negro, gris y blanco pero las propiedades físicas de los tres colores son prácticamente idénticas por lo que se emplearán indistintamente.



Ilustración 51. Bobina HIPS Zortrax

En el anexo 2 se detallan las especificaciones del Z-HIPS en su correspondiente ficha técnica.

Se empleará una resina fotopolimérica de la marca Formlabs ya que va acorde con la impresora que se va a utilizar y viene seleccionada por el laboratorio de impresión en 3D de la ETSID por lo que no hay demasiada capacidad de elección, pero aun así es una resina que es bastante utilizada y con características bastante aceptables, estas se detallan en el anexo 3. El precio de esta resina es de unos 163€ por litro.



Ilustración 52. Resina Clear

4.3. Elección de las impresoras 3D

Una vez se tiene claro que uno de los filamentos elegidos es el PLA se procederá a elegir una impresora 3D que sea compatible con este filamento, ya que no todas lo son. En este caso la elección se basa en la disponibilidad de impresoras 3D ya que, evidentemente, no se dispone de acceso a todas las impresoras del mercado. Se dispone de una impresora Prusa i3 Hephestos de la empresa española bq. En el mercado tiene un precio aproximado de 250 € y en su momento fue una de las impresoras más vendidas en cuanto a gama media-baja. En el anexo 4 se adjunta la ficha técnica de la impresora con todas sus características.



Ilustración 53. Prusa i3 Hephestos

Para la impresora de gama media-alta se elige la Zortrax M200 ya que se trata de una impresora que tiene una alta cuota de mercado por su sencillez de uso debido a que tiene auto nivelación y una carcasa que la protege del exterior. Además, posee un volumen de impresión y una resolución que la hacen apta para el ámbito industrial. El precio de esta impresora 3D está en torno a los 2200€. En el anexo 5 se encuentran sus características en la ficha técnica.



Ilustración 54. Zortrax M200

Para la impresora de resina se recurre al laboratorio de impresión en resina de la ETSID por lo que la única opción es una impresora de alta gama con un precio de unos 3299 €. Se trata de la Form 3 de la empresa Formlabs y es una impresora capaz de generar piezas de una calidad muy alta.

Esta impresora no es exactamente de tipo SLA, sino que utiliza la tecnología LFS que es como la tecnología sucesora de la SLA. Esta tecnología emplea un tanque flexible y una iluminación de tipo lineal para transformar la resina para crear piezas prácticamente perfectas.

La ficha técnica en la que se detallan las características se encuentra en el anexo 6.



Ilustración 55. Form 3

4.4. Elección del metal

La elección del metal se ha de adaptar a su temperatura de fusión ya que los hornos mufla con los que cuenta el laboratorio de fundición de la UPV no llegan a las temperaturas que son necesarias para poder fundir metales con un alto punto de fusión como son el hierro, la plata o el oro, que son metales comúnmente utilizados en fundición en el ámbito de la joyería y bisutería y que, probablemente, dejarían un mejor acabado superficial al ser metales más nobles.

Por esto se va a emplear zinc (Zn) que es un metal con el característico color metálico, una temperatura de fusión de unos 420°C grados y una densidad de 7.13 g/cm³. Este metal es normalmente empleado en aleaciones y como un recubrimiento para aportar protector de otros metales como puede ser el acero galvanizado.

Para rellenar el arbol de impresión 3D que anteriormente se ha diseñado se necesitaría un mínimo de 208.53 g, esto se ha obtenido del siguiente modo:

$$\text{Volumen árbol} \times \text{Densidad Zn} = \text{Masa}$$

$$29.2471 \text{ cm}^3 \times 7.13 \text{ g/cm}^3 = 208.53 \text{ g}$$

Cabe destacar que habrá que fundir algo más que la masa calculada ya que el árbol tendrá un poco más de volumen debido al cono de entrada y a que siempre quedan restos en el crisol en el que se funde el metal y en el que se vierte para centrifugarlo.



Ilustración 56. Zinc

4.5. Elección de la pieza

Una vez que ya se han visto las dificultades que tendría un artista tradicional se procede al diseño de una pieza que precisamente, recoja varias de esas dificultades, es decir, una pieza que muy difícilmente podría generar un artista en cera por el método tradicional.

En este caso, se va a aunar en una pieza tanto arcos de circunferencia como túneles internos en diferentes planos.

Hay que tener en cuenta que la pieza ha de ser pequeña, ya que, el molde de aluminio tiene un diámetro de unos 8 cm y ahí no solo tiene que caber una pieza, sino varias. Además, la altura también es importante ya que tampoco puede ser demasiado alta ya que la altura del molde de aluminio es de unos 12 cm y hay que dejar un margen tanto para el bebedero como para que tenga escayola por arriba la pieza.

Se decide diseñar la siguiente pieza:

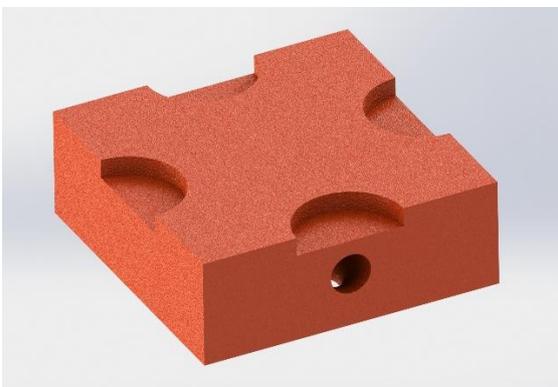


Ilustración 57. Pieza

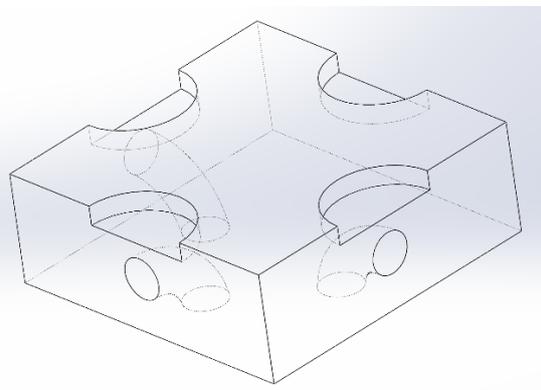
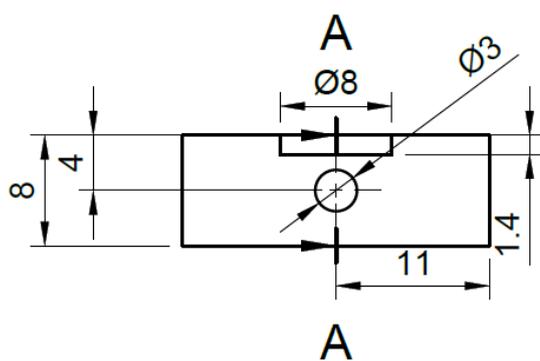
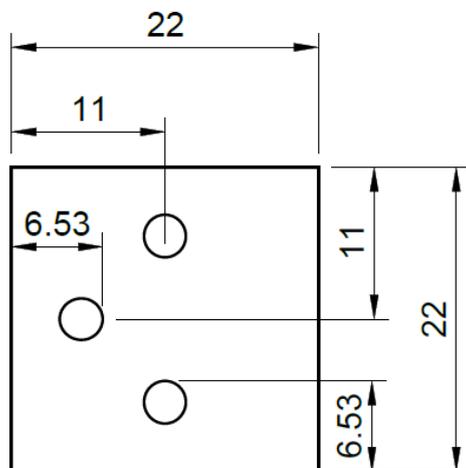
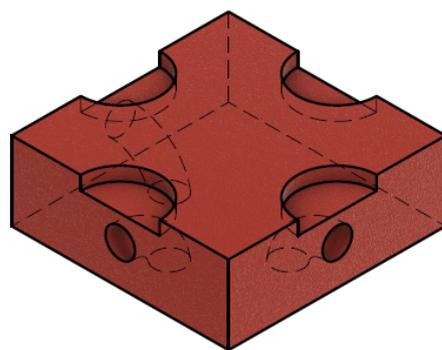
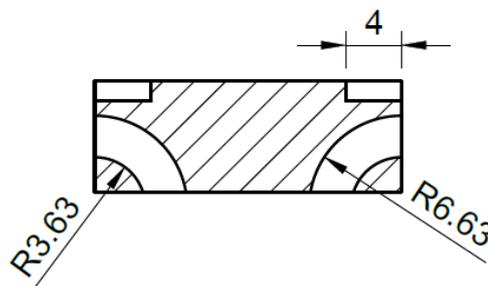


Ilustración 58. Pieza 2

Con las siguientes medidas:



A-A (2:1)



Dept. TFG	Technical reference	Created by Alex Gallego	Approved by	
		Document type Plano de pieza	Document status	
		Title Plano general pieza	DWG No. P-01	
		Rev. 01	Date of issue 29/09/2020	Sheet 1/1

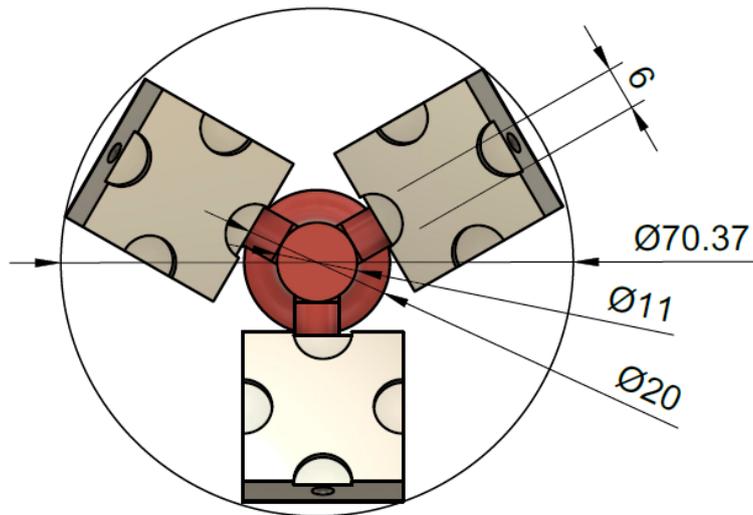
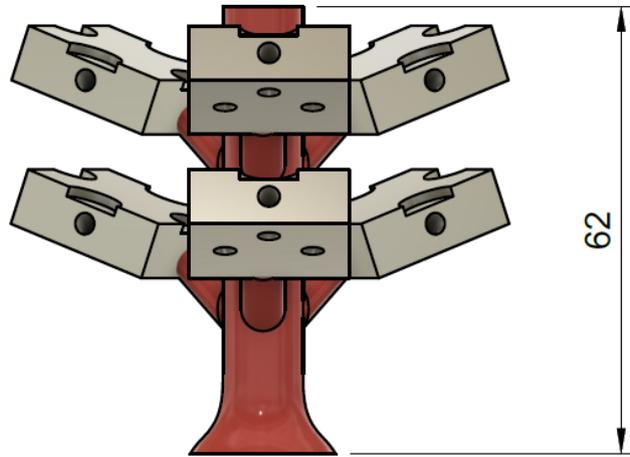
La pieza diseñada tiene un volumen de unos 3584 mm³ lo que supondría un peso aproximado en PLA de 4.4 gramos si estuviera rellena al 100%.

Una vez se tiene la pieza diseñada lo siguiente es diseñar el conjunto del árbol con las diferentes piezas. La idea es colocar 6 piezas, ya que es un número que para algunas pruebas de prototipado o pequeñas tiradas de joyería podría ser interesante.



Ilustración 59. Árbol

Las medidas generales del árbol son las siguientes:



Dept. TFG	Technical reference	Created by Alejandro Gallego	Approved by	
		Document type Plano de conjunto	Document status	
		Title Medidas generales árbol	DWG No. P-02	
		Rev. 01	Date of issue 29/09/2020	Sheet 1/1

El árbol completo tiene un volumen de 29247 mm³ y en PLA tendría un peso de unos 36 gramos si tuviera un relleno al 100 %.

La idea es que al acabar el proceso el árbol de fundición quedara algo así:



Ilustración 60. Árbol metal

Y posteriormente al cortar y limar la pieza se obtendría el resultado final.



Ilustración 61. Pieza metal

5. EQUIPO

En este apartado se describen las características de los elementos que son necesarios para el desarrollo de los ensayos.

- **Horno.** Horno mufla de resistencia, es el equipo de calefacción básico para el uso del laboratorio. El horno de resistencia es el equipo necesario para poder derretir el filamento y dejar el molde preparado para el metal.



Ilustración 62. Horno abierto



Ilustración 63. Horno cerrado

- **Cilindro metálico para escayola.** Este cilindro de aluminio sirve para contener la escayola para la creación del molde. Tiene un diámetro de unos 8 cm.



Ilustración 64. Molde metálico

- **Base de goma para escayola.** Junto al cilindro metálico compone el molde para la escayola. La base sirve para asegurar el cierre hermético y que la escayola no se salga. Además, el cono interior que tiene crea el bebedero por donde se introducirá el metal.



Ilustración 65. Base de goma

- **Campana extractora de gases.** Esta campana es bastante importante en el proceso de derretimiento del filamento para dejar hueco el molde, ya que, una cosa es derretir el filamento para imprimir en 3D y otra es volverlo prácticamente líquido para vaciar el molde ya que en este proceso puede degradarse y emitir gases tóxicos. Lo que hace esta campana es aislar al usuario de en este caso el horno de mufla y extrae el aire hacia el exterior.



Ilustración 66. Campana

- **Termopar.** Este termómetro termopar de la marca Chauvin Arnoux es capaz de medir de -40°C a 1350°C con una precisión del $0.1\% +1$ grado de la lectura. Es necesario ya que ofrece la lectura de temperatura con mucha más precisión que el horno de mufla.



Ilustración 67. Termopar

- **Inyectora de cera.** Esta máquina sirve para el proceso de inyección de cera. Se le alimenta con cera a temperatura ambiente y se le puede regular tanto la presión como la temperatura de salida.



Ilustración 68. Inyectora de cera

- **Licuada de cera.** Sirve para vaciar la cera de los moldes de escayola calentándola con agua y recogiendo la cera para poder ser reutilizada.



Ilustración 69. Licuadora de cera

- **Vulcanizadora.** Su función es aplicar presión y temperatura mientras se está realizando el molde de goma para vulcanizarla para poder replicar correctamente el modelo.



Ilustración 70. Vulcanizadora

- **Centrifugadora.** Es un elemento de gran ayuda a la hora de inyectar el metal ya que mediante el giro produce fuerza centrífuga y provoca que el metal alcance con mayor facilidad todas las partes del molde de escayola.



Ilustración 71. Centrifugadora

- **Horno para secado.** Como su nombre indica este horno sirve para eliminar los restos de humedad y atemperar, en este caso, los crisoles y los moldes de escayola. Suele estar en el caso de este experimento a unos 300°C.



Ilustración 72. Horno de secado

- **Rugosímetro.** Este aparato como indica su nombre, mide la rugosidad superficial de las piezas en un rango de -200 a +150 μm . Además, cuenta con una pantalla en la que muestra el perfil que se está midiendo. Concretamente el modelo empleado es el Map Surf PS 10.



Ilustración 73. Rugosímetro

- **Microscopio.** El microscopio empleado sirve para observar de forma ampliada las piezas deseadas. Se puede ampliar x5, x10, x 20, x50 y x100.



Ilustración 74. Microscopio

- **Soldador.** Este aparato sirve para derretir la cera con el fin de crear los árboles de cera para el molde de escayola. Su rango de funcionamiento es de 50°C a 200°C.



Ilustración 75. Soldador

- **Pulidora.** Esta máquina desbasta y pule las piezas con un movimiento giratorio. El grado de desbaste varía según el tipo de lija que tenga montada.



Ilustración 76. Pulidora

Los consumibles más importantes, sin tener en cuenta el zinc que tiene su apartado propio son los siguientes:

- **Revestimiento cerámico.** Es el elemento fundamental para crear el molde. Se mezcla con agua y se coloca en el cilindro metálico con la base de goma, tras lo que se deja solidificar para crear el molde. Se suele emplear de forma común la terminología escayola.
- **Goma vulcanizada.** Es el elemento principal para elaborar los moldes de goma para replicar piezas en cera. Se emplea una goma de la marca Castaldo Goldlabel de 3 mm de espesor.
- **Cera.** Para rellenar el molde de goma se emplea una cera natural azul que a unos 80 °C se hace lo suficientemente líquida como para poder inyectarse.
- **Otros.** Hay algunos elementos generales que también son necesarios para el desarrollo de los ensayos, pero no son tan importantes como para merecer apartado propio. Estos son: mazo de goma para romper el molde de escayola, balanza de precisión para poder pesar, recipiente de mezcla de escayola y recipiente para recoger el filamento quemado, lijas, pasta de alúmina, entre otros.

6. PRÁCTICA EXPERIMENTAL

Este apartado está más enfocado a las pruebas experimentales realizadas en los laboratorios de fundición de la UPV. En él se explica detalladamente como se han realizado los experimentos.

6.1. Parámetros de impresión

El objetivo de este apartado es explicar brevemente los parámetros de impresión que se han empleado en cada una de las tres combinaciones de filamento-impresora que se han utilizado y mostrar la evolución de la pieza impresa desde el programa de impresión hasta la pieza definitiva en 3D.

6.1.1. Parámetros Prusa i3 Hephestos - PLA

Para la Prusa i3 Hephestos en combinación con el PLA se han empleado los siguientes parámetros de impresión. Cabe destacar que el tipo de adherencia a la base de impresión elegido ha sido el brim.

Calidad	
Altura de capa	0.19 mm
Altura de capa inicial	0.2 mm
Ancho de línea	0.4 mm
Ancho de línea de pared	0.4 mm
Ancho de línea de la pared exterior	0.4 mm

Perímetro	
Grosor de la pared	0.6 mm
Grosor superior	0.4 mm
Grosor inferior	0.4 mm
Patrón superior/inferior	Líneas
Rellenar espacios entre paredes	En todas partes
Expansión horizontal	0 mm
Sin forro en huecos en Z	<input type="checkbox"/>
Habilitar alisado	<input type="checkbox"/>

Relleno	
Densidad de relleno	30 %
Patrón de relleno	Rejilla
Porcentaje de superposición del relleno	5 %

Ilustración 77. Parámetros Prusa i3 Hephestos

Material		
Temperatura de impresión	207	°C
Temperatura de impresión de la capa inicial	207	°C
Flujo	100	%
Velocidad		
Velocidad de impresión	35	mm/s
Velocidad de relleno	60	mm/s
Velocidad de pared exterior	30	mm/s
Velocidad de pared interior	36	mm/s
Velocidad de desplazamiento	120	mm/s
Velocidad de impresión de la capa inicial	20	mm/s
Velocidad de desplaza...to de la capa inicial	50	mm/s

Ilustración 78. Parámetros Prusa i3 Hephestos

Las propiedades más relevantes de esta impresión son :

Prusa i3 Hephestos			
Altura de capa (mm)	Relleno	Gasto de material (g)	Tiempo
0,19	30%	24	2h 58 min

Tabla 9. Parámetros Prusa i3 Hephestos

En la simulación la pieza con los soportes quedaría de la siguiente forma:

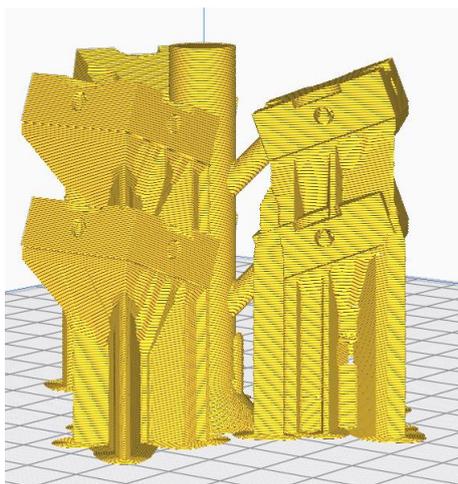


Ilustración 79. Simulación Prusa i3 Hephestos

Una vez se imprime el modelo se puede apreciar que los soportes a simple vista parecen bastante difíciles de retirar.

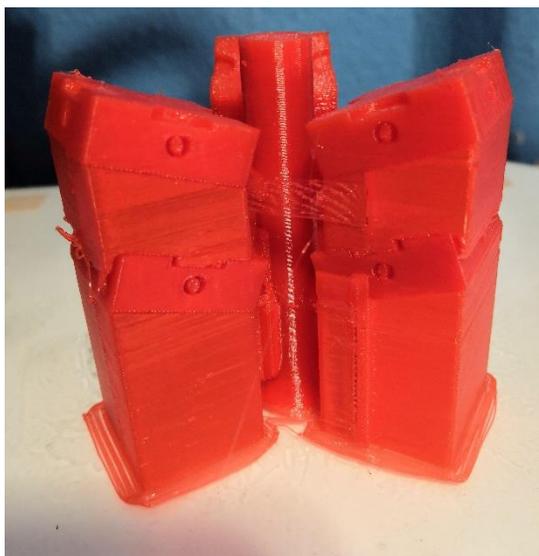


Ilustración 80. Árbol Prusa i3 Hephastos

Una vez se ha conseguido quitar los soportes y se eliminan las rebabas y restos de soportes que hay que eliminar con lija fina el árbol y la pieza individual quedarían de este modo.

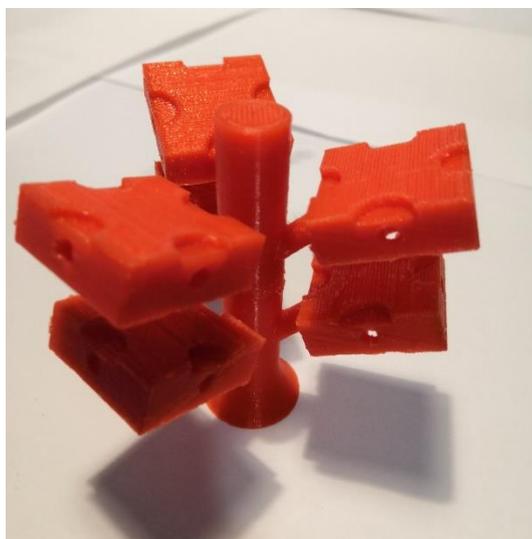


Ilustración 81. Árbol Prusa i3 Hephastos sin soportes

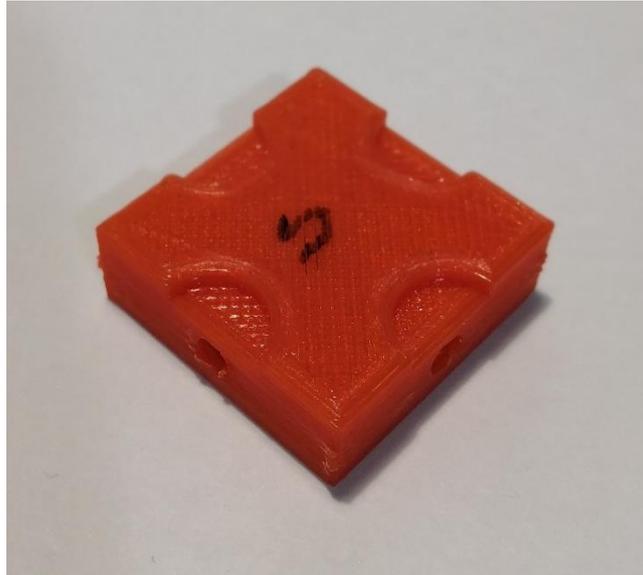


Ilustración 82. Pieza Prusa i3 Hephesto

6.1.2. Parámetros Zortrax M200 - HIPS

Para la combinación de la Zortrax M200 con el HIPS se han elegido los siguientes parámetros en el laboratorio de impresión 3D de la ETSID. Cabe destacar que se ha elegido un soporte de adherencia a la base tipo raft.

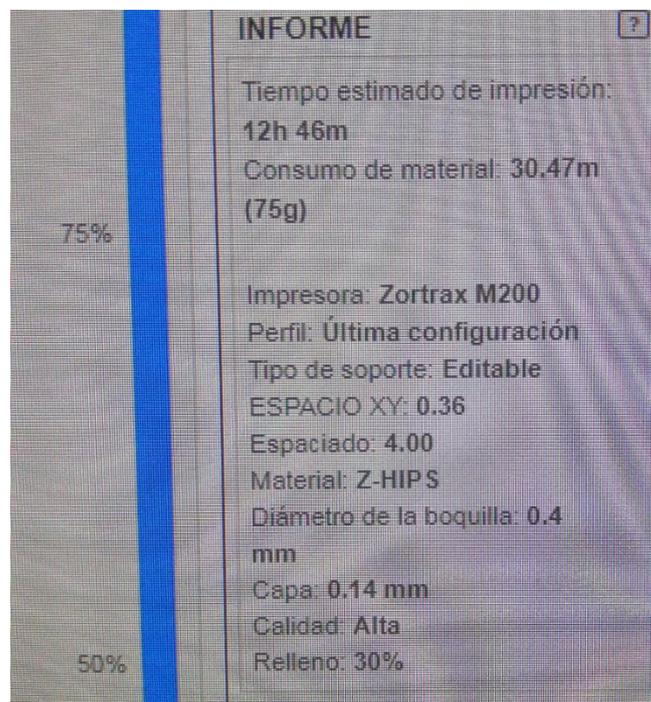


Ilustración 83. Parámetros Zortrax M200

A modo de resumen se ha efectuado la siguiente tabla:

Zortrax M200			
Altura de capa (mm)	Relleno	Gasto de material (g)	Tiempo
0,14	30%	37,5	6h23min

Tabla 10. Parámetros Zortrax M200

Al hacer la simulación por capas la pieza en azul, y los soportes el blanco quedarían así.



Ilustración 84. Simulación M200

Una vez se imprime el modelo se puede apreciar que los soportes a simple vista parecen un poco más sencillos de retirar que en el caso de la Prusa i3 Hephestos.

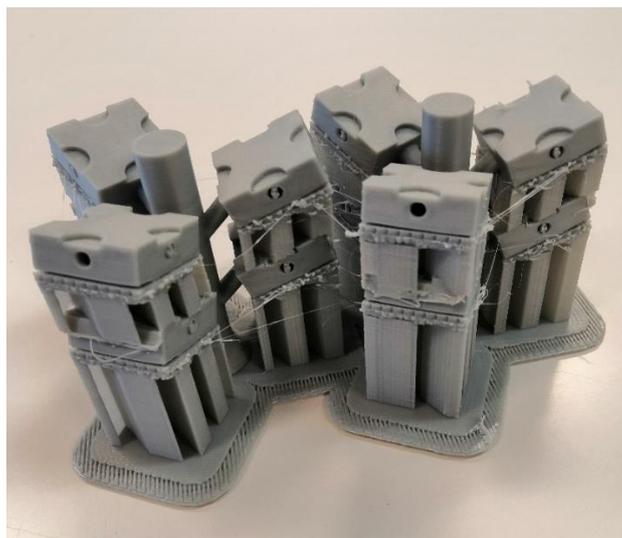


Ilustración 85. Árbol M200

Una vez se ha conseguido quitar los soportes y se eliminan las rebabas y restos de soportes que el árbol y la pieza individual quedarían así.

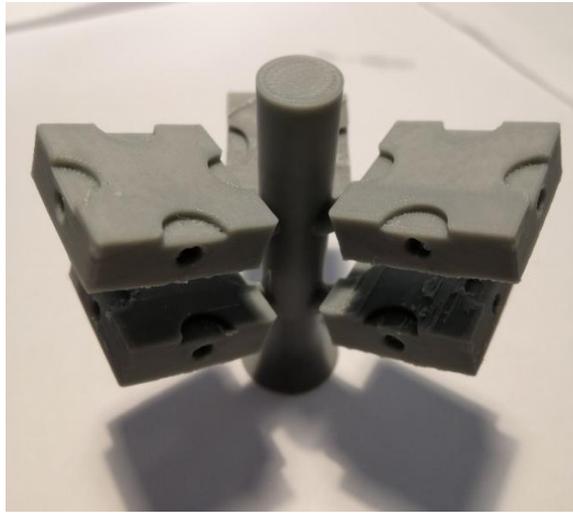


Ilustración 86. Árbol M200 sin soportes

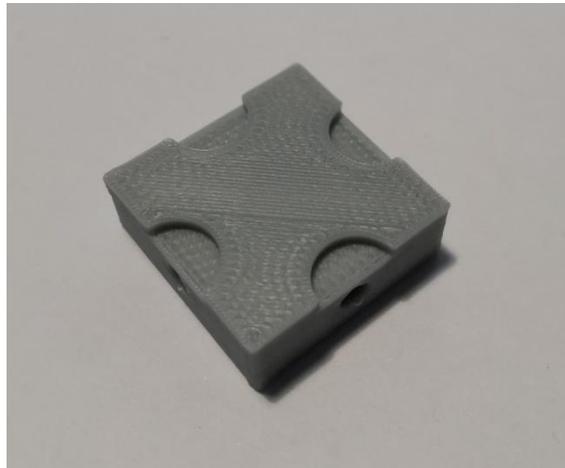


Ilustración 87. Pieza M200

6.1.3. Parámetros Form 3-Clear

Para la impresora Form 3 de Formlabs se han empleado los siguiente parámetros:



Ilustración 88. Parámetros Form 3

Para la impresora de resina se ha elaborado la siguiente tabla a modo de resumen.

Form 3			
Altura de capa (mm)	Relleno	Gasto de material (ml)	Tiempo
0,05	100%	51,75	6h54 min

Tabla 11. Parámetros Form 3

Una vez se tienen impresas las piezas hay que proceder de forma diferente a las impresoras de filamento fundido.

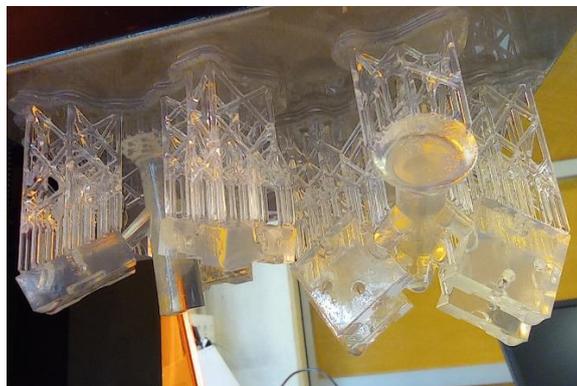


Ilustración 89. Conjunto Form 3

En este caso, hay que retirar la pieza de la base de impresión e introducirla en una lavadora para eliminar el exceso de resina que haya quedado durante la impresión.



Ilustración 90. Limpieza Form 3

Posteriormente, se cura la pieza, es decir, se endurece la resina mediante rayos ultravioletas.

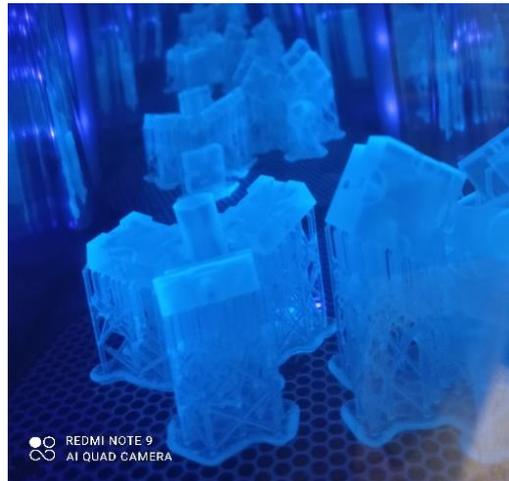


Ilustración 91. Curado Form 3

Por último, ya si, se quitarían los soportes y se tendría la pieza terminada.

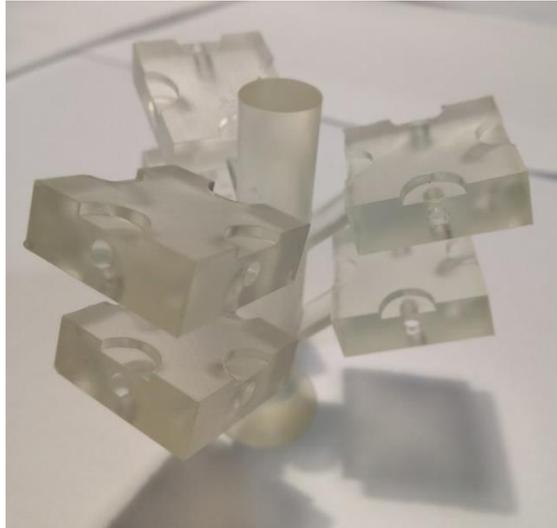


Ilustración 92. Árbol Form 3

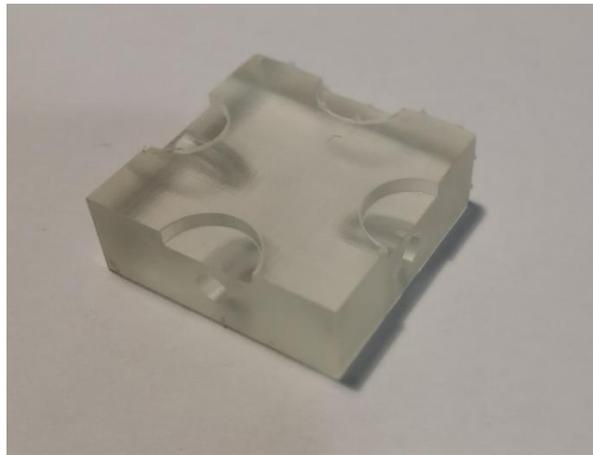


Ilustración 93. Pieza Form 3

6.2. Molde previo y pruebas de temperatura

Antes de realizar los moldes definitivos se debe comprobar si los materiales son apropiados para la técnica que se va a emplear.

Lo primero que se comprueba es si sería capaz de vaciarse el molde al fundir el filamento de impresión 3D. Para ello se imprime en la Prusa i3 Hephastos el árbol de fundición descrito anteriormente, se le quitan los soportes y se quitan algunos defectos de la impresión, se crea el molde de escayola, después se deja secar y posteriormente se introduce en el horno con un cuenco cerámico y se va aumentando la temperatura del horno gradualmente empezando desde la temperatura de impresión ya que se sabe que a esa temperatura el filamento empieza a estar fluido. Se ve que a la temperatura de impresión el filamento no tiene la fluidez suficiente como para vaciar el molde por lo que se aumenta la temperatura hasta los 315°C, a esa temperatura el filamento se vuelve muy líquido y empieza a degradarse ya que cambia de color

hacia un color marrón, color habitual de la degradación en los polímeros. Una vez vaciado el molde se espera una hora aproximadamente a que se enfríe y con la ayuda de un mazo se rompe el molde en un contenedor pequeño para posteriormente poder analizar los restos. Una vez roto, se dirime si ese filamento es apto para la técnica ya que si se crea una capa gruesa adherida a la escayola de filamento 3D entonces no será viable y por el contrario si la capa restante es fina, es decir, como similar a una capa de pintura entonces sería parecido a la cera y por tanto válido. Como la capa que se ha encontrado es fina se ve que el PLA es válido para esta técnica y por tanto se creara otro molde para esta vez sí, rellenarlo de metal.

Por motivos logísticos relacionados con el COVID-19 no se ha podido replicar este apartado para el HIPS y la resina lo que si se ha podido hacer es una prueba de temperatura con todos los materiales. Es importante que los filamentos o resina sea de colores que contrasten con el blanco de la escayola para hacer el molde previo ya que, si el color es muy similar, no se apreciará realmente el espesor de la capa y si deja residuos. Comentar también que, aunque al final de este apartado se explica que la resina no es apropiada para el vaciado del molde, por motivos de tiempos de secado el molde se realizó igualmente y por ello se verá en posteriores imágenes.



Ilustración 94. Molde previo

Se hace una comprobación de cómo se comportan los diferentes materiales frente a diferentes temperaturas para saber si va a ser posible que el molde se vacíe.

Se pone en un crisol cerámico una pieza de PLA otra de HIPS y otra de resina para ir aumentando progresivamente la temperatura y ver cómo van reaccionando.



Ilustración 95. Piezas previas

Se empieza en 230°C y se va aumentando de 20°C en cada paso. En la siguiente tabla se registra de forma cualitativa los cambios que se han observado, además en el anexo 7 se adjuntan las imágenes más relevantes de este experimento. Las siglas NC indican que no se aprecia ningún cambio frente al paso anterior.

Temperatura	PLA	HIPS	Resina
250°C	Se empieza a volver viscoso	Se empieza a deformar	Ligero tono amarillo
270°C	Se vuelve ligeramente más viscoso	Se deforma más	Más amarillo
290°C	Se vuelve líquido	Se vuelve más viscoso	Tono anaranjado
310°C	Adquiere un tono marrón rojizo	Más fluido	Empieza a humear y a adquirir un tono ennegrecido
330°C	NC	Adquiere un tono marrón y se vuelve casi líquido	Se ennegrece más
350°C	Se vuelve totalmente marrón	El tono marrón se convierte casi en negro	La pieza es enteramente naranja oscuro y negro
370°C	NC	NC	Se convierte todo en negro
390°C	Se juntan en una masa casi líquida y negra		NC

Tabla 12. Pruebas previas

A los 430 °C se genera una combustión por la propia temperatura y se calcinan las tres muestras. Una vez se enfría se ve que en donde se puso la pieza de PLA no quedan restos, donde estaba la pieza de HIPS quedan unos restos y en el caso de la pieza en resina se ve que pese al fuego la pieza no se deshace, sino que se queda una estructura alámbrica lo cual la hace inservible para el presente trabajo.



Ilustración 96. Piezas previas calcinadas

6.3. Molde de goma vulcanizada

La intención de este apartado es explicar cómo se ha realizado el proceso para crear un molde de goma vulcanizada para reproducir en cera la pieza empleada en este trabajo. Habría otro camino para crear el árbol en cera y es con la técnica más tradicional, que es creando pieza por pieza a mano. Para esto, se necesita una gran destreza y contratar a un joyero para este proyecto no tendría sentido por lo que se elige la opción de realizar la técnica del molde de goma vulcanizada.

El primer paso es elegir la pieza a replicar. En un primer momento se pensó que la pieza impresa en HIPS sería una buena candidata para realizar el molde ya que tiene una temperatura de impresión bastante alta, pero al realizarlo salió mal debido, probablemente, a que la pieza a replicar no era maciza, sino que tenía un relleno del 30% y al calentar el molde para unir todas las capas del mismo ese aire atrapado generó problemas haciendo inservible el molde para el presente trabajo ya que no tenía sentido replicar en cera una pieza defectuosa. En el anexo 8 se muestra fotográficamente el proceso.

Posteriormente se repitió el proceso con la pieza impresa en resina y es el procedimiento que se va a explicar más detalladamente.

El primer paso es cortar las láminas de goma para conformar el molde. Se emplean 6 láminas de goma de unos 57x87mm. En un molde metálico se coloca la tapa inferior de metal, las capas intermedias de goma y la tapa superior de metal de la forma que a continuación se detalla. Se ponen dos láminas abajo, dos láminas arriba y para las dos láminas centrales se recorta la forma de la pieza a replicar. Se coloca entre las dos láminas centrales que han sido recortadas una pieza metálica para generar al realizarse el molde el bebedero por el que entrará la cera y la propia pieza de resina a replicar.



Ilustración 97. Creación molde de goma vulcanizada

Una vez hecha la composición se coloca el molde metálico con el interior de goma en una vulcanizadora que es una máquina que aplica presión vertical y calor tanto arriba como abajo del molde metálico. Esto hace que la goma se vuelva viscosa y replique a la perfección los detalles de la pieza. Es importante que la pieza a replicar este limpia ya que se va a replicar los detalles de la pieza tal y como esté. El fabricante indica que para que esta goma pueda generar el molde correctamente debe ponerse a 153°C durante 7 minutos por cada capa, en este caso al haber colocado 6 capas se ha de poner 42 minutos a 153°C. Cada 5 minutos aproximadamente, conviene girar el volante un cuarto de vuelta para aplicar un poco más de presión ya que la goma al calentarse se adapta mejor al molde y baja su altura por lo que para que haya contacto en todo momento es necesario reducir la altura inicial.



Ilustración 98. Vulcanizadora

Una vez se realiza este proceso se saca el molde con la protección térmica adecuada de la máquina y del molde de metal. Se deja enfriar hasta que se pueda manipular manualmente sin problemas y con la ayuda de un cúter o un bisturí se corta la mitad del perímetro en el plano medio del molde hasta que se pueda extraer el bebedero metálico y la pieza que ha servido como modelo a replicar.



Ilustración 99. Molde de goma vulcanizada con pieza

Hecho esto y si es necesario se puede mejorar el molde eliminando las pequeñas rebabas que hayan podido quedar tanto exteriores como interiores.

Con esto ya se puede inyectar la cera, para ello se utiliza una máquina que tiene un tanque de cera sólida y al encenderla la calienta a la temperatura seleccionada, además de administrar presión para que la cera se inyecte con mayor facilidad. Estos parámetros dependen del tipo de figura que se necesite rellenar ya que la cera a mayor temperatura más fluida estará y a mayor presión más fácilmente se inyectará. A la hora de inyectar conviene ayudarse de unas cachas metálicas para poder ejercer presión en el molde y que no se abra por la presión de la cera. En este caso después de ir variando los parámetros se establece que los parámetros óptimos son 0.24 Mpa y 96°C.



Ilustración 100. Inyección cera

Una vez se consigue fijar los parámetros óptimos se inyecta la pieza y se deja enfriar unos tres minutos y se extrae la pieza con cuidado. Se repite este proceso tantas veces como piezas se deseen poner en el árbol de cera que posteriormente generará el árbol metálico con las piezas definitivas.

Los fallos que surgen de hacer este paso se pueden resumir en dos: falta de llenado y rebabas.



Ilustración 101. Rebabas

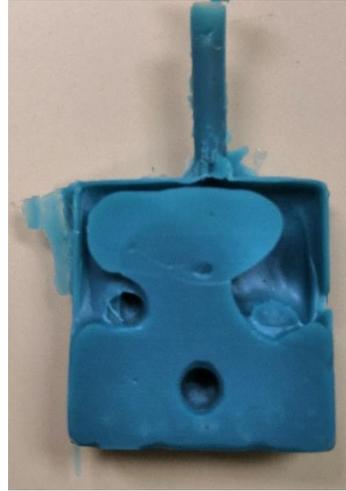


Ilustración 102. Falta de llenado

Una vez se tienen las piezas en cera, con ayuda de un cúter o un bisturí se reparan posibles defectos resultantes del proceso de inyección de la cera. Hecho esto se procede a hacer el árbol en cera, este es un trabajo muy manual y artesanal por lo que la destreza es muy importante. En mi caso, al no tener la experiencia y habilidad de un artesano profesional los resultados tendrán una calidad inferior a la de un joyero.

Para crear el árbol se emplea un rollo de cera de 5 mm de diámetro tanto para el tronco central como para las ramas. Se decide realizar dos árboles de dos ramas para dos piezas ya que no se tiene la habilidad para hacer un árbol de 6 piezas como los que se han hecho para el PLA.



Ilustración 103. Rollo de cera

El proceso ha sido soldar con un soldador el hilo de 5mm a la base de goma con un cono de cera. La cera se enfría muy rápido por lo que prácticamente no hay que esperar entre operación y operación. El siguiente paso en la operación es unir una pequeña rama al cuerpo principal y posteriormente las piezas que se han inyectado en cera. El resultado es el siguiente:

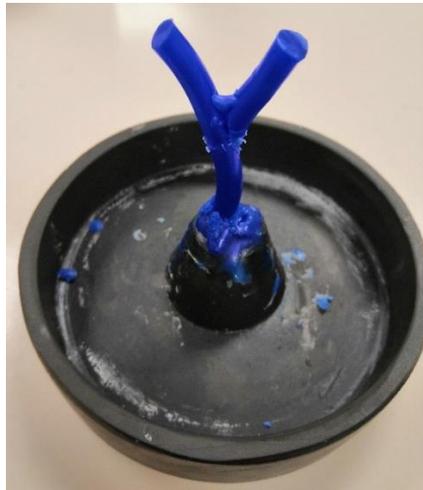


Ilustración 104. Tronco cera

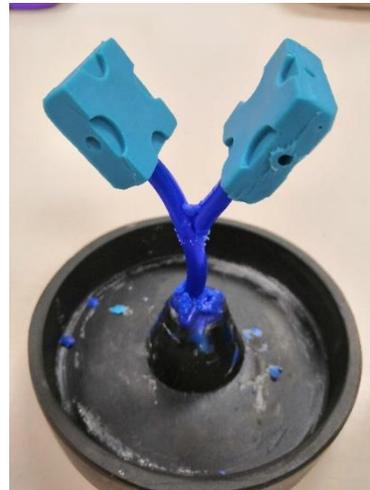


Ilustración 105. Árbol cera

Una vez se tiene el árbol hecho completamente en cera se procede a hacer la mezcla de revestimiento cerámico con agua para poder hacer el molde de escayola que se explica con más detalle más adelante.



Ilustración 106. Llenado molde cera



Ilustración 107. Molde de cera llenos

Una vez hechos los moldes se dejan secar unas 48 horas a temperatura ambiente para que la escayola fragüe.

Para vaciar la cera no se mete en un horno, sino que se mete en un recipiente similar a una olla de cocina conocida como licuadora de cera, el funcionamiento es el siguiente: En primer lugar, se abre la tapa superior y se llena con agua hasta una altura de aproximadamente 6 cm, después, en una especie de parrilla con un canal en medio se colocan los moldes a una altura superior al agua. Hecho esto se enciende un fogón en la parte inferior para poner a hervir el agua para hacer que la cera pase de sólida a líquida y se vacíe el molde dejando el negativo de la pieza y los canales que se rellenarán con metal. Esta cera en estado líquido cae al canal y de este pasa a un depósito en el exterior en el que una vez se enfría puede retirar con facilidad para reutilizarse. Este proceso suele durar en torno a una hora.



Ilustración 108. Licuadora cera



Ilustración 109. Interior licuadora de cera

Al sacar el molde vaciado tiene una gran cantidad de humedad por lo que, si se inyectara el metal, lo más probable es que por el choque térmico y por el repentino evaporamiento del agua el molde se quebrase, por lo que antes de inyectar el metal hay que meterlo en un horno de secado durante unas 12 horas aproximadamente. Se realizó una prueba en principio metiendo

el molde en el horno de secado solamente una hora pero, aunque los restos de humedad estaban prácticamente eliminados, aún quedaban algunos restos de cera que no se habían evaporado y por tanto el llenado no se completó.

Posteriormente ya se puede inyectar el metal, se le introduce zinc a 550°C y al romper el molde las piezas quedan de la siguiente forma:



Ilustración 110. Árbol metal molde cera

Una vez se limpia bien y se separa el tronco central de la pieza queda así:



Ilustración 111. Pieza metal molde cera

6.4. Moldes de escayola

En este apartado se muestra el proceso detallado que se ha seguido en la fabricación de los moldes de escayola a partir de los árboles fabricados en impresión 3D. El proceso a seguir es idéntico para las tres combinaciones impresora-material.

El primer paso es imprimir los tres árboles y quitarles los soportes como se ha visto anteriormente. Posteriormente, se empieza a crear el molde de escayola colocando la pieza en la base de goma y cubriéndola con el cilindro metálico.



Ilustración 112. Árbol colocado en molde

Una vez hecho el montaje, se prepara la mezcla de escayola y agua con la proporción que indica el fabricante en este caso 40 ml de agua por cada 100 gramos de polvo. Aproximadamente se emplean 273 ml de agua y 682 g de polvo de revestimiento cerámico para llenar un molde completo. El polvo de revestimiento empleado es de un tamaño de grano muy fino para poder reproducir muy fielmente los detalles de la pieza a reproducir. Para hacer la mezcla se pesa el agua y el polvo, posteriormente se echa el agua en el recipiente en el que se va a hacer la mezcla, preferiblemente un cuenco de goma y después se vierte el polvo poco a poco mientras se va removiendo la mezcla, es importante echar el polvo al agua y no al revés. Se ha de remover la mezcla durante unos 3 minutos hasta que se obtenga una mezcla homogénea y, en caso de que se disponga de una máquina apropiada para ello, se debe meter en una cámara de vacío durante 20 segundos antes de verter la mezcla en el cilindro metálico.



Ilustración 113. Preparado de revestimiento cerámico

A la hora de llenar el molde se aconseja inclinar ligeramente el molde mientras se sujeta el árbol de fundición para que se llene de abajo a arriba y no caiga mezcla de golpe en alguna de las piezas pudiendo hacer que se rompa alguna de las ramas.

Es importante rellenar el molde al menos 3 centímetros por encima de la parte más alta de la pieza ya que si no se puede llegar a quebrar al rellenar con metal.

Posteriormente se deja secar unos 20 minutos y se escribe la inicial del material que contiene para poder identificarlo, R para resina, P para el PLA y H para el HIPS con mayor facilidad y se deja secar durante al menos 24 horas.



Ilustración 114. Moldes llenos

Aunque en la foto se ve el molde de resina, finalmente no se ha empleado para ningún ensayo ya que como se ha visto en el experimento de la temperatura de degradación de cada material se queda una estructura alámbrica que no iba dejar un molde vacío listo para poder ser rellenado de metal.

Después, para vaciar el contenido del molde se mete en el horno mufla, colocando un cuenco cerámico con tres trozos de material cerámico en la parte inferior y el molde de escayola en la parte superior. Se calienta progresivamente hasta que se ve que se evapora el agua para que no haya un choque térmico muy fuerte y se pueda quebrar el molde por la evaporación del agua.



Ilustración 115. Molde en el horno

Posteriormente se aumenta la temperatura poco a poco hasta los 330°C en el caso del PLA tardando entre el tiempo para que evacúe el agua, el tiempo de incremento de temperatura y el tiempo a máxima temperatura 105 minutos. Se observa que la parte superior del molde de escayola al sacarlo del horno se ha tornado de un inusual color marrón que no se suele dar con la técnica tradicional de cera perdida. En cuanto al residuo que deja el PLA se observa que es una capa fina y parece que ha vaciado bien el molde ya que se puede ver fácilmente el sistema de canales. En las fotos siguientes se muestran lo anteriormente explicado.



Ilustración 116. Molde vaciado PLA



Ilustración 117. Molde vaciado PLA 2

Para el HIPS el proceso no es tan sencillo ya que se tiene que subir la temperatura hasta los 395°C no sin previamente mantenerse a una temperatura más baja para que el agua se evacue de una forma no destructiva y después de esperar más de una hora aún no se ha vaciado. El residuo que deja es bastante viscoso y en una primera instancia se piensa que no va a servir para esta técnica. Al igual que en el caso del molde de PLA al sacarlo del horno se observa que se ha tornado de un color marrón.



Ilustración 118. Molde HIPS vaciado



Ilustración 119. Molde HIPS vaciado 2

Se retira la acumulación de HIPS una vez está frío el molde y se decide volver a introducirlo en el horno para probar si dejándolo más tiempo a una temperatura un poco superior es capaz de vaciarse del todo. Se introduce en el horno y se vuelve a subir la temperatura progresivamente

hasta los 405°C durante unas dos horas y tras abrir el horno se ve que parece que el molde ha vaciado por lo que se decide probar a inyectar el metal.



Ilustración 120. Molde HIPS vaciado 3

En cuanto al molde de resina se decide romperlo y que sirva , al menos, para ver si estaba bien seca la mezcla de el revestimiento cerámico y agua ya que, como se observó anteriormente la resina empleada no es válida para esta técnica por el tipo de residuos de tipo alámbrico que deja.

Una vez se tienen los correspondientes moldes vaciados se empieza el procedimiento para poder inyectar el metal fundido. No es tan simple como fundir metal y echarlo ya que si se hiciera esto lo más probable es que el molde se agrietara y se rompiera debido al choque térmico producido entre el metal a unos 550°C y el molde a temperatura ambiente. Por ello, hay que atemperar todos los elementos necesarios para reducir el choque térmico. A continuación, se procede a explicar el proceso. Además, en el anexo 9 se muestra fotográficamente el proceso completo.

El primer paso es meter el molde de escayola en un horno de secado a unos 300°C durante unas 12 horas para eliminar cualquier resto de agua que haya en el molde y además atemperarlo.

Además, se mete el crisol cerámico que encaja en la centrifugadora donde se echa el metal en un horno que al igual que en el caso anterior sirve para atemperar a unos 300°C y se deja ahí hasta que alcanza esa temperatura.

Obviamente hay que meter en otro horno el metal para que se funda, en este caso el zinc, por lo que se ha de calentar el crisol con granza de zinc hasta unos 550°C para no se enfríe hasta solidificar en el proceso de transporte y vertido hasta el molde.

Antes del vertido del metal se ha de remover el crisol ya que en la parte superior se queda la escoria y se ha de mezclar para que quede una mezcla homogénea.

Una vez están todos los elementos a la temperatura correcta se procede al llenado con el zinc. Este proceso se ha de realizar de la forma más rápida posible, siempre teniendo en cuenta las medidas de seguridad, para que los elementos pierdan la menor temperatura posible.

En el proceso se ha de perder la menor cantidad de grados posible por lo que se colocan los hornos lo más cerca posible de la centrifugadora, que es en donde se va a desarrollar el llenado.

En primer lugar, hay que equiparse con unos guantes de seguridad frente a altas temperaturas por motivos de seguridad, en segundo lugar, hay que abrir la tapa de la centrifugadora y comprobar que todo está conectado a la red eléctrica, en tercer lugar, hay que tener cerca unas pinzas para poder agarrar los elementos a alta temperatura.

Una vez se tiene hecho esto, se abre el horno de secado del crisol cerámico, se saca y se coloca en la centrifugadora, después, se abre el horno de secado del molde de escayola y se agarra para colocarlo en la centrifugadora y se ajusta dependiendo de su tamaño. En este momento ya está todo colocado y solo falta hacer el vertido de metal, para esto, se abre el horno con el crisol lleno de zinc y con ayuda de las pinzas se agarra y con cuidado se vierte en el crisol que ya se había colocado en la centrifugadora. Lo último que queda por hacer es bajar la tapa de la centrifugadora y pulsar el botón para que empiece a girar. Pasados unos 15 segundos se pulsa el botón de parada, se desconecta la máquina, se abre la tapa y se saca el molde. Se deja enfriar y se repite el proceso para los demás moldes.

Una vez el molde está a temperatura ambiente se coloca en un balde para no ensuciar demasiado y con la ayuda de un mazo, se golpea para ir poco a poco rompiendo la escayola y que solo quede el árbol metálico.

Estos son los resultados obtenidos con el molde de HIPS y de PLA:



Ilustración 121. Molde PLA en zinc



Ilustración 122. Molde HIPS zinc

Como se puede observar el molde de PLA ha generado el resultado esperado, es decir, un árbol con sus ramas con las piezas. En el caso del molde de HIPS ha ocurrido una fuga de material a la altura del inicio de las ramas superiores, esto ha generado una especie de torta de unos 5mm de espesor de zinc en la que se integran las piezas superiores. Se limpian las piezas de los restos de revestimiento para evaluar el estado real de la fundición, tras limpiarlos queda así:



Ilustración 123. Molde PLA zinc limpio



Ilustración 124. Molde HIPS en zinc limpio

Una vez limpio se ve que el árbol de PLA está correcto y en el caso de HIPS las piezas están unidas de una forma muy difícil de separar de la torta de metal. Por último, ya solo falta separar las piezas del árbol central, esto se puede hacer con una sierra de metal de forma sencilla para el caso de PLA y para el caso del HIPS por la acumulación de metal se necesita una sierra eléctrica.



Ilustración 125. Piezas PLA en zinc



Ilustración 126. Piezas HIPS en zinc

7. ESTUDIO ECONÓMICO

En este apartado se va a calcular tanto los costes de ejecución del propio proyecto como los costes por pieza.

7.1. Coste de ejecución

En la inversión total se distinguen dos categorías, por un lado, los costes que conlleva la utilización de la maquinaria de laboratorio y los posibles consumibles, así como el mantenimiento de estas. Por otro lado, están los costes de personal, es decir, la mano de obra que ha sido necesaria para poder realizar el presente proyecto.

7.1.1. Costes derivados del uso de las instalaciones

Para la realización de este experimento obviamente no se han comprado los hornos y demás equipamiento, sino que son máquinas que ya estaban en los laboratorios de la UPV. Estas máquinas se emplean en diversos proyectos y prácticas de laboratorio. Por ello, no se va a cargar la totalidad del coste de la compra de los mismos, sino que se va a cargar la parte correspondiente a la amortización de los mismos. Para calcular la amortización se va a emplear la siguiente fórmula:

$$A=(C*h)/(H*V)$$

Siendo: A la amortización

C el coste de compra de la máquina.

H las horas de uso anuales

H las horas de uso de la máquina durante el proyecto

V la vida útil de la máquina

En las siguientes tablas se muestra el proceso para calcular la amortización de cada una de las máquinas empleadas en el experimento.

En el apartado de varios se incluyen las herramientas de menor coste y uso pero que igualmente son necesarias para la realización del experimento como mazas, pinzas para sacar el molde del horno, balanza de precisión, crisoles... Además, también se incluye en este apartado los consumibles necesarios para el mantenimiento y la reparación de las diferentes máquinas.

Instalación experimental			
Objeto	Cantidad	Coste unitario (€)	Subtotal (€)
Horno	1	2.354,32 €	2.354,32 €
Campana extractora	1	1.253,66 €	1.253,66 €
Cilindro metálico	4	36,00 €	144,00 €
Base de goma	4	7,20 €	28,80 €
Termopar	1	182,67 €	182,67 €
Impresora Prusa i3 Hephestos	1	250,00 €	250,00 €
Impresora Zortrax M200	1	2.200,00 €	2.200,00 €
Impresora Form 3	1	3.299,00 €	3.299,00 €
Licuada de cera	1	615,00 €	615,00 €
Inyectora de cera	1	499,00 €	499,00 €
Vulcanizadora	1	899,00 €	899,00 €
Soldador	1	159,00 €	159,00 €
Centrifugadora	1	2.925,00 €	2.925,00 €
Rugosímetro	1	2.175,00 €	2.175,00 €
Pulidora	1	4.134,00 €	4.134,00 €
Microscopio	1	936,00 €	936,00 €
Varios	1	500,00 €	500,00 €

Tabla 13. Instalación experimental

Instalación experimental				
Máquina	Horas anuales	Horas empleadas	Vida útil (años)	Amortización (€)
Horno	900	12	15	2,09 €
Campana extractora	450	6	10	1,67 €
Cilindro metálico	460	52	10	1,63 €
Base de goma	360	40	4	0,80 €
Termopar	400	6	5	0,55 €
Impresora Prusa i3 Hephestos	400	8	5	1,00 €
Impresora Zortrax M200	950	19	5	8,80 €
Impresora Form 3	650	11	5	11,17 €
Licuada de cera	600	5	15	0,34 €
Inyecotra de cera	300	3	15	0,33 €
Vulcanizadora	100	2	15	1,20 €
Soldador	100	1	8	0,20 €
Centrifugadora	20	0,1	10	1,46 €
Rugosímetro	40	0,5	10	2,72 €
Pulidora	250	2	15	2,20 €
Microscopio	340	3	15	0,55 €
Varios	500	5	5	1,00 €
Coste total				37,71 €

Tabla 14. Instalación experimental 2

7.1.2. Costes derivados de consumibles

Hay objetos que se consumen durante el experimento y evidentemente hay que contabilizarlos, el caso que mejor se entiende es el del filamento que se consume en las impresoras 3D.

En la siguiente tabla se muestra el coste total asociado a los consumibles.

Consumibles			
Elemento	Cantidad	Coste unitario(€)	Subtotal (€)
Lija	3	1,20 €	3,60 €
Goma	0,281	23,00 €	6,46 €
Pasta alúmina	0,15	7,00 €	1,05 €
Papel de aluminio	0,15	2,20 €	0,33 €
Bobina de PLA	0,053	17,90 €	0,95 €
Bobina de HIPS	0,084	67,00 €	5,63 €
Resina	0,078	163,35 €	12,68 €
Zinc	0,792	2,21 €	1,75 €
Cera	0,132	5,92 €	0,78 €
Revest ceramico	3,981	1,94 €	7,73 €
Coste total			40,96 €

Tabla 15. Consumibles

7.1.3. Costes derivados de la mano de obra

En este trabajo ha habido mano de obra de tres personas. Miguel Ángel Pérez como tutor, yo mismo como proyectado y después la gente que se encarga del mantenimiento y la supervisión de los equipos.

Para poder calcular los salarios se tiene en cuenta que el año tiene 52 semanas y cada trabajador disfruta de unas 6 semanas de vacaciones anuales. También se tiene en cuenta que el trabajador a jornada completa trabaja 40 horas a la semana.

Para cada uno de los puestos descritos anteriormente se desglosa el cálculo salarial en las siguientes tablas.

Tutor	
Horas anuales	1840,0
Salario neto	22.838,5 €
Seguridad social	28.3%
Salario bruto	29.301,8 €
€/h	15,92

Tabla 16. Tutor

Técnico de laboratorio	
Horas anuales	1840,0
Salario neto	18.631,4 €
Seguridad social	28.3%
Salario bruto	23.904,1 €
€/h	12,99

Tabla 17. Técnico de laboratorio

Proyectado	
Horas anuales	1840,0
Salario neto	5.580,0 €
Seguridad social	0,0%
Salario bruto	5.580,0 €
€/h	3,03

Tabla 18. Proyectado

Una vez se tienen desglosados los diferentes salarios se procede a la suma de los costes de mano de obra de cada persona para obtener el coste de mano de obra total.

Mano de obra			
Operario	€/h	Cantidad	Subtotal
Tutor	15,92	42	668,85 €
Tecnico laboratorio	12,99	27	350,77 €
Proyectado	3,03	168	509,48 €
Coste total			1.529,09 €

Tabla 19. Mano de obra

7.1.4. Coste total proyecto

El coste total es la suma de los costes de mano de obra, de las instalaciones y de los consumibles. En la siguiente tabla se muestra el cómputo global.

Presupuesto total	
Concepto	Importe
Mano de obra	1.529,09 €
Instalación experimental	37,71 €
Consumibles	40,96 €
TOTAL	1.607,77 €

Tabla 20. Presupuesto total

El coste total del proyecto asciende **MIL SEISCIENTOS SIETE EUROS CON SETENTA Y SIETE CÉNTIMOS**.

7.2. Coste por impresora-consumible

En este apartado, se van a efectuar los cálculos de los costes de cada una de las combinaciones de impresora y filamento o resina para poder evaluarlas posteriormente. Principalmente se van a evaluar los costes económicos, pero también los costes en cuanto a tiempo de cada pieza. No se va a evaluar el coste total de generar una pieza metálica con cada uno de los materiales sino simplemente el coste desde que se tiene la idea hasta que se tiene una pieza terminada bien sea en cera o en impresión 3D. El resto del proceso de generación del molde, fundición del material desechable, el vertido de metal, la rotura del molde y el postprocesado del árbol en metal se hacen exactamente del mismo modo y tienen el mismo coste, por lo que para que el coste de la propia generación de la pieza no se pierda en el total del coste del proceso completo se hace de este modo. El coste de filamento se obtiene simplemente sabiendo cuanto pesa la pieza y sus soportes y sabiendo el precio de la bobina, resina o cera. En la amortización se tiene en cuenta la formula anterior. En el diseño se tiene en cuenta que la diseña un ingeniero y que tarda 1 hora en hacer el diseño en un programa de diseño en 3D. Para quitar soportes y rebabas que queden se tiene en cuenta que se tarda una hora de un operario de rango bajo. Para el curado se tiene en cuenta es pequeño coste del lavado de la pieza y de la amortización de la máquina de curado UV.

7.2.1. Coste Prusa i3 Hephestos

En este apartado se tiene en cuenta el coste de generar una pieza en la Prusa i3 Hephestos con filamento PLA de la marca bq.

Coste Prusa i3 Hephestos						
Impresora	Filamento	Amortización	Diseño	Quitar soportes	Curado	Total
Prusa i3 Hephestos	0,47 €	0,38 €	15,92 €	7,00 €	0,00 €	23,77 €

Tabla 21. Coste Prusa i3 Hephestos

7.2.2. Coste Zortrax M200

En este apartado se tiene en cuenta el coste de generar una pieza en la Zortrax M200 con filamento HIPS de la marca Zortrax.

Coste Zortrax M200						
Impresora	Filamento	Amortización	Diseño	Quitar soportes	Curado	Total
Zortrax M200	2,81 €	4,17 €	15,92 €	7,00 €	0,00 €	29,90 €

Tabla 22. Coste Zortrax M200

7.2.3. Coste Form 3

En la tabla que se muestra a continuación se muestra el desglose de generar una pieza en la impresora Form 3 con la resina Clear de Formlabs.

Coste Form 3						
Impresora	Resina	Amortización	Diseño	Quitar soportes	Curado	Total
Form 3	8,45 €	7,44 €	15,92 €	5,60 €	2,21 €	39,63 €

Tabla 23. Coste Form 3

7.2.4. Coste cera perdida

Para calcular el coste de la técnica tradicional de la cera perdida se ha de hacer de una forma un poco diferente a las anteriores ya que para este cálculo se tiene en cuenta que el árbol lo realiza un joyero con el sobrecoste que eso conlleva. Además, esta pieza no la podría realizar un joyero de manera sencilla por lo que se calculará con una pieza de similar aspecto, pero sin los túneles internos curvos.

Para el cálculo se ha tenido en cuenta que la pieza la diseña la misma persona que en el caso de las impresoras por lo que el coste de diseño es el mismo. También se tiene en cuenta el precio de la cera y la amortización de la maquinaria empleada por el joyero.

Se va a dividir el cálculo en dos supuestos, el primero es en el que el joyero de forma manual produce las 6 piezas en cera y crea el árbol y el segundo caso en el que exista una pieza física en metal y sea posible replicarlo mediante un molde de goma vulcanizada. Al primero de estos casos se le llamará coste tradicional y al segundo se le denominará molde de goma vulcanizada.

En la siguiente tabla se ve el coste generado por el diseño del árbol y por la propia generación del mismo.

Coste tradicional						
Técnica	Diseño			Generar árbol		
	Horas	Precio hora	Subtotal	Horas	Precio hora	Subtotal
Tradicional	1	15,92 €	15,92 €	2,50	17,36 €	43,40 €
Molde goma	1	15,92 €	15,92 €	1,00	17,36 €	17,36 €

Tabla 24. Coste tradicional

En las siguientes tablas se ve el coste total de un árbol con 6 piezas generado mediante el método tradicional y mediante el método de goma vulcanizada.

Coste tradicional				
Diseño	Cera	Amortización	Generar árbol	Total
15,92 €	5,46 €	1,95 €	43,40 €	66,73 €

Tabla 25. Coste tradicional 2

Coste molde goma vulcanizada				
Diseño	Cera	Amortización	Generar árbol	Total
15,92 €	0,56 €	2,35 €	17,36 €	36,19 €

Tabla 26. Coste molde goma vulcanizada

Se puede observar que en el caso de que el árbol se genere mediante la utilización de un molde de goma vulcanizada el precio es mucho más bajo debido a que conlleva mucho menos tiempo para el joyero, pero por el contrario se ha de disponer de una pieza física ya existente para poder replicarla.

7.2.5. Coste total técnicas

El coste total de las técnicas es el coste de generar el árbol de piezas con lo que ello conlleva más la fabricación del molde, el vaciado y el proceso de llenado.

El coste de obtener las piezas en metal a partir de un árbol de piezas de filamento o cera es el siguiente.

Coste molde				
Escayola	Mano de obra	Metal	Amortización	Subtotal
1,55 €	15,92 €	0,35 €	1,30 €	19,12 €

Tabla 27. Coste molde

En la siguiente tabla se muestra el coste total de cada técnica.

Técnica	Coste propio	Coste molde	Coste total
Prusa i3	23,77 €	19,12 €	42,89 €
Zortrax M200	29,90 €		49,02 €
Molde goma	36,19 €		55,31 €
Form 3	39,63 €		58,75 €
Tradicional	66,73 €		85,85 €

Tabla 28. Coste técnicas

8. COMPARATIVA DE LAS TÉCNICAS

En este apartado como el propio nombre del apartado indica, se va a proceder a comparar las combinaciones de la Prusa i3 Hephestos con el PLA, la Zortrax M200 con el HIPS y la técnica de fundición a la cera perdida con molde de goma vulcanizada. La combinación de la Form3 con la resina no se va a tener en cuenta ya que no se pudo vaciar el molde y por lo tanto el proceso no sirvió.

Se va a realizar una comparativa visual cualitativa, otra con un microscopio también de forma cualitativa y una con un rugosímetro de forma cuantitativa para poder comparar de tres formas diferentes.

8.1. Comparativa visual

La comparativa visual es la más simple ya que no se necesita ningún instrumento para realizarlo. En las siguientes fotos se ve la calidad superficial de las piezas.



Ilustración 127. Calidad PLA



Ilustración 128. Calidad HIPS



Ilustración 129. Calidad cera

A simple vista se ve que en cuanto a los filamentos de impresión 3D se observa que en el caso de la pieza que se hizo con PLA tiene una peor calidad superficial que en la pieza que se hizo con HIPS por lo que la calidad de la impresora sí parece un factor a tener en cuenta a la hora de llevar este proceso al ámbito industrial.

Al comparar estos con la pieza que se ha hecho con el molde de cera se observa que la calidad superficial de esta es diferente ya que no tiene las líneas de impresión. Esto no tiene por qué ser un defecto, sino que simplemente es un acabado diferente.

8.2. Comparativa con rugosímetro

En este apartado se mide la rugosidad superficial de las piezas. Como esta medición no se puede efectuar de forma cualitativa se emplea un rugosímetro para poder cuantificar la rugosidad. El modelo empleado es el MapSurf PS 10.

Las piezas que se han efectuado con filamento 3D presentan una gran diferencia en cuanto a su rugosidad superficial en la dirección paralela al bebedero y en la sección perpendicular a este. Por ello, se van a efectuar mediciones en ambas direcciones. El método empleado es realizar diferentes mediciones en varias de las piezas para así poder obtener un valor de referencia para poder comparar.

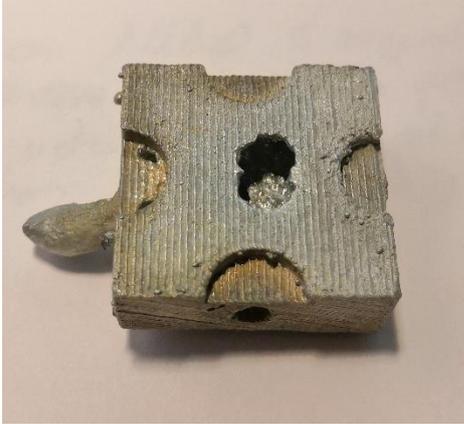


Ilustración 130. Medición perpendicular



Ilustración 131. Medición paralela

El rugosímetro es capaz de obtener una gran cantidad de parámetros, pero en este caso se le va a dar especial relevancia a dos de ellos: Ra y Rz.

El parámetro Ra se puede definir como la media aritmética de los valores absolutos de las coordenadas de los puntos del perfil de rugosidad dentro de la longitud medida, es decir, es la rugosidad media aritmética.

El parámetro Rz se puede definir según la norma DIN 4768 como la media aritmética de los valores de rugosidad parcial Zi correspondientes a cada uno de los cinco módulos integrantes de la longitud de medición. Los valores de Zi son iguales a la suma de las ordenadas, en valor absoluto, de los puntos más alejados de la línea media dentro de cada módulo.

En la siguiente tabla se muestran los valores de Ra y Rz de cada técnica en las diferentes direcciones.

Técnica	Dirección respecto al bebedero	Ra (μm)	Rz (μm)
PLA	Paralelo	33,37	139,592
PLA	Perpendicular	5,379	26,434
HIPS	Paralelo	19,81	87,693
HIPS	Perpendicular	1,998	12,099
CERA	Paralelo	3,226	17,033
CERA	Perpendicular	3,123	17,432

Tabla 29. Rugosidad de las técnicas

En el anexo 10 se muestran las fotografías del rugosímetro que muestran además de los valores de Ra y Rz los gráficos del perfil de cada una de las probetas. Hay que tener en cuenta que

cuando se está en posición perpendicular al bebedero habrá un gran pico en la rugosidad si se pasa por una línea de impresión por lo que la medición se debe hacer paralela a las líneas.

Al comparar las diferentes técnicas se observa que hay una diferencia sustancial entre las piezas hechas con filamento de impresión 3D y las piezas hechas con molde de cera y es que las primeras son muy diferentes en la dirección del bebedero y en la perpendicular mientras que en las de cera la rugosidad es similar en ambas direcciones.

En cuanto a los valores de rugosidad se da un caso curioso y es que, aunque los valores en el plano perpendicular al bebedero son bastante similares en las tres técnicas, siendo la pieza hecha con HIPS de mejor calidad que la hecha con cera y esta a su vez mejor que la hecha con PLA todo cambia en el sentido paralelo al bebedero ya que en este caso la cera tiene una mejor calidad superficial seguida por la pieza en HIPS y después la del PLA.

En esta ocasión también se ve el potencial de las impresoras 3D para este campo de aplicación ya que con los materiales y la máquina adecuados son capaces no solo de igualar sino de mejorar las técnicas tradicionales.

8.3. Comparativa con microscopio

En este apartado se muestra cómo se han observado las piezas de cerca con la ayuda de un microscopio. La parte que se ha mirado es el perfil provocado por el corte de la pieza por la mitad en la dirección paralela al bebedero.

El primer paso es coger las piezas que se han usado para las mediciones de la rugosidad superficial y cortarlas por la mitad.



Ilustración 132. Pieza cortada

Se ve que esta pieza en concreto no ha llenado del todo, pero sirve igual para hacer las comprobaciones de rugosidad superficial.

Una vez hecho esto se crea una probeta circular embutiendo la pieza cortada en polvo de metacrilato y poniéndola a 180°C durante 7 minutos en una embutidora.

Las probetas están demasiado bastas como para poder observarse bien al microscopio. Lo que se hace para poder observarlas correctamente es dejar la superficie lo más plana posible, para ello, se desbasta en una desbastadora-pulidora en varias fases, para todas las probetas igual.

Antes de desbastar se ha de hacer una línea recta en la probeta ya que a la hora de desbastar se ha de hacer en una dirección determinada. En este caso, se hace la línea en la dirección horizontal, es decir, paralela a la cara superior e inferior de la pieza.



Ilustración 133. Probeta en pulidora

Teniendo en cuenta que la lija gira de manera circular en sentido antihorario se coloca la probeta de manera que la línea que se ha hecho quede horizontal.

La primera fase consiste en una lija de grano 220 por lo que se coloca esta en la máquina, se abre el grifo que suministra una pequeña cantidad de agua, se enciende la máquina y se coloca la pieza como anteriormente se ha explicado. La pieza se puede mover radialmente pero no girar. Es importante no ejercer demasiada presión en esta máquina ya que de lo contrario la pieza se desgastará en exceso y, ya que es difícil que la presión sea completamente uniforme, se crearán biseles.

Esta fase finaliza cuando en el microscopio se observa que han desaparecido las rayas iniciales y solo se ven las rayas generadas por la lija empleada. En este caso este proceso ha tardado unos 5 minutos por fase y pieza.

Es importante que antes de examinar la pieza en el microscopio se enjuague con agua y jabón y se seque con papel para eliminar posibles restos.

Una vez hecho esto se cambia la lija a una de grano 500 y se gira la pieza 90° con respecto a la fase anterior, quedando la línea que se había dibujado vertical. Se repiten los pasos anteriores y cuando se ve en el microscopio que las líneas anteriores han desaparecido y solo quedan las de la dirección actual se gira otros 90° y se vuelve a repetir el proceso con la lija de grano 1000 y posteriormente se gira y se repite con una lija de grano 4000.

Hecho esto, la pieza esta casi lista, solo falta pulirla a brillo espejo. Para ello, se pule la pieza de una forma similar a los desbastes anteriores, pero con algunas salvedades. En vez de una lija de grano se utiliza una lija de paño y se ha de colocar una pequeña cantidad de pasta de alúmina, este proceso es un poco más lento que los anteriores ya que se emplean unos 12 minutos por pieza. Cabe destacar que en este proceso no se ha de mantener la pieza fija como en el caso

anterior, sino que se ha de girar la pieza de manera horaria haciendo así que no queden líneas en una dirección, sino que las rayas sean prácticamente inexistentes.

Al terminar de pulir las piezas, se lavan con agua y jabón como en los casos anteriores, pero no se secan con papel, sino que se sumergen en alcohol unos segundos y se seca con ayuda de un secador de aire caliente para evitar que la muestra tenga residuos de agua y poder rayarla con el papel.

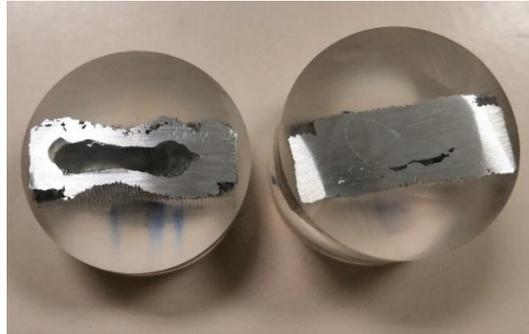


Ilustración 134. Probetas pulidas

Hecho esto con todas las probetas, se observan de cerca con un microscopio con cámara incorporada que permite tomar fotos a 50 aumentos con lo que se pueden ver las crestas y los valles de la superficie de la pieza de una forma mejor para poder comparar.

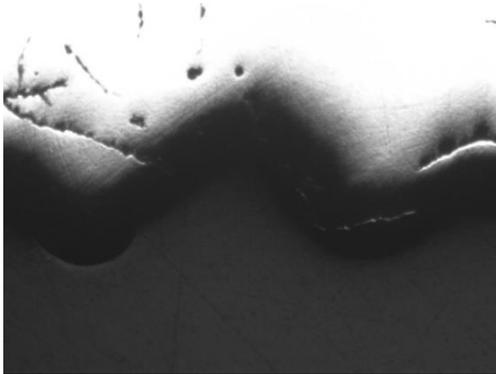


Ilustración 135. Crestas PLA



Ilustración 136. Crestas HIPS

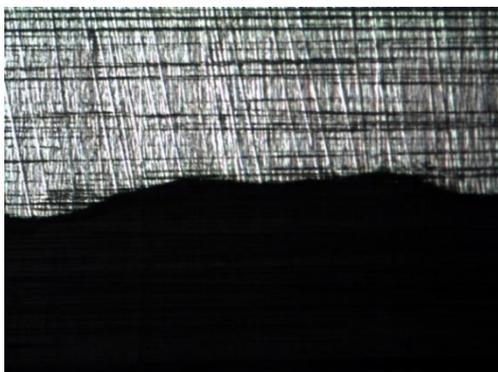


Ilustración 137. Crestas cera

A la hora de comparar estas tres imágenes lo primero que salta a la vista es que la probeta de la pieza hecha con cera no se ha pulido con la lija de paño y la pasta de alúmina, sino que tan solo se ha llegado a pulir con la lija de grado 4000 y por eso se ven unas líneas tan marcadas.

Si se habla de las crestas se ve que en el caso del PLA las crestas sí que son bastante marcadas y además en la imagen solo se ven dos picos mientras que en el caso del HIPS se ven tres picos en esa misma distancia. En el caso de la pieza de cera se ve que el perfil es más plano en el sentido de que no tiene patrones de crestas y valles periódicos, sino que tiene irregularidades aleatorias.

9. CONCLUSIONES

En este apartado se van a comentar, después de haber hecho todos los ensayos que se han creído pertinentes las conclusiones que se han obtenido.

El uso de impresoras 3D es muy útil si lo que se desea realizar es una idea original, es decir, no existe un elemento físico ya creado que poder replicar. Este es el caso de los prototipos sean o no de geometría compleja, aunque si es cierto que en el caso de que sí sea compleja su forma este potencial aumenta bastante ya que un molde de goma vulcanizada para generar piezas en cera tiene muchas limitaciones si se compara con una impresora 3D, especialmente en el caso de huecos internos o túneles ya sea en el ámbito industrial o de la joyería.

En cuanto a los parámetros empleados para la realización de las piezas en impresión 3D se puede concluir que el porcentaje de relleno óptimo es aquel que siendo el menor posible permita poder eliminar los soportes sin que se rompan las ramas del árbol. En este caso con un 30% se ha roto solo una rama por lo que estará cerca de ser el óptimo. El objetivo de que el porcentaje de relleno sea el menor posible es que el vaciado sea más sencillo ya que a más porcentaje de relleno mayor cantidad de tiempo se empleará tanto para crear la pieza como para el posterior vaciado en el horno una vez se ha creado el molde. Otro parámetro importante es la altura de capa ya que si se imprimieran las piezas de forma en que la horizontal de estas coincidiera con la horizontal de la impresora no habría problema ya que la altura de capa solo afectaría a las paredes laterales, pero, en el caso de los árboles de fundición, no se puede hacer de este modo porque se necesita que las piezas estén inclinadas hacia el tronco del árbol para poder vaciarse. Por esto, la altura de capa influye directamente en las capas superior e inferior. Cuanto menor sea la altura de capa, cosa que influye directamente en el precio de la impresora 3D, mejor acabado superficial y menor rugosidad queda en la pieza de metal.

Al comparar los acabados se observa que, si se emplea una impresora 3D de gama media con un filamento como HIPS, quizá una combinación con otro filamento como PLA, ABS e incluso algún tipo de resina sin polimerizar se puede conseguir unas características similares a las de las piezas hechas con el molde de goma vulcanizada e incluso mejores en algunos casos. Eso sí, el acabado que deja la impresión 3D será diferente al habitual ya que dejará su característico patrón de rayas cosa que no es mejor ni peor sino diferente. También hay que tener en cuenta que, mientras los acabados en las piezas de cera suelen ser similares en todas las ramas del árbol, en los de impresión 3D las piezas superiores salen con una mejor calidad debido a que hay que generar soportes de las piezas inferiores a las superiores por la propia forma de crear piezas de la impresión 3D. Una manera de solucionar este problema e igualar la calidad de las piezas sería crear el árbol con un material y los soportes con otro material que fuera soluble para poder de esta forma eliminarlos sin que deje rastro en las piezas finales. También hay que comentar que mientras que en las piezas de impresión 3D a la hora de generar las piezas, si se hace con soportes solubles, la calidad será la misma, en los moldes de cera vulcanizada siempre aparece algún defecto en las piezas que se extraen como poros, falta de llenado o rebabas que posteriormente se trasladan a la pieza final.

Otra observación que se puede realizar es que estas técnicas no tienen por qué estar reñidas ya que se pueden combinar como se ha hecho en el presente trabajo con la pieza de resina que ha servido de modelo para generar el molde de cera vulcanizada. Hay que tener en cuenta que para realizar esta pieza para que sirva de copia hay que tener en cuenta que ha de ser una pieza con

la mejor calidad posible y con un relleno del 100%, es decir, maciza. Esto es para que el aire del interior al calentarse e intentar expandirse no deforme el modelo y cree burbujas que hagan inservible el molde de goma.

Como ya se comenta en apartados anteriores la calidad superficial también depende del metal empleado, con un metal más noble como el oro o la plata los acabados superficiales son mejores y más uniformes.

En cuanto a precios se ve claramente que la técnica tradicional de que un joyero haga las piezas y monte el árbol para crear el molde cuesta el doble aproximadamente que con la impresora de gama media y gama baja. Si se compara la técnica de molde de goma vulcanizada con las técnicas de impresión 3D se observa que hay una diferencia significativa de precio a favor de la impresión 3D. Además, para crear desde cero un taller donde poder replicar estas técnicas para las de impresión 3D hace falta una inversión mucho menor que para uno con la técnica del molde de goma vulcanizada.

Teniendo en cuenta todo lo comentado anteriormente se puede afirmar sin ningún tipo de dudas que la impresión 3D es una muy buena alternativa a la técnica tradicional de un joyero, y una muy buena aliada de la técnica de molde de goma vulcanizada. No solo eso, sino que es una muy buena alternativa por si misma para la creación de prototipos o piezas de joyería por sí mismas mediante la técnica de fundición a la cera perdida. Adicionalmente, comentar que esta es una tecnología en auge por lo que en ellos años venideros es muy probable que esta mejore y su precio disminuya por lo que se ha de tener muy en cuenta para este tipo de técnicas y para muchas otras en el campo de la ingeniería y la industria.

10. PLIEGO DE CONDICIONES

En estos apartados se van a especificar las diferentes condiciones de índole legal y facultativa que se han de cumplir a lo largo del presente proyecto.

10.1. Recomendaciones generales.

Antes de afrontar cualquier tipo de trabajo en un laboratorio es imprescindible que se tengan en cuenta las siguientes recomendaciones generales [11]:

- Cerciorarse, antes cualquier uso, que las máquinas y equipos no tienen quitados los dispositivos de seguridad, enclavamiento, y emergencia bajo ningún concepto, salvo en operaciones de reparación y mantenimiento. Estas operaciones deberán realizarse con la máquina desconectada y nunca deben quitarse estos dispositivos de seguridad.
- Respetar las zonas señalizadas como de acción de las máquinas que disponen de partes móviles.
- No penetrar en el interior de las áreas de riesgo mientras la máquina esté funcionando o conectada.
- Atender a la señalización de seguridad, como pictogramas, que marca los riesgos potenciales de los lugares de trabajo.
- No comer o beber durante la realización de las tareas. Llevar el pelo corto o recogido y no llevar prendas que puedan causar atrapamientos por las partes móviles de las máquinas.
- Conocer y aplicar los procedimientos de trabajo de que se disponga en el laboratorio o taller.
- En ningún caso se deben adoptar actitudes peligrosas o temerarias a la hora de manipular los equipos, herramientas o máquinas.
- Verificar la existencia de iluminación suficiente en la zona de trabajo para poder desarrollar este minimizando los riesgos.
- Mantener limpio y ordenado el puesto de trabajo: máquinas, suelos y paredes libres de desechos, derrames, virutas o papeles.
- Ante cualquier tipo de anomalía, problema o emergencia, es prioritario avisar al responsable en materia de Salud y Seguridad del área de trabajo.

10.2. Seguridad en las máquinas del taller.

- Antes de la puesta en funcionamiento de las máquinas, se ha de comprobar el buen estado de las conexiones eléctricas, la eficacia de la toma de tierra y la del disyuntor diferencial para evitar riesgos de electrocución.
- En el uso de las máquinas de taller se observará el método y recomendaciones establecidas para cada operación.
- Los resguardos de las máquinas permanecerán siempre colocados en un lugar visible.
- Las máquinas de taller estarán siempre unidas a tierra para la seguridad del usuario. Esta toma de tierra se revisará cada 6 meses por una entidad autorizada.
- Nunca se pararán las máquinas empleando las manos o pies como freno.
- Se recomienda encarecidamente que el trabajo en máquinas no se realice con prendas sueltas, puños desabrochados, pelo largo suelto, corbata, anillos, relojes o pulseras.
- Se debe mantener la zona de trabajo limpia de obstáculos y de sustancias resbaladizas, tales como aceites, taladrinas, etc. [11]

10.3. Hornos y muflas.

Son equipos de trabajo destinados generalmente a la fundición de metales mediante la transformación de energía eléctrica en energía térmica. Las consideraciones generales de utilización y las precauciones que se han de tener en cuenta son las siguientes[11]:

- Los hornos deberán estar protegidos frente a los riesgos de contacto térmico y eléctrico por los usuarios.
- La puerta de los hornos deberá permanecer cerrada en todo momento, abriéndose únicamente y exclusivamente cuando sea necesario para sacar o introducir algún elemento, lo que se realizará utilizando las pinzas o útiles adecuados a tal fin y los equipos de protección individual necesarios.
- Cualquier horno en funcionamiento deberá llevar su marcado CE correspondiente. En caso de que su adquisición haya sido anterior a 1995 y carezca de dicho marcado, se procederá a su puesta en conformidad, según lo dispuesto en el Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio.
- Todo horno ha de disponer de su correspondiente manual de instrucciones y libro de mantenimiento y revisiones en el idioma del país en que vaya a ser empleado, en este caso el castellano, facilitado por el fabricante.

- Las operaciones tanto de limpieza como de mantenimiento de cualquier horno se llevarán a cabo en todo momento con el equipo previamente desconectado y a temperatura ambiente, nunca en caliente.
- En caso de que sea necesario, los usuarios de estos equipos deberán usar ropa de trabajo con resistencia al calor tanto por convección como por radiación, de acuerdo a la norma EN 531.
- Cuando estos equipos generen unas condiciones de discomfort térmico en el ambiente de trabajo, las precauciones que han tenerse en consideración se han de orientar hacia la reducción del riesgo de tensión térmica, lo que puede conseguirse actuando, sobre dos factores como son la agresividad térmica del ambiente y la actividad física del trabajador.

No existe una norma general de actuación, por lo que es preciso analizar cada situación concreta para conocer el riesgo de cada uno de los elementos citados y proceder en consecuencia.

10.3.1. Referencias legales.

Se enumeran las referencias legales que se han de seguir, clasificadas por orden cronológico.

- **Real Decreto 1435/1992**, de 27 de noviembre, de aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre máquinas.
- **Ley 31/1995**, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales.
- **Real Decreto 39/1997**, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención.
- **Real Decreto 486/1997**, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- **Real Decreto 1215/1997**, de 18 de julio, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo.

10.4. Impresoras 3D

En este apartado se enumerarían las disposiciones de seguridad según alguna Ley o Real Decreto pero, en este caso, al no existir una normativa específica para la impresión 3D, lo que se va a hacer es enumerar los diferentes riesgos a los que el usuario se expone, así como la solución que se debe tomar para eliminarlos o, al menos, reducirlos.

Los riesgos que se van a exponer son complementarios de los que se muestran anteriormente, ya que hay diversos riesgos generales que se debe cumplir en todo momento, como es el no

llevar el pelo largo y suelto, no comer o beber cerca de los aparatos, tener una iluminación adecuada, realizar una limpieza periódica, etc.

Además, hay riesgos, que ya se han mencionado anteriormente en el apartado de seguridad en las máquinas del taller, que se han de cumplir de igual manera ya que, aunque sea un tipo bastante excepcional de máquina, está conectada a la red eléctrica y, por tanto, debe tener sus correspondientes medidas de seguridad.

Dicho esto, se procede a la enumeración de los riesgos y sus diferentes soluciones.

- En caso de reparaciones o transporte de elementos pesados, como pueden ser partes de la impresora o la propia impresora, conviene que el usuario se ponga calzado de seguridad.
- En caso de manejar productos químicos, como el caso de la acetona, muy común para limpiar las bases de impresión, se han de extremar las precauciones y utilizar, al menos, gafas protectoras y guantes apropiados.
- Antes de usar cualquier producto químico el usuario se ha de leer la etiqueta del mismo.
- Si se utilizan productos químicos, ya sean de limpieza, o algún tipo de laca para mejorar la adhesión de la pieza, es importante disponer de una buena ventilación.
- Para retirar la pieza de la base de impresión y, posteriormente los soportes de la pieza en sí, se utilizan herramientas con filo por lo que es indispensable llevar guantes apropiados para la realización de estas tareas.
- Es altamente desaconsejable tocar las partes móviles de la impresora mientras esta está en funcionamiento, ya que puede ocasionar riesgo de atrapamiento. En caso de querer tocar alguna parte por cualquier motivo antes deberá desconectarse la impresora 3D.
- Se recuerda que la impresora 3D de filamento fundido lo que hace es fundir el plástico por lo que el extrusor está a una temperatura muy elevada, así como la base de impresión, por lo que, para mover, tocar, reparar, etc. estas partes se hará con la máquina desconectada y a temperatura ambiente.
- Para algunos filamentos en particular, será necesaria la utilización de una mascarilla apropiada, ya que, dependiendo de qué tipo de material se esté empleando, puede generar gases con partículas tóxicas, las más habituales son los estirenos.

10.5. Equipos de protección individual.

El Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual, define los Equipos de Protección Individual (EPI) como “cualquier equipo destinado a ser llevado o sujetado por el trabajador para que le proteja de uno o varios riesgos, que puedan amenazar su

seguridad o su salud en el trabajo, así como cualquier complemento o accesorio destinado a tal fin". Tal como se indica en la Ley de Prevención de Riesgos Laborales, "Los Equipos de Protección Individual deberán utilizarse cuando los riesgos no se puedan evitar o limitarse suficientemente por medios técnicos de protección colectiva o mediante medidas, métodos o procedimientos de organización del trabajo". Los trabajadores están obligados a utilizar y cuidar correctamente de los equipos de protección individual, a colocarlos después de su utilización en un lugar indicado para ello y a informar de inmediato a su superior de cualquier defecto, anomalía o daño apreciado en el equipo para la reparación o sustitución de este. La legislación establece la obligatoriedad de que todo prototipo de EPI sea sometido al examen "CE" por un organismo de control, oficialmente reconocido, que garantice la eficacia del equipo según la normativa vigente.[12]

10.5.1. Gestión de los equipos de protección individual (EPI)

Los EPI se deben elegir en función de la evaluación de los diferentes riesgos que existen en el laboratorio. El EPI ha de tener el grado necesario de protección que precisan las diferentes situaciones de riesgo, las exigencias de ergonomía además de las de salud del usuario y contemplar la posible aparición de otros riesgos simultáneos. Los trabajadores han de ser consultados antes de proceder a la adquisición. [13]

Todos los EPI que se adquieran deben tener el marcado CE y un folleto informativo acerca de la correcta utilización y conservación del mismo para garantizar la efectividad de los mismos.

Estas son algunas recomendaciones para la distribución de los EPI:

- Los equipos de uso general, como pueden ser los guantes de látex, se distribuirán por todas las unidades del laboratorio.
- Los guantes para cortes tendrán una asignación personalizada, es decir, corresponderán a un usuario.
- Los guantes para frío se ubicarán junto a las zonas de frío como los arcones congeladores y se utilizarán en aquellas operaciones que impliquen la utilización de baños fríos.
- Del mismo modo que los guantes para frío, los guantes para calor se ubicarán junto a los hornos de calcinación y en estufas y, en general, junto a todo equipo que presente un riesgo de quemadura por calor.
- Para la gestión de gafas de seguridad se recomienda su asignación personalizada a todo el personal del laboratorio, disponiéndose siempre de un excedente para el personal eventual tales como visitantes o personal de apoyo.
- Las viseras, delantales y ropa de protección específica que suelen tener un uso esporádico y puntual se deberán repartir por los laboratorios y tendrá que haber un stock mínimo.
- Los equipos de protección respiratoria tendrán siempre una asignación personalizada para evitar problemas higiénicos e infecciosos derivados de compartir estos equipos.

11. BIBLIOGRAFÍA

En este apartado se enumeran los libros y páginas web que se han consultado para la realización del siguiente proyecto. Los libros y webs que no llevan el corchete con la numeración no pertenecen a ningún apartado en concreto ya que han servido para estudio e investigación en general. Además, hay libros en lengua inglesa que han sido traducidos de la mejor manera que se ha podido, pero hay matices que pueden variar de la intención original del autor.

- **Libros físicos**

Fundición:

[1] D.M. Stefanescu. Volume 15 Casting. 1992

[2] Frieda Munro. La práctica en el taller de joyería. 2018

[3] American society for metals. Metals handbook vol.5 Forging and casting. 1970

Callister W. Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales. 2004

Impresión 3D:

[4] Mathilde Berchon y Bertier Luyt. La impresión 3D. 2014

[5]H. Lipson. La revolución de la impresión 3D. 2014

[7]Domingo Espín M. Aportaciones al conocimiento sobre la fabricación aditiva con la tecnología Fused Deposition Modeling. 2016

[10]J. Bughin. La revolución de la impresión 3D. 2015

Ad van Wijk y Iris van Wijk .3D printing with biomaterial. 2018

S. González Gómez. Impresión 3D. 2014

J. Horvath. Mastering 3D printing. 2014

Prevención de riesgos laborales:

[12] M.P.García. Manual de seguridad en el laboratorio. 2010

[13] J.S.Solano. Guía de seguridad en el laboratorio. 2004

- **Páginas web**

[6]<https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>

[8]<https://all3dp.com/es/1/tipos-de-impresoras-3d-tecnologia-de-impresion-3d/>

[9] <https://filament2print.com>

[11] Servicio Integrado de Prevención y Salud Laboral UPV
<https://www.sprl.upv.es/seguridad-en-laboratorios-y-talleres>

<https://of3lia.com/tipos-de-impresoras-3d/>

<https://www.joyeriaplaor.com/blog/joyeria-artesanal-fundicion-montaje-de-arboles/>

https://www.academia.edu/34745092/CERA_PERDIDA_FUNDICI%C3%93N_A_LA_CERA

<https://www.impresoras3d.com/guia-rapida-de-terminos-basicos-en-impresion-3d/>

<https://www.bq.com/>

<https://formlabs.com/es/>

<https://zortrax.com/>

Las fotografías han sido obtenidas en una gran mayoría por mí mismo, el resto han sido obtenidas de las siguientes páginas web:

Cera perdida:

<https://www.hathawaystyles.co.uk>

<http://pi-castings.co.uk>

<https://www.radver.com>

<https://www.pinterest.es/pin/35254809567114657/>

Aspectos técnicos:

<https://imprimakers.com/guia-de-diseno/>

<http://wiki.ikaslab.org/index.php/File:Raft-skirt-brim.jpg>

<https://www.thingiverse.com/thing:605239/files>

<https://www.materialise.com/es/manufacturing/tecnologia-de-impresion-3d/estereolitografia>

Impresoras 3D:

<https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/3d-printing>

<https://www.pccomponentes.com>

<https://www.leon-3d.es/producto/lion-2x/>

<http://www.leolane.com/blog/life-cycle-additively-manufactured-product/>

<https://www.3djake.es/elegoo/mars>

<https://formlabs.com/es/store/clear-resin/>

<pslc.ws/spanish/styrene.htm>

<dream3d.co.uk/product/starter-pack-zortrax-z-hips-filament>

<simplify3d.com/support/materials-guide/hips>

Otros:

<https://qualites.net/producto/rugosimetro-mahr-marsurf-ps10/>

12. ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Boceto del anillo.....	7
Ilustración 2. Anillo de cera perfil.....	8
Ilustración 3. Anillo de cera frontal.....	8
Ilustración 4. Molde abierto	8
Ilustración 5. Molde cerrado	8
Ilustración 6. Árbol	9
Ilustración 7. Baño cerámico.....	9
Ilustración 8. Vertido de metal.....	9
Ilustración 9. Rotura del molde.....	10
Ilustración 10. Anillo sin pulir frontal	10
Ilustración 11. Anillo sin pulir perfil.....	10
Ilustración 12. Anillo pulido frontal	11
Ilustración 13. Anillo pulido perfil.....	11
Ilustración 14. Método artista	12
Ilustración 15. Pieza difícil.....	12
Ilustración 16. Pieza difícil 2.....	13
Ilustración 17. Pieza difícil 3.....	13
Ilustración 18. FDM	14
Ilustración 19. SLA.....	15
Ilustración 20. SLS.....	16
Ilustración 21. SLM.....	16
Ilustración 22. Anet A8.....	19
Ilustración 23. Witbox 2	19
Ilustración 24. Lion 2X.....	20
Ilustración 25. Elegoo Mars.....	20
Ilustración 26. Filamento ABS	21
Ilustración 27. Pieza ABS	21
Ilustración 28. Estructura ABS.....	21
Ilustración 29. Filamento PLA	22
Ilustración 30. Piezas PLA	22
Ilustración 31. Estructura PLA	22
Ilustración 32. Filamento PVA	23
Ilustración 33. Pieza con soportes PVA.....	23
Ilustración 34. Estructura PVA.....	23
Ilustración 35. Filamento HIPS	24
Ilustración 36. Pieza con soportes HIPS	24
Ilustración 37. Estructura HIPS.....	24
Ilustración 38. Filamento PC	25
Ilustración 39. Pieza PC	25
Ilustración 40. Estructura PC.....	25
Ilustración 41. Filamento Soft PLA	26
Ilustración 42. Pieza Soft PLA	26
Ilustración 43. Filamento materiales híbridos	27
Ilustración 44. Pieza materiales híbridos	27

Ilustración 45. Altura de capa	29
Ilustración 46. Grosor de la pared.....	30
Ilustración 47. Soportes	30
Ilustración 48. Raft, skirt,brim.....	31
Ilustración 49. Bobina PLA rojo	35
Ilustración 50. Bobinas PLA bq	35
Ilustración 51. Bobina HIPS Zortrax.....	36
Ilustración 52. Resina Clear	36
Ilustración 53. Prusa i3 Hephestos.....	37
Ilustración 54. Zortrax M200.....	37
Ilustración 55. Form 3	38
Ilustración 56. Zinc	39
Ilustración 57. Pieza	39
Ilustración 58. Pieza 2	39
Ilustración 59. Árbol	41
Ilustración 60. Árbol metal.....	43
Ilustración 61. Pieza metal	43
Ilustración 62. Horno abierto	4
Ilustración 63. Horno cerrado	44
Ilustración 64. Molde metálico	44
Ilustración 65. Base de goma	45
Ilustración 66. Campana.....	45
Ilustración 67. Termopar	46
Ilustración 68. Inyectora de cera.....	46
Ilustración 69. Licuadora de cera	47
Ilustración 70. Vulcanizadora	47
Ilustración 71. Centrifugadora	48
Ilustración 72. Horno de secado	48
Ilustración 73. Rugosímetro	49
Ilustración 74. Microscopio.....	49
Ilustración 75. Soldador	50
Ilustración 76. Pulidora	50
Ilustración 77. Parámetros Prusa i3 Hephestos	52
Ilustración 78. Parámetros Prusa i3 Hephestos	53
Ilustración 79. Simulación Prusa i3 Hephestos	53
Ilustración 80. Árbol Prusa i3 Hephestos	54
Ilustración 81. Árbol Prusa i3 Hephestos sin soportes.....	54
Ilustración 82. Pieza Prusa i3 Hephesto	55
Ilustración 83. Parámetros Zortraz M200	55
Ilustración 84. Simulación M200.....	56
Ilustración 85. Árbol M200.....	56
Ilustración 86. Árbol M200 sin soportes	57
Ilustración 87. Pieza M200	57
Ilustración 88. Parámetros Form 3.....	58
Ilustración 89. Conjunto Form 3.....	58
Ilustración 90. Limpieza Form 3	59
Ilustración 91. Curado Form 3.....	59

Ilustración 92. Árbol Form 3.....	60
Ilustración 93. Pieza Form 3	60
Ilustración 94. Molde previo	61
Ilustración 95. Piezas previas	62
Ilustración 96. Piezas previas calcinadas.....	63
Ilustración 97.Creación molde de goma vulcanizada.....	64
Ilustración 98. Vulcanizadora	64
Ilustración 99. Molde de goma vulcanizada con pieza	65
Ilustración 100. Inyección cera.....	65
Ilustración 101. Rebabas	66
Ilustración 102. Falta de llenado	66
Ilustración 103. Rollo de cera.....	66
Ilustración 104. Tronco cera	67
Ilustración 105. Árbol cera	67
Ilustración 106. Llenado molde cera	67
Ilustración 107. Molde de cera llenos.....	68
Ilustración 108. Licuadora cera	68
Ilustración 109. Interior licuadora de cera.....	68
Ilustración 110. Árbol metal molde cera.....	69
Ilustración 111. Pieza metal molde cera	69
Ilustración 112. Árbol colocado en molde	70
Ilustración 113. Preparado de revestimiento cerámico.....	70
Ilustración 114. Moldes llenos	71
Ilustración 115. Molde en el horno.....	71
Ilustración 116. Molde vaciado PLA	72
Ilustración 117. Molde vaciado PLA 2	72
Ilustración 118. Molde HIPS vaciado	72
Ilustración 119. Molde HIPS vaciado 2	72
Ilustración 120. Molde HIPS vaciado 3.....	73
Ilustración 121. Molde PLA en zinc	74
Ilustración 122. Molde HIPS zinc	74
Ilustración 123. Molde PLA zinc limpio	75
Ilustración 124. Molde HIPS en zinc limpio.....	75
Ilustración 125. Piezas PLA en zinc	75
Ilustración 126. Piezas HIPS en zinc	75
Ilustración 127. Calidad PLA	83
Ilustración 128. Calidad HIPS	83
Ilustración 129. Calidad cera	83
Ilustración 130. Medición perpendicular	84
Ilustración 131. Medición paralela.....	84
Ilustración 132. Pieza cortada	85
Ilustración 133. Probeta en pulidora.....	86
Ilustración 134. Probetas pulidas	87
Ilustración 135. Crestas PLA	87
Ilustración 136. Crestas HIPS	87
Ilustración 137. Crestas cera	87

13. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Técnicas de fundición	5
Tabla 2. Técnicas de fundición 2	6
Tabla 3. Técnicas de fundición 3	6
Tabla 4. Técnicas de fundición 4	6
Tabla 5. Precios impresoras 3D	19
Tabla 6. Datos de los filamentos	27
Tabla 7. Aspectos a valorar	34
Tabla 8. Puntuación de los filamentos	34
Tabla 9. Parámetros Prusa i3 Hephestos	53
Tabla 10. Parámetros Zortrax M200	56
Tabla 11. Parámetros Form 3	58
Tabla 12. Pruebas previas	62
Tabla 13. Instalación experimental	77
Tabla 14. Instalación experimental 2	77
Tabla 15. Consumibles	78
Tabla 16. Tutor	78
Tabla 17. Técnico de laboratorio.....	79
Tabla 18. Proyectoado.....	79
Tabla 19. Mano de obra	79
Tabla 20. Presupuesto total	79
Tabla 21. Coste Prusa i3 Hephestos	80
Tabla 22. Coste Zortrax M200	80
Tabla 23. Coste Form 3.....	80
Tabla 24. Coste tradicional.....	81
Tabla 25. Coste tradicional 2.....	81
Tabla 26. Coste molde goma vulcanizada	81
Tabla 27. Coste molde.....	82
Tabla 28. Coste técnicas.....	82
Tabla 29. Rugosidad de las técnicas.....	84

14. ANEXOS

14.1. Ficha técnica PLA



PLA filamento: ficha técnica

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES	MÉTODO DE TESTEO
Propiedades generales			
Densidad	1,24	g/cm ³	ASTM D792
Propiedades mecánicas			
Módulo elástico en flexión	3600	MPa	ISO 178
Resistencia a la flexión	108	MPa	ISO 178
Dureza Sh D	85	Sh D	ASTM D2240
Propiedades térmicas			
Temperatura de flexión bajo carga	56	°C	ISO 75/2B
Temperatura de fusión	145-160	°C	ASTM D3418
Temperatura de transición vítrea	56-64	°C	ASTM D3418

Además de las propiedades descritas, hemos realizado los ensayos de tracción tanto de probetas inyectadas como de probetas impresas con nuestro PLA, para conocer las propiedades mecánicas de la pieza impresa final. En la siguiente tabla se recogen estos resultados:

Propiedades mecánicas	Probetas inyectadas	Probetas impresas ^a	Probetas impresas ^b	Unidades	Método de testeo
Resistencia a la rotura en tracción	52	50	39	MPa	ISO 527
Deformación a rotura en tracción	5	9	4	%	ISO 527
Módulo elástico en tracción	1320	1230	1120	MPa	ISO 527

^a Estirado en dirección paralela a las capas.

^b Estirado en dirección perpendicular a las capas

Probetas	Altura de capa (mm)	Grosor pared exterior (mm)	Grosor parte inferior/superior (mm)	Densidad del relleno (%)	Diseño de impresión
Probeta impresa en dirección paralela a las capas	0,2	2	0,2	100	
Probeta impresa en dirección perpendicular a las capas	0,3	1	0,3	100	

bq

14.2. Ficha técnica HIPS

TECHNICAL DATA SHEET

Date of issue: 12.12.2014 | Update: 05.03.2020 | Version: 3.00

Z-HIPS

Smooth and Stable

Z-HIPS is a versatile thermoplastic perfect for 3D printing prototypes which can be used in thorough tests before starting the production processes. It exhibits a high level of hardness, allowing you to complete durable prints without compromises on their quality. With Z-HIPS, your boldest models can acquire a unique, smooth, semimat surface and resemble elements manufactured with mass production plastics, therefore, imitate complete consumer products or end-use parts. Z-HIPS is also fully suited for creating prototypes of mechanical parts or casing elements for performance tests.

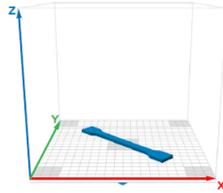


Mechanical Properties	Metric	Imperial	Test Method
Tensile Strength	16.90 MPa	2450 psi	ISO 527:1998
Breaking Stress	13.02 MPa	1890 psi	ISO 527:1998
Elongation at max Tensile Stress	1.87%	1.87%	ISO 527:1998
Elongation at Break	7.75%	7.75%	ISO 527:1998
Bending Stress	29.30 MPa	4250 psi	ISO 178:2011
Flexural Modulus	1.18 GPa	171 ksi	ISO 178:2011
Izod Impact, Notched	4.82 kJ/m ²	2.29 ft-lb/in ²	ISO 180:2004
Thermal Properties	Metric	Imperial	Test Method
Glass Transition Temperature	96.68° C	210° F	ISO 11357-3:2014
Other Properties	Metric	Imperial	Test Method
Melt Flow Rate	7.14 g/10 min Load 5 kg Temperature 200° C	0.0157 lb/10 min Load 11 lb Temperature 392° F	ISO 1133:2006
Specific Density	1.136 g/cm ³	9.48 lb/gal	ISO 1183-3:2003
Shore Hardness (D)	73.2	73.2	ISO 868:1998

The data presented in this document are intended for information and comparison purposes only. They should not be used for project specifications or its quality evaluation. The material's actual properties depend on the printing process conditions, the design structure and its purpose, test conditions, etc.

Samples of Z-HIPS used to carry out the tests were built on Zortrax M200.
The general print parameters utilized are noted below:

Z-SUITE: v2.2.0.0
Layer thickness: 0.19 mm;
Quality: High;
Seam: Normal;
Infill: Solid,
Fan Speed: Auto;
Surface Layers:
- Top: 7 (default);
- Bottom: 4 (default);



Product specifications are subject to change without notice.

Each user is responsible for complying with product safety standards, its intended use as well as the law and waste disposal (and recycling) rules for electrical and electronic equipment. Zortrax does not make any express or implied warranties, including but not limited to implied warranties of merchantability or fitness for a particular purpose.

zortrax

Zortrax S.A.
Lubelska 34,
10-409 Olsztyn, Poland
NIP: 7393864289
REGON: 281551179

Contact
Office: office@zortrax.com
Sales Department: sales@zortrax.com
Support Center: support@zortrax.com

©2020 Zortrax S.A. All rights reserved. All trade names, logos and trademarks mentioned in the following document are registered trademarks of Zortrax and are subject to legal protection.

www.zortrax.com

14.3. Ficha técnica resina

Material Properties Data

The following material properties are comparable for all Formlabs Standard Resins.

	METRIC ¹		IMPERIAL ¹		METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Green ²	Post-Cured ³	
Tensile Properties					
Ultimate Tensile Strength	38 MPa	65 MPa	5510 psi	9380 psi	ASTM D 638-10
Tensile Modulus	1.6 GPa	2.8 GPa	234 ksi	402 ksi	ASTM D 638-10
Elongation at Failure	12 %	6.2 %	12 %	6.2 %	ASTM D 638-10
Flexural Properties					
Flexural Modulus	1.25 GPa	2.2 GPa	181 ksi	320 ksi	ASTM C 790-10
Impact Properties					
Notched IZOD	16 J/m	25 J/m	0.3 ft-lbf/in	0.46 ft-lbf/in	ASTM D 256-10
Temperature Properties					
Heat Deflection Temp. @ 264 psi	42.7 °C	58.4 °C	108.9 °F	137.1 °F	ASTM D 648-07
Heat Deflection Temp. @ 66 psi	49.7 °C	73.1 °C	121.5 °F	163.6 °F	ASTM D 648-07

¹Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

²Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, Clear settings, washed and air dried without post cure.

³Data was obtained from parts printed using Form 2, 100 µm, Clear settings, and post-cured with 1.25 mW/cm² of 405 nm LED light for 60 minutes at 60 °C.

Solvent Compatibility

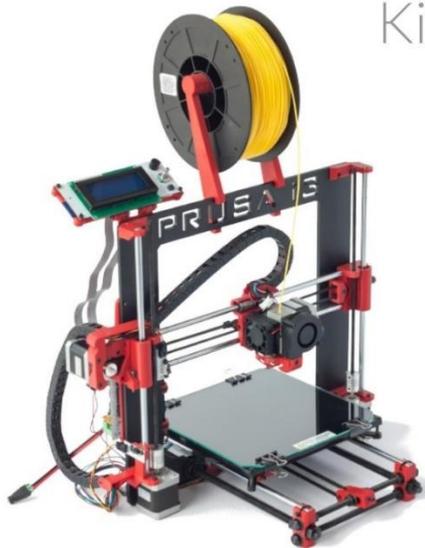
Percent weight gain over 24 hours for a printed and post-cured 1 x 1 x 1 cm cube immersed in respective solvent:

Solvent	24 Hour Weight Gain (%)	Solvent	24 Hour Weight Gain (%)
Acetic Acid, 5 %	< 1	Hydrogen Peroxide (3 %)	< 1
Acetone	sample cracked	Isooctane	< 1
Isopropyl Alcohol	< 1	Mineral Oil, light	< 1
Bleach, ~5 % NaOCl	< 1	Mineral Oil, heavy	< 1
Butyl Acetate	< 1	Salt Water (3.5 % NaCl)	< 1
Diesel	< 1	Sodium hydroxide (0.025 %, pH = 10)	< 1
Diethyl glycol monomethyl ether	1.7	Water	< 1
Hydraulic Oil	< 1	Xylene	< 1
Skydrol 5	1	Strong Acid (HCl Conc)	distorted

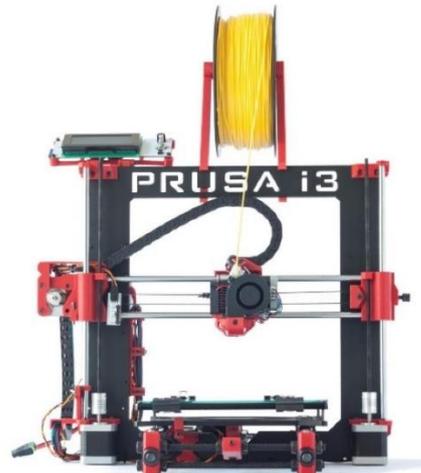
14.4. Ficha técnica Prusa i3

bq

kit Prusa i3 Hephestos



Kit Prusa i3 Hephestos



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Toda la electrónica de Prusa i3 HEPHESTOS ha sido probada y calibrada para asegurar su óptimo funcionamiento. Tanto los drivers como el firmware vienen preparados para que el usuario pueda comenzar a imprimir nada más terminar el montaje.

Dimensiones y peso

Dimensiones impresora: 460 x 370 x 510 mm (sin bobina PLA)
460 x 370 x 583 mm (con bobina PLA)
Dim. área de impresión: 215 x 210 x 180 mm
Dimensiones caja: 408 x 425 x 233 mm
Peso caja: 11 Kg

Resolución de capas

Muy alta: 60 micras
Alta: 100 micras
Media: 200 micras
Baja: 300 micras

Velocidad de impresión

Velocidad recomendada: 40-60 mm/s
Velocidad máxima recomendada: 80-100 mm/s

Electrónica

Ramps 1.4
Mega 2560
Pantalla de LCD con encoder rotativo con pulsador para la navegación
Base fría de cristal tamaño 220 x 220 x 3 mm
Fuente de alimentación de 220 AC 12 DC 100W
Termistores 100k en extrusor
Cartucho calefactor 40W 12V

Mecánica General

Marco y base de aluminio pintado al polvo
Barras de cromo duro para los carros X, Y, Z
Rodamiento lineal de bolas LM8UU para X, Y, Z
Rodamiento axial de bolas B623ZZ para las poleas X, Y
Cadenas portacables Iguis
Acoplamientos flexibles para las varillas roscadas del eje Z
Sistema de nivelado de base de impresión con 4 puntos y amortiguación
Sistema de cambio rápido de base de impresión con clips
Ventiladores brushless axiales con rodamientos de bolas
Piezas impresas en PLA

Mecánica Extrusor

Extrusor de diseño propio
Boquilla de 0.4 mm para filamento de 1.75 mm
Disipador de aletas con ventilador axial
Tobera de refrigeración de pieza

Software

Firmware derivado de Marlin
Entorno recomendado: Cura Software, slic3r, Repetier, Kisslicer
Archivos admitidos: .gcode
Sistemas operativos compatibles:
Windows XP y superiores
Mac OS X y superiores
Linux

Comunicaciones

Lector de tarjetas SD
Puerto USB tipo B

Seguridad

Extrusor protegido con pieza de diseño propio

Materiales de impresión

PLA, HIPS, FilaFlex entre otros

Contenido de la caja

6 guías de montaje
Garantía
Certificado de calidad



* Imagen del dispositivo no contractual

Kit Prusa i3 Hephestos

14.5. Ficha técnica Zortrax M200

Especificaciones técnicas

DIMENSIONES	
Sin Bobina	345 x 360 x 430 mm [13.6 x 14 x 17 in]
Con Bobina	345 x 430 x 430 mm [13.6 x 17 x 17 in]
Caja de transporte	460 x 470 x 570 mm [18 x 18.5 x 22.4 in]
Peso	13 kg [28.7 lbs]
Peso de transporte	20 kg [44 lbs]
TEMPERATURAS	
Temperatura ambiente de trabajo	15°-35° C [60°-95° F]
Almacenamiento	0°-35° C [32°-95° F]
ELECTRICIDAD	
Salida AC	110/240V ~ 2 A 50/60 Hz
Tensión requerida	24 V DC @ 11 A
Consumo	~ 190W
Conectividad	SD card [included], WiFi*
SOFTWARE	
Programa	Z-Suite
Tipos de archivos	.stl, .obj, .dxf
Sistemas operativos	Mac OS X / Windows XP, Windows Vista, Windows 7, Windows 8
IMPRESIÓN	
Tecnología	LPD - Layer Plastic Deposition
Volumen de trabajo	200 x 200 x 185 mm [7.87 x 7.87 x 7.28 in]
Resolución de capa	Advanced: 25-50* microns [0.000984-0.0019685 in] Standard: 90-400 microns [0.003543-0.015748 in]
Espesor de pared	Minimal: 400 microns Optimal: 800+ microns
Resolución de impresión de un punto	400+ microns
Diámetro del filamento	1.75 mm [0.069 in]
Tipo de filamento	Z-Filament Series
Diámetro de la boquilla (nozzle)	0.4 mm [0.015 in]
Posicionamiento mínimo	1.5 microns
Precisión ejes x/y	1.5 microns
Pasos del eje Z	1.25 microns
Máxima temperatura de extrusión	380° C
Máxima temperatura de la plataforma	110° C



Especificaciones Técnicas: Impresora Formlabs 3



Estadísticas rápidas

Tecnología

Estereolitografía de baja fuerza (LFS)™

Resolución XY

25 micras

Tamaño de punto láser

85 micras

Potencia de Láser

Un láser de 250 mW

Volumen de construcción

(altura x ancho x profundidad)

14.5 × 14.5 × 18.5 cm

5.7 × 5.7 × 7.3 pulgadas

Espesura de capa

25 – 300 microns

.001 – .012 in

Propiedades de impresión

Tecnología:	Estereolitografía de baja fuerza (LFS)™
Sistema de llenado de resina:	Automatizado
Volumen de construcción (altura x ancho x profundidad):	14.5 × 14.5 × 18.5 cm 5.7 × 5.7 × 7.3 in
Espesura de capa (Axis Resolución):	25 – 300 micras .001 – .012 pulgadas
Resolución XY:	25 micras 0.001 pulgadas
Cartuchos de resina:	1
Soportes:	Auto generado Eliminación Light-Touch



Especificaciones Técnicas: Impresora Formlabs 3

Hardware

Dimensiones mínimas de acceso (Altura x ancho x profundidad):	40.5 × 53 × 78 cm 15.9 × 20.9 × 30.7 pulgadas
Dimensiones de la impresora (Altura × ancho × profundidad):	40.5 × 37.5 × 53 cm 15.9 × 14.8 × 20.9 pulgadas
Peso:	17,5 kg 38,5 libras
Temperatura de funcionamiento:	Se calienta automáticamente a 35°C Se calienta automáticamente a 95°F
Control de temperatura:	Cámara de impresión calentada por aire
Requerimientos de energía:	100–240 VAC 2.5 A 50/60 Hz 220 W
Especificaciones Láser:	1 unidad de procesamiento de luz Certificación EN 60825-1:2007 Producto láser de clase 1 Longitud de onda de 405 nm 250 mW de potencia Punto láser de 85 micras (0.0033 pulgadas)
Conectividad:	Wi-Fi (2.4, 5 GHz) Internet (1000 Mbit) USB 2.0
Control de impresora:	Pantalla táctil interactiva de 5.5" Resolución de 1280 × 720

14.7. Piezas previas

Se muestran en este anexo las fotos más relevantes de los análisis previos. El orden de estas fotografías viene dado por la temperatura a la que se encuentran las piezas en cada imagen. Las temperaturas en orden son las siguientes: 280, 311, 350, 370, 390 y 410 °C.



14.8. Molde fallido de goma vulcanizada

En este anexo se muestra el primer molde de goma vulcanizada que se realizó y resultó fallido.



14.9. Molde de escayola

En este anexo se va a complementar de forma fotográfica el apartado 6.4.

Cabe destacar que las fotos se han hecho con todos los elementos en frío ya que, por motivos de seguridad, no es posible realizarlas cuando están a la temperatura de trabajo.





14.10. Valores de rugosímetro

En este apartado se muestran los perfiles y valores del rugosímetro. Se sigue el mismo orden que en la tabla: PLA paralelo, PLA perpendicular, HIPS paralelo, HIPS perpendicular, cera paralelo y cera perpendicular.

