



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

*ESTUDIO COMPARATIVO
MOLDE PROTOTIPO DE
TERMOCONFORMADO MEDIANTE
TÉCNICAS DE F.A (A.M)*

**Máster Universitario en Ingeniería, Procesado y Caracterización
de Materiales**

*Autor: Judith Boronat Soler
Dirigido por: Santiago Ferrándiz Bou*

Convocatoria: noviembre 2020

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi director de trabajo final de máster Santiago Ferrándiz por introducirme y formarme en el mundo de la fabricación aditiva.

También quiero agradecer a los profesores que han participado en el proyecto y que han aportado sus conocimientos para conseguir cumplir con los objetivos del proyecto.

Por último, agradecer al Campus de Alcoy por facilitarme sus instalaciones y equipos.

Resumen

Durante el desarrollo de este trabajo final de máster se verán todos los aspectos que engloban a la fabricación de un molde con materiales especiales para termoconformado.

Este proyecto se estructura partiendo de una fase inicial de estudio del arte de la fabricación aditiva, concretando en cada una de las técnicas de impresión 3D. Se buscará una visión general de cómo ha sido la evolución de la producción con la fabricación aditiva junto con el estudio de los materiales empleados en este tipo de método productivo, finalmente se detallará en que consiste el proceso de termoformado.

A continuación, con los conceptos teóricos básicos necesarios para este proyecto se diseñará la pieza a estudiar y se realizará una simulación del proceso de termoformado con el programa técnico ANSYS.

Con el diseño y la simulación realizados se procederá al prototipado de la pieza con los diferentes materiales para su posterior empleo en los ensayos de termoformado y estudio de su comportamiento frente a los esfuerzos sufridos durante el proceso.

Por último, con los resultados obtenidos debido a los esfuerzos sufridos en los moldes por el ensayo de termoformado se realizará una comparativa para finalmente obtener una conclusión de dichos ensayos con este tipo de materiales especiales.

Resum

Durant el desenvolupament d'aquest treball final de màster es veuran tots els aspectes que engloben a la fabricació d'un motle amb materials especials per a termoconformació.

Aquest projecte s'estructura partint d'una fase inicial d'estudi de l'art de la fabricació additiva, concretant en cada una de les tècniques d'impressió 3D. Es buscarà una visió general de com ha sigut l'evolució de la producció amb la fabricació additiva juntament amb l'estudi dels materials emprats en aquest tipus de mètode productiu, finalment es detallarà en què consisteix el procés de termoformat.

A continuació, amb els conceptes teòrics bàsics necessaris per a aquest projecte es dissenyarà la peça a estudiar i es realitzarà una simulació del procés de termoformat amb el programa tècnic ANSYS.

Amb el disseny i la simulació realitzats es procedirà al prototipat de la peça amb els diferents materials per a la seua posterior ocupació en els assajos de termoformat i estudi del seu comportament enfront dels esforços patits durant el procés.

Finalment, amb els resultats obtinguts a causa dels esforços patits en els motles per l'assaig de termoformat es realitzarà una comparativa per a finalment obtindre una conclusió d'aquests assajos amb aquest tipus de materials especials.

Summary

During the development of this master's final project we will see all the aspects that encompass the manufacture of a mold with special materials for thermoforming.

This project is structured starting from an initial phase of study of the art of additive manufacturing, specifying each of the 3D printing techniques. A general overview of how evolution of production with additive manufacturing along with the study of the materials used in this type of productive method has been sought will finally be detailed in what the thermoforming process is.

Then, with the basic theoretical concepts necessary for this project, the piece to be studied will be designed and a simulation of the thermoforming process with the technical program ANSYS will be carried out.

With the design and simulation carried out, it will proceed to the prototyping of the piece with the different materials for its subsequent use in the thermoforming tests and study their behavior in relation to the efforts suffered during the process.

Finally, with the results obtained due to the efforts suffered in the molds for the thermoforming test, a comparison will be made to finally obtain a conclusion of these tests with this type of special materials.

Contenido

Agradecimientos	3
Resumen.....	5
Resum.....	7
Summary	9
Listado de figuras	13
Listado de tablas.....	15
1. Introducción	19
2. Estudio del estado del arte.....	23
2.1 Fabricación aditiva	23
2.2 Materiales empleados en F.A.....	35
2.3 Ventajas y retos de la F.A.	41
2.3.1 Ventajas de la fabricación aditiva	41
2.3.2 Limitaciones de la fabricación aditiva	43
2.4 Termoconformado	45
3. Diseño de la pieza.....	59
4. Ansys. Simulación termoconformado	69
5. Prototipado	79
5.1 Materiales empleados.....	79
5.2 Selección de la máquina.....	84
5.3 Definición de los parámetros	86
6. Ensayos de termoconformado	97
7. Presupuesto final.....	107
8. Conclusiones.....	117
9. Referencias Bibliográficas	121
ANEXOS.....	123

Listado de figuras

Fig. 1 Proceso de inyección de aglutinante. Binder Jetting.....	26
Fig. 2. Proceso de deposición directa de energía. Directed energy deposition.....	27
Fig. 3 Proceso de extrusión de material. Material extrusion o FDM.....	29
Fig. 4. Impresora basada en extrusión de material empleada en el proyecto. Modelo Pruso i3 mk3s.....	29
Fig. 5 Proceso de inyección de material. Material jetting.....	30
Fig. 6 Proceso de fusión de lecho de polvo. Powder bed fusion.....	31
Fig. 7. Proceso DMLS. Aplicación de laser sobre la superficie de polvo.....	32
Fig. 8. Proceso de laminación por hojas. Sheet lamination.	33
Fig. 9 Proceso de fotopolimerización. Vat photopolymerization.....	34
Fig. 10 Descripción general de los materiales de investigación actuales para AM en la próxima era.	38
Fig. 11. Esquema para el proceso de conformado en una sola etapa.	46
Fig. 12. Esquema de operaciones:.....	47
Fig. 13 Esquema del proceso para conformado en etapas múltiples.	48
Fig. 14 Etapas del proceso de conformado en etapas múltiples. Variante de vacío con respaldo.	48
Fig. 15. Diseño deseado del molde.	59
Fig. 16. Croquis de la bandeja y de la pieza.	60
Fig. 17. Croquis de la extrusión de la pieza.	60
Fig. 18 Extrusión de la pieza en forma de cubo.	61
Fig. 19. Croquis para corte de la pieza	61
Fig. 20 Pieza con el corte deseado.	62
Fig. 21. Croquis del redondeo.	62
Fig. 22 Redondeo de la pieza.....	63
Fig. 23. Croquis del vaciado.....	63
Fig. 24. Vaciado de la pieza.	64
Fig. 25. Pieza con croquis para extruir base.....	64
Fig. 26. Pieza con base extruida	65
Fig. 27 Entorno de la pantalla inicial del programa técnico ANSYS.	69
Fig. 28 Entorno de Polydata de ANSYS.....	70
Fig. 29. Mallado de la pieza y la lámina.....	71
Fig. 30. Inicio de la simulación de termoformado de la lámina sobre el molde.	71
Fig. 31. Primer contacto de la lámina con el molde.....	72
Fig. 32. Primeras zonas de riesgo al entrar en contacto la lámina y el molde.....	72
Fig. 33. Evolución de la simulación con espesor de lámina máx.2.042e-1 mm.	73
Fig. 34. Evolución de la simulación con espesor de lámina máx.1.292e-1 mm.	73
Fig. 35. Evolución de la simulación con espesor de lámina máx.9.4542e-2 mm.	74
Fig. 36. Simulación de moldeo finalizada.	74
Fig. 37. Especificaciones del filamento PLA reforzado con fibra de carbono	81
Fig. 38. Especificaciones del filamento Lay-Brick (Cerámico)	83
Fig. 39 Impresora 3D modelo Prusa i3 MK3s	84
Fig. 40 Premios otorgados a la impresora i3 MK3s.....	84
Fig. 41. Entorno del software PrusaSlic3r.	86

Fig. 42. Configuración de la impresión. Capa y perímetros.	87
Fig. 43 Distintos porcentajes de relleno.....	88
Fig. 44. Rellenos configurados en las piezas.	88
Fig. 45. Principales opciones de relleno.	88
Fig. 46. Configuración de la impresión. Relleno.....	89
Fig. 47 Configuración del filamento de PLA.	90
Fig. 48. Configuración del filamento de PLA + CF.....	91
Fig. 49. Configuración del filamento de PLA + GF.	91
Fig. 50. Configuración del filamento LayBrick.	92
Fig. 51. Impresión de los moldes utilizados para el posterior termoformado.....	92
Fig. 52. Tiempos de impresión y cantidades de material.....	93
Fig. 53. Rotura del primer molde y escalado del molde.	93
Fig. 54. Colocación del molde de PLA +CF y calentamiento de la lámina de PETG.....	98
Fig. 55.Colocación del molde de PLA +GF junto con el de LayBrick y calentamiento de la lámina de PETG	98
Fig. 56. Calentamiento de lámina PETG	99
Fig. 57. Primeras ondulaciones de la lámina PETG tras el calentamiento.	99
Fig. 58. Calentamiento óptimo de la lámina PETG.....	99
Fig. 59. Succión del aire para el correcto acople de la lámina PETG al molde.....	100
Fig. 60. Lámina de PETG atemperada y correctamente acoplada a la pieza.	100
Fig. 61. Pieza deseada obtenida por termoformado. Vista 1.....	101
Fig. 62. Pieza deseada obtenida por termoformado. Vista 2.....	102
Fig. 63. Piezas obtenidas por termoformado.....	102
Fig. 64. Pieza termoconformada con errores detectados.	103
Fig. 65. Temperaturas de los moldes post termoconformado	103

Listado de tablas

Tabla 1. Principios básicos, materiales, ventajas, desventajas, volúmenes de fabricación típicos y fabricante de herramientas de siete categorías ASTM de AM.....	25
Tabla 2. Propiedades físicas (T_g , T_m , ΔH_m y X_c) de PLA con distintos grados de pureza.	36
Tabla 3. Tabla resumen propiedades del filamento de PLA.....	79
Tabla 4. Características más significativas de la impresora modelo i3 MK3s. Fuente: www.prusa3d.es	85
Tabla 5. Temperatura del extrusor para cada material.	90
Tabla 6. Cálculo del precio prototipo molde PLA.	109
Tabla 7. Cálculo del precio prototipo molde PLA + CF	110
Tabla 8. Cálculo del precio prototipo molde PLA + GF.....	111
Tabla 9. Cálculo del precio prototipo molde LayBrick.....	112

INTRODUCCIÓN

1. Introducción

La aparición de tecnologías de impresión tridimensionales (3D), también conocidas como fabricación aditiva (AM), se considera una revolución en la fabricación. La impresión en 3D es una serie de tecnologías de fabricación avanzadas que se utilizan para fabricar partes físicas de manera discreta, punto por punto, línea por línea o capa por capa, a partir de modelos CAD en 3D [1]. El Comité Técnico F2 de ASTM que es responsable de supervisar el desarrollo de los estándares de AM define la tecnología como "un proceso de unión de materiales para hacer objetos a partir de datos de modelos 3D, generalmente capa por capa, en oposición a metodologías de fabricación sustractiva" (ASTM, 2012) [2].

La impresión en 3D es una filosofía de fabricación única que permite la preparación de estructuras altamente complejas y precisas que son difíciles de realizar con los métodos de fabricación tradicionales, como por ejemplo la fundición y el mecanizado. La productividad también se puede aumentar significativamente ya que muchos objetos se pueden construir en una sola ejecución. Como resultado, la impresión 3D ha ganado rápidamente adeptos en las comunidades de ciencia e ingeniería desde su aparición en la década de 1980 [1].

El término "fabricación aditiva" abarca una amplia gama de tecnologías de producción que fabrican productos capa por capa, lo que permite que los objetos tridimensionales se "imprimen" a pedido. Algunas de las tecnologías de AM más ampliamente adoptadas son el modelado por deposición fundida (FDM), la estereolitografía (SLA), la fusión por láser selectiva (SLM), la sinterización por láser selectiva (SLS) y el procesamiento de luz digital (DLP), pero hay una variedad de otros procesos de AM también, que incluyen polyjet, fusión de haz de electrones (EBM) y fabricación de objetos laminados (LOM). En términos de materiales, se puede utilizar una variedad de polímeros, metales, cerámicas y compuestos para AM. El uso de estos materiales depende del tipo de proceso de AM utilizado [2].

El objetivo general de este trabajo es analizar y estudiar la técnica de fabricación aditiva modelado de deposición fundida (FDM) con PLA reforzado con diferentes materiales, estudiando y analizando el comportamiento de la pieza, en este caso concreto, un molde de termoformado. Se fabricará la misma pieza con PLA de uso común, PLA reforzado con fibra de carbono, PLA reforzado con fibra de vidrio y finalmente se utilizará un nuevo material presentado en 2018 en la feria Fabcon de aspecto de piedra arenisca llamado LayBrick para tener una buena comparativa del comportamiento de la pieza, frente a los esfuerzos que puede sufrir en el proceso de termoformado teniendo en cuenta que son materiales especiales y novedosos.

Con este proyecto se pretende obtener diferentes conocimientos frente a la impresión 3D y al termoformado, tales como:

- Conocer las características generales de la fabricación aditiva junto con las diferentes técnicas existentes y los materiales empleados.
- Estudiar el proceso de termoformado.
- Observar el comportamiento de la pieza diseñada con un programa técnico de simulación, como el ANSYS.
- Analizar las características de las piezas impresas en la impresora Prusa i3 Mk3S tras el proceso de termoformado.

Estudio del estado del arte

2. Estudio del estado del arte

En este punto primero se proporcionará una descripción general de las tecnologías de AM, sus características y una descripción de sus aplicaciones industriales junto con ejemplos.

2.1 Fabricación aditiva

La aparición de tecnologías de fabricación avanzadas, junto con las demandas de los consumidores de productos y servicios más personalizados, están provocando cambios en la escala y distribución de la fabricación.

El panorama manufacturero está en constante cambio. Uno de los impulsores más importantes de este cambio es el surgimiento de tecnologías de fabricación avanzadas que permiten una producción a pequeña escala más eficiente en cuanto a costos y recursos.

La adopción de la fabricación aditiva (AM) y otras tecnologías avanzadas de fabricación parece anunciar un futuro en el que las cadenas de valor son más cortas, más pequeñas, más localizadas, más colaborativas y ofrecen importantes beneficios de sostenibilidad [2].

La fabricación aditiva crea "objetos" a partir de un "modelo" digital al depositar el /los material /es constitutivo/s de manera capa por capa utilizando herramientas de colocación de material operadas y controladas digitalmente. Como una definición más amplia de la fabricación aditiva podemos destacar esencialmente cuatro componentes principales [3]:

- Un modelo digital del objeto.
- Materiales que se consolidan de la forma más pequeña posible, por ejemplo, gotas de líquido, alambre, polvo para hacer el objeto.
- Una herramienta para la colocación de materiales.
- Un sistema de control digital de la herramienta para colocar el / los materiales /s capa por capa para construir la forma del objeto.

Es decir, la primera etapa de la impresión 3D consiste en crear un modelo digital del objeto que se va a imprimir. Esto generalmente se hace con el software de modelado de diseño asistido por computadora (CAD) o mediante el uso de servicios en línea especializados por algunas de las plataformas de impresión 3D (por ejemplo, Thingiverse, Shapeways o Sculpteo). Los escáneres 3D también se pueden usar para crear automáticamente un modelo de un objeto existente (al igual que los escáneres 2D se utilizan para digitalizar fotos, dibujos o documentos) [4].

Finalmente, en diferentes plataformas, es posible el crowdsourcing de diseño y fabricación y el resultado se imprimirá en la impresora predeterminada.

La fabricación aditiva es fundamentalmente diferente de la fabricación tradicional formativa o sustractiva que es la más cercana a la fabricación "de abajo hacia arriba", donde podemos construir una estructura en su forma diseñada utilizando un enfoque de "capa por capa". Esta fabricación capa por capa permite una libertad sin precedentes en la fabricación de estructuras complejas, compuestas e híbridas con precisión y control que no se pueden realizar a través de las rutas de fabricación tradicionales [3].

Algunos de los beneficios potenciales de la fabricación aditiva se pueden resumir a continuación:

1. Traducción directa de diseño a componente.
2. Generación de piezas con mayor personalización sin herramientas adicionales ni costos de fabricación.
3. Diseño funcional que permite la fabricación de complejas características internas.
4. Fabricación de componentes flexibles y ligeros con estructuras huecas o de celosía.
5. Capacidad de fabricación directa de componentes a su forma final (neta) o casi final (casi neta) con un procesamiento mínimo o sin procesamiento adicional.
6. Posibilidad de acercarse a cero la fabricación de residuos al maximizar la utilización del material.
7. Una gran reducción en el desarrollo general del producto y el tiempo de fabricación que lleva a una transferencia más rápida al mercado.
8. Una huella operativa más pequeña hacia la fabricación de una gran variedad de partes.
9. Fabricación bajo demanda, alejándose de la fabricación basada en proyección.
10. Excelente escalabilidad.

El éxito de la fabricación aditiva, sin embargo, radica en qué tan bien este "objeto" fabricado cumple con su uso previsto en el mercado. Traducir la superioridad y la conveniencia de AM en la creación de formas y estructuras en productos útiles es fundamental para su adopción en la configuración industrial. El éxito comercial también dependerá de la firmeza con la que se pueda asegurar que las propiedades de los materiales en la forma o estructura deseada realmente cumplan con ciertos estándares predefinidos y aceptados, mientras que el costo de producción siga siendo competitivo [3].

AM es capaz de producir piezas totalmente funcionales en una amplia gama de materiales, incluidos los metálicos, cerámicos, polímeros y sus combinaciones en forma de materiales compuestos, híbridos o materiales funcionalmente graduados (MGF). Entre estos materiales, los polímeros se han utilizado ampliamente, quizás debido a su uso generalizado en las máquinas de primera generación diseñadas principalmente para la creación rápida de prototipos. Sin embargo, la tecnología no se limita solo a polímeros u otros materiales poliméricos. Todo tipo de materiales, incluidos los metales, la cerámica, los nanomateriales, los productos farmacéuticos y los materiales de origen biológico se pueden traducir en formas y estructuras en 3D utilizando AM [3].

El estándar 52900: 2015 de la Organización Internacional de Normalización (ISO) / Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) clasifica el estándar, los procesos de AM en siete categorías:

1. Inyección de aglomerante (BJ);
2. Deposición directa de energía (DED);
3. Extrusión de material (ME);
4. Chorro de material (MJ);
5. Fusión de lecho en polvo (PBF);
6. Laminación en lámina (SL)
7. Fotopolimerización de cuba (VP).

La Tabla 1 resume los principios básicos, ejemplos de materiales fabricados, ventajas y desventajas de cada uno de estos siete sistemas. También indica el principal fabricante de herramientas para la tecnología AM dada.

Tabla 1. Principios básicos, materiales, ventajas, desventajas, volúmenes de fabricación típicos y fabricante de herramientas de siete categorías ASTM de AM.

Principios básicos, materiales, ventajas, desventajas, volúmenes de fabricación típicos y fabricante de herramientas de siete categorías ASTM de AM: inyección de aglomerante (BJ); deposición de energía dirigida (DED); extrusión de material (ME); (4) chorro de material (MJ); fusión de lecho en polvo (PBF); laminación de láminas (SL); y fotopolimerización de cuba (VP). Los volúmenes de construcción se redondean al número más cercano para mayor comodidad. Los tipos de materiales han sido clasificados en orden de idoneidad y uso común [3].

ASTM Categoría	Principios básicos	Ejemplos tecnológicos	Ventajas	Desventajas	Materiales	Volumen de fabricación	Herramienta de fabricación/País
BJ	Agglomerante líquido / s impreso en capas delgadas de polvo. La pieza se construye capa por capa pegando las partículas juntas	<ul style="list-style-type: none"> Tecnología de inyección de tinta 3D 	<ul style="list-style-type: none"> Libre de soporte / sustrato Libertad de diseño Gran volumen de construcción Alta velocidad de impresión Costo relativamente bajo 	<ul style="list-style-type: none"> Piezas frágiles con propiedades mecánicas limitadas. Puede requerir procesamiento posterior 	<ul style="list-style-type: none"> Polímeros Cerámica Composites Metales Híbrido 	Versátil (pequeño a grande) X = <4000 Y = <2000 Z = <1000	<ul style="list-style-type: none"> ExOne, USA PolyPico, Irlanda
DED	La energía térmica enfocada funde los materiales durante la deposición.	<ul style="list-style-type: none"> Deposición láser (LD) Ingeniería láser Modelado de red (LENTE) Rayo de electrones Fusión del arco de plasma 	<ul style="list-style-type: none"> Alto grado de control de la estructura del grano. Piezas de alta calidad Excelente para aplicaciones de reparación. 	<ul style="list-style-type: none"> La calidad de la superficie y la velocidad requieren un equilibrio. Limitado a metales / híbridos a base de metales. 	<ul style="list-style-type: none"> Metales Híbrido 	Versátil X = 600–3000 Y = 500–3500 Z = 350–5000	<ul style="list-style-type: none"> Optomec, USA InssTek, USA Sciaky, USA Irepa Laser, Francia Trumpf, Alemania
ME	El material se expulsa selectivamente a través de una boquilla u orificio	<ul style="list-style-type: none"> Deposición fundida Modelado (FDM) / Fundido Fabricación de filamentos (FFF) Modelado de capas fundidas (FLM) 	<ul style="list-style-type: none"> Uso extendido Barato Escalable Puede construir partes totalmente funcionales. 	<ul style="list-style-type: none"> Anisotropía vertical Superficie escalonada No está sujeto a detalles finos. 	<ul style="list-style-type: none"> Polímeros Composites 	Pequeño a mediano X = <900 Y = <600 Z = <900	<ul style="list-style-type: none"> Stratasys, USA
MJ	Se depositan gotitas de materiales de construcción.	<ul style="list-style-type: none"> Tecnología de inyección de tinta 3D Escritura directa de tinta 	<ul style="list-style-type: none"> Alta precisión de gota declaración Poco gasto Múltiples piezas de material. Multicolor 	<ul style="list-style-type: none"> A menudo se requiere material de apoyo Principalmente se pueden utilizar fotopolímeros y resinas termoestables. 	<ul style="list-style-type: none"> Polímeros Cerámica Composites Híbrido Productos biológicos 	Small X = <300 Y = <200 Z = <200	<ul style="list-style-type: none"> Stratasys, EE.UU. Sistemas 3D, USA PolyPico, Irlanda 3Dinks, USA WASP, Italia
PBF	La energía térmica fusiona una pequeña región del lecho de polvo del material de construcción	<ul style="list-style-type: none"> Fusión de haz de electrones (EBM) Láser de metal directo Sinterización (DMLS) Láser selectivo Sinterización / Fusión (SLS / SLM) 	<ul style="list-style-type: none"> Relativamente barato Pequeña huella de pie La cama de polvo actúa como una estructura de soporte integrada Amplia gama de opciones de materiales. 	<ul style="list-style-type: none"> Relativamente lento. Falta de integridad estructural. Limitaciones de tamaño. Alta potencia requerida. El acabado depende del tamaño del polvo precursor. 	<ul style="list-style-type: none"> Metales Cerámica Polímeros Composites Híbrido 	Pequeña X = 200–300 Y = 200–300 Z = 200–350	<ul style="list-style-type: none"> ARCAM, Suecia; EOS, Alemania; Concept Laser Cusing, Alemania; MTT, Alemania; Phoenix System Group, Francia; Renishaw, Reino Unido; Realizador, Alemania; Matsuura, Japón, Voxeljet, 3Dsystems, USA
SL	Las hojas / láminas de materiales están unidas.	<ul style="list-style-type: none"> Fabricación de objetos laminados (LOM) Ultrasonido de consolidación / Ultrasonido. Fabricación Aditiva (UC / UAM) 	<ul style="list-style-type: none"> Alta velocidad. Bajo costo. Facilidad de manejo de materiales. 	<ul style="list-style-type: none"> La resistencia y la integridad de las piezas dependen del adhesivo utilizado. Los acabados pueden requerir procesamiento posterior. Uso limitado del material. 	<ul style="list-style-type: none"> Polímeros Metales Cerámica Híbridos 	Pequeña X = 150–250 Y = 200 Z = 100–150	<ul style="list-style-type: none"> Sistemas 3D, USA MCor, Irlanda
VP	El polímero líquido en una cuba es fotopolimerizable.	<ul style="list-style-type: none"> Estereolitografía (SLA) Procesamiento de luz digital (DLP) 	<ul style="list-style-type: none"> Piezas grandes Excelente exactitud Excelente acabado superficial y detalles. 	<ul style="list-style-type: none"> Limitado solo a los fotopolímeros Baja vida útil, malas propiedades mecánicas de los fotopolímeros. Precursores caros / proceso de construcción lenta 	<ul style="list-style-type: none"> Polímeros Cerámica 	Medio X <2100 Y <700 Z <800	<ul style="list-style-type: none"> Lithoz, Austria 3D Ceram, Francia

Tal y como se ha comentado anteriormente y como se puede observar en la tabla existen siete categorías atendiendo a las diferentes características que pueden ofrecer. Estas categorías se describen a continuación [5]:

1. Binder Jetting

Descripción

Los procesos de tipo inyección de aglutinante son una mezcla entre la inyección de material y la fusión de lecho de polvo. Un cabezal aplica un líquido aglutinante de forma selectiva sobre una capa de polvo de tal manera que se consigue un aglomerado de líquido curado y polvo con la forma de la sección transversal de la pieza. Terminada una capa, la maquina se extiende una nueva capa de polvo y se repite el proceso, como el proceso de la *Fig.1* [6]. Con este tipo de tecnología se puede trabajar con una gran variedad de materiales, además de producir piezas de colores. En el caso de los metales, es necesario un trabajo posterior para darle propiedades mecánicas, ya que la pieza formada por polvo aglomerado es frágil debido a la cantidad de poros en su interior. Lo más común es infiltrar otro material que rellene esos poros y que haga aumentar la resistencia de la pieza. En el caso del plástico, la necesidad de trabajo posterior es más reducida, ya que en la mayoría de casos solo es necesario, además de la limpieza del polvo sobrante, una capa protectora (de laca, por ejemplo) que fortalezca la superficie.

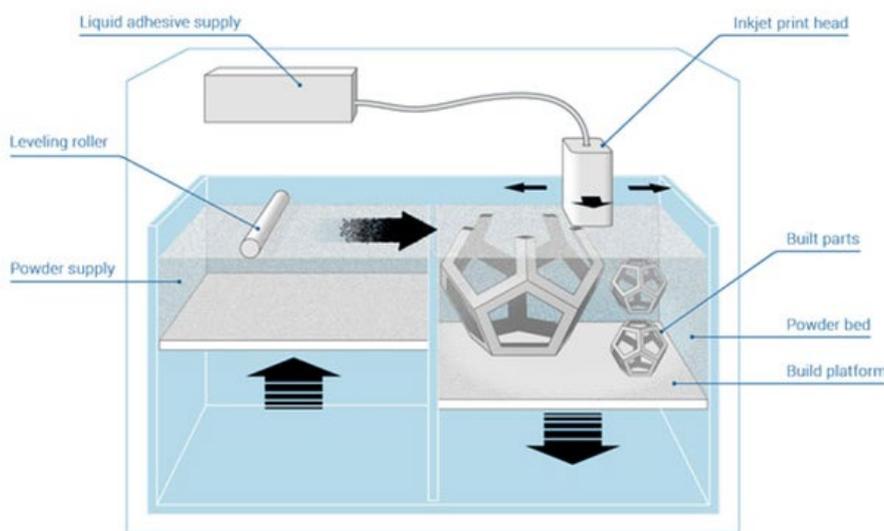


Fig. 1 Proceso de inyección de aglutinante. Binder Jetting.

Materiales

Se puede utilizar una amplia gama de materiales, según la aplicación que le vayamos a dar. Generalmente, el agente aglutinante es del tipo resina, con propiedades adhesivas o curable ante alguna fuente de energía (luz, calor...). Como material base se puede utilizar polvo polimérico, para el desarrollo de modelos, prototipos, etc. También se trabaja con metales, pudiendo obtener piezas de aleaciones férricas y no-férricas, también para prototipo y ornamentos incluso. Se fabrican también moldes de arena para colada, utilizando arena junto con el aglutinante para conformar el molde.

Ventajas e inconvenientes

Las ventajas más evidentes de este tipo de tecnología son la velocidad de fabricación, de las más rápidas dentro de la fabricación aditiva y junto con la fusión de lecho de polvo, la que puede conseguir geometrías de mayor complejidad. Otro de sus puntos fuertes es que puede trabajar con casi cualquier material en forma de polvo, ya que al aglutinarse mediante otro material adhesivo no necesita tener en cuenta propiedades como el punto de fusión porque no es necesario, por ejemplo, el uso de ninguna fuente de energía para procesar el material.

El principal problema de las piezas obtenidas por este método es que, en esencia, son polvo pegado, sin ningún tipo de transformación física o química. Esto hace que las piezas no tengan propiedades mecánicas útiles, lo que hace necesario un proceso posterior sobre el componente fabricado para darle algún tipo de propiedad.

2. Directed Energy Deposition

Descripción

La deposición directa de energía (DED Directed Energy Deposition), consiste en aplicar un haz de energía sobre la pieza de forma localizada, de tal manera que se forme un baño de material fundido, a la vez, se aplica nuevo material, que en contacto con el haz de energía se funde antes de depositarse sobre ese baño. Mediante una boquilla, se aplica conjuntamente el haz de energía, que puede ser laser o haz de electrones, y el material de aporte fundido, que puede estar inicialmente en forma de polvo o en hilo. De esta manera, la boquilla se desplaza de forma programada sobre la superficie de trabajo generando un pequeño baño sobre el que aporta nuevo material, cuando la boquilla se desplaza, el líquido que deja atrás solidifica creando una nueva capa al finalizar el recorrido. Tras una capa, la boquilla repite el proceso generando otra, y así de forma sucesiva, tal y como se muestra en la *Fig. 2 [7]*.

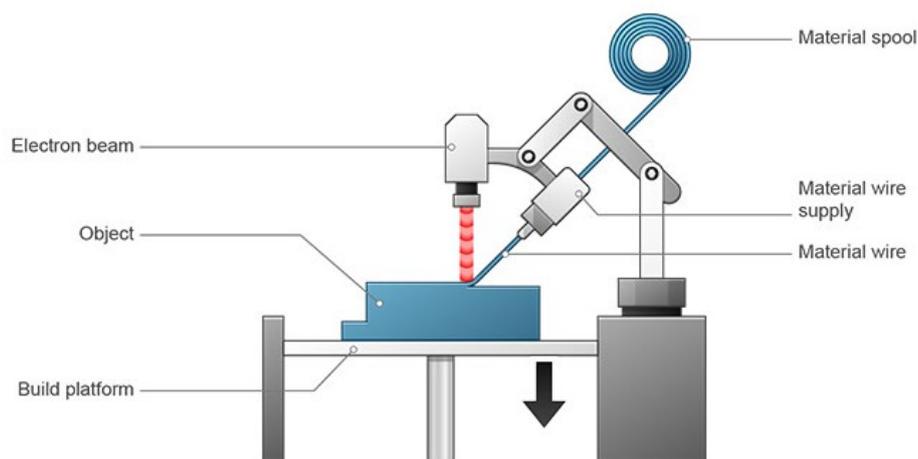


Fig. 2. Proceso de deposición directa de energía. Directed energy deposition.

Esta tecnología, en general se utiliza con tres finalidades distintas; al igual que los demás procesos de fabricación aditiva, se utiliza para generar objetos, aunque también se utiliza para reparar piezas dañadas y añadir partes o modificar una parte de un objeto ya existente; esto se debe a que generalmente todos los procesos DED permiten el movimiento libre de la boquilla con 4 o 5 ejes, de tal manera que pueden proyectar material sobre cualquier dirección.

Existen varios procesos categorizados como DED. Según el tipo de material de aporte, el tipo de energía aplicada u otros factores como el nombre comercial que la empresa que lo comercializa decide darle.

Materiales

Existen procesos que trabajan distintos materiales por DED, desde polímeros termoplásticos hasta metales o cerámicos, aunque generalmente se trabaja sobre metales. El rango de aleaciones metálicas utilizadas con este proceso abarca desde las aleaciones de acero (inoxidable y de herramientas), aleaciones de aluminio y de níquel. Al poder trabajar bajo atmósferas protectoras, también se producen piezas de titanio y aleaciones de este y aleaciones de cobalto.

Ventajas e inconvenientes

Las principales ventajas de la deposición directa de energía frente sus tecnologías competidoras, en el caso de procesado de metales, las tecnologías basadas en PBF (Powder Bed Fusion), fusión de lecho de polvo, son un mayor tiempo de deposición de material y la posibilidad de generar piezas de mayor tamaño que las que se obtendrían por PBF. Como se ha descrito con anterioridad, los procesos DED son idóneos para las reparaciones o modificaciones de piezas ya construidas. En el caso de materiales sensibles al aire, es necesario trabajar bajo una atmosfera adecuada; En este caso las tecnologías DED también aventajan a las PDF, ya que estas necesitan que toda la cámara de trabajo se encuentre en la atmosfera adecuada, mientras que algunas tecnologías DED añaden a la boquilla canales de gas que proyectan una atmosfera protectora solo sobre el baño de material (como una soldadura TIG), de esta manera solo se protege la parte necesaria evitando la necesidad de tener una máquina para soportar dichas atmosferas. Las principales desventajas del DED, están en su acabado superficial, más vasto que el generado por PBF, necesitando un mecanizado posterior. También presenta ciertas limitaciones con algunas geometrías complejas, sobre todo con partes huecas.

3. Material Extrusion

Descripción

Los procesos de fabricación aditiva por extrusión de material, como el de la Fig.3 [8], consisten en extrudir material fundido, depositándolo selectivamente según el desplazamiento programado del cabezal generando capas con la forma de hilo que se funde a través de una boquilla antes de ser depositado y posteriormente solidifica en la superficie de trabajo adhiriéndose al material contiguo. Inicialmente esta tecnología se conocía por el nombre de FDM (Fused Deposition Modeling), modelado por deposición fundida, ya que era el nombre que le dio la empresa que comercializó este proceso, Stratsys.

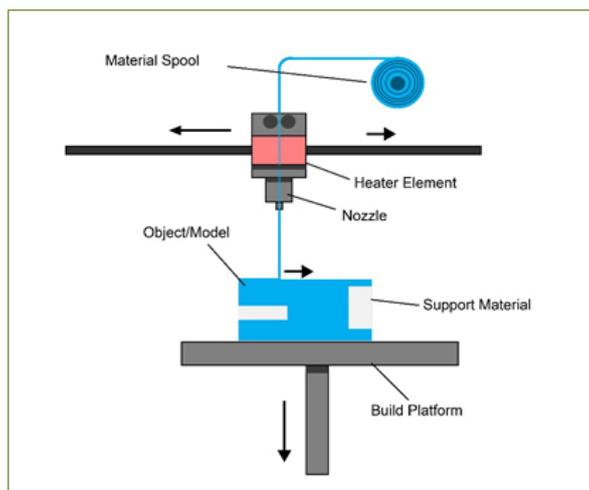


Fig. 3 Proceso de extrusión de material. Material extrusion o FDM.

Esta tecnología es la que tiene mayor popularidad fuera del ámbito puramente industrial debido a la comercialización de pequeñas impresoras, como la de la Fig. 4, que permiten su adaptación al ámbito del pequeño comercio, oficina e incluso doméstico. En el campo industrial, las impresoras basadas en este proceso son las que tienen menor coste.



Fig. 4. Impresora basada en extrusión de material empleada en el proyecto. Modelo Pruso i3 mk3s.

Materiales

Los termoplásticos son los materiales más utilizados para extrusión de material, aunque se ha investigado para adaptar el proceso a cerámicos y metales en forma de pasta. Los polímeros más comunes son el PLA, PC y ABS. Muchas impresoras permiten trabajar con un segundo material de apoyo, que se encarga de cubrir las zonas del área de trabajo donde se necesita una superficie sobre la que imprimir una nueva capa de material. Estos materiales de apoyo acostumbran a ser solubles en algún medio para su eliminación posterior, aunque en las impresoras más humildes el material de apoyo es el mismo que el de la pieza, por tanto, se necesitan operaciones de mecanizado posterior para eliminar dicho material.

Ventajas e inconvenientes

Una de las principales ventajas de esta tecnología es la capacidad de realizar figuras de geometrías complejas apoyándose en material de soporte, ya sea soluble o del mismo material. Al trabajar con materiales poliméricos su post-proceso es más sencillo. Es la tecnología de fabricación aditiva más económica, debido a la sencillez del mecanismo en comparación con otros procesos y la disponibilidad y bajo coste del material base.

Por el contrario, la resolución en el eje z (eje que forman la sucesión de las capas) es pobre comparado con otras tecnologías, haciendo necesario un trabajo de acabado si la pieza requiere una calidad superficial determinada, aumentando el tiempo y el coste del proceso.

4. Material Jetting

Descripción

Es un proceso con un funcionamiento similar a las impresoras de tinta sobre papel, que depositan tinta gota a gota sobre el papel. Este caso, un cabezal deposita material fluido gota a gota sobre una superficie, normalmente cera o polímeros fotosensibles, Fig.5 [9]. Una vez depositado el material, se polimeriza o cura mediante una fuente de calor o luz. Al ser un proceso basado en la deposición gota a gota, es difícil utilizar materiales cerámicos o metales, aunque existen investigaciones en esa línea.

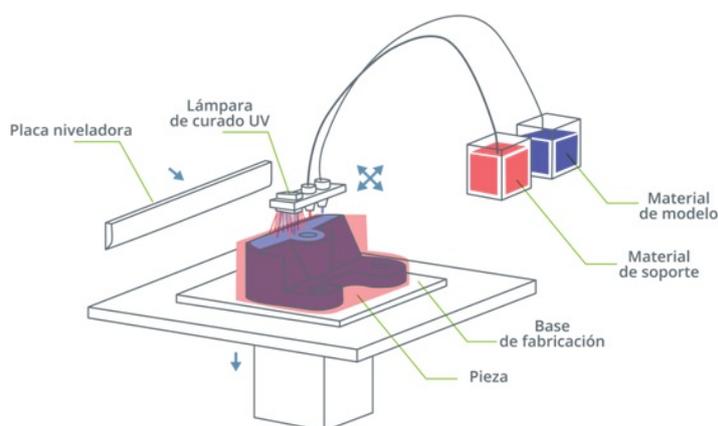


Fig. 5 Proceso de inyección de material. Material jetting.

La inyección de material permite impresiones con más de un material, ya sea por necesidad de un material de soporte para la construcción de la pieza o para ensamblar durante la impresión dos o más piezas de distintos materiales y así evitar procesos posteriores de ensamblado.

Materiales

Los materiales utilizados para la inyección de material son varios tipos de plásticos y ceras; los más típicos son el HDPE, PP, PMMA, ABS, entre otros.

Ventajas e inconvenientes

Entre las virtudes de este proceso está el alto nivel de acabado superficial de las piezas, haciendo prácticamente innecesarios los trabajos de acabado posteriores.

Esta particularidad hace de la inyección de material una tecnología idónea para el desarrollo de moldes para fundición a la cera perdida, ya que se consiguen crear piezas de cera con un alto nivel de exactitud respecto a la pieza final.

Por el contrario, existe poca variedad de materiales que pueden ser utilizados, solo algunos tipos de polímeros y ceras cumplen con los requisitos de las máquinas actuales. Además, debido al proceso y al material, las propiedades mecánicas del producto son algo pobres.

5. Powder Bed Fusion

Descripción

Las tecnologías PBF están basadas en el mismo principio que las primeras invenciones en el campo de la impresión 3D, un recipiente lleno de materia prima y un sistema de aplicación de energía que crea un sólido en la capa superficial del recipiente, una vez creada una capa de sólido, más materia prima recubre dicha capa y se repite el proceso. En el caso de la fusión de lecho de polvo, y su característica principal, es que la materia prima está en forma de polvo. Las fuentes de aplicación de energía son el láser o el haz de electrones. Un recipiente contiene polvo de un material, mediante una fuente de calor se funden selectivamente ciertas zonas de tal manera que el polvo se vuelve líquido y se une al polvo fundido adyacente, Fig.6 [10], una vez solidificado se obtiene una capa de material sólido, entonces, un mecanismo hace descender la superficie de trabajo y extiende otra capa de polvo virgen sobre la anterior.

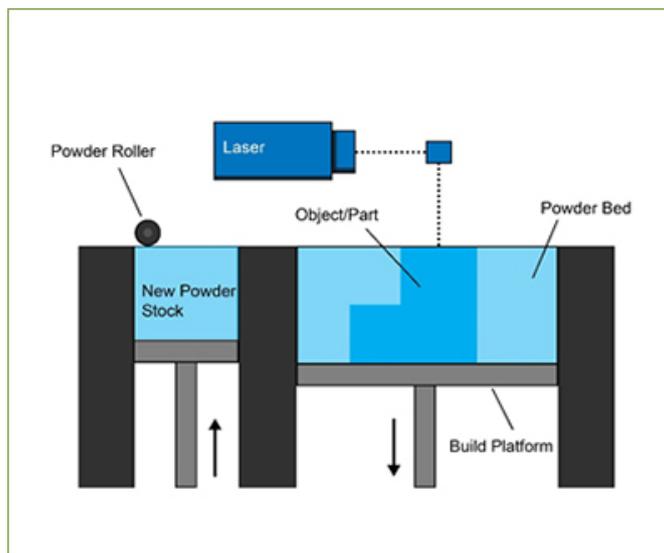


Fig. 6 Proceso de fusión de lecho de polvo. Powder bed fusion.

Se repite el proceso hasta que se obtiene el sólido proyectado. Como en los demás tipos de tecnologías de fabricación aditiva, a lo largo de la historia se han desarrollado distintos procesos basados en PBF, que han recibido distintos nombres; entre varios procesos encontramos el sinterizado selectivo por láser (SLS Selective Laser Sintering) de la empresa DTM, donde un láser sinteriza polvo de polímeros termoplásticos. Para metales, existe el proceso EBM (Electron Beam Melting) de la empresa ARCAM; en este proceso se utiliza un haz de electrones como fuente de calor para polvos metálicos. También está el sinterizado directo de metal por láser (DMLS Direct Metal Laser Sintering), desarrollado por la alemana EOS, donde el material base son polvos metálicos.

Materiales

Las tecnologías PBF permiten trabajar con un amplio rango de materiales, desde polímeros termoplásticos hasta metales. En el campo de los metales es la tecnología más utilizada para el desarrollo de nuevos componentes, por delante de las tecnologías DED. La mayoría de máquinas PBF están pensadas para trabajar bajo una atmosfera controlada, ya sea en vacío, como en las máquinas EBM, o bajo gas inerte; este hecho permite trabajar metales como el acero y metales y aleaciones de procesado más complejo, como las de titanio o cobalto.

Ventajas e inconvenientes

En comparación con otras tecnologías de fabricación aditiva que compiten con el lecho de polvo, esta, permite el desarrollo de componentes de alta complejidad geométrica, debido a que el propio polvo ejerce de material de soporte, de esta manera se facilita la construcción de, por ejemplo, parte huecas. Las tecnologías PBF permiten un gran nivel de acabado y una alta precisión geométrica, *Fig. 7* [11].

Su punto flaco es básicamente el tamaño de los componentes que se pueden obtener, ya que el tamaño del objeto depende fuertemente del tamaño del recipiente que contiene el polvo; para obtener grandes piezas sería necesario disponer de una máquina de grandes dimensiones, cosa que implicaría un coste muy elevado, mayores complicaciones técnicas y un elevadísimo consumo de polvo. En este aspecto, la tecnología DED, sale ventajosa ya que lo único importante es el cabezal, encargado de depositar el material, la energía y si fuera necesario, la atmosfera controlada.

Así que los requerimientos técnicos del sistema para poder generar piezas de grandes dimensiones son muy inferiores a las máquinas de lecho de polvo. Otra carencia es la imposibilidad actual de trabajar con más de un material y la dificultad de utilizar esta tecnología para la adición de partes a componentes ya creados, o para la reparación de piezas.

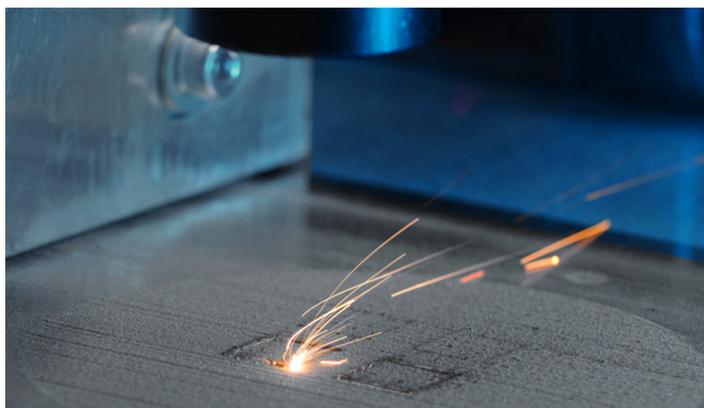


Fig. 7. Proceso DMLS. Aplicación de laser sobre la superficie de polvo

6. Sheet Lamination

Descripción

Los procesos por laminación de hojas se basan en la superposición de materiales en forma de lámina, juntados de varias formas dependiendo del material de las láminas, de tal manera que se obtiene un sólido completo en tres dimensiones.

Una de las primeras tecnologías de este tipo fue la impresión por laminación (LOM Laminated Object Manufacturing) donde una lámina de papel era cortada por láser con la forma deseada y se pegaba a la capa inferior con un producto adhesivo, *Fig. 8* [12]. Esta tecnología permite también trabajar con metales, donde una chapa metálica, se corta según la sección transversal y se adhiere a la inferior y luego a la posterior mediante remaches, adhesivo o por soldadura por ultrasonidos. El trabajo con metales generalmente implica un trabajo de mecanizado posterior para obtener la geometría deseada.

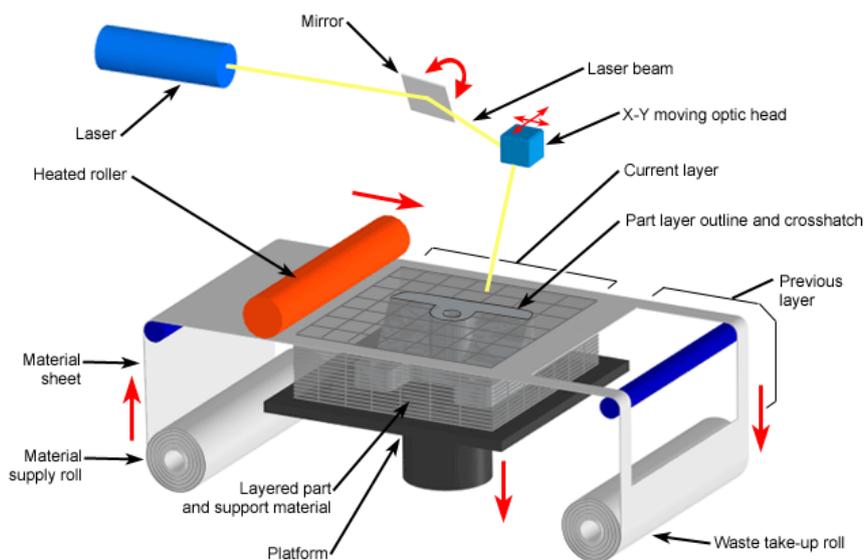


Fig. 8. Proceso de laminación por hojas. Sheet lamination.

Materiales

Se pueden obtener distintos objetos por laminación aditiva con diferentes materiales. Generalmente, cualquier material que pueda ser conformado en forma de lámina se pueden utilizar con este método. Uno de los más comunes y el primero en ser utilizado fue el papel. También existen máquinas que trabajan con metales, además existe la posibilidad de generar piezas multimaterial, ya que cualquier metal soldable puede ser utilizado, así que se pueden intercalar láminas de distintos materiales según las necesidades.

Ventajas e inconvenientes

Una de las ventajas principales es la velocidad, las capas se obtienen relativamente rápido ya que solo es necesario cortar por el contorno de la sección, sin necesidad de recorrer toda la superficie de esta como en las otras tecnologías. En las tecnologías que utilizan papel, sus propiedades mecánicas y físicas en general dependen fuertemente del adhesivo que se utiliza.

Los materiales laminados son altamente conocidos y es una técnica existente desde hace muchos años por tanto la obtención de la materia prima es más económica que para otras tecnologías, por ejemplo, las de base de polvo. La posibilidad de trabajar con más de un material, sobretodo en metales. Además, el tipo de unión utilizado en metales es en estado sólido, por lo tanto, se evita llevar el material a estado líquido y posterior solidificación; de esta manera se previenen los posibles defectos de solidificación o de la zona afectada térmicamente.

Su principal desventaja son los acabados, más bastos que en otras tecnologías debido al espesor de las capas. Esto hace necesario un proceso de acabado posterior, que en papel es más sencillo, pero en metales requiere más recursos. En la laminación con metales existe el problema de la porosidad; los posibles defectos superficiales de la lámina y de sus capas superior y/o inferior pueden provocar que la unión entre capas no sea completa, dejando huecos en el interior que podrían afectar a las propiedades finales de la pieza.

7. Vat Photopolymerization

Descripción

Dentro de las tecnologías que conforman todo el espectro de la fabricación aditiva, la que es considerada la primera por ser la primera en ser comercializada es la fotopolimerización, más conocida por estereolitografía, el nombre comercial dado al sistema patentado por Charles Hull y comercializado por la empresa 3D Systems. El proceso consiste en, mediante un haz de energía, generalmente láser o UV, curar o polimerizar selectivamente la superficie de un baño de polímero fotosensible. La Fig. 9 [13] esquematiza este proceso. Después, se cubre con polímero líquido la capa solidificada y se repite el proceso.

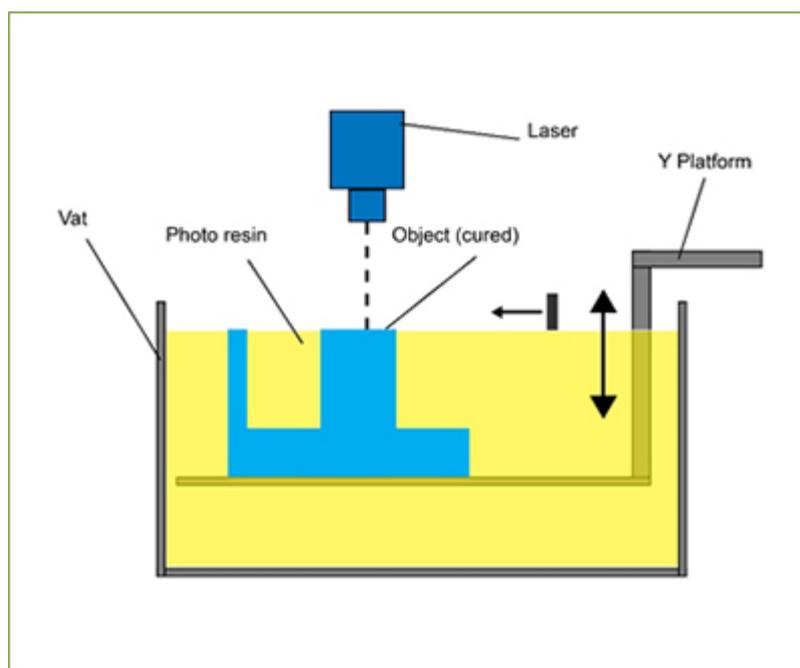


Fig. 9 Proceso de fotopolimerización. Vat photopolymerization.

Esta tecnología es utilizada para el desarrollo de prototipos y modelos. También es frecuente su utilización en el desarrollo de moldes para procesos posteriores, ya que las propiedades de la pieza terminada, permite que sea utilizada como patrón para generar moldes para colada. En el campo de la medicina se utilizan modelos generados por fotopolimerización ya que se pueden generar geometrías personalizadas y se utilizan para estudios de procedimiento antes de operaciones quirúrgicas, por ejemplo

Materiales

Actualmente, el abanico de materiales que pueden ser procesados mediante fotopolimerización es bastante reducido, y como se puede deducir del nombre de la tecnología, está limitado a los polímeros o resinas fotosensibles.

Ventajas e inconvenientes

Una de sus principales ventajas es la alta calidad del acabado superficial, y la precisión geométrica respecto al diseño. El proceso de impresión relativamente rápido y actualmente hay máquinas que permiten imprimir piezas de tamaño considerable, pudiendo llegar hasta los 200 kg. El mayor inconveniente es el precio del material base y la limitada variedad de estos; actualmente los polímeros y resinas utilizados tienen precios elevados en comparación con los materiales base de otras tecnologías. Otro de los inconvenientes, debido a que el material base es líquido, es que, para generar geometrías complejas, es necesario imprimir estructuras de soporte, cosa que en los procesos en base polvo no es necesario, por ejemplo. El trabajo de limpieza posterior es ligeramente alto. Otro inconveniente es que el proceso de polimerización a partir de un líquido puede generar defectos internos como porosidades, que afectan a las propiedades del componente. Muchas veces, es necesario un procesado posterior para mejorar las propiedades de la pieza.

2.2 Materiales empleados en F.A

Hoy en día el material más común utilizado para la impresión 3D es el plástico, (PLA, ABS, Nylon), pero se pueden utilizar aleaciones metálicas, cerámicas, partículas de madera, sal e incluso azúcar y chocolate para imprimir [4]. A continuación, se detallarán en más profundidad los materiales industrialmente más utilizados que son el PLA, ABS y Nylon y se comentará como se están introduciendo en el mercado nuevos materiales.

- **POLI (ÁCIDO LÁCTICO) (PLA)**

El PLA, es un polímero biodegradable cuyo monómero (ácido láctico) se obtiene a partir de recursos renovables como es el maíz, la celulosa, la caña de azúcar y la remolachas azucareras. Presenta propiedades similares a algunos de los materiales plásticos de uso común, tales como el polietileno (PE) o el policloruro de vinilo (PVC), a un precio competitivo.

El PLA es uno de los plásticos biodegradables que mayor crecimiento ha experimentado en los últimos años. Lo podemos encontrar en el mercado en objetos como cubiertos, platos, tazas, tapas, pajitas de bebidas, bolsas, films, envases de fruta fresca o vegetales, botellas y helados.

Después de su uso, los productos de PLA pueden ser degradados en sistemas de compostaje o reciclados ya sea química o mecánicamente, por hidrólisis en ácido láctico o reprocessando el material (triturado y transformación térmica), respectivamente.

Los envases de materiales biodegradables, tras su uso, en lugar de ser desechados con el resto de materiales plásticos, pueden ser tratados junto con los residuos orgánicos.

Estructura química

El PLA es un poliéster obtenido de la polimerización del ácido láctico, donde los monómeros iniciales son producidos por fermentación o síntesis química. El ácido láctico es una de las moléculas ópticamente activas más simples y existe como dos estereoisómeros: L(+) y D(-).



Fig. 1. Estructura química de los estereoisómeros del ácido láctico.

Los dos enantiómeros son producidos por hongos o por fermentación bacteriana (del género *Lactobacillus*), siendo ésta última la forma más frecuente de obtención de ácido láctico a nivel industrial. En la Fig. 10, se muestra la unidad repetitiva del PLA.

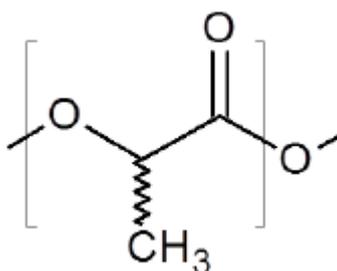


Fig. 2 Unidad repetitiva del PLA

Propiedades

Las propiedades del PLA se encuentran altamente influenciadas por la relación entre las dos formas isoméricas D y L que contienen y la masa molar. La mayor parte del ácido láctico sintetizado por vía biotecnológica, a partir de recursos renovables, se encuentra como L-ácido láctico. Por lo tanto, generalmente el PLA contiene mayor proporción del enantiómero L.

- Cristalinidad y transiciones térmicas

La temperatura de fusión y el grado de cristalinidad son dependientes de la masa molar, de la historia térmica del material y de la pureza del polímero. La capacidad de controlar la estereoquímica permite un control sobre la velocidad de cristalización y, finalmente el grado de cristalinidad, las propiedades mecánicas y las temperaturas de transformación del material.

A modo de resumen, en la Tabla 2, se muestran los valores de temperatura de transición vítra, temperatura de fusión, entalpía de fusión y cristalinidad del PLA enantioméricamente puro, PLA con distintos porcentajes de isómero D y estereocomplejos del PLA.

Tabla 2. Propiedades físicas (T_g , T_m , ΔH_m y X_c) de PLA con distintos grados de pureza.

	PLA (100% L o D)	PLA (98% L)	PLA (94% L)	sc- PLA
T_g (°C)	95	71	66	65-72
T_m (°C)	180	163	141	230
ΔH_m (J g ⁻¹)	93	38	22	102
X_c (%)	100	40	25	70

- Estabilidad térmica

El PLA tiende a ser afectado por diferentes métodos de proceso y por el ambiente de almacenaje lo que puede causar diferentes tipos de reacciones de degradación, interacciones o inmiscibilidad entre mezclas de componentes. Así una de las principales limitaciones del PLA es su inestabilidad térmica para el procesado.

- Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del PLA dependen de la estereoquímica, del peso molecular y del porcentaje de cristalinidad. Dependiendo de la proporción de D y L- ácido láctico se puede obtener PLA con una amplia gama de valores de rigidez, desde materiales blandos y elásticos a materiales de alta resistencia [14].

- **ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO (ABS)**

El ABS pertenece a una familia muy extensa y versátil de materiales poliméricos termoplásticos derivados del poliestireno (PS), que se obtiene por la combinación de tres monómeros distintos; (A) acrilonitrilo, (B) butadieno, (S) estireno [15].

Cada uno de los componentes que integran el ABS tienen una marcada finalidad en el copolímero:

- El acrilonitrilo contribuye de forma decisiva a un incremento de la resistencia química y de la dureza superficial.
- El componente estirénico contribuye a facilitar la procesabilidad de la mezcla y aportar alta resistencia mecánica y alta rigidez para ser empleado como plástico técnico.
- El butadieno, componente elastomérico, contribuye de forma decisiva a incrementar la tenacidad y resistencia al impacto del sistema.

La obtención de estos copolímeros puede llevarse a cabo de diferentes técnicas de polimerización, dando lugar a materiales con características distintas. Por otro lado, las características del ABS presentan una elevada variabilidad en función de la proporción de los diferentes monómeros, pero de forma general se pueden considerar las siguientes propiedades:

- Alta resistencia mecánica y rigidez.
- Elevada dureza y resistencia al rayado.
- Elevada resistencia al impacto incluso a bajas temperaturas.
- Estabilidad dimensional elevada en un amplio rango de temperaturas.
- Escasa absorción de humedad.
- Buena resistencia química.

- **NYLON**

El nylon es un polímero artificial que pertenece al grupo de poliamidas. Es un polímero termoestable que presenta propiedades específicas que lo aventajan como filamento de impresión 3D sobre los hasta ahora ya conocidos. Su alta resistencia junto con su elevada flexibilidad y durabilidad extrema en términos de posible rotura unido a un elevado rendimiento en los resultados, han llevado a que este material sea el futuro en la impresión 3D [16].

Aunque con esta fibra sintética se obtengan muy buenos acabados se debe tener en cuenta algunos inconvenientes importantes como la tendencia a encogerse, curvarse, la no biodegradabilidad.

• NUEVOS MATERIALES

Por otro lado, los investigadores en este campo tienen un gran interés en los nuevos materiales adecuados para las aplicaciones de impresión 3D. Aunque hay una gran cantidad de componentes de plástico / polímeros disponibles para la AM, algunos materiales específicos atraen mayor atención de la industria como se ilustra en la Fig. 10. En esta sección, se discutirán en detalle las propiedades de los materiales prospectivos que probablemente se desarrollarán en la era de Industria 4.0 y se identificarán sus usos potenciales [17].

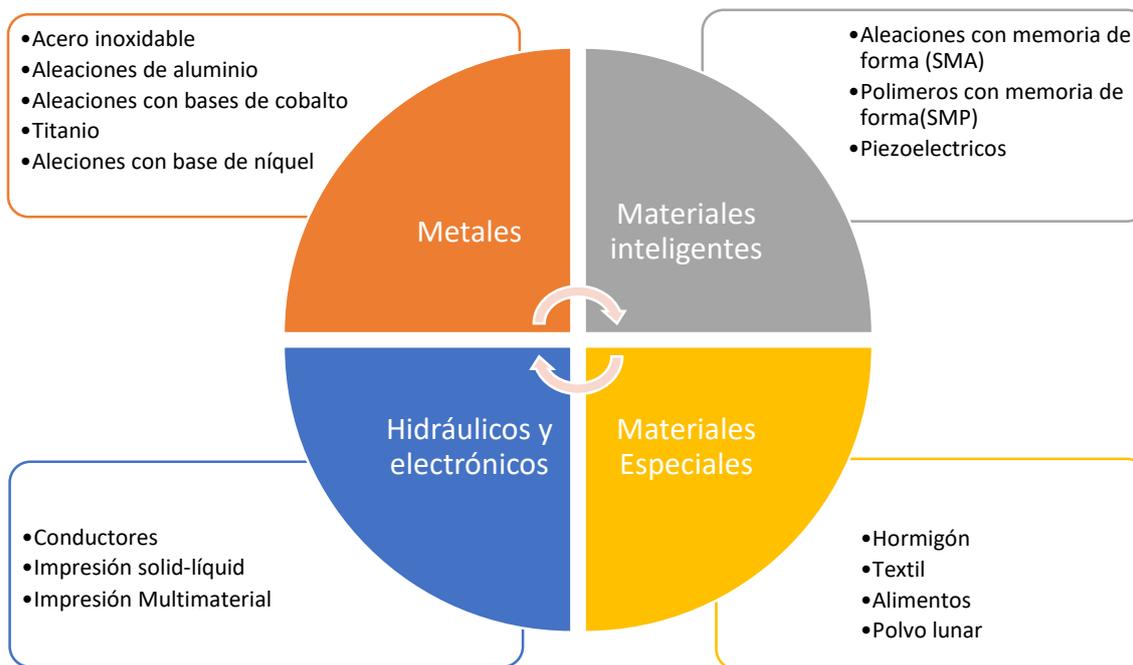


Fig. 10 Descripción general de los materiales de investigación actuales para AM en la próxima era.

Fabricación aditiva con metales

Debido a sus características mecánicas favorables, los metales son quizás los materiales más comunes en ingeniería. Como consecuencia, la industria de la impresión 3D busca soluciones novedosas para crear piezas metálicas que puedan sustituir a los ya utilizados en producción convencional. Los nuevos desarrollos en la tecnología de impresión 3D dan lugar a los intentos hacia el campo de investigación activa: fabricación de aditivos para metales (*Metal additive manufacturing, MAM*).

Recientemente, muchos componentes metálicos se pueden fabricar mediante técnicas de AM que utilizan aluminio, titanio, acero inoxidable, etc. como el componente principal del proceso. La mayoría de las impresoras 3D comerciales de metal emplean polvos metálicos, mientras que otras también utilizan mezclas de materiales. Además, la microestructura resultante de la AM tiene una gran influencia en las propiedades mecánicas de las piezas, como el comportamiento de tracción / fatiga. Por lo tanto, los problemas relacionados con la microestructura, la composición de las fases y el tratamiento térmico han atraído la atención de la comunidad de investigadores de AM recientemente [17].

Materiales inteligentes

Las estructuras inteligentes se han identificado como aquellas que alteran su forma o propiedades materiales como resultado de condiciones expuestas externamente. Debido a sus propiedades cambiantes con el tiempo, también se han clasificado como materiales de impresión 4D.

La introducción de materiales inteligentes a la industria de AM proporciona características ventajosas como la reconfiguración de la estructura impresa y el logro de la propiedad material deseada en el tiempo. En general, las aleaciones con memoria de forma (SMA) y los polímeros con memoria de forma (SMP) se implementan como material de impresión 4D para producir partes funcionales de sistemas robóticos blandos, estructuras que evolucionan a sí mismas y aplicaciones de plegado secuencial controlada.

Las aleaciones con memoria de forma se tienen en cuenta por sus propiedades básicas de super-elasticidad y recuperación de forma térmica. Algunas SMA como el níquel-titanio se han empleado extensivamente en áreas de aplicación que van desde implantes biomédicos hasta dispositivos microelectromecánicos. Como otra rama de los materiales inteligentes, los SMP también son sensibles a estímulos externos, como la luz, la humedad y el gradiente de temperatura. Debido a la biocompatibilidad de SMP, hay un interés creciente hacia sus aplicaciones a la ingeniería médica. El procesamiento de luz digital de materiales SMP también se ha utilizado en la industria de la confección y aplicaciones de joyería. Además, los materiales piezoeléctricos se consideran como otra alternativa notable para la impresión 3D. Junto con la recolección de energía y los fines de actuación, se ha investigado la nanofabricación 3D de dichos materiales. En la era de la Industria 4.0, todos estos sectores probablemente usarán AM con las mejoras adicionales en la calidad de las piezas producidas.

Uno de los campos de aplicación reciente de los materiales inteligentes es la robótica suave, donde los investigadores han descubierto que los componentes funcionales con polímeros electroactivos pueden estimularse externamente para alterar su rigidez de manera controlada.

Como una implicación futura, los materiales inteligentes pueden ser factibles para ambientes extremos como el océano profundo o el viaje espacial activándolos por agua o luz UV, respectivamente.

En resumen, la tecnología de impresión 3D puede acelerar la introducción de materiales inteligentes. Las posibles aplicaciones futuras serían estructuras de autoensamblaje, configuraciones compactas, mecanismos activados por estímulos en entornos extremos y materiales programables, que se utilizarán fácilmente en la próxima era. Sin embargo, es necesario realizar más investigaciones sobre materiales inteligentes sobre nuevas combinaciones de materiales, procesos de fabricación innovadores y mejoras de diseño [17].

Sistemas hidráulicos y electrónicos

Actualmente se está investigando el empleo de multimateriales en impresión 3D, donde se introducen sistemas hidráulicos imprimibles en los que se imprimieron simultáneamente materiales sólidos y líquidos. El modelo de deposición fundida (FDM) con múltiples boquillas se ha utilizado para fabricar estructuras sólidas que consisten en materiales de soporte rígidos y flexibles y para rellenar al mismo tiempo se utiliza un fluido. La impresión 3D puede ofrecer una forma sencilla de fabricación robótica instantánea y sistemas funcionales listos para usar.

Además, en esta nueva era, la introducción de sustancias conductoras para AM permite que se incorporen circuitos electrónicos en el objeto impreso. En consecuencia, la integración total del circuito en el objeto que lo acompaña (los llamados componentes electrónicos integrados) se convierte en un tema importante. En un estudio de vanguardia sobre componentes funcionales impresos en 3D realizado por *E. MacDonald* y *R. Wicker* se mencionan otras aplicaciones de la electrónica impresa, como quad-cópters, sensores táctiles estirables y micro baterías. Los resultados de tales trabajos revelan el potencial de AM para fabricar objetos inteligentes para campos versátiles.

En conclusión, AM ofrece oportunidades para la fabricación de productos junto con su electrónica. La eficiencia de empaque de los sistemas electrónicos posiblemente se puede mejorar en la era de la Industria 4.0, permitiendo diseños más innovadores creados en un solo paso con la tecnología de impresión de materiales múltiples [17].

Materiales especiales

En primer lugar, la discusión reciente sobre la construcción aditiva se centra en la creación de edificios e infraestructuras. Como consecuencia, las investigaciones sobre hormigón y otros materiales específicos forman la base para la tecnología de impresión en aplicaciones de ingeniería civil.

Como una rama diferente, las prácticas de AM en la industria de la confección y joyería han aumentado con los desarrollos en la impresión textil. Algunas ventajas de AM en la industria de la moda incluyen un proceso de diseño rápido (es decir, un tiempo de fabricación corto) y costos reducidos asociados con el embalaje y el transporte.

Otro material extraordinario para la impresión 3D son los componentes comestibles en la industria alimentaria. Recientemente, se han examinado varias aplicaciones con la textura superficial deseada y el contenido nutricional múltiple utilizando las técnicas de AM basadas en extrusión. Aunque aún no se han superado los desafíos en la productividad, durabilidad y capacidad de servicio del material comestible; la fabricación aditiva puede tener un futuro en la fabricación de alimentos.

Como un tema inusual, hoy en día, es la utilización de esta tecnología en la exploración espacial. Es decir, hay algunos estudios que investigan la impresión 3D de *Moondust* para construir colonias espaciales donde se discute la factibilidad de construir hábitats e infraestructuras en la Luna con las capacidades de la tecnología AM. Además, se ha propuesto hacer un buen uso de los recursos insitu de Marte como material de impresión 3D para futuras misiones de exploración (tripuladas) con el fin de reducir los recursos transportados desde la Tierra.

Para resumir, algunos materiales especiales y procesos asociados se explican brevemente con sus implicaciones en la construcción, alimentos, prendas de vestir e incluso en la industria aeroespacial. AM ofrece un gran potencial para ser explorado en la próxima era, aumentando la competitividad en una amplia variedad de industrias [17].

2.3 Ventajas y retos de la F.A.

Las principales características que distinguen el proceso de fabricación de sólidos por adición de capas de material (AM) de cualquier otro proceso de fabricación industrial las podemos resumir en dos [18]:

- **La complejidad geométrica que se debe conseguir no encarece el proceso:** características como la esbeltez, un vaciado interior, canales internos, los espesores variables, las formas irregulares e incluso la reproducción de la naturaleza (persiguiendo ergonomía, aerodinámica, hidrodinámica...) son retos que los métodos convencionales de fabricación de piezas no han resuelto más que con aproximaciones, ensamblajes o por medio de procesos de muy alto coste, y que para el AM son, en muchas ocasiones, propiedades muy poco relevantes a la hora de fabricar una pieza.
- **La personalización no encarece el proceso:** AM permite fabricar productos, sin penalizar el coste, independiente de si se tiene que fabricar un determinado número de piezas iguales o todas distintas, lo que facilita la personalización, que es una de las principales tendencias actuales en el desarrollo de productos de alto valor añadido; la personalización en masa es uno de los paradigmas que persigue la industria en países desarrollados y que se considera clave para su sostenibilidad.

Estas dos características se pueden traducir en ventajas en muchos sectores industriales, que hacen que el AM sea el proceso más competitivo para la fabricación de piezas en muchas aplicaciones. De hecho, permite materializar ejecuciones que son simplemente imposibles mediante cualquier tecnología de fabricación en diversas fases de la cadena de valor industrial:

1. Desarrollo de nuevos productos (modelos conceptuales, prototipos...)
2. Obtención de útiles, patrones, moldes...en el proceso de industrialización y pre/series.
3. Producción de productos finales.

La fabricación por capas ha hecho que las tecnologías que usan este principio tengan algunas ventajas importantes frente a las tecnologías de fabricación sustractiva o frente a las tecnologías de conformado.

2.3.1 Ventajas de la fabricación aditiva

Ventajas asociadas a los productos que hay que fabricar

- I. Productos que requieren de una gran complejidad de forma.

Paradójicamente, mientras una geometría compleja suele suponer un aumento del coste si se siguen procesos convencionales, cuando se aplica AM puede suponer incluso un abaratamiento o simplificación. Estas nuevas capacidades de ejecución geométrica habilitan un diseño que pueda jugar con distintas composiciones tridimensionales del material, a la hora de concebir un producto y no sólo por una cuestión estética, sino que a veces permite actuar sobre propiedades químicas, mecánicas o eléctricas y adaptar un comportamiento a las necesidades estrictamente necesarias y requeridas en cada caso (resistencia, capilaridad, aerodinámica, conductividad).

II. Productos aligerados.

La complejidad geométrica tiene una aplicación especialmente destacable en la reducción del peso de un objeto, por medio de estructuras internas huecas o jugando con la densidad de los materiales. La AM permite materializar gradientes de porosidad en un mismo material, aligerando solo aquellas partes del producto que el diseñador estima que sufrirán menos esfuerzos.

III. Productos multimaterial.

La AM puede fabricar aportando simultáneamente varios materiales en un mismo sólido, para así seguir superando limitaciones actuales en la relación/resistencia mecánica o aportando funcionalidades nuevas o abaratando costes. Es cierto que también existen técnicas conformativas de sobre/moldeo, que pueden unir varios materiales en una misma pieza, pero la distribución multimaterial en todo el volumen es mucho más limitada, y las zonas de interconexión suelen ser conflictivas por el distinto comportamiento (mecánico, térmico, dilatación...) de ambos materiales.

IV. Productos ergonómicos.

La absoluta libertad geométrica que confiere el AM a sus productos es la adaptación de las formas a la biomecánica humana, de manera que los diseños alcancen una mejor interacción con el usuario sin necesariamente afectar los costes de fabricación. Además, por la característica previamente citada de la personalización, esa ergonomía en el diseño puede adaptarse no solo a unas tallas estándar, sino exactamente a las particularidades antropométricas de cada individuo.

V. Mecanismos integrados en una misma pieza.

Al poder integrar distintas geometrías y materiales en un mismo sólido, se puede conseguir un mecanismo totalmente embebido en la pieza en la que debe trabajar, sin necesidad de armados y ajustes posteriores. Esta particularidad no se da en todas las tecnologías de AM y principalmente se puede conseguir en aquellas que no necesitan soporte para su fabricación.

VI. Acceso a nuevos nichos de mercado.

El avance de las técnicas de AM, cada vez más sofisticadas y precisas unido a la imaginación de los diseñadores, ha permitido ir descubriendo ya no solo nuevas soluciones a productos actuales, sino aplicaciones radicalmente nuevas e incluso modelos de negocio basados en estas tecnologías.

Ventajas asociadas a los procesos de ejecución

I. Reducción del time to market de nuevos diseños.

La aplicación de AM a la producción rápida de prototipos ha permitido, ya hace años, reducir los errores de comunicación entre los distintos participantes en un nuevo diseño y acelerar su salida al mercado. Se puede disponer de una técnica de fabricación para materializar el producto final, ya no como prototipo intermedio, reduciendo drásticamente muchas de las fases actuales de lanzamiento y validación, así como flexibilizar su adaptación a las continuas demandas en cambio constante de dicho mercado.

II. Productos con series cortas.

La fabricación permite reducir los lotes de fabricación, llegando incluso a la serie unitaria, sin apenas costes extras de fabricación, al prescindir de utillaje, lo que supone una ventaja absoluta respecto a métodos de fabricación sustractivos y/o conformativos.

III. Reduce errores de montaje y por lo tanto los costes asociados a ellos.

La integración de componentes puede permitir la fabricación de una sola vez del producto acabado, evitando procesos de ensamblaje de componentes, reduciendo además posibles errores durante el proceso productivo.

IV. Reducción de costes de inversión en utillaje.

La posibilidad de implementar un modelo de negocio donde el producto no esté ligado a utillajes supone no solo gran flexibilidad de adaptarse al mercado, sino que se consigue una reducción o eliminación de costes asociados (fabricación del utillaje, paradas por cambios de referencia, mantenimiento e inspección), y de muchos procesos intermedios.

V. Procesos híbridos.

Una opción que no se debe olvidar es combinar procesos AM con procesos convencionales (sustractivos y/o conformativos), para aprovechar las ventajas de ambos.

2.3.2 Limitaciones de la fabricación aditiva

A pesar de los evidentes avances que puede aportar a la industria por sus indiscutibles ventajas, existen limitaciones que hacen que las tecnologías AM no se hayan implantado aún de manera generalizada en muchos sectores.

Dichas limitaciones son, sin duda, superables, y constituyen retos para la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación que actualmente están siendo abordados por equipos de investigadores y empresas en todo el mundo.[19]

A continuación, se describen las limitaciones más destacadas en el proceso de AM:

I. Disponibilidad de materiales

La gama disponible para aplicar técnicas de AM es inferior a la que se puede trabajar por métodos sustractivos y/o conformativos, y además el coste de adquisición de material por unidad de medida, suele ser también bastante superior.

Estos problemas de disponibilidad y coste de la materia prima son inherentes a los bajos volúmenes de consumo actuales, ya que, debido a la baja demanda en algunos procesos, no se justifican las inversiones necesarias de los productores para obtener nuevos materiales además del alto coste unitario que supone el nuevo desarrollo de materiales, siendo estos motivos por lo que se disuade de un aumento del consumo. Disponer de nuevos materiales que satisfagan requisitos concretos de la industria y los consumidores es un aspecto crítico para el futuro desarrollo de AM.

II. Acabado superficial de las piezas y velocidad de fabricación.

Estos dos parámetros están relacionados directamente ya que la velocidad condiciona el acabado de las piezas. El incremento de velocidad disminuye el acabado superficial de la pieza, aunque el acabado superficial se puede mejorar disminuyendo el espesor de las capas, sin embargo, actualmente este espesor está limitado por las características de las máquinas y por el tiempo de fabricación, mientras menor es el espesor de capa mayor será el tiempo de impresión.

III. Calidad del producto y repetitividad.

Algunas tecnologías AM presentan problemas de repetitividad y capacidad de proceso, es decir, a veces es difícil garantizar la misma estabilidad dimensional (dureza, elasticidad, carga de rotura...).

Los principales causantes de estas desviaciones dimensionales en las piezas son las tensiones que se generan entre las diferentes capas, una vez se ha fabricado la pieza, ya que se producen pequeñas contracciones del material al enfriarse en los procesos térmicos.

IV. Tamaño limitado de piezas.

Actualmente en los procesos AM existe la limitación relacionada con la alimentación de material, por ejemplo, en piezas de material plástico se puede llegar a trabajar hasta con dos metros. Por otro lado, es importante destacar que en el caso de las piezas metálicas la longitud de material que podría emplearse equivale a un cubo de 500 mm.

V. Coste maquinaria.

De forma análoga a cuanto sucede con el coste de materia prima por lo limitado del mercado actual, el coste de la maquinaria supone una barrera de entrada. Aunque hay una amplia gama de precios en función de la aplicación final del producto, del tipo de tecnología AM que hay que emplear y de la calidad que se requiera para cada caso. La tendencia es que esta maquinaria vaya reduciendo su coste al ir introduciéndose poco a poco en la industria y se alcancen economías de escala. El factor que más influye en el coste de las piezas fabricadas es precisamente el precio/máquina que hay que repercutir en la fabricación de cada unidad.

VI. Diseño y proceso.

A la hora de fabricar una pieza, es indispensable encontrar el punto más apto para evitar los soportes, conseguir la mejor calidad superficial, el menor tiempo de fabricación, la mejor posición para limitar las tensiones internas y deformaciones y la disminución de problemas de roturas de los soportes durante la fabricación.

Para un control más ajustado del proceso se requieren investigaciones más profundas, con el objetivo de poder determinar bien las relaciones entre todos los parámetros, para así poder prever las consecuencias que la temperatura de la pieza, los soportes, la plataforma, las tensiones y sus dilataciones durante la fabricación tienen en las deformaciones y dimensiones finales de la pieza. Este conocimiento podrá llevar incluso a introducir modificaciones en el diseño, de forma que se corrijan las desviaciones durante el proceso de fabricación y la pieza final corresponda a lo deseado.

2.4 Termoconformado

Originalmente, la disponibilidad de planchas de materiales termoplásticos dio lugar a la idea de construir moldes hembra, emplazar sobre ellos una plancha de estos materiales, fijarla de modo que el hueco entre molde y pieza fuese estanco, calentarla hasta una presión similar a la temperatura de reblandecimiento y hacer el vacío en dicho hueco de modo que el material se estire y se adapte a la superficie del molde. Una vez fría la pieza, se extrae, se corta el material en exceso y se obtiene una pieza acabada.

Como alternativa, en lugar de aplicar vacío entre el molde y lámina, puede aplicarse presión sobre esta para obtener un resultado similar, o pueden combinarse ambas técnicas para embutidos profundos.

Dado que se produce un estirado de la lámina, puede suceder que el adelgazamiento de la misma se produzca en zonas no deseadas, además de que puede ser preciso obtener un moldeado menos regular o una gran profundidad de embutido.

Con este objetivo, se han desarrollado técnicas de pre-estirado por diversos medios, punzón o soplado previo, que permiten obtener mayor regularidad de espesor.

La adaptabilidad del proceso a las grandes series especialmente cubetas de pequeño tamaño para la industria alimentaria ha hecho que se desarrollen máquinas de moldeo secuencial con moldes de cavidades múltiples, sistemas automatizados de alimentación y transporte de la lámina y de troquelado y apilado de las piezas.

La variedad de materiales con que pueden fabricarse los moldes, que va desde la escayola reforzada con fibra de vidrio al acero, con especial preferencia por el aluminio, dados su conductividad térmica y fácil mecanizado, hacen a estos procedimientos especialmente adecuados para series cortas, partidas piloto e incluso prototipos. La velocidad de moldeo depende fundamentalmente del ciclo térmico. Cada tipo de material y cada grado de embutido, hacen que se deba trabajar en una zona alta o baja ventana térmica de cada polímero.

Optimizar materiales como el PP en el intercambio térmico supone reducir el ciclo total de tiempo que se precisa utilizar.

Métodos de termoconformado

El sistema más simple es el estirado de una lámina en estado semiplástico sobre un molde. A medida que la lámina toca con la superficie del molde, el estirado se detiene y como resultado las partes de la lámina que tocan el molde, en primer lugar, tienen un espesor mayor que el resto. Si el estirado es pequeño, no queda comprometida la integridad de la pieza, por tanto, es el procedimiento más usado en el envase del tipo blíster (que significa ampolla) a partir de una lámina delgada suministrada en rollo.

1. Conformado de una sola etapa

Si se precisa un grado elevado de estirado o se utiliza una chapa gruesa no es posible usar el sistema anterior.

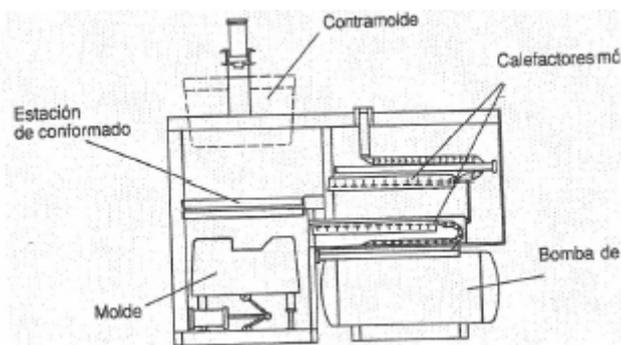


Fig. 11. Esquema para el proceso de conformado en una sola etapa.

Existen cinco métodos que realizan el conformado en una sola etapa:

- a. Conformado por adaptación la lámina caliente se baja sobre el molde macho o se hace subir este de modo que se adapte a su forma. La adaptación se complementa haciendo el vacío entre el molde macho y la lámina aplicando sobre ella presión de aire. Los productos de este proceso presentan un espesor grande en el fondo que va disminuyendo hasta ser mínimo en los bordes.
- b. Moldeo por vacío: la lámina se fija sobre el borde del molde hembra haciendo luego el vacío como se ha indicado inicialmente. En contraste con el método anterior, el espesor de la pieza es mayor en los bordes y mínimo en los cantos de la parte inferior.

- c. Formado de moldeo por vacío, sobre la lámina se aplica además aire comprimido hasta 1,4 mpa, por lo que el sistema precisa de una cámara cerrada superior. Este procedimiento se utiliza para conformar lámina de pequeña galga que se suministran en rollo o para transformar lámina de gran espesor en piezas con detalles superficial fino.
- d. Libre soplado. Se aplica aire comprimido entre una cámara que substituye al molde, inexistente en este caso, y la lámina para obtener la pieza. A medida que la burbuja, cuya altura se controla mediante una fotocélula. Dado que la burbuja formada de la lámina no toca ningún elemento metálico, no tiene diferencias de espesor ni marcas excepto en las cercanías del marco de fijación, que si que presenta irregularidad. El aire enfría la burbuja para dar rigidez a la pieza. El sistema se utiliza extensamente.
- e. Molde y contramolde. Utilizado para conformar piezas a partir de polímetros relativamente rígidos, como la espuma de PS. Puede aplicarse vacío al molde para ayudar al conformado, aunque las presiones de cierre son de alrededor de 0,35 mpa. Si se aplica 1 mpa puede producirse además un cierto movimiento del material.

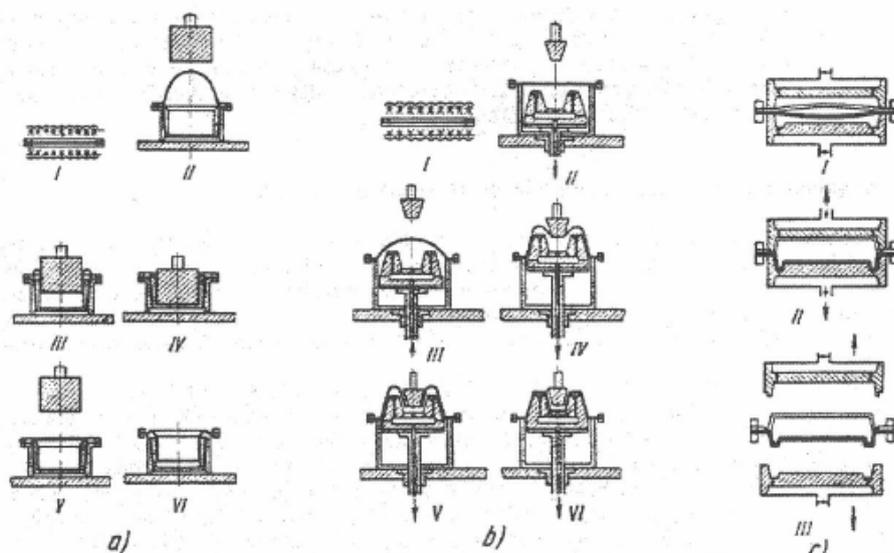


Fig. 12. Esquema de operaciones:

a) moldeo de artículos profundos, b) moldeo combinado, c) moldeo bilateral

2. Conformado en etapas múltiples

El principal inconveniente de los métodos descritos es la dificultad para controlar el espesor en piezas complejas que presenten cantos con radios reducidos o un embutido profundo, especialmente cuando se conforman planchas de un espesor importante. Por ello se ha desarrollado métodos con más de un paso, siendo habitualmente el primero una forma de estiramiento de la lámina.

Existen numerosas variantes que se describen de forma resumida, con gráficos para facilitar su comprensión.

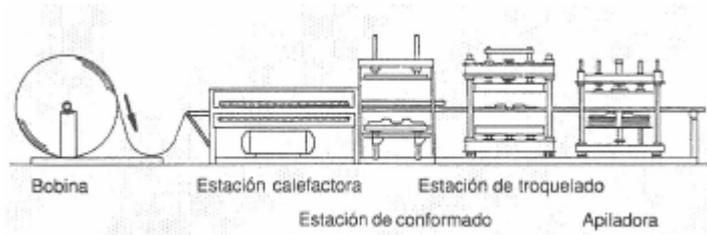


Fig. 13 Esquema del proceso para conformado en etapas multiples.

1.- Estirado de burbuja: Se forma una burbuja como se ha descrito antes y un molde macho descende a continuación. Al cerrarse sobre los bordes de la lámina, se aplica vacío entre ambos y presión de aire en la cámara inferior.

2.- Vacío con respaldo: de modo inverso al anterior, la burbuja se forma mediante vacío entre la lámina y la cámara inferior. El molde macho descende y completa el conformado, efectuándose el vacío entre éste y la lámina y aplicando aire comprimido entre ésta y la cámara.

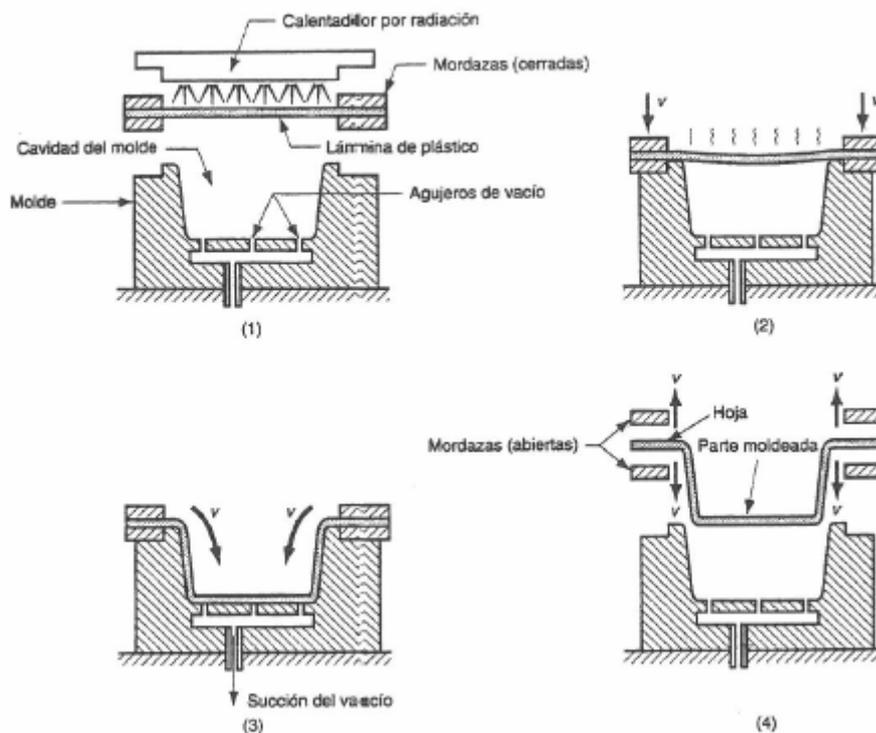


Fig. 14 Etapas del proceso de conformado en etapas múltiples. Variante de vacío con respaldo.

3.- Vacío con burbuja: se utiliza un molde hembra y se aplica aire a presión entre el molde y la lámina. Una vez formada la burbuja, se hace el vacío entre ésta y el molde.

4.- Vacío asistido con pistón: para asegurar el espesor del fondo y sus aristas, un pistón macho con la contraforma de éstos descende sobre la lámina hasta contactar con la cavidad hembra, entre las cuales se aplica el vacío para completar el moldeo.

5.- Presión asistida con pistón combinando el método anterior con una cámara superior. Este sistema aplica presión de aire sobre la lámina y el molde hembra lleva taladros de ventilación que pueden o no conectarse a una bomba de vacío.

6.- Presión asistida con pistón con estirado inverso: como en el método anterior, pero con un paso previo de formación de burbuja con aire a presión desde el molde inferior, hasta que ésta toca al pistón, que desciende entonces hasta el contacto con el molde hembra.

7.- Vacío con burbuja asistido con pistón: como en el método anterior, pero sin que exista cámara superior para aplicar presión.

8.- Formando a presión con inmersión de burbuja: en este caso se utiliza, como en el de vacío con respaldo, una cámara inferior, que permite formar la burbuja, y un molde macho superior que desciende en contacto con ésta, completándose el moldeo con presión desde la cámara.

3. Otras variaciones.

Algunos tipos de plásticos tienen características que han hecho necesario desarrollar otras técnicas.

El conformado con lámina apoyada se utiliza para moldear láminas muy orientadas (PS) o sensibles al calor (PP, PE), que se calientan apoyadas sobre una chapa porosa. Al alcanzar la temperatura de moldeo, se aplica la lámina contra el molde hembra aplicando aire comprimido a través de los poros de la chapa o se hace el vacío entre lámina y molde.

El conformado por deslizamiento, la lámina caliente no se sujeta fuertemente con el marco de cierre de modo que, al aplicar presión diferencial, se desliza sobre el borde y hacia adentro de la cavidad. En un momento dado, se aumenta la fuerza de cierre y se completa el moldeo por estiramiento de la lámina. El proceso es similar al embutido profundo de chapa metálica con pistón.

Las láminas de plásticos que se rasgan con facilidad (PET, PA) se conforman mediante moldeo con diafragma, en el que la lámina se apoya sobre una membrana gruesa de neopreno caliente, dispuesta en la cara opuesta a la cavidad del molde. Al introducir presión entre la membrana y la cámara inferior, se obtiene un estirado muy regular y se hace posible una embutición profunda.

El moldeo de láminas gemelas es una técnica que compite con el moldeo rotacional si se utiliza para láminas gruesas. Dos láminas se calientan en paralelo y, al llegar a la estación de soplado y/o vacío, se juntan por sus bordes mientras que se introduce entre ambas un microtubo de soplado, por medio del cual se suministra aire comprimido que hace conectar a ambas láminas con los moldes hembra enfrentados. Las piezas huecas así producidas suelen tener una profundidad limitada y pueden rellenarse con espuma de PUR para darles mayor consistencia.

Otra técnica similar se aplica al envase, permitiendo la recuperación del desperdicio de recorte de las distintas películas de plásticos que se precisan para conferir propiedades diferenciadas de estructura y barrera. Los materiales de barrera más efectivos son plásticos que han de formar el envase, alimentadas en rollos, pasan individualmente por calentadores dispuestos en sándwich y se moldean luego conjuntamente.

A la salida del molde se troquelan y separan las piezas, que están adheridas por contacto, y la membrana de películas sobrantes se separa y se enrollan individualmente las distintas películas para su recuperación.

Maquinaria de termoconformado

Desde el punto de vista de la maquinaria y equipo, el proceso de termoconformado puede analizarse según:

- La fuente de calentamiento.
- La estación de conformado, incluyendo el bastidor de la máquina, la mesa de conformado, el sistema de arrastre el de expulsión.
- El sistema de vacío y presión de aire.
- El marco de estirado de la lámina y el mecanismo de transporte.
- El sistema eléctrico o electrónico para los automatismos.
- El equipo adicional (manejo de la lámina, ajuste, recorte)

Calentamiento

La temperatura de la lámina debe llegar a la óptima con una tolerancia de +/- 5°C y durante el transporte a la estación de moldeo no debe caer más de 5° a 10 °C. Las distintas técnicas incluyen:

- Alambre de calefacción de Ni/Cr
- Barras de resistencia metálicas
- Radiadores cerámicos
- Placas radiantes calentadas por gas.
- Calentadores de cuarzo en forma de placa o varilla
- Lámparas calentadoras.
- Placas de cristal de cuarzo.

La temperatura superficial del calentador se controla mediante termopares o termistores y el calentamiento de la lámina se establece en relación al tiempo, generalmente por iteración. Los alambres de calefacción y las barras de resistencia son económicos, pero se deterioran rápidamente por oxidación. Los calentadores de cuarzo son muy eficientes y no se deterioran, pero son costosos. Se prefieren para temperaturas altas y necesidades de calentamiento selectivo por zonas.

Aunque el calentamiento por infrarrojos es el más frecuente, algunas láminas pueden calentarse por contacto con una placa metálica caliente, o por convección en un horno con circulación de aire. El calentamiento por energía de radiofrecuencia (RF o microondas) requiere que el material absorba estas frecuencias, como en el caso del PVC.

El tiempo preciso para calentar el material puede determinarse por la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{c\gamma(t_2 - t_1)\delta^2}{1,15 \times 10^3 \lambda \Delta t}$$

En la cual:

c es el calor específico del material, julios/ (kg-grad);

γ el peso específico del material, N/m³;

t_1 la temperatura inicial, °C;

t_2 la temperatura de reblandecimiento, °C;

δ el espesor de la lámina, m;

λ la conductividad térmica, w/(m-grad);

Δt la diferencia de temperaturas en las superficies opuestas de la lámina, °C.

Puesto que en la expresión indicada hay varios valores variables (t_2 , Δt , y λ), el tiempo se calcula utilizando el método de aproximación sucesiva. En la práctica se emplean nomogramas especiales, calculados por este sistema.

Transporte de las láminas

El método más corriente para el material alimentado en rollos es el arrastre mediante tetones o pinchos, espaciados unos 25 mm, montados sobre cadenas paralelas que penetran en el borde del material por la parte inferior y lo transportan hasta el final del ciclo. Para láminas más gruesas se utilizan agarres de pinzamiento que pueden retroceder a medida que se calienta y dilata la lámina, manteniéndola plana. La precisión del orden de 0,25 mm.

Las placas cortadas se sujetan mediante marcos dobles, accionadas habitualmente por aire. Para evitar colapse la placa al calentarse se la soporta mediante un colchón de aire a presión. Los marcos se desplazan mediante raíles con vía-sín-fín o con pistones neumáticos o hidráulicos. En los equipos más simples, la plancha se sujeta sobre el molde hembra y se desplaza sobre ella el elemento calentados. Estos conjuntos para el moldeo de lámina cortada pueden montarse también sobre su carrusel, que efectúa una operación distinta en cada estación de su rotación.

Plataforma de conformado

La estación de conformado debe incluir todos los elementos necesarios para pretensar la lámina de la que se formara la pieza, para enfriarla y para extraerla del molde.

Para moldeo a presión de piezas mayores de 300 mm o de más de 600 mm de longitud, el accionamiento de los moldes hace necesaria una estructura de tipo de prensa con barras de soporte importantes, normalmente cuatro. Debe ser fácil el mantenimiento y cambio de molde y el ajuste en altura de la apertura de los mismos, así como el conectar los medios de enfriamiento o control de temperatura. La altura total debe ser suficiente para el moldeo con burbuja vieo asistido con pistón o el preestirado.

Son importantes los medios de enfriamiento superficial del molde: sopladores, turbinas, chorros de aire enfriado, boquillas de niebla, etc.

La estructura de soporte debe ser adecuada para soportar moldes pesados y debe existir un volumen suficiente para la ventilación de las cámaras de los moldes. Debe ser posible un acceso fácil a las líneas de vacío y aire comprimido.

Cuando el sistema de desmoldeo o expulsión no sea integral con el molde, es necesario preverlo. El conjunto puede completarse con el yunque de recorte sobre el molde, cuchillas y sistema mecánico de arrastre y, eventualmente, recorte y recolección del desperdicio.

Los cambios de presión que pueden observarse en el molde durante el ciclo de moldeo se determinan con la siguiente ecuación:

$$P_i = \frac{(p_i - Kp_0)V_m}{V_m(1 + K) - V_i'}$$

Donde

p_0 es la presión residual en la cámara de vacío;

V_i el volumen del aire desalojado del molde;

V_m el volumen de la cavidad útil del molde;

$K = vp / V_m$ la relación entre el volumen de la botella de aire y el del molde.

La presión del moldeo se determina de la diferencia existente entre la presión atmosférica y la del molde.

$$p_i' = p_a - p_i = \frac{KV_m(p_a - p_0) - V_i p_i}{V_m(1 + K) - V_i}$$

La presión al comienzo y final del moldeo, cuando $V_i = 0$ y $V_i = V_m$, será:

$$p_c' = \frac{K}{1 + K}$$

$$p_f' = \frac{K - 1}{K}$$

La diferencia entre la presión máxima y mínima viene dada por:

$$\Delta p' = \frac{1}{K(K + 1)}$$

El trabajo

$$A = \int_0^V p_i' dV = \int_0^V \frac{KV_m(p_a - p_0)p_i V}{V_m(1 + K) - V_i} dV$$

Después de la integración tendremos:

$$A = V_m \left[p_a - (p_a - Kp_0) \ln \frac{1 + K}{K} \right]$$

Simplificando y sustituyendo los valores p_0 y p_a (en N/m^2), tendremos:

$$A = 10V_m \left(1 - 2.303 \log \frac{1 + K}{K} \right)$$

La potencia de cálculo será:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{10 V_m \left(1 - 2.303 \log \frac{1 + K}{K} \right)}{102 t \eta}$$

donde t es la duración del ciclo, seg;

$\eta = \frac{N_c}{N}$ el rendimiento de la máquina;

N la potencia del motor de la bomba de vacío.

La fuerza necesaria para sujetar la plancha de material durante el moldeo, será:

$$S = \frac{\sigma_n \delta P_n}{f}$$

Donde

δ es el espesor de la plancha

f el coeficiente de fricción

σ_n la tensión que surge en la plancha

Comportamiento del material

El material más utilizado en el termoconformado es el PS, tanto en lámina como en espumado extruído. En el primer caso, como para otras láminas tradicionales, no se precisa más sofisticación del proceso que la descrita. Sin embargo, para obtener estampación profunda del espumado (EPS), no es suficiente el conformado a presión porque la presión interna del gas contenido en las células lo dificulta. Una solución es el calentamiento con vapor, que se difunde rápidamente por las células y se obtienen embuticiones profundas a temperaturas del orden de 105°C.

Los plásticos amorfos tienen esencialmente estructuras similares al vidrio, por lo que las técnicas utilizadas en el moldeo de vidrio pueden ser aplicables a estos plásticos. Se sabe, por ejemplo, que el vidrio amorfo caliente no es penetrado por una barra fría si se aplica a gran velocidad. Esta técnica funciona también con algunos plásticos, tales como PS y PET. Si la barra se enfría durante la introducción, puede conformarse mecánicamente un envase de fondo cuadrado. El desarrollo de nuevas aleaciones poliméricas con comportamientos diferenciados puede permitir también el de nuevos métodos de termoconformado.

Moldes para termoconformado

Se ha señalado que el procedimiento es particularmente adecuado para la fabricación de prototipos y series cortas o piloto. Para este tipo de producción, los moldes pueden ser muy económicos y la selección de material depende básicamente de la calidad de superficie que se desee obtener. Es de notar que se suele tratar de molde hembra y que es necesario disponer en ellos finos taladros para efectuar el vacío a su través, estando el molde contenido en una cámara en la que se hace el vacío. Los taladros no deben ser tan grandes que resulten marcas en la pieza y deben distribuirse de un modo adecuado teniendo en cuenta que son los que producen las zonas de aspiración.

Los **moldes en madera** se fabrican a partir de maderas duras secadas al horno para evitar deformaciones debidas al ciclo térmico del proceso. Si deben construirse en piezas, estas se juntan a la cola de milano o se encolan con resorcinol o adhesivo epoxi. Los taladros de ventilado se efectúan con pequeño diámetro hasta cerca de la superficie taladrando desde la otra cara. Pueden terminarse con barnices epoxi o poliuretanos. La madera, fácil de mecanizar, puede emplearse también para construir prototipos de pistón en molde definitivos metálicos y obtener la mejor forma por iteración.

Los **moldes de escayola**. Especialmente si están reforzados con un 5 % de fibra de vidrio cortada, tienen una duración sorprendente. Para realizarlos se requiere un modelo con suficiente resistencia para soportar la temperatura de fraguado del yeso (ca.1001 C), en el que se insertan alambres rígidos recubiertos con desmoldeante, que sirven para formar los taladros de ventilado.

Una primera capa fina relativamente rica en agua proporciona una buena calidad de superficie. A continuación, se prepara y vierte sobre esta capa el resto de la colada. Vertiendo la cantidad adecuada de yeso sobre el agua (y no al revés), mezclando cuidadosamente y eliminando por vibración el aire atrapado. En esta fase, para facilitar la extracción de los alambres. Estos se recubren con un tubito fino de plástico.

Como desmoldeante se suelen emplear jabones o parafina disuelta en aguarrás. El molde endurece en unos 30-50 minutos y puede extraerse, pero debe dejarse secar, para que adquiera suficiente consistencia. Hasta que pueda encenderse una cerilla raspando sobre su superficie. Debe tenerse en cuenta que la escayola sufre una expansión importante durante el fraguado. Los moldes pueden barnizarse, después de aplicar una tapa poros (goma laca).

Hay en el mercado formulaciones para fabricar moldes epoxi de colada que pueden soportar calefacción y tienen una duración importante. Los moldes por deposición galvánica y respaldo de latón pueden considerarse molde para series medianas y si el respaldo es de epoxi tienen una duración algo menor.

Otros materiales para fabricar los moldes pueden ser los metales blandos depositados por fundido-proyección y las coladas de kirksite o kayem.

Por su conductividad térmica, los moldes de aluminio son los más populares para este proceso. Los moldes de alta calidad se mecanizan y para molde más económicos pueden utilizarse la colada, aunque suele presentar porosidades que crean problemas en la vecindad de los conductos de regulación térmica.

Los moldes de acero para estos procesos, dado que las presiones son, casi siempre, muy inferiores a las de los procesos de inyección pueden construirse con aceros menos conflictivos para el mecanizado y bruñido, además de presentar menor riesgo de deformación al endurecimiento.

Campos de aplicación

Estableciendo un símil con la estampación metálica, cualquier forma que pueda realizarse en chapa es, en principio, realizables por termoconformado. En consecuencia, las limitaciones del proceso las establecen las formas de los productos. Pueden fabricarse, en moldes con correderas, piezas con contrasalidas, sin problemas tan importantes como el moldeo por inyección, porque el material no llega al estado fundido.

Algunos de los procesos citados tienen ciclos extremadamente rápidos y, desde el punto de vista económico, el sistema presenta una serie de ventajas, más aparentes cuando las series no son muy elevadas, en razón al bajo coste de los moldes y a su puesta a punto más rápida.

Se ha constatado en los últimos años que el proceso, está compitiendo con la inyección en series grandes para piezas de un tamaño importante. Algunas aplicaciones como las citadas de construcción de embarcaciones o de sanitarios tienen tamaños inviables por otros procesos de termoplásticos.

Pero el gran uso de estos procedimientos se encuentra en el campo del envase y embalaje. Las máquinas de termoconformado fabrican bandejas para productos alimentarios o se combinan con equipos de llenado para producir artículos envasados, al tiempo que permiten combinar diversos plásticos para obtener propiedades de barrera comparables a la coextrusión pero permitiendo un reciclado selectivo de los materiales constitutivos.

También en la construcción se producen mediante esta técnica lucernario para cubiertas y otros artículos como canalones de desagüe mediante el conformado a pasos (Steve Corning) comparable a la fabricación de perfiles de acero. Este es uno de los procesos que permite utilizar láminas con un grado de refuerzo de fibras importante, con lo que se supera la limitación en resistencia mecánica que se impone a los productos de termoconformado en razón al nivel de resistencia de las láminas a transformar. Se trata, pues, de uno de los primeros procesos de moldeo que se desarrollaron sin que en el transcurso de los años haya perdido protagonismo[20]

Diseño de la pieza

3. Diseño de la pieza

Para comenzar a plantear el diseño, lo primero que se necesita es el producto que deseamos producir, en este caso se realizó un sondeo de diferentes posibilidades (diversos moldes de juguetes para niños, moldes de alimentación, bandeja de alimentación...) finalmente se ha decidido simular un molde similar a la pieza simulada por el software Ansys.

A continuación, se muestra el diseño final de la pieza.

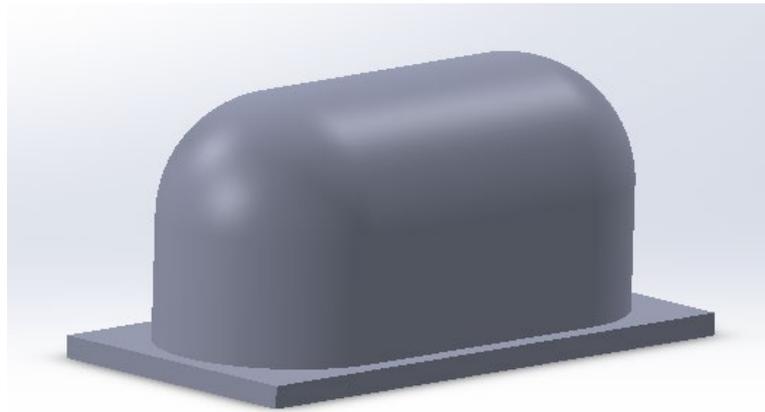


Fig. 15. Diseño deseado del molde.

Para comenzar con el diseño primero se tuvo en cuenta las medidas de la bandeja de impresión de la impresora 3D que se iba a utilizar, una vez establecida dicha restricción, se siguieron los siguientes pasos.

La primera operación realizada ha sido una extrusión para poder hacer el saliente que posteriormente vaciaremos. Para ello, se ha dibujado un croquis marcando en línea constructiva el tamaño de la bandeja de la impresora para asegurarnos que se podrá fabricar y en línea continua el tamaño de la extrusión que vamos a realizar.

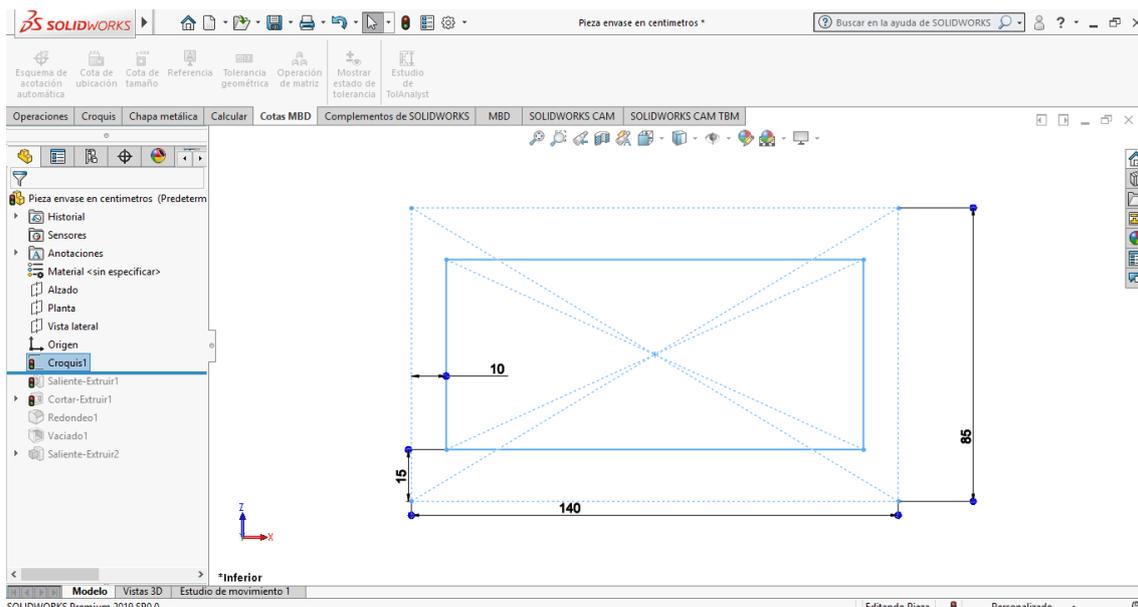


Fig. 16. Croquis de la bandeja y de la pieza.

Una vez terminado y definido el croquis, dibujamos la extrusión con la altura máxima de la pieza.

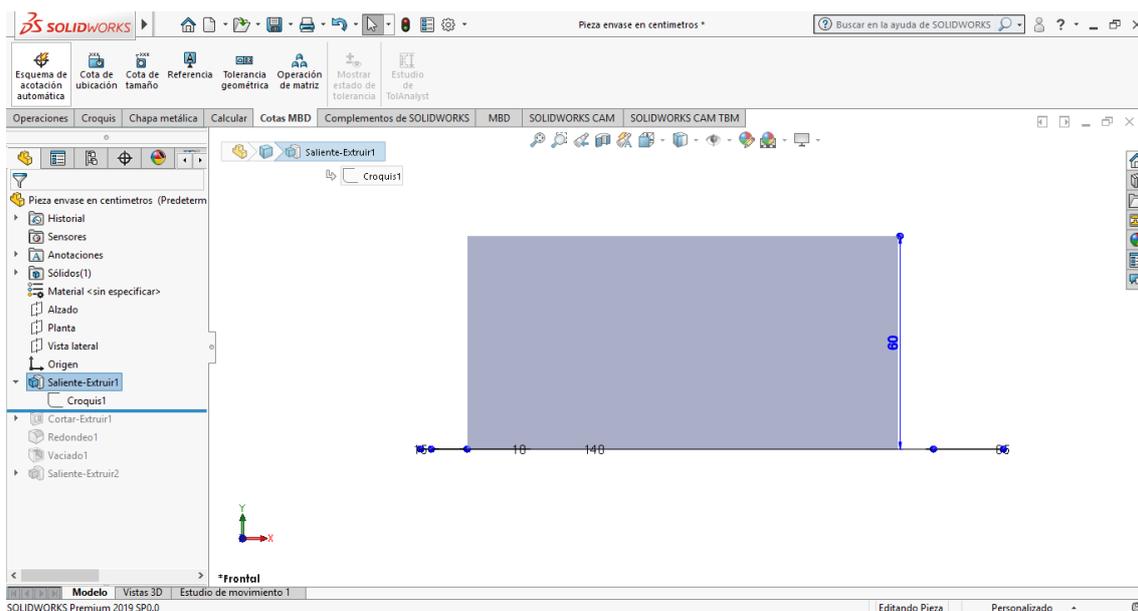


Fig. 17. Croquis de la extrusión de la pieza.

Finalizada la operación "Extruir" podemos observar un cubo rectangular con las medidas máximas de la pieza.

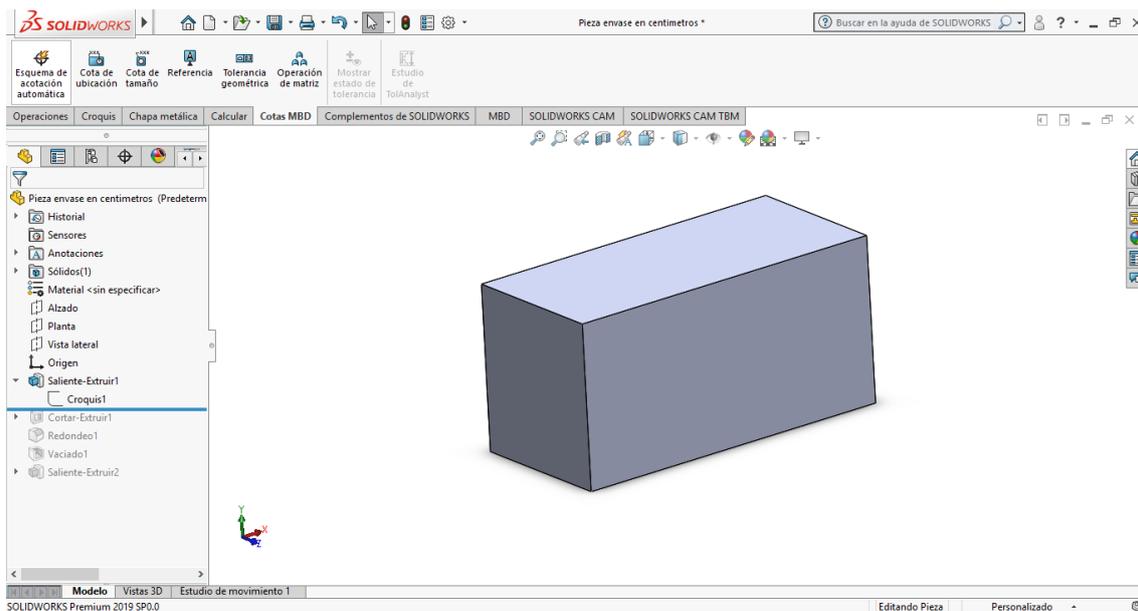


Fig. 18 Extrusión de la pieza en forma de cubo.

Como se puede observar la pieza final que deseamos tiene los bordes redondeados así que con el cubo extruido mediante dos operaciones podremos dibujar todos los radios.

En primer lugar, dibujaremos en una cara los radios laterales deseados y utilizaremos la operación de “Extruir Corte” para hacer los dos radios laterales.

Con el croquis dibujado, abriremos la operación de corte y indicaremos que el corte debe ser por toda la pieza para que se pueda actualizar sin problemas si posteriormente se necesita cambiar alguna cota.

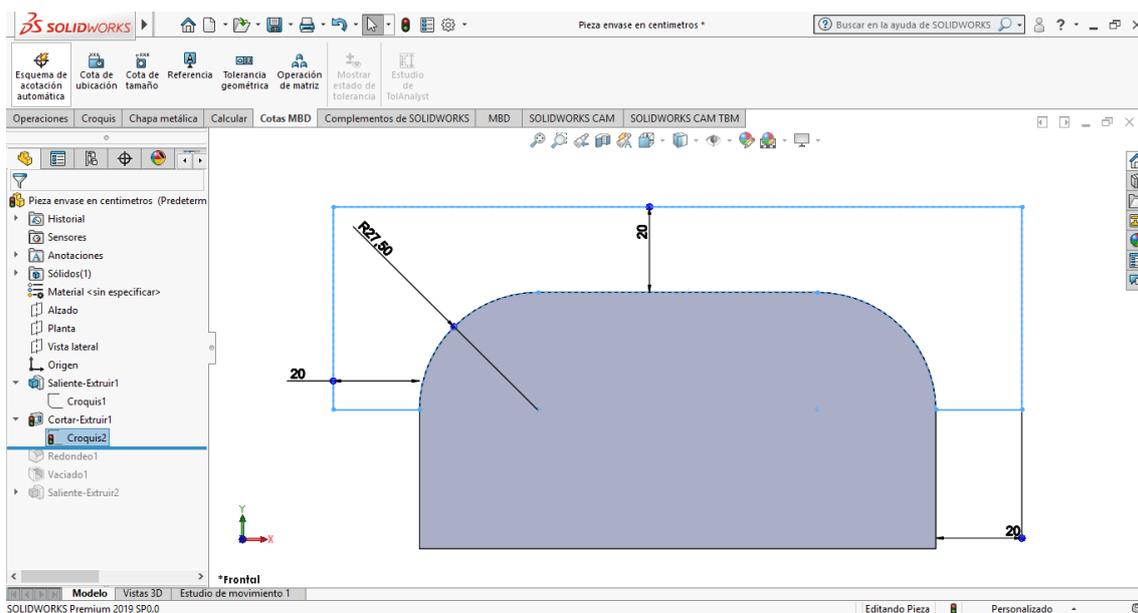


Fig. 19. Croquis para corte de la pieza

Al terminar la primera operación de corte podemos observar que el cubo ya tiene los dos radios laterales y procedemos a dibujar el resto de radios.

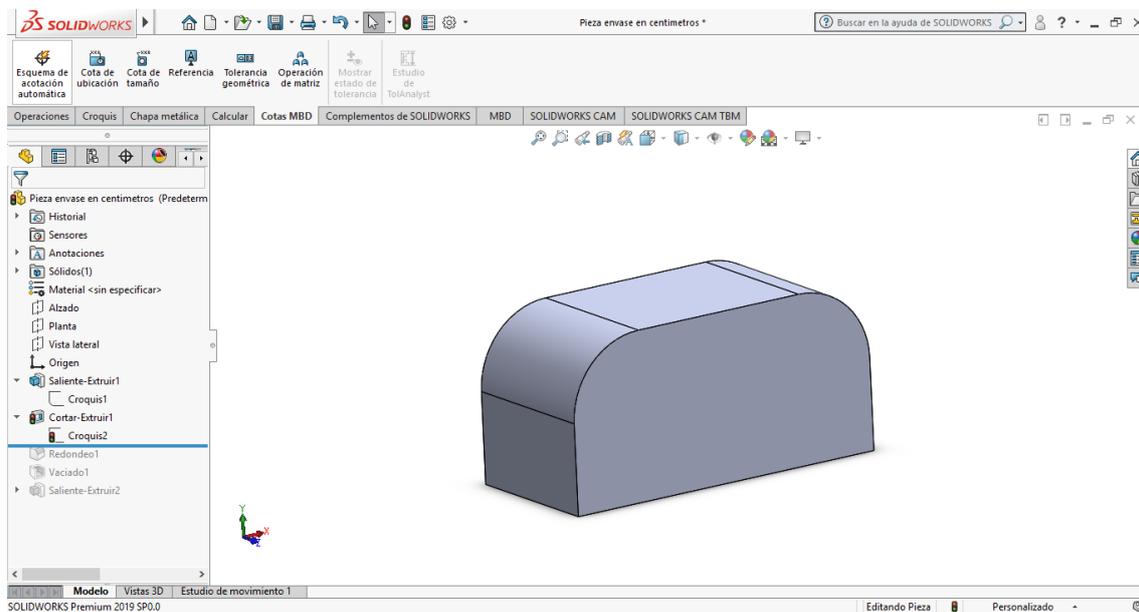


Fig. 20 Pieza con el corte deseado.

Para terminar los bordes utilizaremos la operación “Redondeo” e indicaremos las aristas que deseamos redondear, así como, el radio deseado.

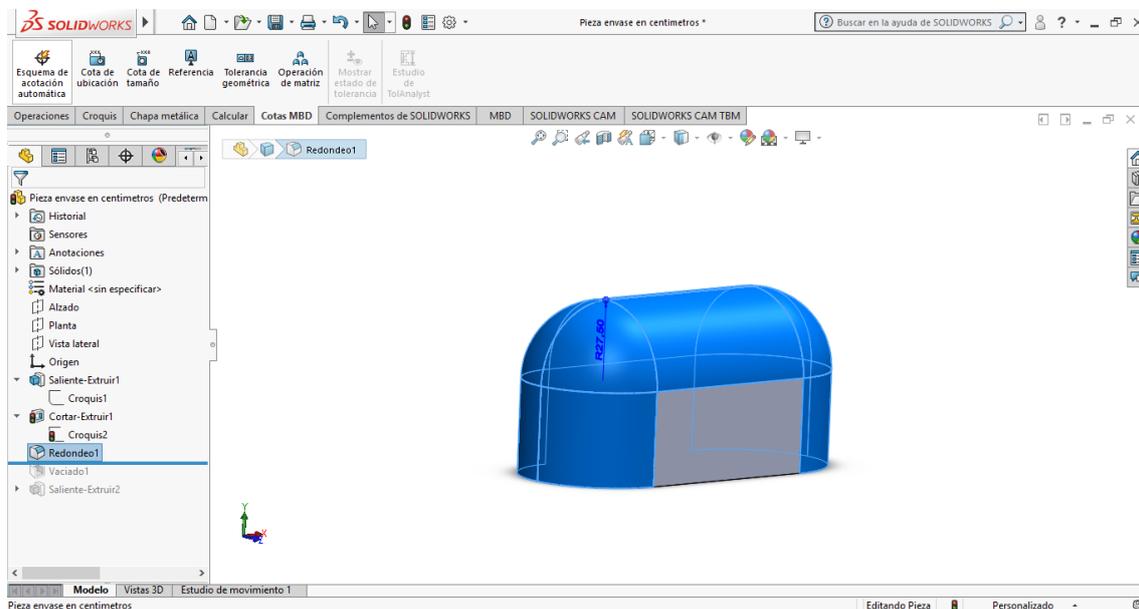


Fig. 21. Croquis del redondeo.

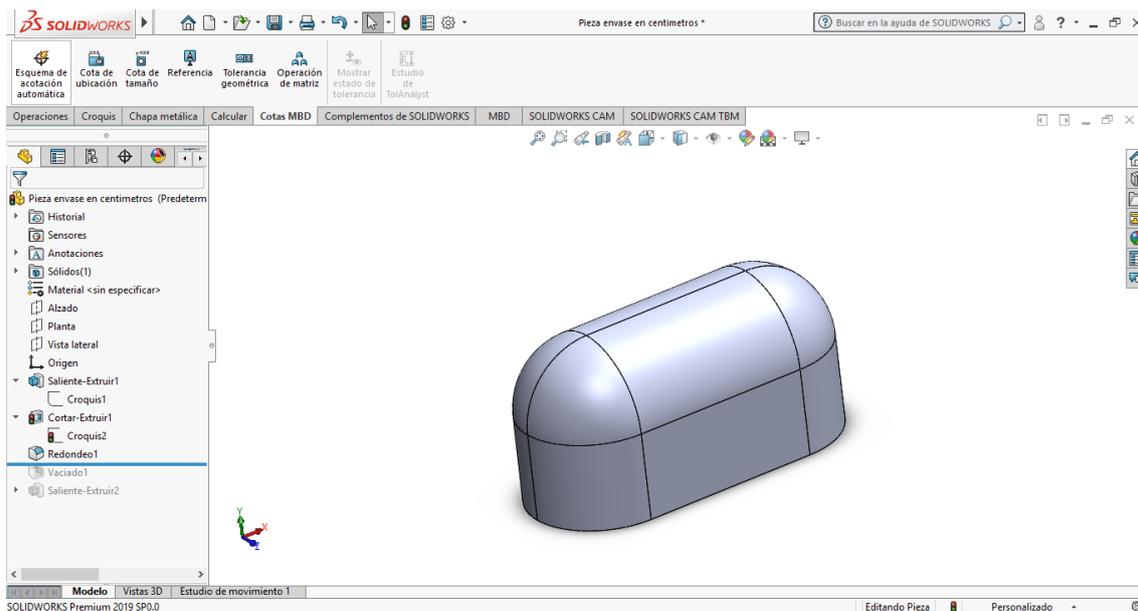


Fig. 22 Redondeo de la pieza

Una vez terminadas estas operaciones ya tenemos la forma exterior deseada de la pieza y solo nos queda utilizar la operación de “Vaciado” para poder hacer hueco el interior.

Para realizar esta operación necesitaremos indicar la cara donde queremos que se haga el vaciado y el espesor deseado de la pared.

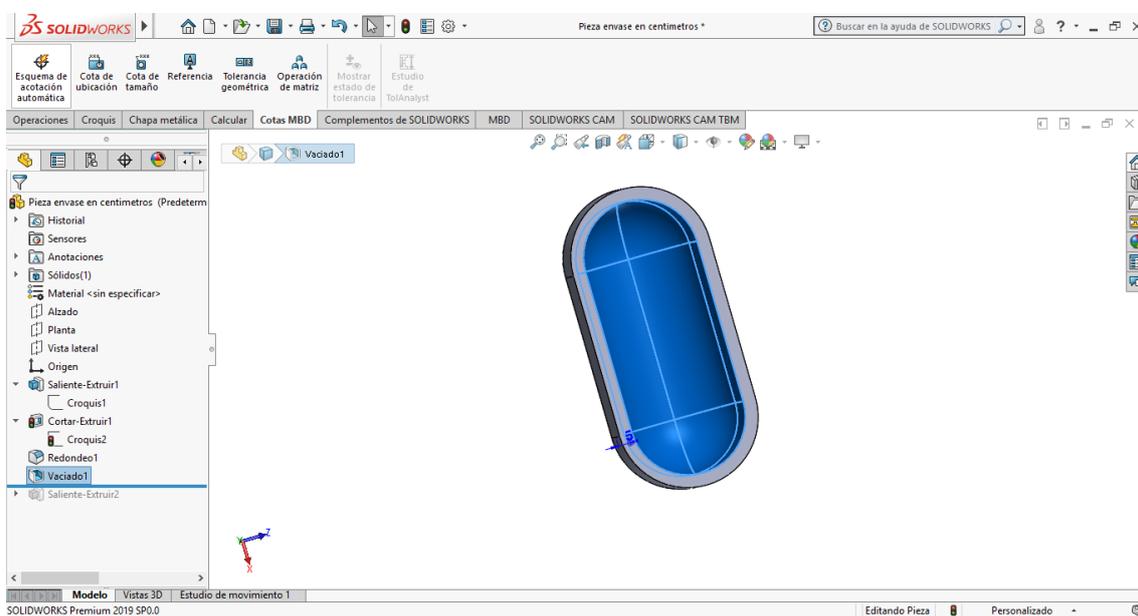


Fig. 23. Croquis del vaciado.

Terminadas estas operaciones finalizamos el diseño de la pieza, pero nos falta una base para poder realizar correctamente el proceso de conformado.

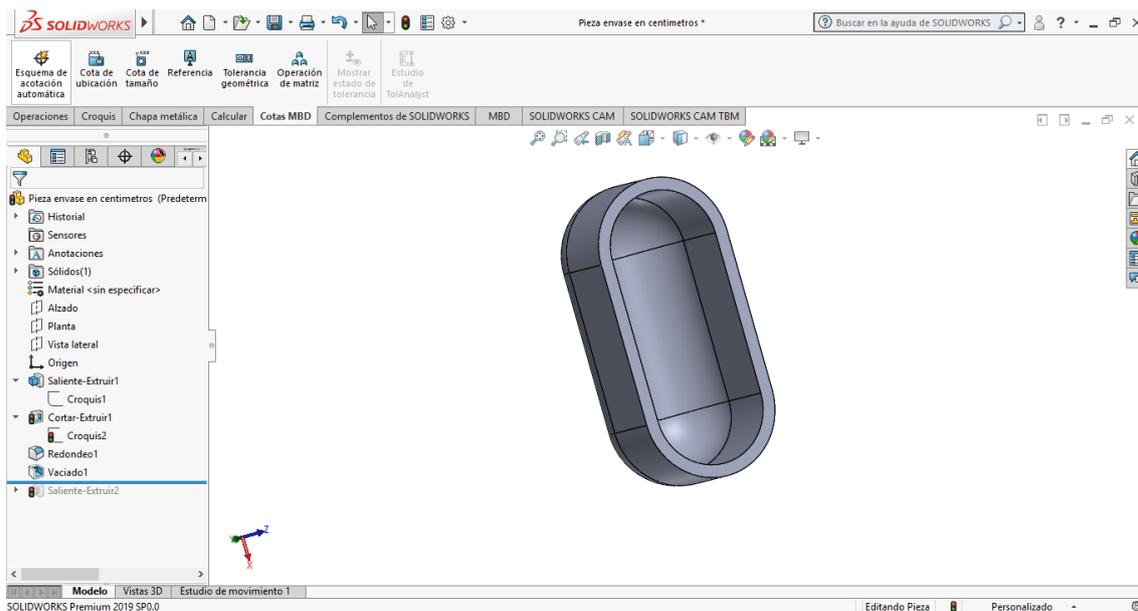


Fig. 24. Vaciado de la pieza.

Para hacer la base utilizamos la operación anteriormente empleada “Extruir” y dibujamos un croquis utilizando las aristas interiores de la pieza y las dimensiones máximas de la base. En este paso también es necesario indicar el espesor, ya que sin un espesor adecuado podrían surgir problemas de estabilidad en los ensayos de termoformado.

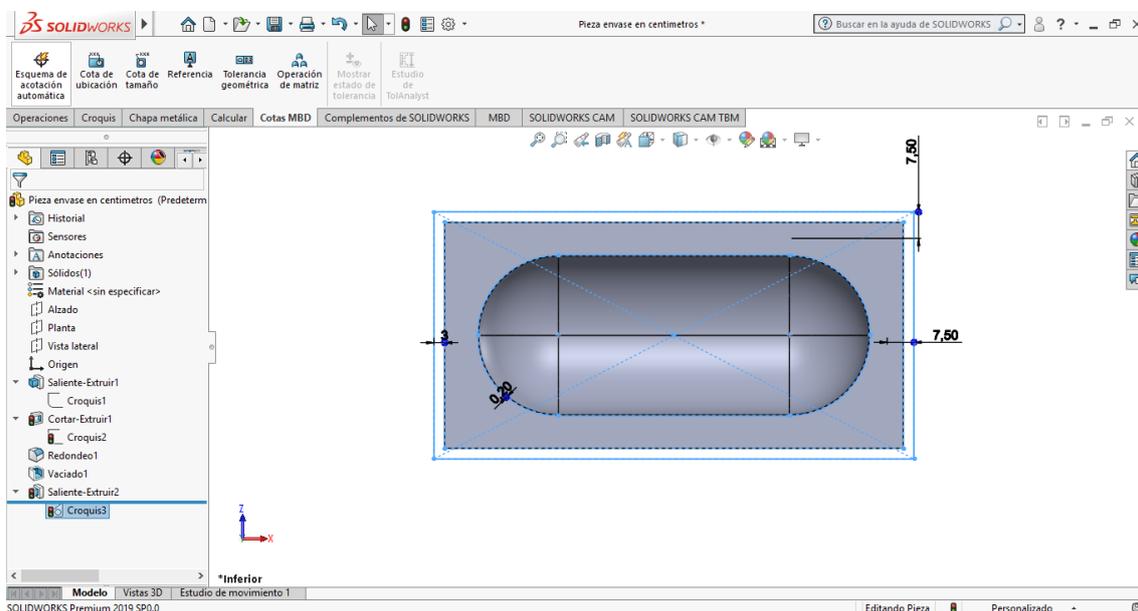


Fig. 25. Pieza con croquis para extruir base

Al finalizar todas las operaciones necesarias conseguimos diseñar el molde que posteriormente imprimiremos mediante fabricación aditiva para emplear dicho molde en el proceso de termoformado.

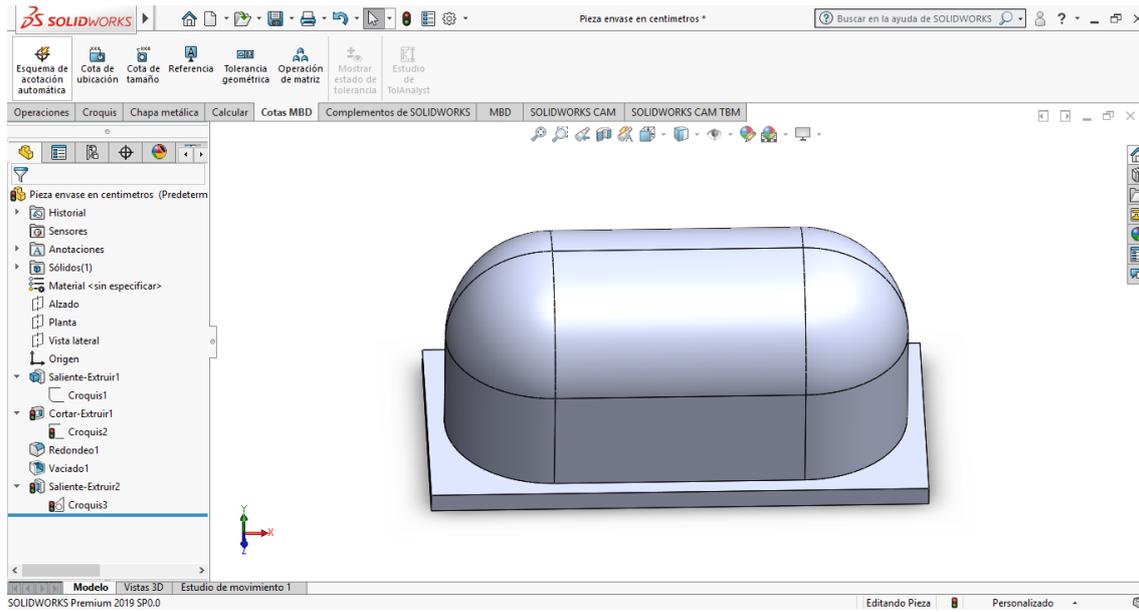


Fig. 26. Pieza con base extruida

En el apartado de Anexos se puede encontrar el plano del molde con todas las medidas necesarias para su correcta reproducibilidad.

Ansys. Simulación
termoconformado

4. Ansys. Simulación termoconformado

En este apartado se realiza una simulación del comportamiento del material a la hora de moldear una lámina de un material determinado mediante termofomado con el software técnico ANSYS, utilizando el módulo Poly-flow.

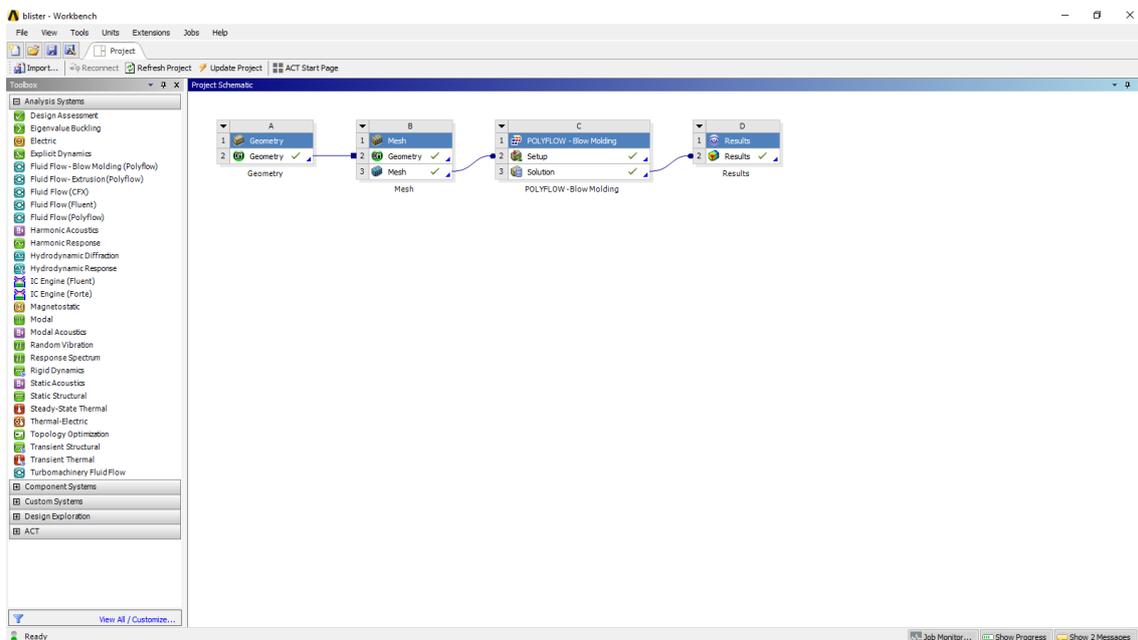


Fig. 27 Entorno de la pantalla inicial del programa técnico ANSYS.

Para realizar este apartado vamos a emplear el archivo de la cubeta simplificado, ya que este archivo tiene curvas y detalles que a la hora de crear el mallado y cálculo en Ansys ralentiza de forma notable el proceso de cálculo. Además de la pieza similar a la que se va a fabricar en el molde hemos de crear la lámina que actuará de material en la simulación, tal y como se muestra en la figura:

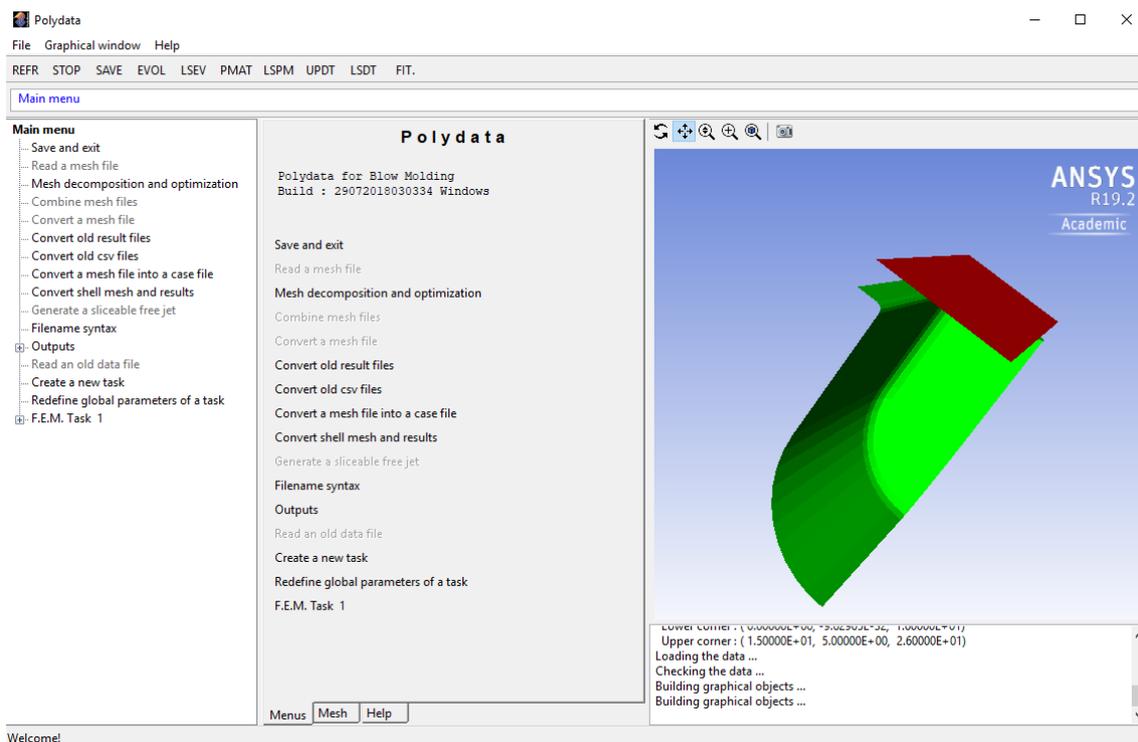


Fig. 28 Entorno de Polydata de ANSYS.

Para realizar la simulación se han seguido los siguientes pasos:

- 1) Importar el diseño creado para la simulación.
- 2) Realizar el mallado de la mejor manera posible para que el cálculo se aproxime lo máximo posible a la realidad, ajustando los valores del software.
- 3) Introducir todos los parámetros de movimiento y fuerzas para que la simulación sea lo más próxima a la realidad. Los parámetros introducidos han sido:
 - Presión de moldeo: 6 bares, realmente se aplican unas presiones cercanas a los 5 bares, pero añadimos uno para compensar que no aplicamos vacío en ese software.
 - Espesor inicial de la lámina: 0,35 mm.
 - Desplazamiento únicamente en el molde, como la separación entre la lámina y la bandeja en el diseño es de 20 mm se aplica una velocidad de desplazamiento al molde de 10 mm/s, con lo que tardaría 2 segundos en estar en contacto con el material. En este momento es cuando actuaría la fuerza aplicada en la lámina hacia molde y comenzaría a formar el producto.

A la hora de introducir los parámetros se han de especificar muchos más detalles, para realizar la simulación de manera correcta, por tanto, se ha seguido un tutorial proporcionado por la empresa ANSYS, que se pudo encontrar en la bibliografía.

Una vez se han añadido todos los parámetros necesarios para la simulación se calcula el proceso y ya podemos ver la simulación. En esta veremos cómo varía el espesor en la lámina al moldear, que es lo que nos muestra la leyenda. A continuación, se muestran las imágenes del proceso de simulación:

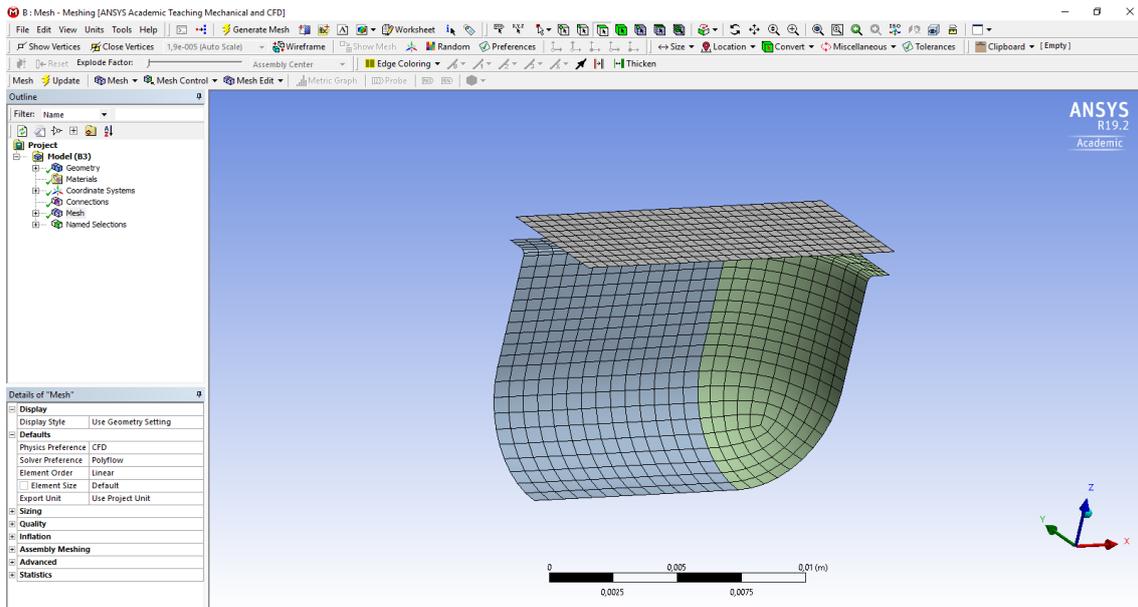


Fig. 29. Mallado de la pieza y la lámina.

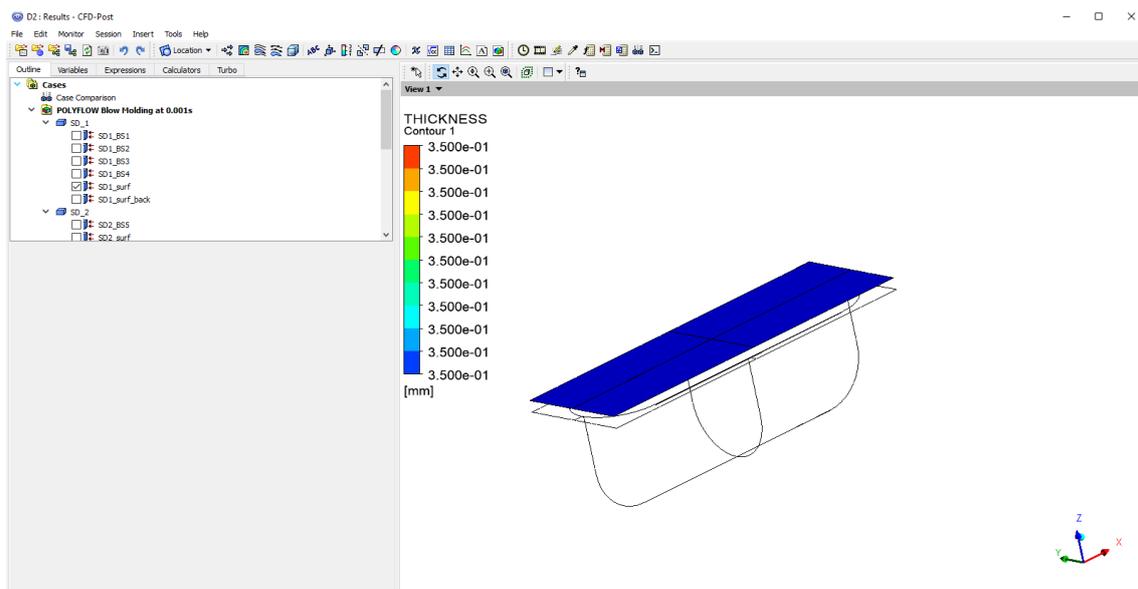


Fig. 30. Inicio de la simulación de termoformado de la lámina sobre el molde.

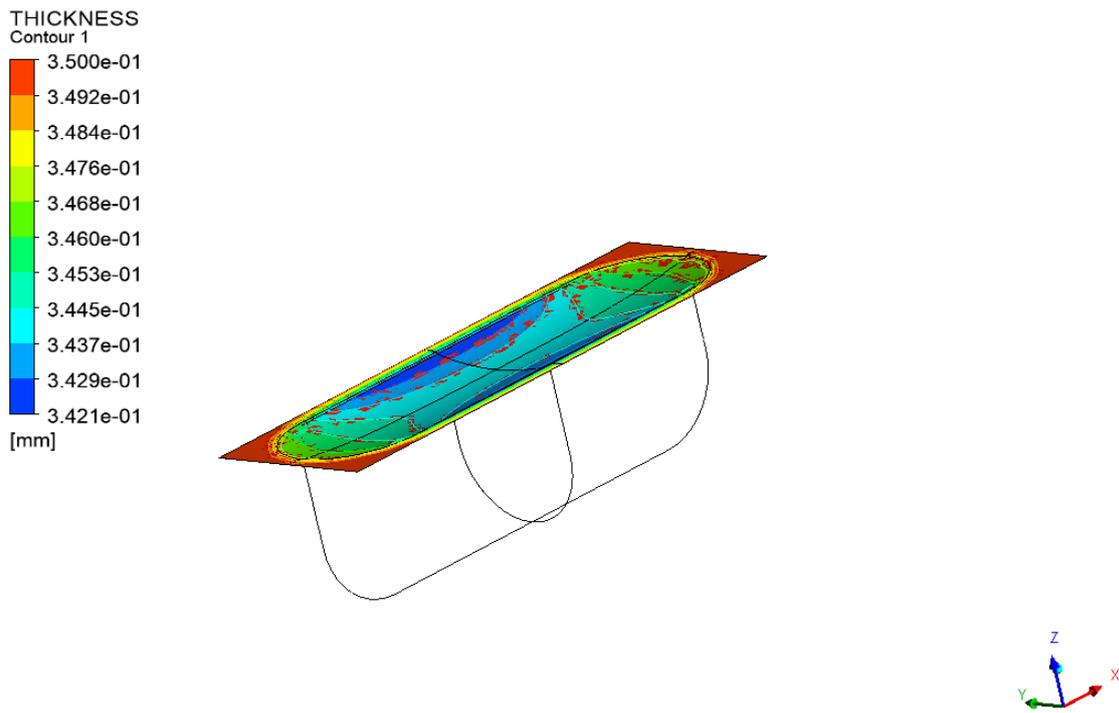


Fig. 31. Primer contacto de la lámina con el molde.

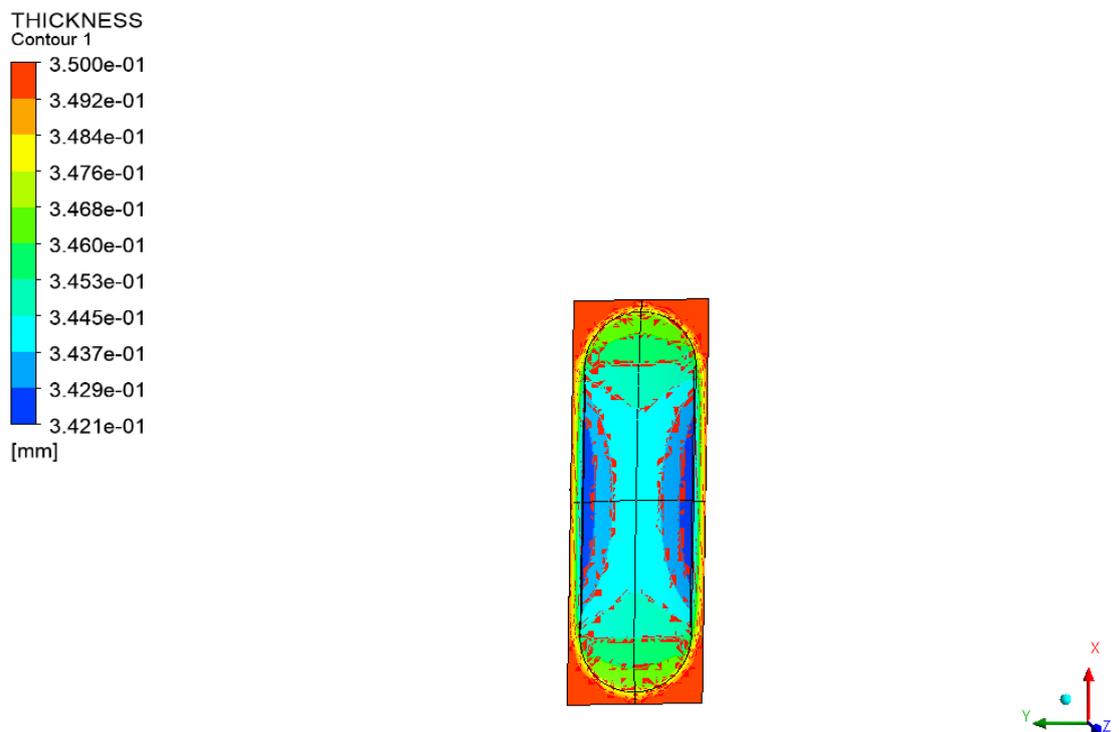


Fig. 32. Primeras zonas de riesgo al entrar en contacto la lámina y el molde.

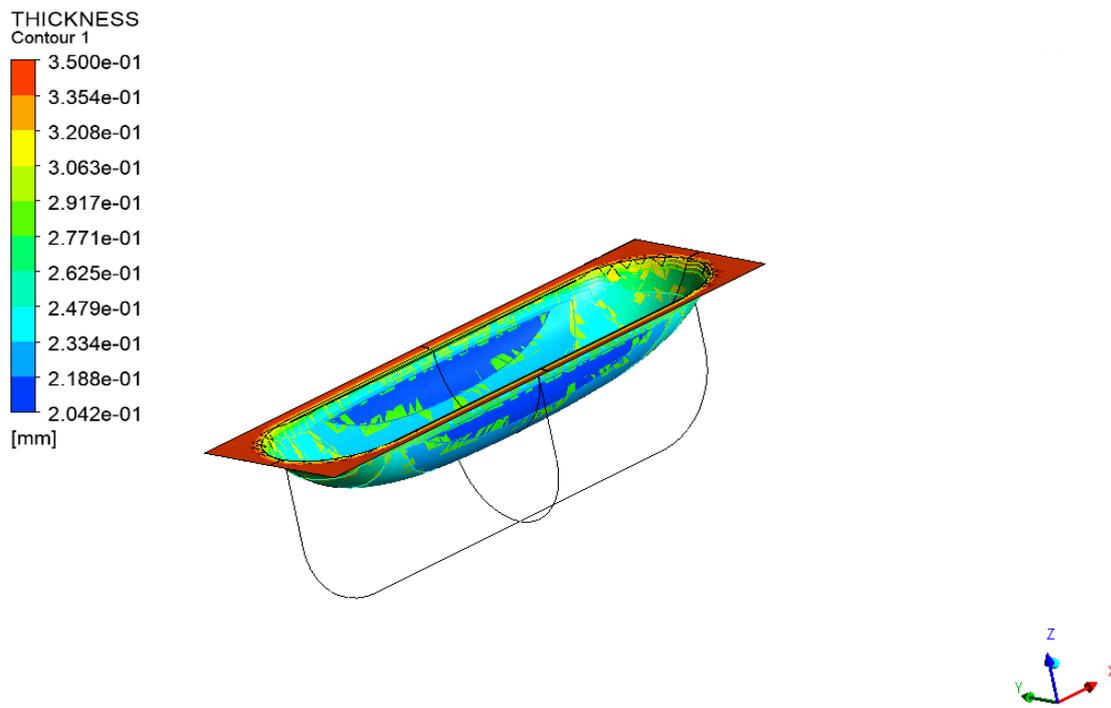


Fig. 33. Evolución de la simulación con espesor de lámina máx. 2.042×10^{-1} mm.

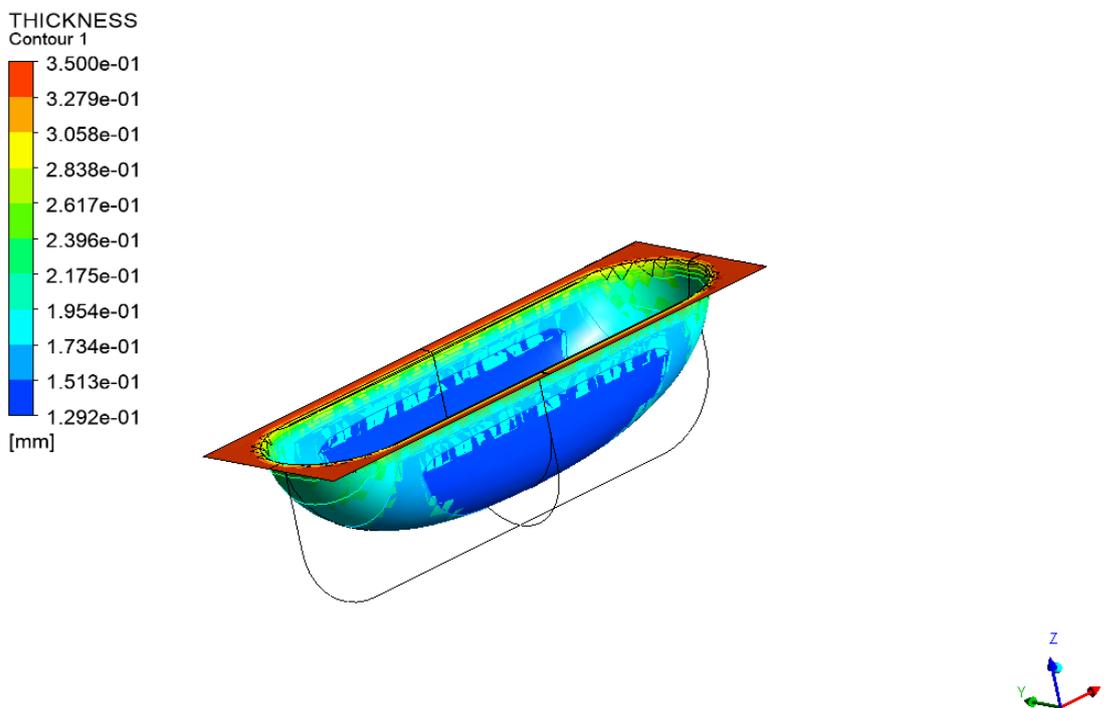


Fig. 34. Evolución de la simulación con espesor de lámina máx. 1.292×10^{-1} mm.

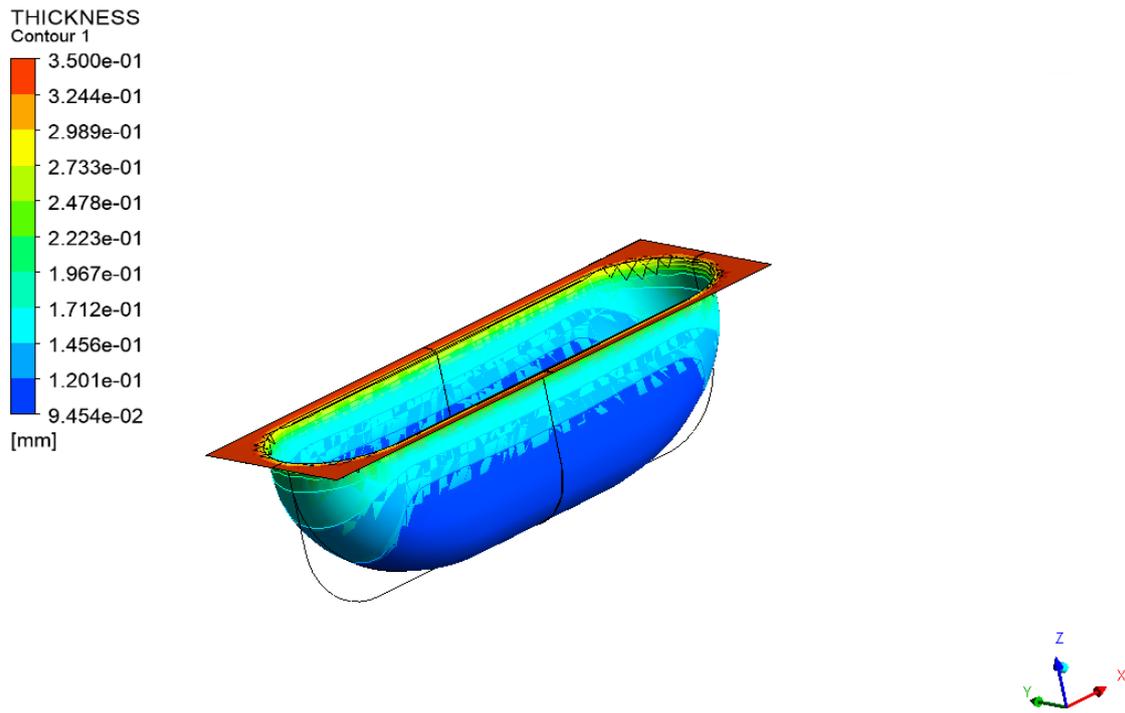


Fig. 35. Evolución de la simulación con espesor de lámina máx.9.4542e-2 mm.

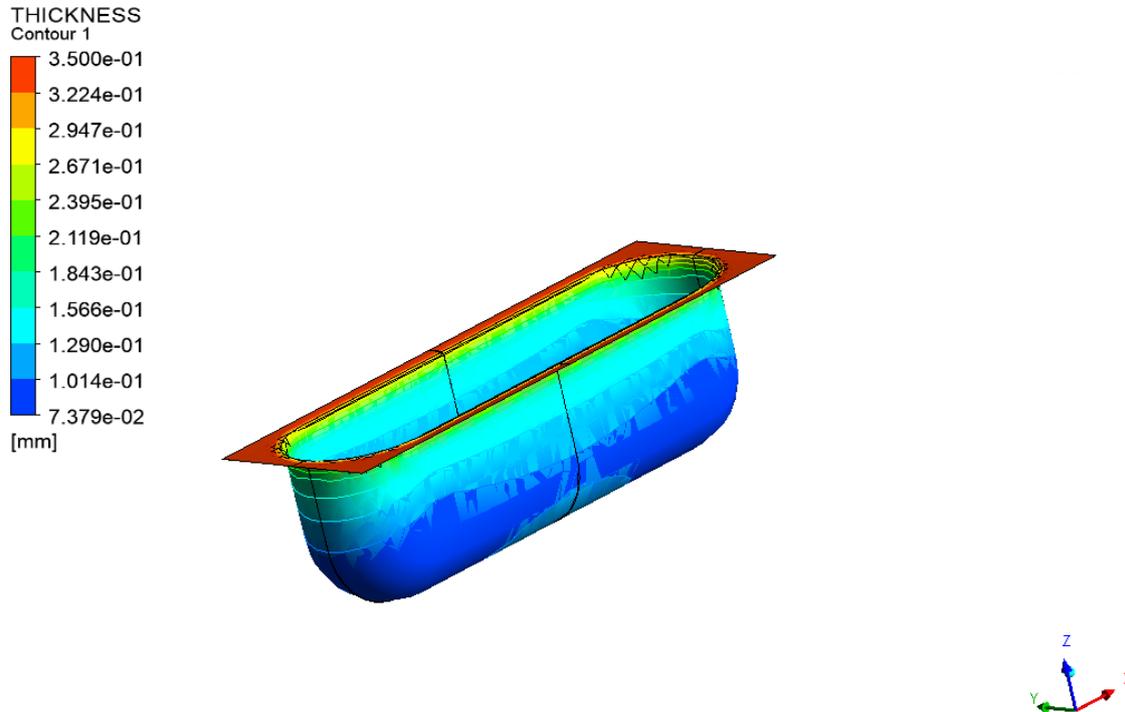


Fig. 36. Simulación de moldeo finalizada.

Con esta simulación se ha observado el problema de este tipo de moldeo. El molde se puso en contacto con una lámina, donde se aplicó una presión constante a la lámina. Esto acopló la lámina en el molde donde se consiguió la forma del molde. La herramienta Polyflow interpoló linealmente las variables del proceso: espesor, velocidad y posición, siendo posible observar el grosor la lámina en función del tiempo.

Las imágenes han sido ordenadas de principio a final de simulación. En la última imagen se observa que las zonas que quedan con el menor espesor son las esquinas de la cubeta. Como conclusión se puede decir que el espesor de la bandeja será el doble aproximadamente entre las zonas con mayor espesor (la cara superior de la cubeta) y la menor (las mostradas con los colores azulados, las esquinas de la bandeja).

El comportamiento se repetirá en cualquier tipo de proceso de termoconformado, obteniendo menores espesores cuanto más nos alejamos de la parte superior de la bandeja.

Prototipado

5. Prototipado

5.1 Materiales empleados

La creciente evolución de la tecnología de fabricación aditiva ha provocado en gran medida el desarrollo de materiales que facilitan la implementación de mejores acabados y reducción en el tiempo de impresión. Tanto el mercado de la impresión 3D como el del sector de la investigación de materiales han estado retroalimentados sufriendo un crecimiento exponencial. Actualmente ya podemos encontrar el material adecuado en cualquier empresa especializada con las especificaciones requeridas para el diseño.

Para el diseño de la pieza que nos ocupa, en este caso el molde de termoformado hemos empleado los siguientes materiales.

1. PLA

El PLA empleado para este proyecto está hecho internamente por Prusa Research con la resina Natureworks 4043D, siendo la mejor y más utilizada en la impresión 3D. El filamento se puede encontrar en la siguiente página web: <https://shop.prusa3d.com/es/prusament/711-prusament-pla-prusa-galaxy-black-1kg.html>.

El PLA se derrite a una temperatura relativamente baja de aproximadamente 175 °C. A diferencia de los llamados materiales termoendurecibles, el PLA puede calentarse más allá de su punto de fusión varias veces con muy poca degradación. Es un material duro, pero eso también significa que es algo frágil. Solo este material está probado para capas de 50 micras de altura.

El PLA no es un material perfecto y, al igual que cualquier otro plástico, tiene algunas desventajas. La baja temperatura de fusión también significa resistencia a baja temperatura. Las piezas comienzan a perder resistencia mecánica a temperaturas superiores a 60 ° C.

La combinación de ser biodegradable y tener resistencia a bajas temperaturas significa que no es ideal para uso en exteriores, sin mencionar la baja resistencia a los rayos UV. Además, el PLA solo es soluble en productos químicos como el cloroformo o el benceno caliente. Entonces, cuando se conectan varias piezas, es mejor usar solo pegamento.

Aunque el PLA es biodegradable, y el material por sí solo es seguro para los alimentos, no sugerimos beber o comer repetidamente en sus impresiones 3D. Debido a las pequeñas fracturas en la superficie de impresión, las bacterias pueden acumularse allí con el tiempo. Puede evitar esto aplicando un recubrimiento seguro para alimentos. Cuando postprocesamos PLA, es mejor usar lijado húmedo. Sin agua, comenzará a calentar rápidamente el plástico por fricción, se derretirá localmente y dificultará el lijado. En definitiva, las propiedades de este filamento se resumen en la siguiente tabla:

Ventajas	Desventajas
Fácil impresión	Frágil
Pueden imprimir piezas pequeñas	Poca resistencia a bajas temperaturas
Puede imprimir piezas grandes	Postprocesamiento difícil
Duro	
Warping Bajo	

Tabla 3. Tabla resumen propiedades del filamento de PLA.

2. PLA reforzado con fibra de carbono

El proveedor de este material ha sido filament2print y se puede encontrar en la siguiente dirección: [https://filament2print.com/es/pla-especial/656-fibra-carbono-protopasta.html#/217-diametro-175 mm/279-formato-rollo 125 g](https://filament2print.com/es/pla-especial/656-fibra-carbono-protopasta.html#/217-diametro-175-mm/279-formato-rollo-125-g)

El filamento PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta es un material compuesto por una matriz de polímero PLA (85 %) y fibras de Carbono (15%).

La fibra de carbono es una fibra sintética constituida por finísimos filamentos compuestos casi en su totalidad por átomos de carbono. Estos filamentos son tan finos que es necesario reunir varios miles de ellos para dar forma a una sola fibra de carbono. La fabricación de estas fibras de carbono se realiza a partir del poliacrilonitrilo.

El refuerzo de fibras de carbono mejora las propiedades mecánicas generales del plástico base. En este caso, se logra un filamento PLA mucho más rígido. Esta mayor rigidez se logra a costa de una menor flexibilidad que convierte a este material ideal para realizar piezas que no está previsto que se doblen como pueden ser soportes, herramientas, hélices o carcasas de drones o similares.

Esta rigidez del filamento de Fibra de Carbono proporciona una excelente resistencia estructural y una buena adhesión entre capas con muy baja distorsión.

Gracias al alto porcentaje de PLA que contiene el filamento PLA Fibra de Carbono, este material es muy fácil de imprimir incluso utilizando configuraciones PLA estándar y sin necesidad de cama caliente. Por ello, PLA con Fibra de Carbono es compatible con la mayor parte de impresoras 3D FDM del mercado.

Las partículas de fibra de Carbono son partículas abrasivas, por lo que pueden desgastar y dañar el nozzle de latón con el tiempo. Por este motivo, se recomienda utilizar un nozzle de acero endurecido, Nozzle X, Olsson Ruby o Nozzle Everlast de 3D Solex.

Para este tipo de filamentos con fibras, se recomienda utilizar nozzles con diámetro de salida de al menos 0.5 mm para evitar posibles atascos y fallos de impresión. En el caso del PLA con fibra de carbono, se han realizado pruebas de éxito con boquillas de 0.5 mm y sistema de extrusión directo.

En cuanto al acabado de este filamento destaca su acabado negro mate con un ligero brillo debido a las fibras de carbono incrustadas.

Consejos de uso:

En estado de filamento, el PLA Fibra de Carbono es más frágil que el PLA estándar por lo que debe manipularse con cuidado para evitar roturas.

La temperatura óptima de impresión puede oscilar entre los 195°C y los 220°C en función de cada impresora 3D. La impresión de este filamento es igual de sencilla a la del PLA estándar tal y como se ha comentado anteriormente. Aunque no es necesario disponer de cama caliente para imprimir este filamento, en caso de disponer de ella se recomienda ponerla a 50-60°C. La adhesión de la primera capa es clave y probablemente de los factores más importantes para obtener buenas impresiones.

Información general	
Fabricante	Proto Pasta (EEUU)
Material	PLA + Fibra de carbono
Formato	Rollo de 125 g Bobina de 500 g
Densidad	1.15 g/cm ³
Diámetro de filamento	1.75 ó 2.85 mm
Tolerancia de diámetro	±0.05mm
Longitud filamento	±45 m (Ø1.75 mm-125 g) ±180 m (Ø1.75 mm-500 g) ±17 m (Ø 2.85 mm-125 g) ±68 m (Ø 2.85 mm-500 g)
Color	Negro
RAL/Pantone	-
Propiedades de impresión	
Temperatura de impresión	195-225°C
Temperatura de base/cama	50-60°C
Temperatura de cámara	No necesaria
Ventilador de capa	Recomendado
Velocidad de impresión	20-80 mm/s
Propiedades mecánicas	
Resistencia al impacto Izod	-
Resistencia al impacto Charpy	-
Alargamiento a la rotura	-
Resistencia a la tracción	-
Módulo de tracción	-
Resistencia a la flexión	-
Módulo de flexión	-
Dureza superficial	-
Propiedades térmicas	
Temperatura reblandecimiento	55°C
Temperatura de fusión	150°C
Propiedades específicas	
Transparencia	No
Información adicional	
HS Code	3916.9
Diámetro carrete (exterior)	205 mm
Diámetro carrete (agujero interior)	53 mm
Ancho carrete	55 mm

Fig. 37. Especificaciones del filamento PLA reforzado con fibra de carbono

3. PLA reforzado con fibra de vidrio

El proveedor de este material ha sido 3D-fuel y se puede encontrar en la siguiente dirección: https://eu.3dfuel.com/products/glass-filled-pla?_pos=3&_sid=a80a1c599&_ss=r.

El filamento de impresora 3D PLA con reforzado con fibra de vidrio es el primer filamento de grado de ingeniería que se puede usar en cualquier máquina capaz de imprimir PLA estándar.

El filamento de PLA reforzado con fibra de vidrio ofrece beneficios similares al PLA estándar, como una urdimbre muy baja, poco olor y no se necesita una extrusora especial o lecho calentado. Pero el poder de su nueva composición con el refuerzo le permite ser más fuerte, más resistente y más flexible.

En comparación con las piezas impresas en 3D en PLA estándar, el PLA relleno de vidrio es:

- 1,4 veces más fuerte que el PLA a 57 MPa de resistencia a la tracción máxima.
- 1,3 veces más resistente que el PLA con 34 J / m de resistencia al impacto.
- 1,9 veces más flexible que el PLA con un alargamiento a la tracción del 3,4% antes del fallo.

Glass Filled PLA es un avance para piezas y componentes impresos en 3D de ingeniería y uso práctico, pero también para ofrecer simplemente a los usuarios de PLA un producto muy mejorado.

El PLA reforzado con fibra de vidrio se imprime bien a 190-210 °C. Estos son puntos de partida generales para PLA reforzado con fibra de vidrio, aunque las temperaturas reales varían de una impresora a otra. No es necesaria una cama climatizada, aunque si dispone de una, se obtendrán mejores resultados si se configura a una temperatura de 40 °C.

4. Lay-Brick (Cerámico)

El proveedor de este material ha sido filament2print donde lo podemos encontrar en la siguiente dirección: <https://filament2print.com/es/madera-ceramico/587-lay-brick.html>

El Lay- Brick es un filamento para impresión 3D fabricado con arena y un polímero de unión que crea un acabado superficial similar al de un objeto cerámico o de piedra.

Además, variando la temperatura de extrusión las superficies serán más o menos rugosas. La combinación de las nuevas geometrías que son posible de fabricar gracias a la impresión 3D y de las diferentes posibilidades de acabado superficial que ofrece el Lay-Brick permiten crear innovadoras piezas de decoración.

En cuanto a la temperatura de trabajo, el nozzle puede oscilar entre los 165 °C y los 210 °C. A temperaturas bajas se obtienen superficies con menos rugosidad. Según se va aumentando la temperatura se van consiguiendo superficies más rugosas y ásperas.

Información general	
Fabricante	Kai Parthy-LayFilaments (Alemania)
Material	Arenisca con polímero de unión
Formato	Pack de 50g Rollo de 250g
Densidad	-
Diámetro de filamento	1.75 ó 2.85 mm
Tolerancia de diámetro	±0,1 mm
Longitud filamento	-
Color	Blanco
RAL/Pantone	-
Propiedades de impresión	
Temperatura de impresión	165-210°C
Temperatura de base/cama	20-40°C
Temperatura de cámara	No necesaria
Ventilador de capa	Recomendado
Diámetro de boquilla	>0.40 mm
Propiedades mecánicas	
Resistencia al impacto Izod	-
Resistencia al impacto Charpy	-
Alargamiento a la rotura	-
Resistencia a la tracción	-
Módulo de tracción	-
Resistencia a la flexión	-
Módulo de flexión	-
Dureza superficial	-
Propiedades térmicas	
Temperatura reblandecimiento	-
Temperatura de fusión	-
Propiedades específicas	
Transparencia	Opaco
Información adicional	
HS Code	3916.9
Diámetro rollo (exterior)	200 mm
Diámetro rollo (agujero interior)	125 mm
Ancho rollo	30 mm

Fig. 38. Especificaciones del filamento Lay-Brick (Cerámico)

5.2 Selección de la máquina

El trabajo se ha realizado en las instalaciones del Campus Universitario de Alcoy. Entre las diferentes impresoras 3D que dispone el Campus se ha empleado la impresora basada en extrusión de material, modelo Prusa i3 mk3s.



Fig. 39 Impresora 3D modelo Prusa i3 MK3s

La original Prusa i3 mk3s es la "mejor impresora 3D" según all3dp.com y la revista Make, donde la mk3s también recibió la "elección del editor" como la impresora 3D mejor puntuada en la guía de fabricación digital 2019. La mk3s incorpora un extrusor mejorado, numerosos sensores y varias características inteligentes. Además, dispone de una nueva base calefactable magnética mk52 con una plancha de acero forrada de PEI intercambiable.



Fig. 40 Premios otorgados a la impresora i3 MK3s

La funcionalidad de la mk3s se puede extender aún más con la actualización multi-material 2.0 para imprimir con hasta 5 materiales simultáneamente, aunque en nuestro caso únicamente hemos empleado un material por impresión. Las características más significativas de la prusa i3 MK3s se resumen en el siguiente esquema.

Cama caliente desmontable	La nueva base calefactable magnética sujeta una chapa de acero recubierta de PEI.
Estabilidad estructural	Con la MK3s se ha introducido un eje Y rediseñado a partir de perfiles de aluminio, además de añadir 10 mm de altura en Z.
Impresión rápida y silenciosa	Gracias a los nuevos drivers la MK3s es extremadamente silenciosa, un 99% mas que las otras. También se ha aumentado la velocidad de impresión con más de 200 mm/s.
Modo pánico	La impresora puede recuperarse totalmente de un apagón. Un sensor especial detecta la interrupción de la electricidad e inmediatamente desconecta la cama caliente y el extrusor.
Sensor de filamento	Se ha incorporado un nuevo sensor de filamento que utiliza un sensor óptico que se activa mediante una simple palanca mecánica, sin preocuparse de la propiedades ópticas del filamento.
Recuperación de desplazamientos de capa	Con los nuevos drivers se detecta pérdida de pasos y desplazamientos de capa, mejorando en fiabilidad y confort.
Extrusor Bondtech	Extrusor mejorado con engranajes Bondtech que agarran el filamento en ambos lados, mejorando el empuje y haciendo la impresora más fiable.
Sensor P.I.N.D.A 2	Dos sensores: uno mide la temperatura ambiente en la electrónica y el segundo sensor permite compensar la diferencia de temperatura.
Boquilla E3D V6	Es el extrusor completamente metálico líder en el mercado debido a su alto rendimiento a altas temperaturas.

Tabla 4. Características más significativas de la impresora modelo i3 MK3s. Fuente: www.prusa3d.es

5.3 Definición de los parámetros

Para poder imprimir una pieza necesitamos un tipo de archivo que nuestra impresora pueda entender. Las impresoras 3D trabajan con un tipo de fichero que le indica en que posiciones del espacio debe depositar el filamento fundido. Cada impresora comercial tiene sus propias especificaciones y cada empresa recomienda su propio software para conseguir un G-code del diseño 3D. Pero el que más destaca por su formato intuitivo, sencillo de usar, y con el que gracias al uso del mismo podemos profundizar más en la comprensión de cómo funciona una impresora 3D es Slic3r, que además es un software libre.

Este tipo de software lo que hace es laminar el diseño 3D en capas horizontales para que la impresora construya el modelo vertical de abajo hacia arriba. Va depositando todo el material de una capa y cuando la figura está a nivel continúa agregando material y así sucesivamente. Con Slic3r además de laminar el diseño se configuran diferentes parámetros fundamentales para la impresión 3D. A continuación, se detalla el entorno del software y algunos de los parámetros más importantes.

En concreto en este proyecto se ha utilizado PrusaSlicer, un software de laminado diseñado internamente basándose en el proyecto de código libre Slic3r. Es una herramienta con multitud de mejoras frecuentemente actualizada que contiene todo lo que se necesita para importar perfiles de impresión perfectos para la impresora 3D Original Prusa.

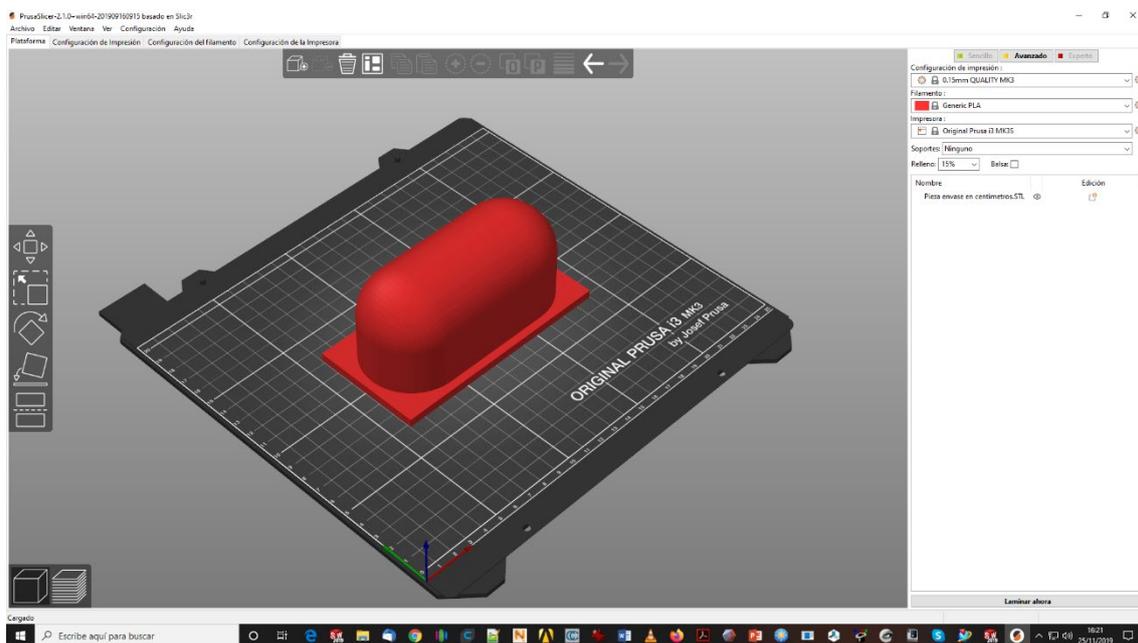


Fig. 41. Entorno del software PrusaSlic3r.

De los parámetros más importantes y que comentaremos a continuación, podemos destacar:

- Configuración de la impresión
 - Capas y perímetros
 - Relleno
- Configuración del filamento

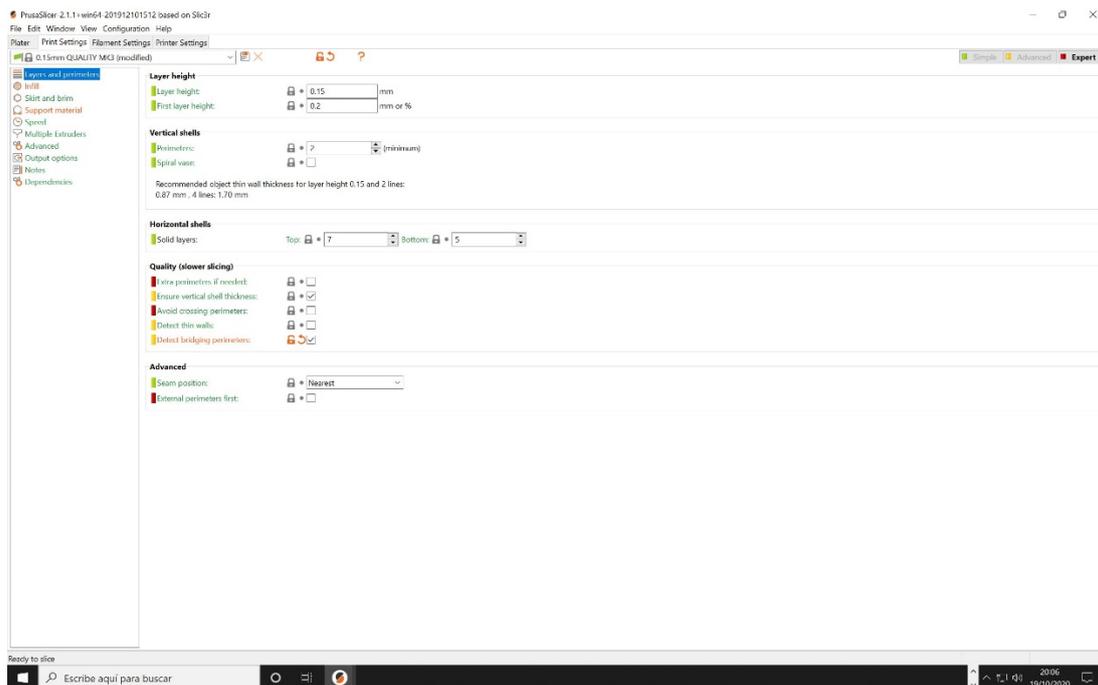


Fig. 42. Configuración de la impresión. Capa y perímetros.

Dentro de capas y perímetros como se puede observar en la figura 42, se puede configurar valores como altura de capa, que en nuestro caso se ha establecido un valor de 0,2 mm. Por defecto el programa establece en 3 el número de perímetros recomendados, pero en nuestro caso se han establecido 2 perímetros. Otros aspectos que se tienen en cuenta en esta pestaña son los contornos en la geometría, número de capas solidas e inferiores.

En el apartado de relleno figura 46, lo primero que se debe tener en cuenta a la hora de escoger el relleno de una determinada pieza son las características y la funcionalidad de la misma. El relleno se define mediante dos parámetros: el porcentaje de relleno y el patrón de relleno. A continuación, veremos cómo influyen cada uno de ellos en la resistencia mecánica de las piezas impresas.

- Porcentaje de Relleno

El primer parámetro de importancia es la densidad de relleno, este valor puede variar desde un 0% (sin relleno) hasta un 100% (pieza solida). Cuanto mayor sea el porcentaje de relleno mayor será la resistencia de la pieza. Pero también serán mayores el peso, el tiempo de impresión y el coste (asociado a un mayor consumo de material) de la misma. Debe haber una solución de compromiso entre la resistencia del componente que queremos imprimir y el tiempo y los costes de impresión. Ya que un menor relleno nos permite crear piezas más baratas en menos tiempo.

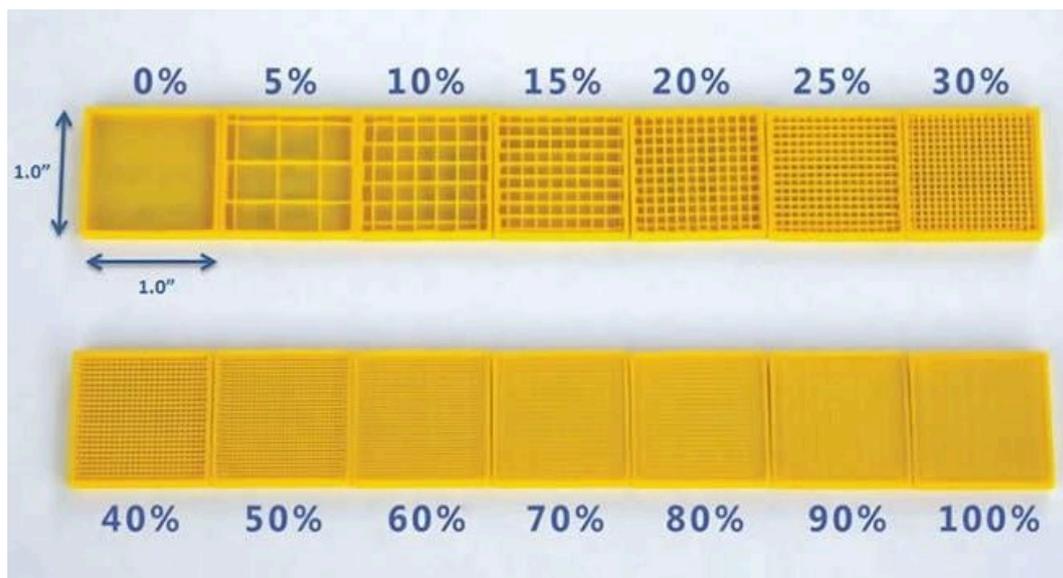


Fig. 43 Distintos porcentajes de relleno.

En nuestro caso, la pieza que vamos a imprimir no necesita relleno ya que es una pieza que deseamos que esté hueca. De todos modos, para una mejor impresión, se ha configurado un relleno del 15%.

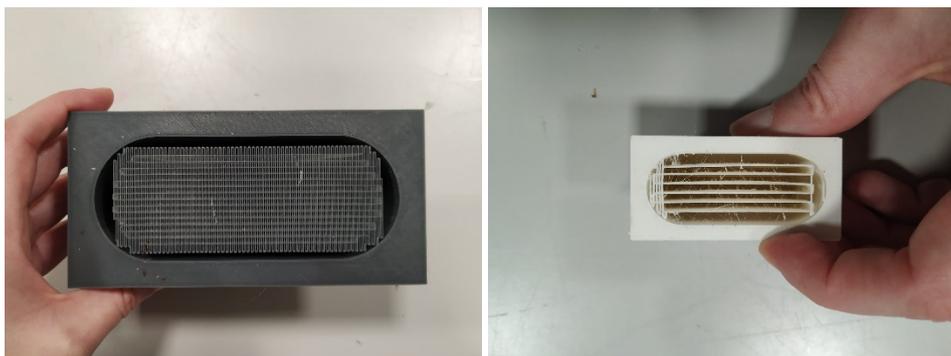


Fig. 44. Rellenos configurados en las piezas.

- Patrones de Relleno

El segundo parámetro de importancia es el patrón de relleno, existen una amplia variedad de patrones de relleno, debido a que cada software de laminación cuenta con unos patrones determinados, pero los más utilizados son el rectangular o rectilíneo, el triangular (o diagonal), ondulado (o curvilíneo) y panel de abeja (o hexagonal). En nuestro caso se ha seleccionado el patrón denominado rectilíneo.

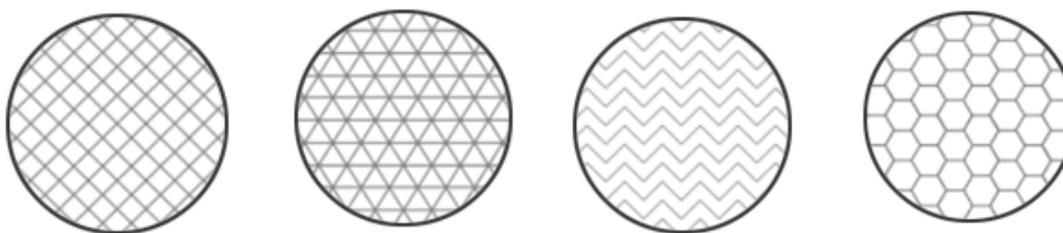


Fig. 45. Principales opciones de relleno.

En este apartado se debe considerar también la definición del tipo de relleno para las capas superiores e inferiores de la geometría construida, por defecto se ha configurado el patrón Rectilíneo.

Un aspecto que complementa a este parámetro es el ángulo de inclinación del patrón de relleno de las capas superiores e inferiores, este valor generalmente y el que se ha empleado en nuestra impresión ha sido de 45° de inclinación.

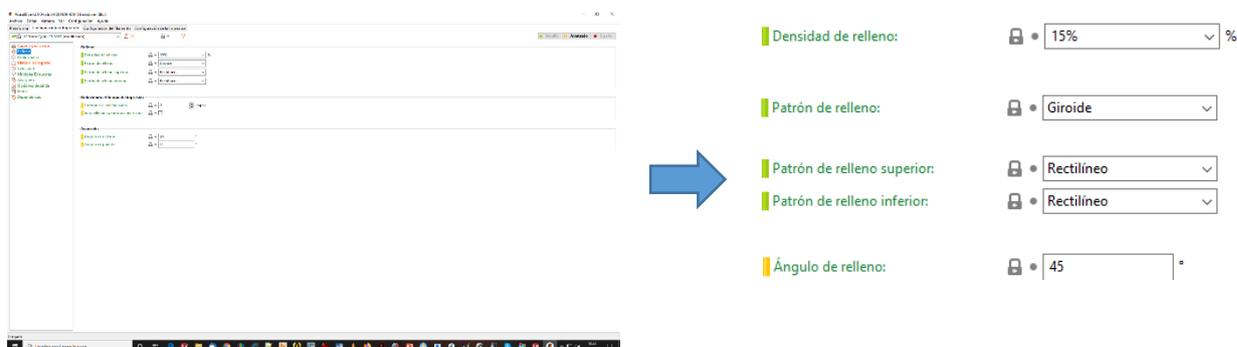


Fig. 46. Configuración de la impresión. Relleno.

Este proyecto se basa en la impresión de un molde para el proceso de termoformado con distintos materiales. A continuación, en la siguiente pestaña del software PrusaSlicer configuramos cada uno de los filamentos empleados.

En esta pestaña nos centramos en el apartado de filamento, donde configuramos los siguientes parámetros:

- Diámetro. Aquí debemos configurar el diámetro de filamento usado. Este parámetro es que nos regula la cantidad de material que deposita el extrusor. Si se detecta que la boquilla no extruye la cantidad adecuado de material hay que revisar el valor introducido. Para este proyecto se ha configurado un valor de diámetro de 1,75 mm.
- Multiplicador de extrusión. Es la relación de radios entre el engranaje pequeño y el engranaje grande del extrusor. Se recomienda no modificar el valor por defecto 1, ya que este parámetro lo define Slic3r a través del firmware de la máquina.
- Temperatura del extrusor. Define la temperatura del extrusor en función de cada material y también del fabricante, este valor no se debe ir ajustando mediante pruebas hasta obtener el mejor acabado y adherencia. Aunque se pueden tomar como referencia los valores de temperatura que nos indica el fabricante del material. Las temperaturas seleccionadas para los materiales que hemos empleado son:

Material	Temperatura del extrusor
PLA	1ª Capa: 215 °C Otras capas: 210 °C
PLA + CF	1ª Capa: 195 °C Otras Capas: 200 °C
PLA + GF	1ª Capa: 195 °C Otras Capas: 200 °C
LayBrick	1ª capa: 185°C Otras capas: 190 °C

Tabla 5. Temperatura del extrusor para cada material.

- Temperatura de la base (o cama): Con este parámetro definimos la temperatura de la cama caliente. Los valores típicos oscilan entre los 40 °C y los 100 °C, pero igual que el parámetro anterior se prueba con diferentes valores hasta conseguir una adherencia óptima. La temperatura seleccionada para los cuatro tipos de materiales ha sido de 60 °C.

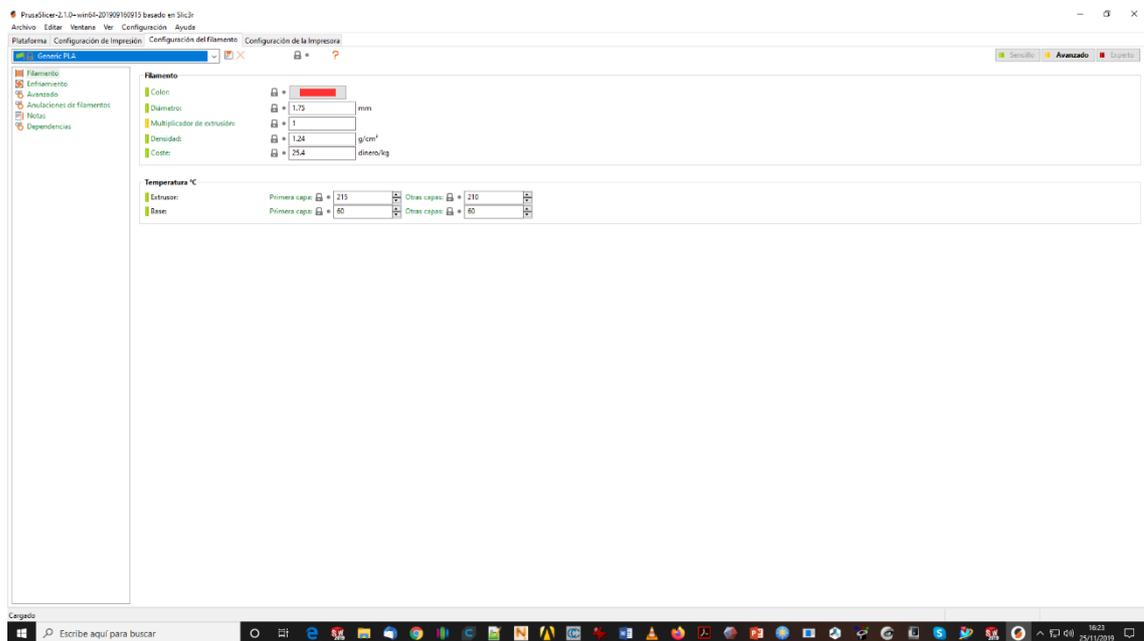


Fig. 47 Configuración del filamento de PLA.

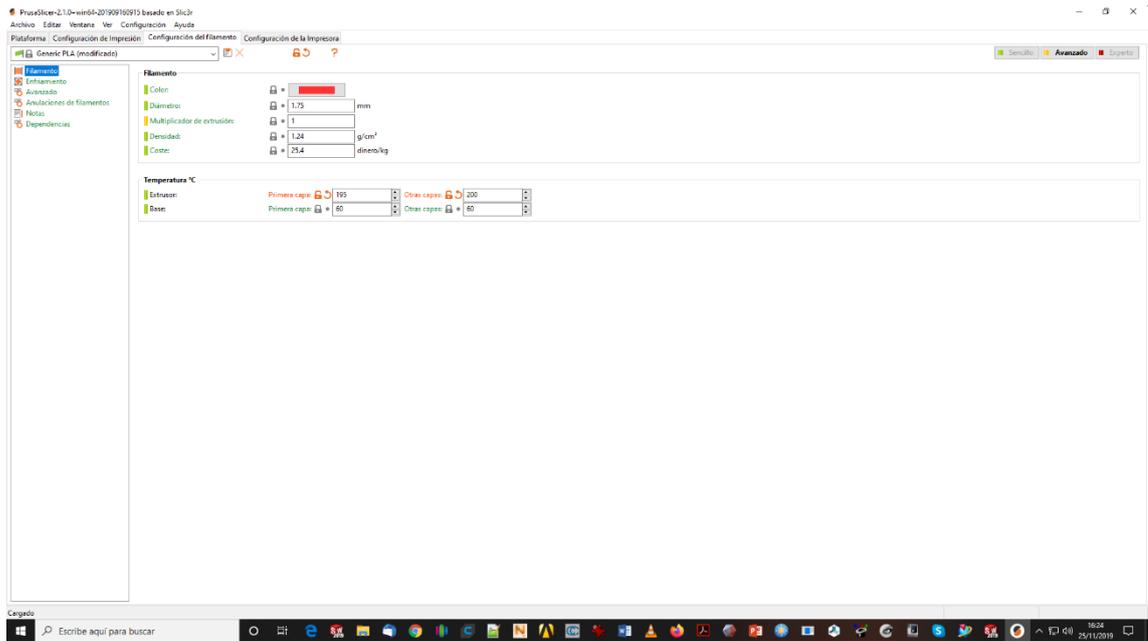


Fig. 48. Configuración del filamento de PLA + CF.

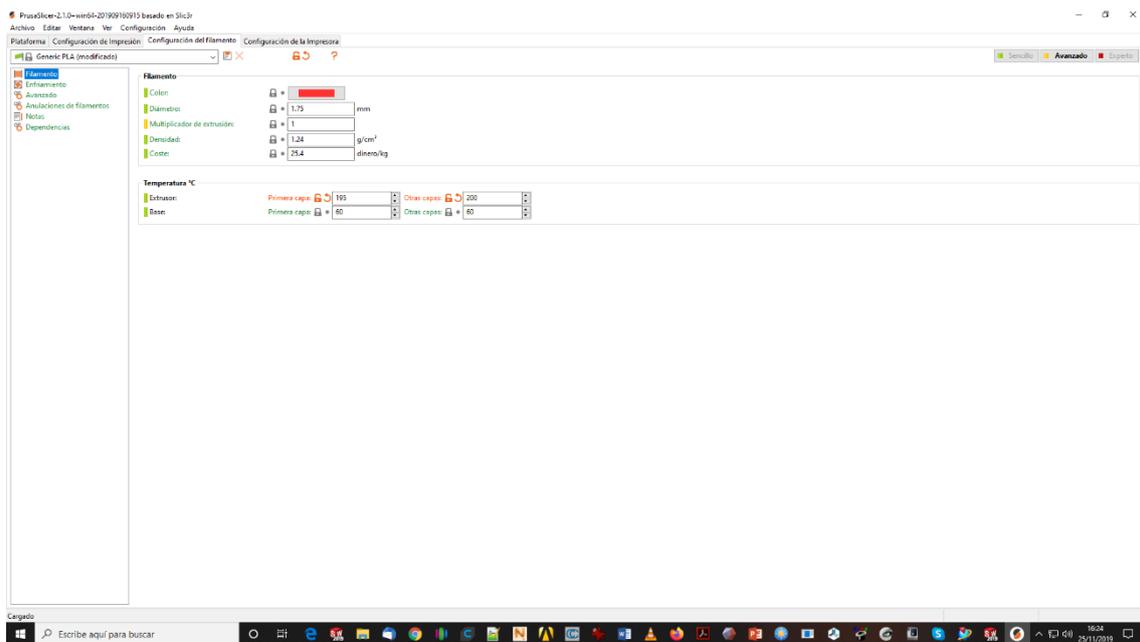


Fig. 49. Configuración del filamento de PLA + GF.

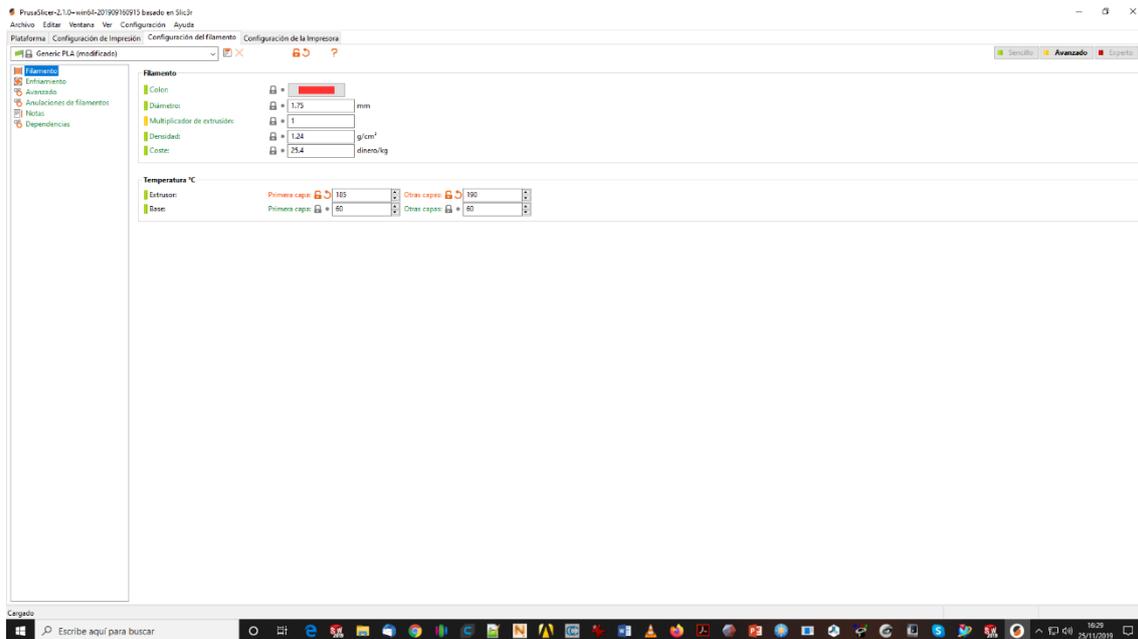


Fig. 50. Configuración del filamento LayBrick.

Una vez establecidos los parámetros para cada uno de los materiales y generados los Gcodes, se han transferido los archivos a la impresora Prusa i3 MK3s para proceder a su impresión.

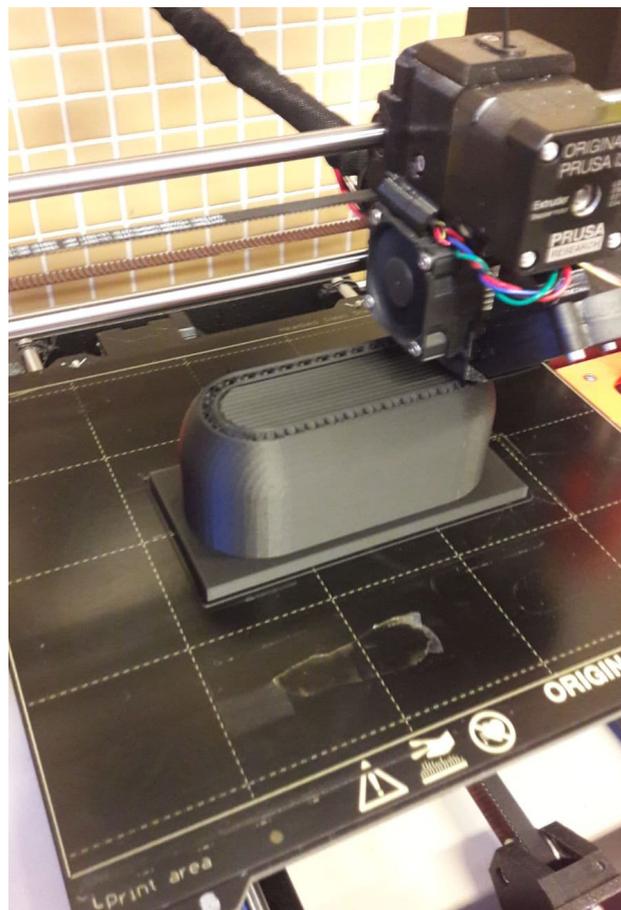


Fig. 51. Impresión de los moldes utilizados para el posterior termoformado.

A continuación, se listan los tiempos y la cantidad de material empleado en cada uno de los moldes.

Material	Tiempo de impresión	Cantidad de material
PLA	11 h	93,08 g
PLA + CF	11 h	93,08 g
PLA + GF	11 h	93,08 g
LayBrick	2 h *	23,27 g

Fig. 52. Tiempos de impresión y cantidades de material.

* Es importante comentar que el molde impreso con el material LayBrick se ha escalado debido a que cuando se realizó la primera impresión con la medida de los otros moldes se rompía, por tanto, se decidió disminuir el tamaño y como consecuencia se ha reducido el tiempo de impresión y la cantidad de material.

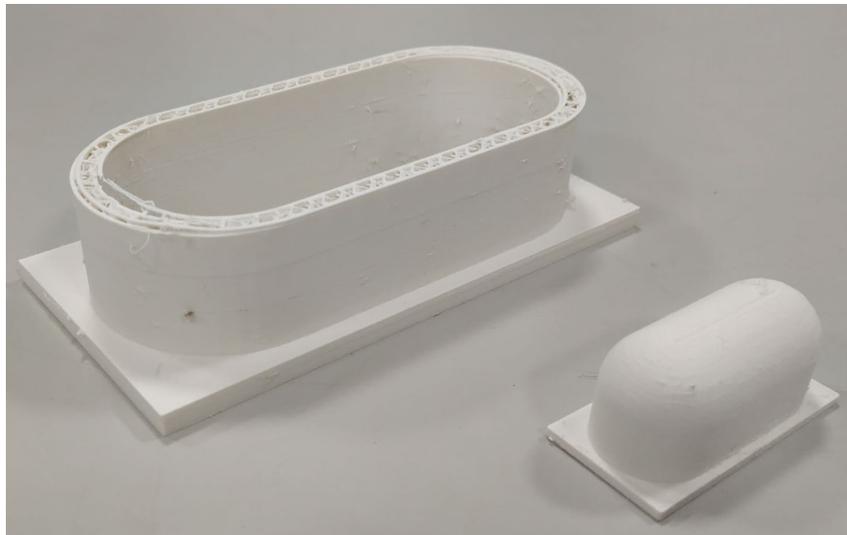


Fig. 53. Rotura del primer molde y escalado del molde.

Ensayos de termoconformado

6. Ensayos de termoconformado

En la presente investigación y para el desarrollo del proceso de termoformado la Universidad ha adquirido una termoformadora de vacío FormBox para laboratorio para crear rápidamente prototipos de productos con acabados de alta calidad, reproduciendo diseños y haciendo moldes en segundos. Esta máquina termoformadora brinda tecnología de fabricación avanzada en un espacio reducido. Es un equipo que permite unir el prototipado con la impresión 3D ya que nos permite crear lotes de productos.

El proceso de fabricación de la pieza llevada a cabo con la termoformadora FormBox ha consistido en:

1. Conectar la máquina a la red eléctrica utilizando el cable de alimentación conectado a la parte posterior del equipo.
2. Conectar el cable de alimentación de la aspiradora en la parte posterior del FormBox y encenderla.
3. Insertar el extremo más pequeño del tubo de vacío FormBox en el puerto en la parte posterior del FormBox.
4. Conectar la manguera de la aspiradora al otro extremo del tubo de aspiración.
5. Encender el calentador de la FormBox, seleccionando el ajuste de temperatura en el dial del calentador. Para mantener la máquina fría se encenderán los ventiladores.
6. Elegir la hoja de fundición con el material deseado. En nuestro caso elegimos la lámina de tereftalato de polietileno glicol (PETG).
7. Ajustar la maquina a la temperatura correcta para la hoja de fundición elegida siendo las configuraciones de tiempo y calor elegidas el nivel 5 de calentamiento con un tiempo de 1:00-1:20 min.
8. Colocar la lámina de PETG entre las bandejas, cuando estaba correctamente sujeta entra ambas bandejas se levantaron ambas bandejas juntas hasta que encajaran en su lugar cerca del calentador y encender el temporizador.



Fig. 54. Colocación del molde de PLA +CF y calentamiento de la lámina de PETG



Fig. 55. Colocación del molde de PLA +GF junto con el de LayBrick y calentamiento de la lámina de PETG

9. Colocar el prototipo en la placa de vacío.
10. Cuando el equipo nos indicó que la lámina estaba correctamente calentada, comprobamos que así era, fijándonos en la ondulación de los bordes.



Fig. 56. Calentamiento de lámina PETG



Fig. 57. Primeras ondulaciones de la lámina PETG tras el calentamiento.



Fig. 58. Calentamiento óptimo de la lámina PETG

11. Cuando la lámina estuvo correctamente calentada bajamos las bandejas con fuerza y la máquina de vacío se activó automáticamente succionando el aire del alrededor del prototipo.



Fig. 59. Succión del aire para el correcto acople de la lámina PETG al molde.

12. Finalmente esperamos aproximadamente 5 minutos que el molde creado se enfríe para retirarlo sin provocar ningún desperfecto.

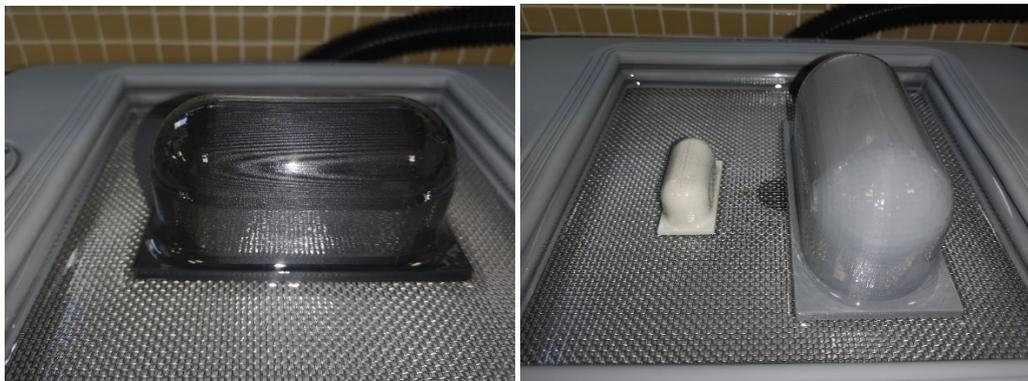


Fig. 60. Lámina de PETG atemperada y correctamente acoplada a la pieza.

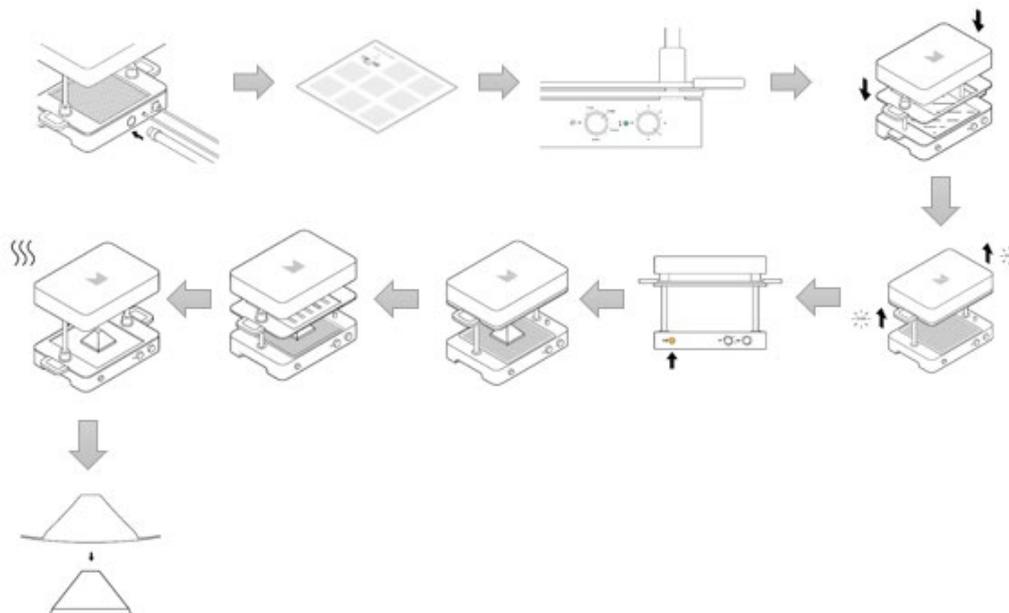


Gráfico 1. Diagrama de flujo del proceso de termoformado.

El proceso de termoformado se concluyó con éxito consiguiendo la pieza deseada. A continuación, se muestra la pieza obtenida utilizando la lámina de PETG proporcionada por el fabricante de la máquina FormBox.



Fig. 61. Pieza deseada obtenida por termoformado. Vista 1

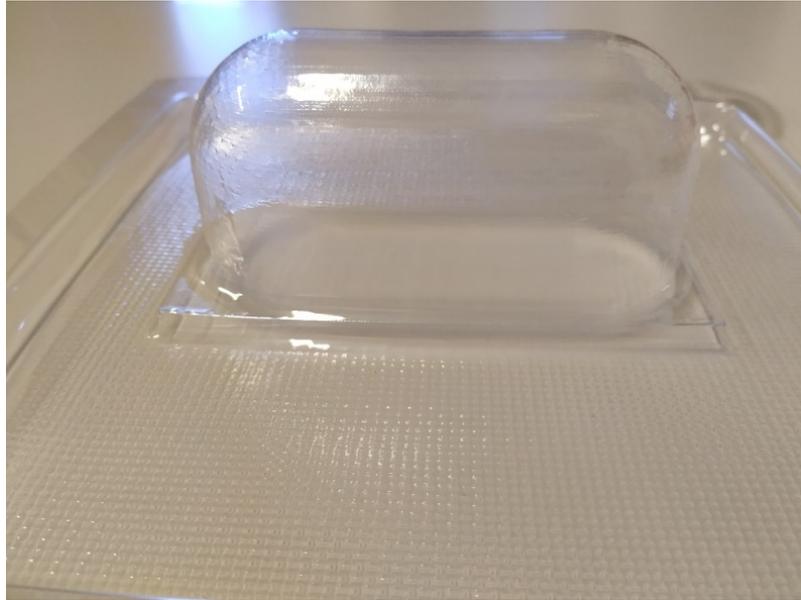


Fig. 62. Pieza deseada obtenida por termoformado. Vista 2



Fig. 63. Piezas obtenidas por termoformado.

Tras las pruebas de termoconformado realizadas, no se observaron indicios significativos de degradación de los moldes. Pero como fue descrito anteriormente, el termoconformado es un proceso que varía dependiendo de muchos factores, como por ejemplo el material utilizado, del sistema de calefacción, la temperatura ambiente, etc., por lo que es un proceso que, aunque se ha estudiado en profundidad y existe mucha bibliografía, además de esto requiere de mucha práctica.

Por tanto, aunque sí que se ha conseguido la pieza tal y como se ha comentado anteriormente, a continuación, se muestra la imagen de una pieza termoconformada que presenta algunas irregularidades debido a un sobrecalentamiento de la lámina, por tanto, este caso erróneo fue útil para determinar el tiempo de calentamiento de las láminas y evitar este tipo de problemas.



Fig. 64. Pieza termoconformada con errores detectados.

Para nuestro estudio era interesante medir la temperatura de los moldes y por tanto registrar la temperatura a la cual tienen un buen comportamiento sin sufrir ningún tipo de degradación y para tener una base para posteriores estudios más industriales.

Los datos obtenidos de la temperatura que presentaron los moldes tras el proceso de termoconformado sin extraer la lámina y extrayendo la lámina fueron:

Material	Temperatura post termoconformado con la lámina	Temperatura post termoconformado desmoldeado
PLA	85 °C	67 °C
PLA + CF	85 °C	67 °C
PLA + GF	85 °C	67 °C
LayBrick	85 °C	67 °C

Fig. 65. Temperaturas de los moldes post termoconformado

Presupuesto final

7. Presupuesto final

A continuación, se pretende enumerar los gastos que se han producido a lo largo del proyecto. Para determinar los costes totales del proyecto debemos saber cuáles son:

- Materiales
- Trabajo del personal
- Equipos e instalaciones (amortización, consumo, mantenimiento)
- Otros

Un presupuesto bien elaborado, puede facilitar información de la ejecución del proyecto, además de proporcionar una base para futuros proyectos relacionados.

En nuestro caso, dividimos los gastos en tres partidas:

1. RRHH

Para llevar a cabo el siguiente proyecto únicamente se ha contado con la participación del alumno y del profesor tutor como coordinador del proyecto, para cumplir en su totalidad los objetivos establecidos.

El número horas empleadas para la fabricación de un prototipo de molde para termoformado ha sido de 1 hora con un coste de 13,11 €/h. Por tanto, el **coste total de recursos humanos** es de **13,11 €**.

2. Equipos y software

Los equipos requeridos han sido la máquina de impresión 3D, la máquina de termoformado, la cámara térmica, y el ordenador para la realización del diseño de la pieza, las simulaciones, las configuraciones para la impresión 3D y para la redacción del trabajo.

Además, es importante comentar, que al ser proyecto de investigación universitaria los softwares empleados tales como, Solidworks, Ansys, Slice3r y Microsoft Office no han tenido ningún coste ya que están disponibles para los alumnos del campus.

Por tanto, como estamos realizando el presupuesto del proyecto no se incluirán dichos gastos. A continuación, se muestra una tabla resumen de los costes de los equipos:

Equipo	Tarea	Precio
Prusa i3 MK3s	Impresión de los moldes	1.500,00 €
MAYKU FormBox	Obtención de las piezas mediante termoformado	900,00 €
Cámara térmica	Medición de la temperatura de los moldes	800,00 €
Ordenador	Búsqueda de información, diseño de los moldes, configuración de los archivos para la impresión 3D, redacción de la memoria.	700,00 €
Total		3.900,00 €

3. Materiales

Para estimar los materiales e insumos utilizados hemos usado una calculadora con la que se tienen en cuenta diferentes factores que influyen en la impresión. Una vez introducidos los valores nos remite el precio del prototipo del molde para termoformado. En las siguientes tablas se muestra el valor obtenido para cada uno de los moldes fabricados, hay que tener en cuenta que las celdas amarillas son los valores que imputamos y las celdas azules los cálculos.

Object	
Object Weight (grams)	93,08
Printing Time (hours)	11,00
Energy	
Electricity Tariff (€/kWh)	0,10
Printer Power (Watts)	190,00
kWh (1 hr)	0,19
€/hr	0,02
COST (£)	0,21
Filament	
Filament Cost (€/kg)	24,99
COST (€)	2,33
Depreciation	
Printer Purchase (€)	1500,00
Printer Lifetime (years)	5,00
Daily Usage (hours)	2,00
Hours in Life	3650,00
Depreciation/hr	0,41
COST (€)	4,52
Repairs	
Repair Costs (%)	0,00
Lifetime (h)	3650,00
Repairs/hr	0,00
COST (€)	0,00
Other	
Other Costs (€)	0,00
COST (€)	0,00
Failures	
Failure Rate (%)	0,00
Costs so far	7,06
COST (€)	0,00
TOTAL	
Total Cost (€)	7,06

Tabla 6. Cálculo del precio prototipo molde PLA.

Object	
Object Weight (grams)	93,08
Printing Time (hours)	11,00
Energy	
Electricity Tariff (€/kWh)	0,10
Printer Power (Watts)	190,00
kWh (1 hr)	0,19
€/hr	0,02
COST (£)	0,21
Filament	
Filament Cost (€/kg)	193,12
COST (€)	17,98
Depreciation	
Printer Purchase (€)	1500,00
Printer Lifetime (years)	5,00
Daily Usage (hours)	2,00
Hours in Life	3650,00
Depreciation/hr	0,41
COST (€)	4,52
Repairs	
Repair Costs (%)	0,00
Lifetime (h)	3650,00
Repairs/hr	0,00
COST (€)	0,00
Other	
Other Costs (€)	0,00
COST (€)	0,00
Failures	
Failure Rate (%)	0,00
Costs so far	22,71
COST (€)	0,00
TOTAL	
Total Cost (€)	22,71

Tabla 7. Cálculo del precio prototipo molde PLA + CF

Object	
Object Weight (grams)	93,08
Printing Time (hours)	11,00
Energy	
Electricity Tariff (€/kWh)	0,10
Printer Power (Watts)	190,00
kWh (1 hr)	0,19
€/hr	0,02
COST (£)	0,21
Filament	
Filament Cost (€/kg)	98,38
COST (€)	9,16
Depreciation	
Printer Purchase (€)	1500,00
Printer Lifetime (years)	5,00
Daily Usage (hours)	2,00
Hours in Life	3650,00
Depreciation/hr	0,41
COST (€)	4,52
Repairs	
Repair Costs (%)	0,00
Lifetime (h)	3650,00
Repairs/hr	0,00
COST (€)	0,00
Other	
Other Costs (€)	0,00
COST (€)	0,00
Failures	
Failure Rate (%)	0,00
Costs so far	13,89
COST (€)	0,00
TOTAL	
Total Cost (€)	13,89

Tabla 8. Cálculo del precio prototipo molde PLA + GF

Object	
Object Weight (grams)	23,27
Printing Time (hours)	2,00
Energy	
Electricity Tariff (€/kWh)	0,10
Printer Power (Watts)	190,00
kWh (1 hr)	0,19
€/hr	0,02
COST (£)	0,04
Filament	
Filament Cost (€/kg)	110,84
COST (€)	2,58
Depreciation	
Printer Purchase (€)	1500,00
Printer Lifetime (years)	5,00
Daily Usage (hours)	2,00
Hours in Life	3650,00
Depreciation/hr	0,41
COST (€)	0,82
Repairs	
Repair Costs (%)	0,00
Lifetime (h)	3650,00
Repairs/hr	0,00
COST (€)	0,00
Other	
Other Costs (€)	0,00
COST (€)	0,00
Failures	
Failure Rate (%)	0,00
Costs so far	3,44
COST (€)	0,00
TOTAL	
Total Cost (€)	3,44

Tabla 9. Cálculo del precio prototipo molde LayBrick

En definitiva, una vez desglosados los gastos más significativos del proyecto podemos saber cuál ha sido el total de la inversión

Gasto	Importe
RRHH	13,11 €
Equipos y software	3.900,00 €
Materiales	47,10 €
Gasto Total	3.960,21 €

Es importante comentar que si este proyecto se realizara en una empresa supondría un mayor gasto. Al ser un trabajo de investigación académico, la universidad proporciona una gran cantidad de recursos gratuitos. Por tanto, el precio total obtenido es real a nivel académico, pero no a nivel industrial.

Conclusiones

8. Conclusiones

Al inicio del proyecto nos planteamos como era la situación actual respecto a la industria del termoformado y concluimos que es un sector que podría mejorar ya que, con un simple estudio del arte del sector, detectamos los siguientes problemas:

- Costes de fabricación de los moldes. Altos costes de inversiones por la diversidad de tamaños y formas.
- Largo tiempo de espera hasta la recepción del molde desde el lanzamiento del pedido.
- Altos costes de inversión en caso de medidas especiales.
- Altos costes de amortización de moldes para tiradas pequeñas.

Partiendo de estos problemas e ideas principales se llevó a cabo el proyecto presentando y los resultados obtenidos durante la ejecución del proyecto de I+D muestran que es posible la fabricación de moldes de impresión 3D mediante impresión por extrusión de material. Este nuevo proceso de fabricación de moldes prototipo de termoconformado ofrece un gran avance a la hora de optimizar nuevos diseños y obtener pequeñas series de envases.

Con los resultados obtenidos tras la medición de la temperatura en cada molde pudimos comprobar que, para este caso en concreto, la obtención de piezas por termoformado, no es necesario utilizar filamentos especiales con cargas extra, ya que simplemente con PLA se puede conseguir las piezas deseadas. Por otro lado, al saber que no es necesario la utilización de filamentos especiales simplemente con un extrusor de latón podemos obtener nuestros moldes, ya que, si no fuera así tal y como hemos tenido que proceder, es necesario la utilización de un extrusor con punta de rubí la cual soporta los materiales abrasivos tales como el PLA+ CF, el PLA +GF y el LayBrick.

Con una adecuada selección de materiales y tecnologías de impresión 3D, se puede conseguir reducir el coste de la fabricación de los moldes prototipo de termoconformado de envases notablemente.

A lo largo del proyecto hemos podido ir identificando las ventajas, que es poder fabricar moldes de termoformado por fabricación aditiva, entre ellas cabe destacar:

- ✓ Fabricación de prototipos impresos a muy bajo coste.
 - Ahorro en coste de material
 - Reducción de peso
 - Optimización estructural. Ahorro de material
- ✓ Reducción notable de los tiempos de fabricación de los moldes.
- ✓ Eliminación de inversiones en moldes metálicos para tiradas cortas.
- ✓ Posibilidad de realizar configuraciones distintas en cada tirada.

El hecho de desarrollar un sistema de fabricación de prototipos de bajo coste, nos hace plantearnos que para el futuro se pueda ir mejorando sin generar un gran impacto económico.

Por último, el resultado de este trabajo se espera que en un futuro próximo pase de ser de nivel laboratorio o experimental a nivel industrial.

Referencias Bibliográficas

9. Referencias Bibliográficas

- [1] Z. L. Zhangwei Chen, Junjie Li, Chengbo Liu, Changshi Lao*, Yuelong Fu, Changyong Liu, Yang Li, Pei Wang, Yi He, "3D printing of ceramics: A review," *Journal of the European Ceramic Society*, pp. 661–687, 2018.
- [2] M. D. Simon Ford, "Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges," *Cleaner Production*, 10 May 2016 2016.
- [3] E. P. K. Syed A.M. Tofail, Amit Bandyopadhyay, Susmita Bose, Lisa O'Donoghue, Costas Charitidi., "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities," *Materials Today*, January/February 2018 2018.
- [4] L. S. Thierry Rayna, "From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation," *Technological Forecasting & Social Change*, 2016.
- [5] S. R. Fuentes, "Estudio comparativo de los métodos de fabricación aditiva para el titanio y sus aleaciones.," Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, 2017.
- [6] L. C. "Guía completa: Binder Jetting o Inyección Aglutinante." <https://www.3dnatives.com/es/inyeccion-aglutinante-te-lo-contamos-23032016/> (accessed).
- [7] L. C. "Guía completa: Deposición de energía directa." <https://www.3dnatives.com/es/guia-deposicion-de-energia-directa-100920192/> (accessed).
- [8] A. M. R. Group. "Material Extrusion." <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/> (accessed).
- [9] "La alternativa de producir componentes por Material Jetting." <http://mizaradditive.com/la-alternativa-producir-componentes-material-jetting/> (accessed).
- [10] A. M. R. Group. "Powder bed fusion." <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/> (accessed).
- [11] A. P. "Guía completa: Fusión láser de lecho de polvo." <https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-directo-de-metal-por-laser-les-explicamos-todo/> (accessed).
- [12] "LOM." <http://www.3d-printers.com.au/technologies/lom/> (accessed).
- [13] A. M. R. Group. "VAT Photopolymerisation." <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/> (accessed).
- [14] M. P. Arrieta, "Films de PLA y PLA-PHB plastificados para su aplicación en envases de alimentos. Caracterización y análisis de los procesos de degradación," Doctorado en Ciencia, Tecnología y Gestión alimentaria, Instituto de Tecnología de Materiales, Universitat Politècnica de València, 2014.
- [15] T. B. Vitoria, "Estudio y modelización de la procesabilidad mediante moldeo por inyección de materiales termoplásticos reciclados.," Departamento de Ingeniería mecánica y de materiales, Universidad Politécnica de Valencia.
- [16] S. N. Montagud, "Desarrollo de piezas de poliamida mediante impresión 3D," Grado en Ingeniería en tecnologías industriales, Universitat Politècnica de València, 2015-2016.
- [17] B. G. Ugur M Dilberoglua, Ulas Yamana, Melik Dolena, "The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0," *Procedia Manufacturing*, 2017.

- [18] F. C. p. I. i. Tecnológica. *Fabricación Aditiva*, 2011.
- [19] W. C. Guamantario, "Influencia de los parametros de relleno en el comportamiento mecanico a la flexió de piezas fabricadas en impresoras de bajo coste," Master universitario en diseño y fabricación integrada asistida por computador, Universitat Politecnica de Valencia, 2014.
- [20] V. J. S. Santiago Ferrandiz, Miguel Jorge Reig, David Juárez, Juan Manuel Gallego., *Procesos de conformado de materiales poliméricos y compuestos*. Universidad Politecnica de Valencia. Dept. Ing. Mecanica y de Materiales.

ANEXOS

Plano del molde

4

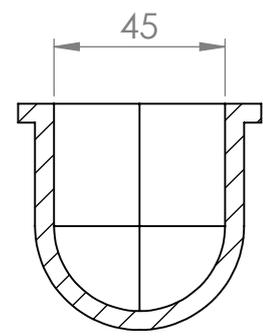
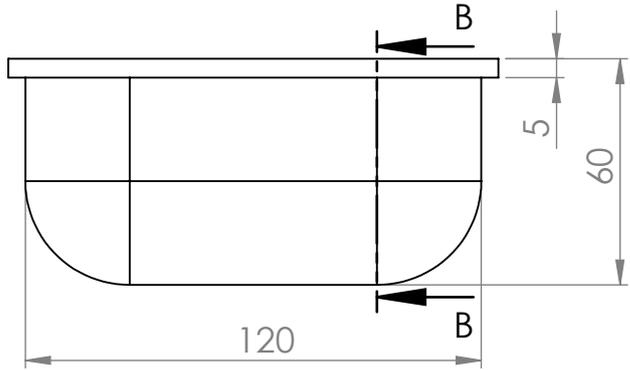
3

2

1

F

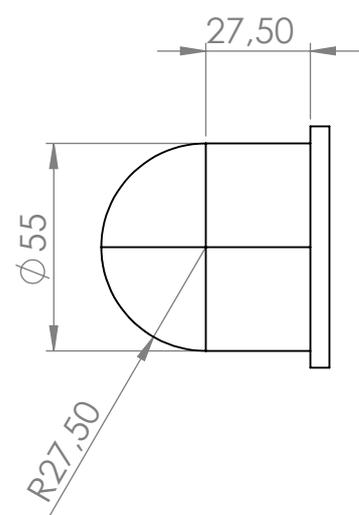
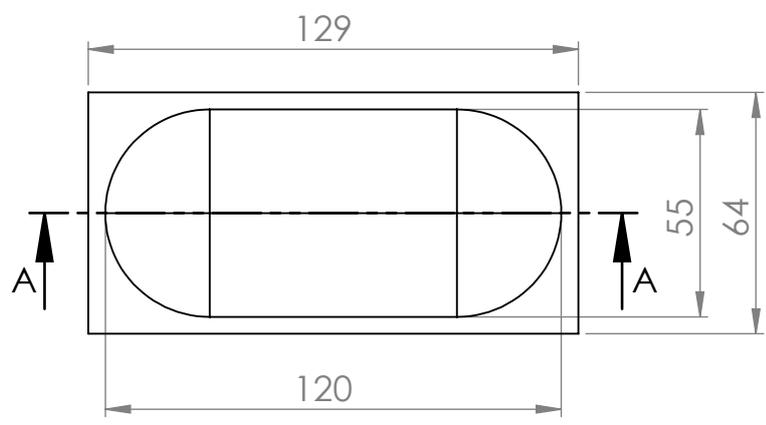
F



SECCIÓN B-B

E

E

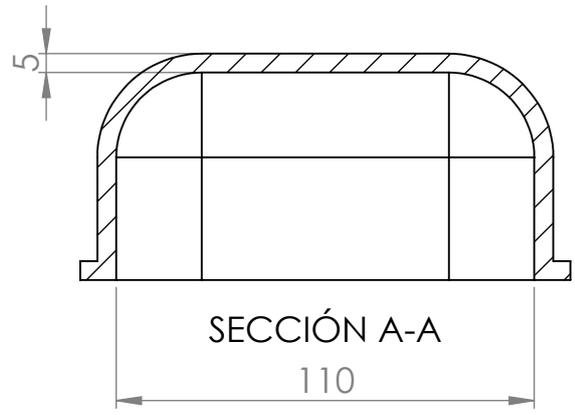


D

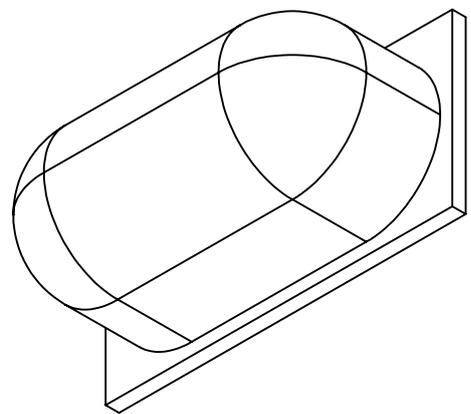
D

C

C



SECCIÓN A-A



B

B

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO: <h1>Cubeta</h1>			
DIBUJ.		VERIF.		APROB.		FABR.		CALID.	
						MATERIAL:		N.º DE DIBUJO	
						PESO:		ESCALA:1:2	
								HOJA 1 DE 1	

A

A

4

3

2

1

*Artículo presentado al congreso
internacional de soldadura y
tecnologías de unión*

Asunto: 4º CONGRESO INTERNACIONAL DE SOLDADURA Y TECNOLOGIAS DE UNIÓN - 23as JORNADAS TÉCNICAS

De: <congress@cesol.es>

Fecha: 29/10/2019 13:01

Para: <sferrand@mcm.upv.es>

Muy señor/a nuestro/a:

Acusamos recibo del título y resumen de la conferencia “**Estudio de nuevos materiales para la creación de un molde de termoformado mediante impresión 3d low cost**”, para presentar en el **4º CONGRESO INTERNACIONAL DE SOLDADURA Y TECNOLOGIAS DE UNIÓN - 23as JORNADAS TÉCNICAS**, que se celebrarán en Sevilla del 27 al 29 de mayo de 2020.

La aceptación o no del trabajo se le notificará para partir del 30 de octubre de 2019.

Agradeciéndole/a sinceramente su intención de participar en este evento, quedamos a su disposición para cualquier aclaración adicional que pueda necesitar.

En nombre del Comité Organizador, le/a saluda atentamente.

Beatriz Martín
Dpto. Administración
CESOL
Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión
C/ Condado de Treviño, 2 Local F-31
28033 MADRID
Tel.: 914 758 307; Fax: 915 005 377
E-mail: congress@cesol.es
Web: www.cesol.es



4º Congreso Internacional y
23as Jornadas Técnicas de
Soldadura y Tecnologías de Unión
Sevilla, 27-29 Mayo 2020



Este mensaje y cualquier fichero que incluya van dirigidos, exclusivamente, a su destinatario y son confidenciales. Si usted lo recibe por error o accede a él sin ser su destinatario, debe tener en cuenta que la información que contiene es reservada y que no puede leerlo, usarlo, copiarlo, distribuirlo o comunicarlo, por lo que le rogamos que lo destruya inmediatamente y nos lo notifique a esta misma dirección de e-mail. Este mensaje no se encuentra especialmente protegido, por lo que su confidencialidad no está asegurada. Puede haber sido previamente interceptado por personas no autorizadas, haber sido alterado o parcialmente eliminado, haber llegado a su destino con retraso, estar incompleto o incluir códigos maliciosos, en todo caso desconocidos por el remitente.

A los efectos legales, le informamos de que, en caso de que usted facilite datos de carácter personal a esta dirección de e-mail, dichos datos serán tratados por la entidad remitente de este correo, cuyos datos de contacto figuran en la firma del mismo. Los datos se tratarán, sobre la base de su consentimiento, para atender su solicitud, consulta o comunicación y, salvo que sea imprescindible para dar respuesta a estas, no es obligatorio facilitarlos. Los datos serán conservados hasta que quede resuelta su solicitud, consulta o comunicación. Puede retirar el consentimiento para el tratamiento de sus datos en cualquier momento a través de esta misma dirección de e-mail, si bien ello no afectará a la licitud de los tratamientos efectuados con anterioridad.

Tiene derecho a solicitar el acceso a sus datos personales, su rectificación o supresión, así como, en los casos previstos en el Reglamento General de Protección de Datos, a la limitación de su tratamiento, a oponerse al mismo y a su portabilidad. Ante cualquier eventual violación de sus derechos, puede presentar una reclamación ante la Agencia Española de Protección de Datos, cuyos datos son accesibles en www.aepd.es.

En caso de que se hayan facilitado los datos personales de un tercero, es la exclusiva responsabilidad de quien lo haga haber obtenido previamente el consentimiento de esa persona para que sus datos sean tratados por nosotros, debiendo haberle informado previamente de todo lo previsto en el artículo 14 del Reglamento General de Protección de Datos.

Antes de imprimir este e-mail piense en su compromiso con el medioambiente.

Estudio de nuevos materiales para la creación de un molde de termoformado mediante impresión 3d low cost

J. Boronat, C. Pavón, J. López, O.Fenollar, S. Ferrándiz
ITM. Universitat Politècnica de València,
Plaza Ferrándiz Carbonell, s/n, 03801, Alcoy.

RESUMEN

La impresión en 3D es una filosofía de fabricación única que permite la preparación flexible de estructuras altamente complejas y precisas que son difíciles de realizar con los métodos de fabricación tradicionales, como la fundición y el mecanizado. La productividad también se puede aumentar significativamente ya que muchos objetos se pueden construir en una sola ejecución. En el presente trabajo se ha realizado un estudio comparativo partiendo de la realización de pruebas de impresión de una pieza sobre material típico de impresión low cost (PLA), siendo este, el material de referencia durante todo el trabajo. Con la aparición de determinados filamentos técnicos, se han impreso los moldes con filamento de PLA reforzado con fibra de carbono, de la empresa RoHS y con filamento de PLA reforzado con fibra de vidrio, de la empresa 3D fuel. En ambos casos los porcentajes de carga de refuerzos oscilan entre el 15 y el 20% de fibras. Además, se ha realizado la prueba con otro material de PLA cargado con material cerámico (Lay-Brick - Ceramic) de suministro comercial. En todos los casos se compara el comportamiento de dichos moldes frente al termoformado de láminas de PE y PP. La impresión de dichos moldes se ha realizado con una impresora low cost, modelo Original Prusa i3, mk3s. Los parámetros de capa se han programado en 0,1 mm de altura de capa, consiguiendo un acabado superficial de muy buena calidad.

Palabras clave: 3d printing, molds, thermoforming, polymers

INTRODUCCIÓN

La aparición de tecnologías de fabricación avanzadas, junto con las demandas de los consumidores de productos y servicios más personalizados, están provocando cambios en la escala y distribución de la fabricación.

El panorama manufacturero está en constante cambio. Uno de los impulsores más importantes de este cambio es el surgimiento de tecnologías de fabricación avanzadas que permiten una producción a pequeña escala más eficiente en cuanto a costos y recursos.

La adopción de la fabricación aditiva (AM) y otras tecnologías avanzadas de fabricación parece anunciar un futuro en el que las cadenas de valor son más cortas, más pequeñas, más localizadas y más colaborativas, ofreciendo importantes beneficios de sostenibilidad [1,2].

La fabricación aditiva crea "objetos" a partir de un "modelo" digital al depositar el material constitutivo de manera capa por capa utilizando herramientas de colocación de material operadas y controladas digitalmente. Esta definición más amplia de fabricación aditiva destaca esencialmente por cuatro aspectos principales [3]:

- Un modelo digital del objeto.
- Materiales que se consolidan de la forma más pequeña posible, por ejemplo, gotas de líquido, alambre, polvo para hacer el objeto.
- Una herramienta para la colocación de materiales.
- Un sistema de control digital de la herramienta para colocar el / los materiales /s capa por capa para construir la forma del objeto.

Es decir, la primera etapa de la impresión 3D consiste en crear un modelo digital del objeto que se va a imprimir. Esto generalmente se hace con el software de modelado de diseño asistido por computadora (CAD) o mediante el uso de servicios en línea especializados, proporcionados por algunas de las plataformas de impresión 3D (por ejemplo, Thingiverse, Shapeways o Sculpteo). Los escáneres 3D también se pueden usar para crear automáticamente un modelo de un objeto existente (al igual que los escáneres 2D se utilizan para digitalizar fotos, dibujos o documentos) [4,6].

La fabricación aditiva es fundamentalmente diferente de la fabricación tradicional formativa o sustractiva que es la más cercana a la fabricación "de abajo hacia arriba", donde podemos construir una estructura en su forma diseñada utilizando un enfoque de "capa por capa". Esta fabricación capa por capa permite una libertad sin precedentes en la fabricación de estructuras complejas, compuestas e híbridas, con precisión y control, que no se pueden realizar a través de las rutas de fabricación tradicionales [3,5].

La fabricación de moldes mediante la impresión 3D permite a los ingenieros y diseñadores obtener una funcionalidad más cercanamente profesional que los métodos utilizados anteriormente que no alcanzaban las exigencias en el campo del prototipado rápido. Con la nueva gama de materiales para impresión se proporciona la capacidad de producir lotes a corto plazo y diseños de moldes de prueba antes de utilizar herramientas más costosas [1]. Para la confección de este tipo de moldes de termoformado, se ha utilizado resinas fotocurables con óptimos resultados. Chimeno Y Craig [6] explican que, en la actualidad, muchos dispositivos médicos, particularmente los receptáculos protésicos y las interfaces ortopédicas, se fabrican mediante termoformado de láminas de plástico sobre moldes de yeso positivos. Tradicionalmente, estas piezas se fabrican creando un molde (o impresión) de la anatomía relevante a partir de la cual se crea un molde de yeso positivo. Este molde de yeso se modifica a mano para lograr el ajuste deseado y luego se utiliza como herramienta para formar la ayuda médica deseada (encaje protésico, interfaz ortopédica, etc.). Esta parte final puede hacerse termoformando una lámina de plástico sobre el molde y / o colocando laminados termoendurecibles. En muchos casos, ambos procesos se usan cuando primero se forma un revestimiento de polímero sobre el molde y luego se fabrica un casquillo estructural compuesto alrededor del revestimiento. Otros componentes de la extremidad artificial se ensamblan en el zócalo para proporcionar funcionalidad y apariencia cosmética. Los materiales con los que se ha trabajado en estos casos son nylon reforzados con fibras, ABS o policarbonatos.

EXPERIMENTAL

MATERIALES

El PLA, es un polímero biodegradable cuyo monómero (ácido láctico) se obtiene a partir de recursos renovables como es el maíz, la celulosa, la caña de azúcar y la remolacha azucarera. Presenta propiedades similares a algunos de los materiales plásticos de uso común, tales como el polietileno (PE) o el policloruro de vinilo (PVC), a un precio competitivo.

El PLA es uno de los plásticos biodegradables que mayor crecimiento ha experimentado en los últimos años. Lo podemos encontrar en el mercado en objetos como cubiertos, platos, tazas, tapas, pajitas de bebidas, bolsas, films, envases de fruta fresca o vegetales, botellas y helados.

El filamento de Fibra de Carbono está compuesto por un polímero (PLA) y por recortes de fibras de carbono (15 %). Estas incrustaciones de fibra de carbono logran un filamento PLA mucho más rígido. Esta mayor rigidez se logra a costa de una menor flexibilidad que convierte a este material ideal para realizar piezas que no está previsto que se doblen como pueden ser soportes, herramientas, hélices o carcasas de drones o similares [8].

Esta rigidez del filamento de Fibra de Carbono proporciona una excelente resistencia estructural y una buena adhesión entre capas con muy baja distorsión. En cuanto al acabado de este filamento destaca su acabado negro mate con un ligero brillo debido a las fibras de carbono incrustadas. Los recortes de fibra de carbono son procesados con un tamaño lo suficientemente pequeño para no causar obstrucciones en las boquillas, pero lo suficientemente grandes para proporcionar la rigidez.

El filamento de PLA con Fibra de Vidrio es más resistente, curiosamente más elástico -1,9 veces más que el PLA convencional, soportando más fuerza en elongación antes de llegar al punto de rotura, más resistente a impactos, superando al PLA tradicional en 1,3-1,4 veces en dureza, resistencia, etc. Puede ser utilizado en cualquier impresora 3D, no emite olores, tiene baja tendencia al warping y no necesita de un extrusor especial. El extrusor debe calentarse entre 190-210°, y no es necesaria una cama calefactada, pero en caso de disponer de ella debe ajustarse a 40°.

El Lay-Brick es un filamento para impresión 3D fabricado con arenisca y un polímero de unión que crea un acabado superficial similar al de un objeto cerámico o de piedra [9].

Además, variando la temperatura de extrusión las superficies serán más o menos rugosas. El Lay-Brick está al igual que el Laywoo-D3 indicado para la impresión 3D de piezas para decoración. La combinación de las nuevas geometrías que son posibles de fabricar gracias a la impresión 3D y de las diferentes posibilidades de acabado superficial que ofrece el Lay-Brick permite crear innovadoras piezas de decoración.

Una vez usado el filamento Lay-Brick en la impresora 3D, es altamente recomendable que se retire el filamento restante y se cargue filamento PLA para extruir durante un minuto a alta temperatura (230°C) [8].

PROCESOS

El trabajo se ha realizado en las instalaciones del Campus Universitario de Alcoy. Entre las diferentes impresoras 3D que dispone el Campus se han empleado la impresora Original Prusa i3 [11], con boquilla de 0,4 mm, tipo rubí. Sección del filamento de 1,75 mm.

Las condiciones de procesado de los materiales empleados para la impresión del modelo de termoformado han sido los siguientes:

Material	Temperatura fundido	Temperatura de cama	Velocidad
PLA	215°C	60°C	45 mm/s
PLA+15%CF	225°C	60°C	45 mm/s
PLA+15%GF	200°C	60°C	45 mm/s
Laybrick	230°C	60°C	45 mm/s

Tabla I: Condiciones de impresión de los modelos.

La pieza de ensayo diseñada ha sido una cubeta de dimensiones de 140 x 85 x 60 mm, como se observa en la Figura I.

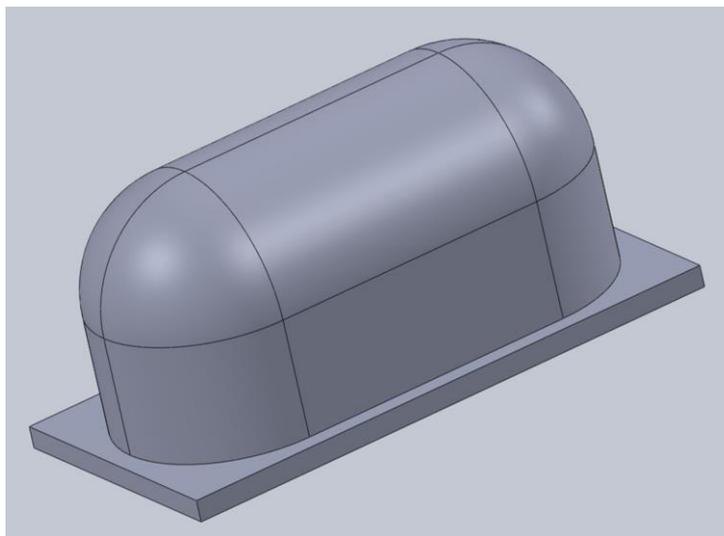


Figura I: Diseño de molde de termoformado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS FILAMENTOS

La dureza Shore D se obtuvo usando un durómetro Shore D 673-D de Instrumentos J. Bot S.A. (Barcelona, España) usando muestras con un espesor de 1,75 mm. Se llevaron a cabo cinco mediciones diferentes y se calcularon los valores promedio.

Material	Dureza Shore D
PLA	79,4
PLA+15%CF	43
PLA+15%GF	42,6
Laybrick	32,2

Tabla II: Dureza de las muestras de filamento.

PROCESO DE TERMOCONFORMADO

Se ha adquirido una termoformadora de vacío FormBox™ [10] para laboratorio para crear rápidamente prototipos de productos con acabados de alta calidad, reproduciendo diseños y haciendo moldes en segundos. Esta máquina termoformadora brinda tecnología de fabricación avanzada en un espacio reducido. Es un equipo que permite unir el prototipado con la impresión 3D ya que nos permite crear lotes de productos.

El proceso de fabricación de la pieza llevado a cabo con la termoformadora FormBox™ es muy similar al proceso convencional de termoformado. Inicialmente se instaló la manguera de la aspiradora al extremo del tubo de aspiración conectado al equipo para poder generar el vacío durante el proceso. La máquina permite poner en marcha el calentador de la FormBox™, seleccionando el ajuste de temperatura en el dial del calentador. Se ha trabajado con láminas de PLA de 0,4 y 0,6 mm de espesor y PETG de 0,3 mm de espesor.



Figura II: Modelos impresos de PLA, PLA+GF, PLA+CF y Laybrick.



Figura III: Máquina FormBox empleada.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La impresión del modelo sobre Laybrick, tuvo que ejecutarse con un tamaño inferior al resto de los modelos, debido a la gran fragilidad del material y a las condiciones de suministro del mismo. El material no venía en bobina y ello ha provocado muchos problemas de continuidad de suministro del filamento a la impresora. Para solucionarlo se optó por reducir el tamaño de la pieza impresa.

El comportamiento de la lámina de PLA en las primeras pruebas de termoformado, no dio unos resultados esperanzadores, debido principalmente al espesor de la lámina de 0,6 mm (figura IV), mientras que la lámina de 0,4 mm de espesor, comenzaba a dar buenos resultados.



Figura IV: Ensayos de termoformado lámina PLA

En la Figura IV, se observan algunos de los defectos aparecidos durante el termoformado. Falta de presión de vacío, que no permitía adaptarse al modelo de la pieza impresa y roturas del material debido a la deformación en la zona crítica del diseño.

Con la reducción del tamaño de la pieza modelo (Laybrick), se observó una mejora sustancial de los resultados, Figura V, obteniendo un resultado óptimo.

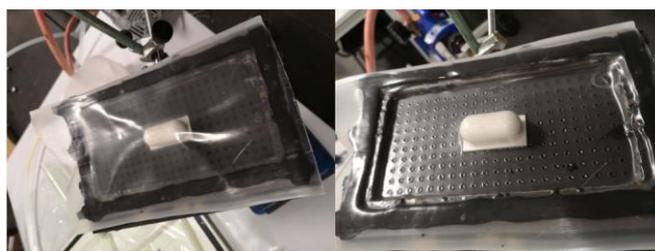


Figura V: Ensayos de termoformado lámina PLA y modelo Laybrick

El uso de la termoformadora FormBox y láminas de PETG de 0,2 mm de espesor, permitieron la obtención de unos resultados espectaculares de adaptación perfecta a los modelos tanto de PLA+CF, como del PLA+GF (Figura VI). Todo ello sin comprometer para nada la forma de las piezas fabricadas por impresión 3D.

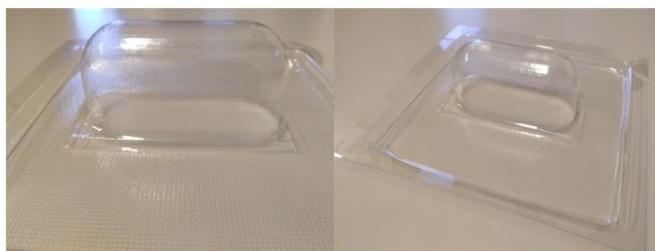


Figura VI: Ensayos de termoformado lámina PETG y modelo PLA+CF y PLA+GF

Las láminas termoformadas con PETG y espesor de 0,2 mm no presentaban ningún signo de rotura ni de deformación. Los espesores en zonas críticas, se mantuvieron dentro de los parámetros de calidad deseados. Los parámetros de termoformado empleados en el proceso han sido de 160°C de temperatura durante 1,5 minutos de calefacción de la lámina.

CONCLUSIONES

Se imprimieron modelos de termoformado mediante impresión 3D, utilizando los materiales comerciales de PLA, PLA+ Fibra de carbono, PLA+ Fibra de vidrio y Laybrick. Los modelos de impresión 3D, no sufrieron deformaciones durante el proceso, quedando por estudiar cuantas veces puede repetirse el proceso, sin que existan deformaciones o rotura del modelo impreso. Las zonas críticas no tuvieron disminuciones de espesor destacables.

REFERENCIAS

- [1] Info formlabs. Libro blanco de formlabs™: Fabricación de Moldes Mediante Impresiones 3D. info@solidperfil3d.com. 2016.
- [2] M. D. Simon Ford, "Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges," Cleaner Production, 10 May 2016 2016.
- [3] E. P. K. Syed A.M. Tofail, Amit Bandyopadhyay, Susmita Bose, Lisa O'Donoghue, Costas Charitidi., "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities," Materials Today, January/February 2018 2018
- [4] Sunil Bhandari, Feasibility of using 3D printed molds for thermoforming thermoplastic composites.. Electronic Theses and Dissertations Fogler Library, 2017.
- [5] Editors. Fabricación de Molde de termoformado a partir de la Impresión 3D. <https://www.3dz.es/>. 2018.
- [6] Jairo Chimento, M. Jason Highsmith, Nathan Crane. 3D printed tooling for thermoforming of medical devices. Rapid Prototyping Journal, 17/5 (2011) 387–392.
- [7] Editors. Fabricación de molde de termoconformado. <https://sicnova3d.com/>. 2018.
- [8] <https://filament2print.com/es/pla-especial/656-fibra-carbono-proto-pasta.html>
- [9] <https://www.impresion3daily.es/glass-filled-pla-filamento-plastico-de-pla-con-fibra-de-vidrio/>
- [10] <https://www.mayku.me/pages/tech-specs>
- [11] Joseph Prusa, prusa3d manual mk3s, v3.12, 2019.