



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Desarrollo de criterios de optimización de diseño de moldes
mediante impresión 3d

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería, Procesado y Caracterización de
Materiales

AUTOR/A: Peñafiel Alvarado, Jorge Israel

Tutor/a: Ferrándiz Bou, Santiago

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Resumen

“Desarrollo de Criterios de Optimización de Diseño de Moldes Mediante Impresión 3D”

En el presente trabajo de investigación se desarrolla criterios de optimización de diseño de moldes mediante impresión 3D, enfocado en aprovechar las ventajas de esta tecnología para mejorar el diseño y rendimiento de los moldes. Dado que la tecnología de la impresión 3D es relativamente nueva en la fabricación de moldes, no existen normas establecidas que definan los parámetros óptimos de diseño y fabricación.

Para desarrollar estos criterios se realizó un estado del arte del proceso de fabricación aditiva, el proceso de termoformado y el uso de software especializado, para de esta manera tener en cuenta las variables que inciden en dichos procesos. Además, el uso del software especializado nos permite obtener un espesor de pared al mismo tiempo que nos facilita un análisis de los factores que se deben de tomar en consideración.

Se evalúa los distintos parámetros mediante el diseño del molde para el blíster de un títex, y así observar los factores que intervienen en el proceso de impresión 3D en PLA, ABS y PETG con un porcentaje de 20% y 40 % de relleno. Finalmente se comparan los resultados experimentales frente a los obtenidos por el software y establecer conclusiones con este tipo de ensayos en los materiales seleccionados.

Palabras clave: termoformado, fabricación aditiva, impresión 3D, diseño de molde, optimización.

Summary

“Development of optimization criteria for mold design through 3d printing”

In this research project it has been developed some criteria for the optimization of the design of moulds made by 3D printing, focusing on taking advantage of this technology to improve both design and performance of moulds. Given that 3D printing technology is relatively new in mould manufacturing, there are no established rules that define the optimal parameters for design and fabrication.

In order to develop these criteria, a state of the art was made for additive manufacturing, thermoforming, and for specialized software, so that all the variables that affect those processes can be taken into account. In addition, by using specialized software, the wall width of the mould can be obtained and, at the same time, it eases the factor analysis that must be considered.

Different parameters were evaluated by the design of a mould for a tipex blister. Then, factors that are involved in the 3D printing process in PLA, ABS and PETG were assessed, with 20% and 40% of infill percentage. Finally, experimental results were compared to those obtained by software, and conclusions were made with this type of tests in the selected materials.

Keywords: thermoforming, additive manufacturing, 3D printing, mould design, optimization.

Resum

“Desenvolupament de Criteris d’Optimització de Disseny de Motles Mitjançant Impressió 3D”

En el present treball d’investigació es desenvolupen criteris d’optimització de disseny de motles mitjançant impressió 3D, enfocat en aprofitar els avantatges d’esta tecnologia per a millorar el disseny i el rendiment dels motles. Donat que la tecnologia de la impressió 3D és relativament nova en la fabricació de motles, no existeixen normes establides que definisquen els paràmetres òptims de disseny i fabricació.

Per a desenvolupar estos criteris es va realitzar un estat de l’art del procés de fabricació additiva, del procés de termoformat i de l’ús de programari especialitzat, per a d’aquesta manera tindre en compte les variables que incideixen en tals processos. A més a més, l’ús del programari especialitzat permet obtindre un espessor de paret al mateix temps que facilita una anàlisi dels factors que s’han de tindre en consideració.

S’han avaluat els diferents paràmetres mitjançant el disseny del motle per al blíster d’un típlex, i després es van observar els factors que intervenen en el procés d’impressió 3D en PLA, ABS i PETG, amb un percentatge del 20% i del 40% de farciment. Finalment s’han comparat els resultats experimentals front als obtinguts amb el programari, i s’establiren conclusions d’aquest tipus d’assajos en els materials seleccionats.

Paraules clau: termoformat, fabricació additiva, impressió 3D, disseny de motle, optimització.

Índice General

Resumen	1
Summary	3
Resum	5
Abreviaturas	12
Listado de figuras.....	14
Listado de tablas.....	17
I. Memoria	19
1.1. Introducción.....	21
1.2. Marco teórico.	23
1.2.1. El termoformado.	23
1.2.1.1. <i>El Proceso de termoformado.</i>	23
1.2.1.2. <i>Técnicas de termoformado.</i>	25
1.2.1.3. <i>Ventajas del termoformado.</i>	28
1.2.1.4. <i>Desventajas del termoformado.</i>	30
1.2.1.5. <i>Diseño del molde.</i>	31
1.2.2. Moldeo por termoformado.....	38
1.2.3. Fabricación aditiva.....	39
1.2.3.1. Procesos de fabricación aditiva.....	41
1.2.3.1.1. <i>La estereolitografía (SLA).</i>	42
1.2.3.1.2. <i>La sinterización láser (SLS).</i>	43

1.2.3.1.3. <i>La técnica de modelado por fusión de material (FDM)</i>	45
1.3. Estado del arte	46
II. Objetivos	50
2.1. Objetivo general	52
2.2. Objetivos particulares	52
III. Desarrollo Sostenible	54
3.1. Industria Innovación e Infraestructura	56
3.1.1. Sostenibilidad para la impresión 3D	57
IV. Metodología	60
4.1. Materiales	62
4.1.1. Materiales para el termoformado	62
4.1.1.1. Hojas Mayku Cast Sheets	62
4.1.2. Materiales utilizados en la impresión 3D por deposición de material fundido	63
4.1.2.1. Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)	64
4.1.2.2. Ácido Poliláctico (PLA)	65
4.1.2.3. Tereftalato de Polietileno Glicolizado (PETG)	66
4.2. Procesos de fabricación	68
4.2.1. Proceso de modelado CAD	68
4.2.2. Proceso de impresión 3D	70
4.2.2.1. <i>Impresión del molde mediante la técnica de modelado por fusión de material (FDM)</i>	70
4.2.2.2. <i>Preparar</i>	73
4.2.2.3. <i>Porcentajes y tipos de patrones de relleno</i>	75

4.2.2.4. <i>Vista Previa</i>	78
4.2.2.5. <i>Supervisar</i>	79
4.2.3. <i>Proceso de termoformado</i>	80
4.2.3. <i>Análisis mediante elementos finitos (FEM)</i>	84
4.2.3.1. <i>Termoformado de un blíster para un típex</i>	84
4.2.3.2. <i>Geometría</i>	85
4.2.3.3. <i>Mallado</i>	85
4.2.3.4. <i>Configuración del Polydata</i>	87
4.3. <i>Técnicas y ensayos de caracterización</i>	89
4.3.1. <i>Calorimetría diferencial de barrido (DSC)</i>	89
V. <i>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</i>	90
5.1. <i>Impresión 3D de Moldes</i>	92
5.1.1. <i>Impresión en material ABS</i>	92
5.1.2. <i>Impresión en material PLA</i>	92
5.1.3. <i>Impresión en material PETG</i>	93
5.2. <i>Termoformado de un blíster - típex</i>	94
5.3. <i>Análisis mediante elementos finitos (FEM)</i>	98
5.4. <i>Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)</i>	100
VI. <i>CONCLUSIONES</i>	103
6.1. <i>Conclusión general</i>	105
6.2. <i>Conclusiones particulares</i>	106
6.2.1. <i>Con respecto a la Impresión 3D de moldes</i>	106

6.2.2. Con respecto al termoformado de un blíster - típex.	106
6.2.3. Con respecto al análisis mediante elementos finitos (FEM).	106
6.2.4. Con respecto a la calorimetría diferencial de barrido (DSC).	106
6.3. Líneas futuras.	108
VII. REFERENCIAS	109
REFERENCIAS.	111

Abreviaturas

3DP	Impresión 3D
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
CNC	Control numérico por computadora
CAD	Dibujo asistido por computadora
DMLS	Sinterización directa de metal por láser
EBF	Fabricación por haz de electrones
FDM	Modelado por deposición de material fundido
PLA	Ácido poliláctico
PETG	Tereftalato de polietileno modificado de glicol
PVA	Acetato de polivinilo
SLA	Estereolitografía
SLS	Sinterización selectiva por laser
SL	Estereolitografía

Listado de figuras

Figura 1 Embalajes de plástico producidos por termoformado.....	24
Figura 2 Pasos fundamentales en el proceso de termoformado, en la máquina lanzadera.	25
Figura 3 Conformado de moldes a medida mediante el conformado mecánico.....	27
Figura 4 Calentamiento y conformado de la lámina mediante conformado al vacío.	28
Figura 5 Calentamiento y conformado de la lámina mediante conformado a presión.	29
Figura 6 Pieza mecánica de ejemplo.....	34
Figura 7 Ubicación del orificio de ventilación y perforación posterior.	36
Figura 8 Canales de enfriamiento del molde.	37
Figura 9 Un buen ejemplo de flujo de enfriamiento.....	37
Figura 10 Un mal ejemplo de flujo de enfriamiento.....	38
Figura 11 Etapas de la impresión de una hélice.	40
Figura 12 Una visión general de las principales tecnologías de fabricación aditiva en 2022.	41
Figura 13 Impresión 3D por estereolitografía.....	43
Figura 14 Esquema explicativo del proceso de impresión 3D mediante sinterización láser.	44
Figura 15 Tecnología FDM.	45
Figura 16 Objetivos de desarrollo sostenible (ODS).....	56
Figura 17 Plano de detalle de un blíster de un tópicos.....	68
Figura 18 Operación de extrusión y ángulo de salida del boceto antes creado.	69
Figura 19 Operación de redondeo de una de las aristas el sólido antes creado.	69
Figura 20 Prototipado del molde para termoformado, listo para proceder a imprimir.....	70
Figura 21 Impresora Ultimaker S5 Pro Bundle.....	71

Figura 22 Entorno de trabajo del software Ultimaker Cura, instalado y configurado correctamente.	72
Figura 23 Herramientas de la pestaña Preparar del software Ultimaker Cura.	73
Figura 24 Parámetros establecidos para el molde de material ABS con un relleno de: a) 20% y b) 40%.	74
Figura 25 Parámetros establecidos para el molde de material PLA con un relleno de: a) 20% y b) 40%.	75
Figura 26 Parámetros establecidos para el molde de material PETG con un relleno de: a) 20% y b) 40%.	75
Figura 27 Porcentajes de relleno en la impresión 3D.	77
Figura 28 Tipos de patrones de relleno.	77
Figura 29 Moldes impresos con un relleno de tipo triangular y con un porcentaje de: a) 20% y b) 40%.	78
Figura 30 Herramienta de vista previa, con las opciones: ver tipo, combinación de colores y barra lateral.	78
Figura 31 Impresora 3D Ultimaker S5 Pro Bundle en pleno funcionamiento.	79
Figura 32 Moldes impresos con un relleno del 20 y 40% e identificados: a) ABS, b) PLA y c) PETG.	80
Figura 33 Equipo de termoformado FormBox termoformadora 3D de Mayku.	80
Figura 34 Lámina de plástico colocada en la bandeja adaptada.	81
Figura 35 Proceso de calentamiento de la lámina de plástico.	82
Figura 36 Moldes ubicados en la placa de vacío de la máquina.	82
Figura 37 Acople de la lámina de plástico al molde mediante la generación de vacío de la máquina.	83
Figura 38 Lámina Cast Sheets: a) mallada en cuadrados, b) aplicado el termoformado.	83
Figura 39 Registro de temperatura mediante una cámara térmica.	84
Figura 40 Molde mallado en el programa Ansys.	86
Figura 41 Lámina mallada en el programa Ansys.	86
Figura 42 Herramienta de cálculo Polydate para simular el termoformado de un blíster.	87
Figura 43 Resultado obtenido mediante el módulo de Poly-flow de Ansys.	88

Figura 44 <i>Equipo de calorimetría diferencial de barrido (DSC) del laboratorio.</i>	89
Figura 45 <i>Molde impreso en ABS.</i>	92
Figura 46 <i>Molde impreso en PLA.</i>	93
Figura 47 <i>Molde impreso en PETG.</i>	94
Figura 48 <i>Típex colocado en el blíster después del proceso de termoformado.</i>	95
Figura 49 <i>Termoformado del molde con una lámina cuadrículada para observar la deformación.</i>	95
Figura 50 <i>Corte transversal para observar la distribución de espesores.</i>	96
Figura 51 <i>Registro de temperatura del molde de ABS.</i>	96
Figura 52.....	97
<i>Registro de temperatura del molde PETG.</i>	97
Figura 53 <i>Registro de temperatura del molde PLA.</i>	97
Figura 54 <i>Evolución de la simulación de termoformado a un timestep de 11.</i>	98
Figura 55 <i>Evolución de la simulación de termoformado a un timestep de 22.</i>	99
Figura 56 <i>Evolución de la simulación de termoformado a un timestep de 33.</i>	99
Figura 57 <i>Evolución de la simulación de termoformado a un timestep de 44.</i>	99
Figura 58 <i>Simulación finalizada.</i>	100
Figura 59 <i>Gráfico DSC comparativo realizado al molde impreso en PLA.</i>	101

Listado de tablas

Tabla 1 Especificaciones de la lámina Mayku Cast Sheets.	63
Tabla 2 Información técnica del filamento de marca Smartfil ABS.	65
Tabla 3 Información técnica del filamento de PLA.	66
Tabla 4 Información técnica del filamento de marca Smartfil PETG.	67
Tabla 5 Especificaciones de la impresora 3D Ultimaker S5 Pro Bundle.	71
Tabla 6 Tiempo y cantidad de material utilizado en cada impresión de los diferentes moldes. .	79
Tabla 7 Principales parámetros empleados en la simulación de termoformado en Ansys.	85

I. Memoria

1.1. Introducción.

El presente trabajo de investigación pretende desarrollar criterios de optimización en el diseño de moldes mediante impresión 3D, así como procura analizar variables representativas al momento de diseñar un molde de plástico, basado en herramientas y conceptos que se aplican sistemáticamente para evaluar la optimización de un proceso.

El moldeo por inyección es uno de los métodos más utilizados para la producción en serie de piezas de plástico. Dada su capacidad para fabricar económicamente piezas complejas, con tolerancias estrictas ya que es un método rápido, eficiente con una alta precisión y calidad. Sin embargo, antes de poder moldear cualquier pieza, hay que diseñar, fabricar y poner en marcha un molde de inyección adecuado.

El diseño del molde, determina directamente la calidad de la pieza moldeada y la productividad del moldeo. El molde para inyección es un sistema complejo compuesto por múltiples componentes sometidos a muchos ciclos de temperatura y tensión. En el diseño de moldes a menudo es necesario hacer algunas concesiones, ya que los moldes más baratos a veces dan lugar a una menor calidad del producto o a procesos de moldeo ineficaces. Los ingenieros deben esforzarse por encontrar un equilibrio entre estos factores ya que el molde debe producir piezas de calidad aceptable con un coste mínimo y que su desarrollo requiera una cantidad mínima de tiempo, dinero y riesgo.[1]

Para la fabricación de moldes la fabricación aditiva se designa como una de las innovaciones revolucionarias desde el siglo XIX, que reformó significativamente las industrias manufactureras. En una visión avanzada de fabricación de materiales, así como un conjunto de

técnicas que utilizan un enfoque capa por capa para construir piezas de formas complejas. La fabricación aditiva, se atribuye a la creación rápida de prototipos, fabricación de forma libre, con bajo consumo de energía y alta flexibilidad de diseño. La técnica es versátil, adaptable, flexible, altamente personalizable y puede utilizarse en muchos sectores de la producción industrial.[2]

El software de diseño asistido por computadora (CAD) es una parte integral de la tecnología de fabricación aditiva, que ayuda a crear diseños digitales personalizados y modelos 3D para fabricar los prototipos, además de ser completamente diferente de las técnicas tradicionales basadas en la fabricación sustractiva disponibles. Con esta técnica se puede usar una amplia variedad de materiales como metales, cerámicas, polímeros junto con combinaciones en forma de mezclas, híbridos y compuestos. Sin embargo, el interés en usar la tecnología de fabricación aditiva a escala industrial ha ido en aumento exponencialmente debido a su capacidad para producir productos reales, de formas complejas, innovadoras y robustas.[2]

En este primer apartado se presenta una visión general del proceso de termoformado seguido de los parámetros que se debe considerar en el diseño del molde. Continúa con una descripción del proceso de fabricación aditiva y termina con un estudio de estado del arte, para de esta manera comprender los procesos de fabricación y la finalidad de esta investigación. A continuación, se plantean los objetivos generales y particulares a conseguir con el desarrollo del presente trabajo. Para lo cual se establece a continuación la metodología utilizada, se realiza la presentación de resultados y discusión de los mismos para terminar con las conclusiones que se obtuvieron al desarrollar la investigación.

1.2. Marco teórico.

1.2.1. El termoformado.

El termoformado es un proceso mediante el cual se utiliza una lámina delgada de termoplástico fijándola en un lugar específico, seguida de su calentamiento hasta una temperatura suficiente para ablandar el material. Luego, se fuerza la lámina contra la superficie de un molde utilizando medios mecánicos, vacío o presión para darle la forma deseada. Al enfriarse, la pieza conserva la forma del molde y se elimina el material sobrante mediante una operación de desbarbado. Este proceso es usado comúnmente para producir piezas de plástico en grandes cantidades a bajo costo y permite el uso de diferentes grosores y colores de plástico.

El termoformado es un proceso versátil, excelente cuando se requiere la obtención de prototipos para pruebas iniciales de forma, tamaño y capacidad. Resulta el proceso perfecto para la producción de empaques tipo blíster, clamshell, cajas plegadizas, entre otras aplicaciones. Las aplicaciones del termoformado son muy amplias y en diferentes industrias, entre ellas la construcción, la automotriz y la alimentaria; en este último caso, por ejemplo, se realizan bandejas para productos alimentarios o se combinan con equipos de llenado para producir artículos envasados.[3]

1.2.1.1. El Proceso de termoformado.

El proceso de termoformado se considera un proceso secundario en la industria del plástico, debido a que primero deben crearse los materiales de entrada, como la lámina y la película de plástico, que normalmente suelen ser producidos mediante procesos de extrusión, fundición y calandrado.

Figura 1

Embalajes de plástico producidos por termoformado.



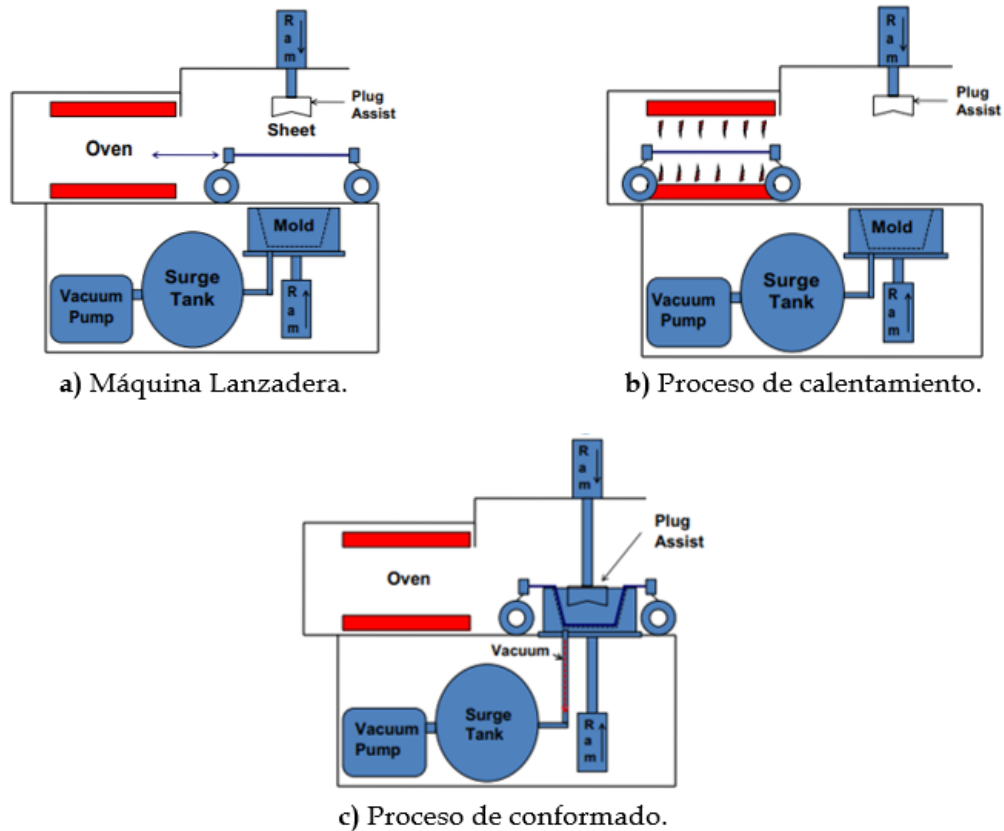
Nota. Adaptado de Tecnología del plástico.[3]

El proceso fundamental de termoformado requiere los siguientes pasos necesarios: preparación de la lámina, carga de la lámina en el proceso, el calentamiento de la lámina hasta alcanzar la temperatura adecuada para el conformado, el estirado de la lámina mediante la aplicación de una fuerza para obtener la forma deseada, el enfriamiento de la lámina hasta una temperatura para que se conserve la nueva forma adquirida, la extracción de la pieza resultante del proceso y finalmente el recorte de la pieza para obtener la forma definitiva deseada.[4]

Existen básicamente tres tipos de máquinas de termoformado: máquinas de transporte de hojas cortadas, máquinas rotativas de hojas cortadas y máquinas continuas de alimentación en rollo. Los pasos del proceso varían según estos tipos de máquina, aunque todos los pasos están incluidos en cada proceso. La máquina de lanzadera, ilustrada en la Figura 2, maneja una sola hoja de corte a la vez, lo que la convierte en un proceso más lento que se utiliza comúnmente para productos de bajo volumen o muy grandes.

Figura 2

Pasos fundamentales en el proceso de termoformado, en la máquina lanzadera.



Nota. Adaptado de Fundamentals of Plastics Thermoforming. [5]

1.2.1.2. Técnicas de termoformado.

El conformado de plásticos durante el proceso de termoformado es básicamente una cuestión de tensión – deformación. A medida que se calienta el material, se reduce la cantidad de fuerza (tensión) necesaria para deformar la pieza (deformación). Por lo tanto, la curva tensión – deformación varía mucho con la temperatura. Cuando los materiales termoplásticos están dentro de su intervalo de temperatura de termoformado, la cantidad de tensión necesaria para la deformación puede ser bastante baja, tan sólo 2 PSI para el poliestireno. A medida que aumenta la longitud de deformación requerida o el nivel de detalle de la pieza, la cantidad de fuerza debe

aumentar. Sin embargo, esta fuerza o tensión rara vez alcanza los 200 PSI. Por estas razones, el termoformado se considera un proceso de baja presión. Existen cuatro tipos de fuerzas que se utilizan para formar la lámina durante este proceso:[6]

- **Conformado mecánico.**

El conformado mecánico de plásticos abarca desde procesos muy sencillos hasta otros muy complejos y costosos. Algunos de los procesos de conformado más sencillos son mecánicos. El uso de un calentador de banda para calentar una zona seleccionada de una lámina y simplemente doblarla para darle una nueva forma es un ejemplo de conformado mecánico. Este proceso se utiliza para artículos de bajo volumen, como porta menús de bebidas en restaurantes, portarretratos y diversos expositores de venta al por menor.[6]

En el extremo opuesto en términos de complejidad y coste se encuentra la conformación de moldes. En este proceso, se crean dos moldes con un espacio entre ellos para colocar la lámina calentada. El molde se cierra sobre la lámina y la adapta a la geometría del molde, permitiendo que se enfríe. Este proceso puede generar una fuerza de conformado significativa y se pueden agregar detalles a la superficie de la pieza, como letras, relieves, texturas, entre otros. De hecho, este proceso es muy similar al utilizado en la estampación metálica para fabricar componentes de carrocería para automóviles. Este proceso es el más costoso de los procesos de termoformado y, por tanto, tiene una aplicación limitada.

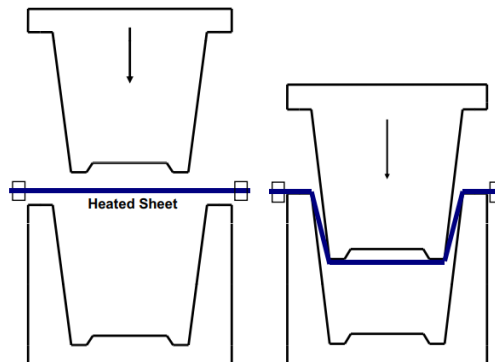
- **Conformado al vacío.**

El proceso de moldeo por vacío directo utiliza la presión atmosférica para aplicar la fuerza sobre la lámina calentada y conformarla contra la superficie del molde, donde se enfría. Aunque esta

fuerza es relativamente limitada, generalmente alrededor de 15 PSI como máximo, es el proceso más utilizado para productos de gran volumen y calibre fino.[6]

Figura 3

Conformado de moldes a medida mediante el conformado mecánico.



Nota. Adaptado de Fundamentals of Plastics Thermoforming. [5]

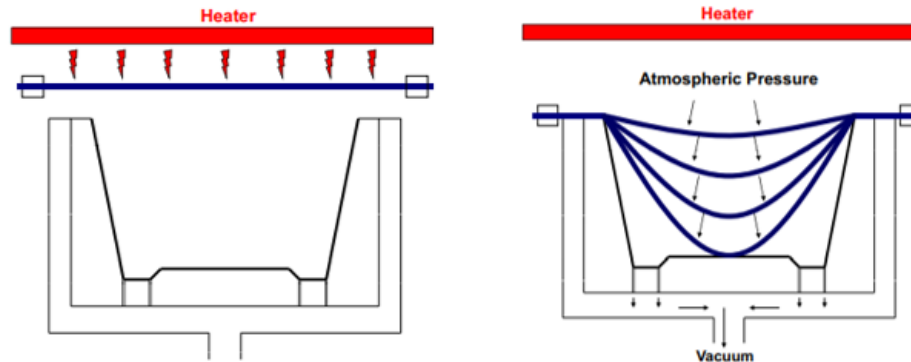
En este proceso, la lámina calentada se coloca sobre un molde con una cavidad. La lámina y el molde entran en contacto y se crea un sello. A continuación, se evacua el aire de la cavidad y la presión atmosférica empuja la lámina hacia los contornos de la cavidad, logrando la forma deseada. La mayoría de las máquinas de conformado al vacío incluyen un depósito de compensación que se evacua primero, lo que permite que el proceso de conformado ocurra de manera rápida y eficiente. Como se puede observar en la Figura 4.

- **Conformado a presión.**

El conformado a presión utiliza aire comprimido para forzar la lámina calentada a entrar en los contornos de la cavidad del molde. Esta fuerza puede ser diez veces superior a la de la conformación al vacío, lo que permite un mayor detalle y un mayor estiramiento. Este proceso es similar a la conformación al vacío directo, ya que la lámina calentada se sella contra el molde.[6]

Figura 4

Calentamiento y conformado de la lámina mediante conformado al vacío.



Nota. Adaptado de Fundamentals of Plastics Thermoforming. [5]

Cuando se sella una caja de presión sobre la lámina, se inyecta aire comprimido en la caja de presión, empujando la chapa hacia la cavidad del molde y contra sus contornos. El aire que queda entre la chapa y la cavidad debe ser expulsado de la cavidad. A menudo se aplica vacío para acelerar este proceso. Como la fuerza es mucho mayor que en el moldeo por vacío, se pueden formar letras, relieves, esquinas más agudas, etc.

Los moldes deben ser más robustos para el proceso de conformado a presión que para el proceso de conformado al vacío, ya que las fuerzas contra el molde son mayores. Este proceso se aplica normalmente para conformar materiales de calibre grueso, productos que requieren detalles extremos y materiales difíciles de conformar, como el policarbonato.[6]

1.2.1.3. Ventajas del termoformado.

El proceso de termoformado presenta diversas ventajas, entre las cuales destacan:

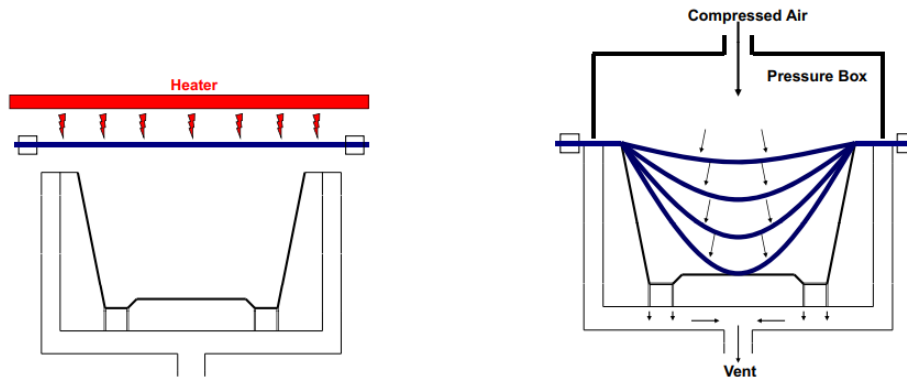
- *Bajo coste de los equipos:* El equipo de procesamiento de termoformado tiene un coste relativamente bajo en comparación con otros equipos de procesamiento de plásticos, como el moldeo por inyección. La fuerza necesaria para conformar una lámina suele ser inferior

a 14 PSI para el conformado al vacío e inferior a 150 PSI para el conformado a presión.

Esto contrasta con los más de 10.000 PSI del moldeo por inyección.[7]

Figura 5

Calentamiento y conformado de la lámina mediante conformado a presión.



Nota. Adaptado de Fundamentals of Plastics Thermoforming. [5]

- *Bajos costes de utillaje:* Debido principalmente a la baja presión utilizada en los procesos de termoformado, las herramientas/moldes pueden fabricarse con una gran variedad de materiales. Aunque el aluminio es el material más común para los moldes de producción, los moldes de bajo volumen pueden fabricarse con madera, yeso para herramientas como Hydrocal B11, epoxi, materiales compuestos y otros materiales que puedan soportar las presiones, así como las temperaturas utilizadas en este proceso.[7]
- *Gran relación superficie/espesor Común:* se pueden producir piezas muy finas, como vasos desechables, que son demasiado finas para procesos como el moldeo por inyección. También pueden fabricarse productos de gran tamaño, como revestimientos de frigoríficos y carcasas de jacuzzis, que pueden superar las capacidades de los procesos de moldeo habituales.[7]

- *Decoración e impresión:* Los procesos de impresión habituales suelen realizarse sobre la chapa antes del proceso de conformado. La impresión después del conformado también es económica y ofrece una enorme libertad a los diseñadores de productos, así como un método muy económico para decorar el producto.[7]
- Mayor velocidad en la obtención de piezas con menor costo y la posibilidad de cambios de producto con rapidez.
- El proceso de fabricación de moldes suele ser menos exigente en el caso del termoformado por vacío que en el de inyección.
- Es posible utilizar un solo molde para varios productos y hacer cambios sin alterar su precisión, lo que resulta especialmente útil en la producción de envases para bebidas lácteas y empaques para alimentos.
- *Piezas multicapa:* las láminas extruidas pueden fabricarse con muchas capas de materiales, incluidos diferentes colores, grados, aditivos, etc. Esto puede dar lugar a productos termoformados multicapa. Un ejemplo común es un vaso desechable con el interior blanco y el exterior de color[7].

1.2.1.4. Desventajas del termoformado.

El proceso de termoformado tiene limitaciones que es importante tener en cuenta:

- *Espesor de pared no uniforme:* Esta es la principal desventaja del proceso de termoformado. Dado que el termoformado es un proceso de "estiramiento", el grosor de la pared del producto varía en función de la cantidad de estiramiento que debe producirse para crear la geometría deseada. [7]
- *Limitación de la geometría de la pieza:* Las geometrías típicas pueden presentar esquinas gruesas y paredes delgadas que dificultan el proceso de producción.

- Es necesario fabricar lámina para el proceso, lo que puede aumentar el costo de la materia prima debido a los altos niveles de desperdicio, aunque es importante mencionar que la materia prima no se pierde, pero sí requiere de subprocesos adicionales.
- *El coste del material de recorte:* El "recorte" se refiere a los residuos sobrantes que quedan después de retirar la pieza conformada de la lámina original. Estos restos pueden representar hasta un 80% del material de la lámina inicial. La gestión de estos recortes generalmente implica métodos de rectificado y reprocesado, lo cual añade costes adicionales al producto final.[7]
- *La gama útil de temperaturas:* A diferencia del proceso de moldeo, el termoformado implica la formación de productos que conservan una "memoria" de su forma original. Las moléculas del material se mantienen en un estado de tensión, y si la temperatura alcanza el punto de distorsión térmica (generalmente similar a la temperatura de conformado más baja), la pieza tiende a volver a su forma de lámina original. Por lo tanto, es esencial controlar adecuadamente las temperaturas para obtener el resultado deseado en el proceso de termoformado.

1.2.1.5. Diseño del molde.

El molde de termoformado tiene muchas finalidades. En primer lugar, define la geometría de la pieza que se va a moldear. Además, puede proporcionar textura a la pieza, letras, logotipos y otros detalles moldeados. El molde también actúa como intercambiador de calor para extraer calor de la pieza moldeada y reducir el tiempo de enfriamiento. También puede proporcionar lugares para el recorte de la pieza o incluso realizar la operación de recorte durante el proceso de conformado, lo que se conoce como recorte en el molde.[8]

El molde debe ser capaz de soportar las fuerzas aplicadas repetidamente durante el proceso de conformado, así como ser lo suficientemente robusto como para producir el número deseado de piezas para el que fue diseñado. Debe tener un flujo de aire adecuado para evacuar el espacio entre la chapa calentada y la superficie del molde durante el proceso de conformado.

1.2.1.5.1. Materiales del molde.

Un molde de termoformado puede estar hecho de una variedad de materiales, siempre y cuando cumplan con el propósito de la herramienta. Los moldes de bajo volumen, a veces llamados moldes prototipo, se fabrican normalmente para producir unas pocas piezas o probar una pieza o el diseño de un proceso. El objetivo de estos moldes es el bajo coste y la rapidez de fabricación.

El mayor inconveniente de todos estos materiales es su conductividad térmica o, en realidad, su falta de conductividad. Todos se consideran aislantes térmicos y apenas cumplen los requisitos de un intercambiador de calor. Por ejemplo, la conductividad térmica del epoxi es de 0,131 y el aluminio 6061 tiene una conductividad térmica de 96,8. En definitiva, el aluminio conduce el calor por encima de la media. En conclusión, el aluminio conduce el calor más de 700 veces mejor que el epoxi. Por esta razón, el aluminio es el material más utilizado para los moldes de producción de termoformado. Estos moldes se construyen normalmente utilizando tecnología de mecanizado CNC [8].

1.2.1.5.2. Geometría del molde.

El molde debe fabricarse para permitir la contracción de la pieza, por lo que el molde suele ser más grande que la pieza. Hay muchas variables que afectan a la contracción de la pieza. Éstas incluyen, entre otras, el polímero utilizado, la temperatura de conformado, la temperatura del

molde, la orientación de las moléculas desde la producción de la lámina, etc. El mejor método para determinar los índices de contracción reales es probar el proceso o utilizar piezas y moldes de diseño similar como ejemplos. [8]

Para lograr una pieza de termoformado de la mejor calidad, es fundamental que la geometría específica de la pieza cumpla con las directrices de diseño establecidas. A continuación, se presentan algunas de estas directrices:

- **Ángulos y radios.**

Existen varios tipos de esquinas en la geometría de cualquier pieza. Entre ellos se incluyen las esquinas interiores y exteriores bidimensionales (2D) y las esquinas interiores y exteriores tridimensionales (3D). El diseñador de la pieza suele querer esquinas afiladas, mientras que las especificaciones de termoformado exigen el mayor radio posible.[5]

Las esquinas son también concentradores de tensiones. La última zona de la chapa que entra en contacto con el molde es la sección más delgada. En un molde de cavidad, ésta es la esquina interior y la esquina 3D suele ser el último punto que se dibuja. En consecuencia, cuanto más afilada sea la esquina, más delgada y débil será la pieza en ese punto. Si la esquina puede tener un radio o chaflán grande, la pieza será más gruesa, más fuerte y tendrá menos tensión. La mejor regla para determinar el radio de las esquinas es hacerlo lo más grande posible y tener en cuenta que será un punto débil y de gran tensión en la pieza.

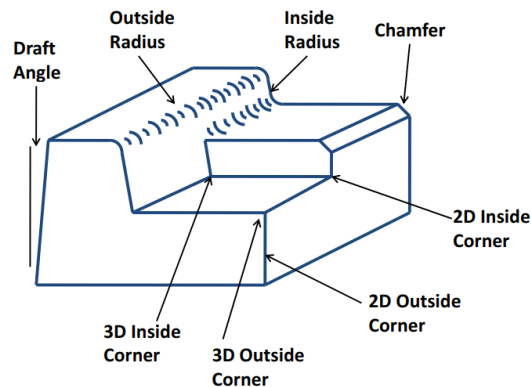
- **Ángulos de desmoldeo.**

Un ángulo de desmoldeo puede definirse como el ángulo que forma la pared del molde con la vertical. Si la pared del molde es vertical, el ángulo de desmoldeo es nulo. Los ángulos de desmoldeo crean los mismos problemas de diseño con las piezas termoformadas que con otras

piezas de plástico producidas mediante otros procesos, como el moldeo por inyección y el moldeo por compresión. Pueden ser muy indeseables para el diseñador de la pieza, pero necesarios para el proceso. (Klein, 2009).

Figura 6

Pieza mecánica de ejemplo.



Nota. Adaptado de Fundamentals of Plastics Thermoforming. [5]

Los moldes de cavidad no requieren necesariamente ningún ángulo de desmoldeo, aunque se recomienda hasta 2 grados. Los moldes machos deben tener un ángulo para permitir que la pieza se libere. Los materiales de mayor contracción, especialmente los cristalinos, como el polietileno, pueden requerir más de 5 grados, mientras que la mayoría de los materiales amorfos, como el poliestireno y el policarbonato, sólo necesitan 3 grados. Si el molde está texturizado, la cantidad de calado tanto para moldes de tapón como de cavidad aumenta en función del tipo y la profundidad de la textura. Además, las altas presiones de moldeo, como las utilizadas en el moldeo a presión, también pueden requerir un mayor ángulo de desmoldeo.[5]

- **Profundidad de moldeo.**

La geometría de la pieza debe tener en cuenta la profundidad de moldeo necesaria en el proceso de fabricación de la pieza. La decisión de utilizar un molde de tapón o de cavidad tiene

un gran impacto en la profundidad de moldeo, así como en la localización de la variación del espesor de pared. Es necesario evaluar cada diseño de pieza individual para determinar sus requisitos de profundidad de moldeo. La bandeja simple con divisores es un buen ejemplo[9].

1.2.1.5.3. Ventilación.

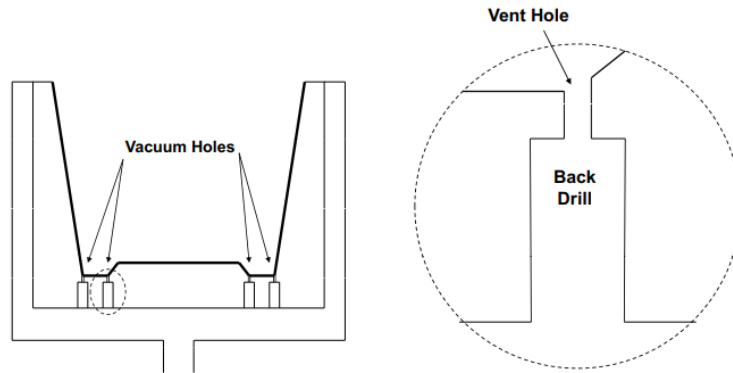
Todos los moldes de termoformado deben tener un medio para evacuar el aire entre la lámina calentada y el molde. Estos medios se denominan respiraderos para el moldeo por presión y orificios de vacío para el moldeo por vacío. Básicamente sirven para lo mismo y los principios fundamentales de diseño son idénticos. El objetivo principal de estos respiraderos u orificios de vacío es facilitar que la lámina calentada se forme y entre en contacto con la superficie del molde lo más rápidamente posible.

Aunque se utiliza el término orificio, puede tratarse de ranuras, canales o cualquier otra abertura que permita la circulación del aire. El tamaño de estas aberturas debe ser lo suficientemente pequeño como para que la lámina calentada no se forme en la abertura, pero lo suficientemente grande como para evacuar rápidamente el aire. Lo ideal es que estas aberturas no dejen marcas en la pieza, pero esto es menos importante en los envases y productos desechables, ya que el examen minucioso de estos productos suele revelar marcas visibles.

El tamaño real también varía en función del material que se está formando, así como del grosor del material que está en contacto con la abertura. A medida que aumenta el volumen de aire que hay que evacuar, también aumenta el número o el tamaño de estas aberturas. Los materiales cristalinos como el polietileno y el polipropileno son bastante blandos y fluidos a temperaturas de conformado.

Figura 7

Ubicación del orificio de ventilación y perforación posterior.



Nota. Adaptado de Fundamentals of Plastics Thermoforming. [5]

Los orificios de ventilación o vacío están situados en los últimos puntos en formarse y donde puede quedar aire atrapado entre la lámina y el molde. Para aumentar el flujo de aire fuera del molde, los orificios de ventilación y vacío suelen perforarse por detrás. Esto se consigue agrandando el orificio en el lado opuesto del molde con respecto a la cavidad. El orificio más grande suele tener dos o tres veces el diámetro de los orificios de ventilación y vacío[8].

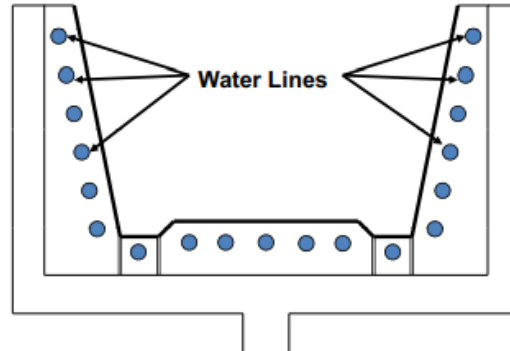
1.2.1.5.4. Control de temperatura.

La mayoría de los moldes de aluminio tienen algún tipo de control para mantener la temperatura correcta para el material que se está formando. El método de control de temperatura más común utiliza agua que fluye a través de un controlador que calienta o enfría el agua para mantener una temperatura preestablecida. Los canales de agua se mecanizan en el molde para eliminar el calor de la forma más eficaz.

La Figura 8 ilustra los canales de enfriamiento mecanizados a través de la cavidad de un molde. La trayectoria del refrigerante debe diseñarse de manera que se produzca un enfriamiento igual dentro del molde.

Figura 8

Canales de enfriamiento del molde.

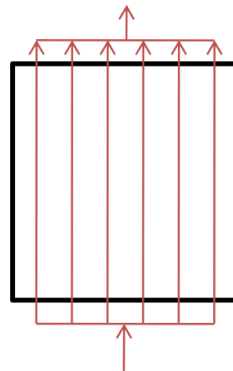


Nota. Adaptado de Fundamentals of Plastics Thermoforming. [5]

La Figura 9 ilustra un sistema colector que enfriaría el molde de manera más uniforme.

Figura 9

Un buen ejemplo de flujo de enfriamiento.

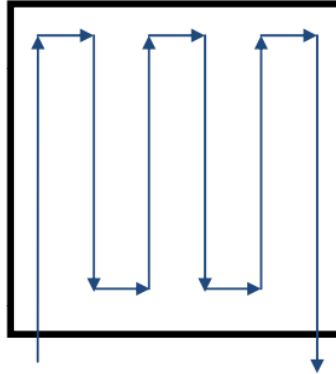


Nota. Adaptado de Fundamentals of Plastics Thermoforming. [5]

La Figura 10 ilustra un diseño deficiente en el que el fluido aumenta de temperatura a medida que fluye a través del molde, lo que crea un enfriamiento desigual.

Figura 10

Un mal ejemplo de flujo de enfriamiento.



Nota. Adaptado de Fundamentals of Plastics Thermoforming. [5]

1.2.1.5.5. Cavidades.

Los moldes de termoformado básicos incluyen una cavidad o tapón a menudo mecanizado en un bloque de aluminio. Los moldes más sofisticados tienen bases de molde estándar con insertos de cavidad añadidos. Las piezas de gran volumen rara vez se producen de una en una. Pueden utilizarse en máquinas de alimentación de láminas o de rodillos.

Otra opción de cavidad se conoce como molde familiar, que consiste en varias cavidades diferentes que producen piezas que actúan como un conjunto de piezas en el producto final. Por ejemplo, la parte superior e inferior de la carcasa de un ordenador pueden fabricarse al mismo tiempo en un molde familiar. Se parte de la base de que no se necesitaría una parte superior sin una inferior.

1.2.2. Moldeo por termoformado.

El moldeo por termoformado es un proceso ampliamente utilizado en la industria manufacturera para crear una amplia variedad de productos. En vista de que representa una

alternativa al mecanizado de moldes de metal, ya que además de aprovechar la impresión 3D para fabricar moldes de termoformado, se usa para el prototipado y la producción de bajo volumen reduciendo así los costes y tiempos necesarios con respecto al uso de moldes metálicos, sin dejar de fabricar piezas repetibles y de alta calidad.

La impresión 3D es una potente solución para fabricar moldes de inyección con rapidez y costes bajos. Requiere muy poco equipamiento, con lo que se ahorra en tiempo y operarios expertos de CNC que pueden dedicarse mientras tanto a otras tareas importantes. Los fabricantes pueden aprovechar la velocidad y la flexibilidad de la impresión 3D en su empresa para crear el molde y combinarlo con la potencia de producción del moldeo por termoformado para producir varias unidades a partir de termoplásticos comunes en cuestión de días.

Los equipos de desarrollo de productos se benefician de la capacidad de realizar iteraciones del diseño antes de invertir en utillaje pesado. Incluso pueden conseguir formas de molde complicadas que serían difíciles de fabricar con los métodos tradicionales, lo que permite a los diseñadores e ingenieros ser más innovadores. Los moldes impresos en 3D también pueden sustituirse fácilmente a medida que evoluciona el diseño y en caso de fallo [10].

1.2.3. Fabricación aditiva.

La fabricación aditiva es una tecnología extremadamente prometedora y vemos un aumento espectacular en las organizaciones que utilizan la tecnología. Anteriormente, se usaba principalmente para la creación de prototipos, pero hoy en día se centra en su uso para la producción en serie y en la actualidad estamos presenciando una tendencia de fabricación de componentes en miniatura resultando así una creciente demanda [11].

La fabricación aditiva (FA) se trata de una nueva tecnología que permite la producción automática de objetos tridimensionales (3D) mediante la impresión de capas sucesivas de material. También se le conoce como fabricación de forma libre, creación rápida de prototipos (RP), impresión 3D o fabricación digital directa. Estas tecnologías describen el proceso de construcción de objetos 3D añadiendo capa tras capa de material, que puede ser de plástico, metal, hormigón o incluso tejido humano. La fabricación aditiva se considera a menudo como una tecnología asociada a la industria 4.0.

La fabricación aditiva es un término colectivo para una amplia gama de tecnologías que funcionan de formas muy diferentes y en muchos tipos de materiales diferentes, como se muestra en la figura. [11]

La fabricación aditiva agrega material para crear un objeto e inherentemente produce menos desperdicio. Mientras que los sistemas de producción tradicionales proceden por sustracción, la fabricación aditiva implica la fabricación de un objeto 3D mediante la adición sucesiva de material, generalmente capa por capa, como se muestra en la figura 12. [12] La diferencia entre los distintos procesos la marca generalmente la forma en que se crean las capas.

Figura 11

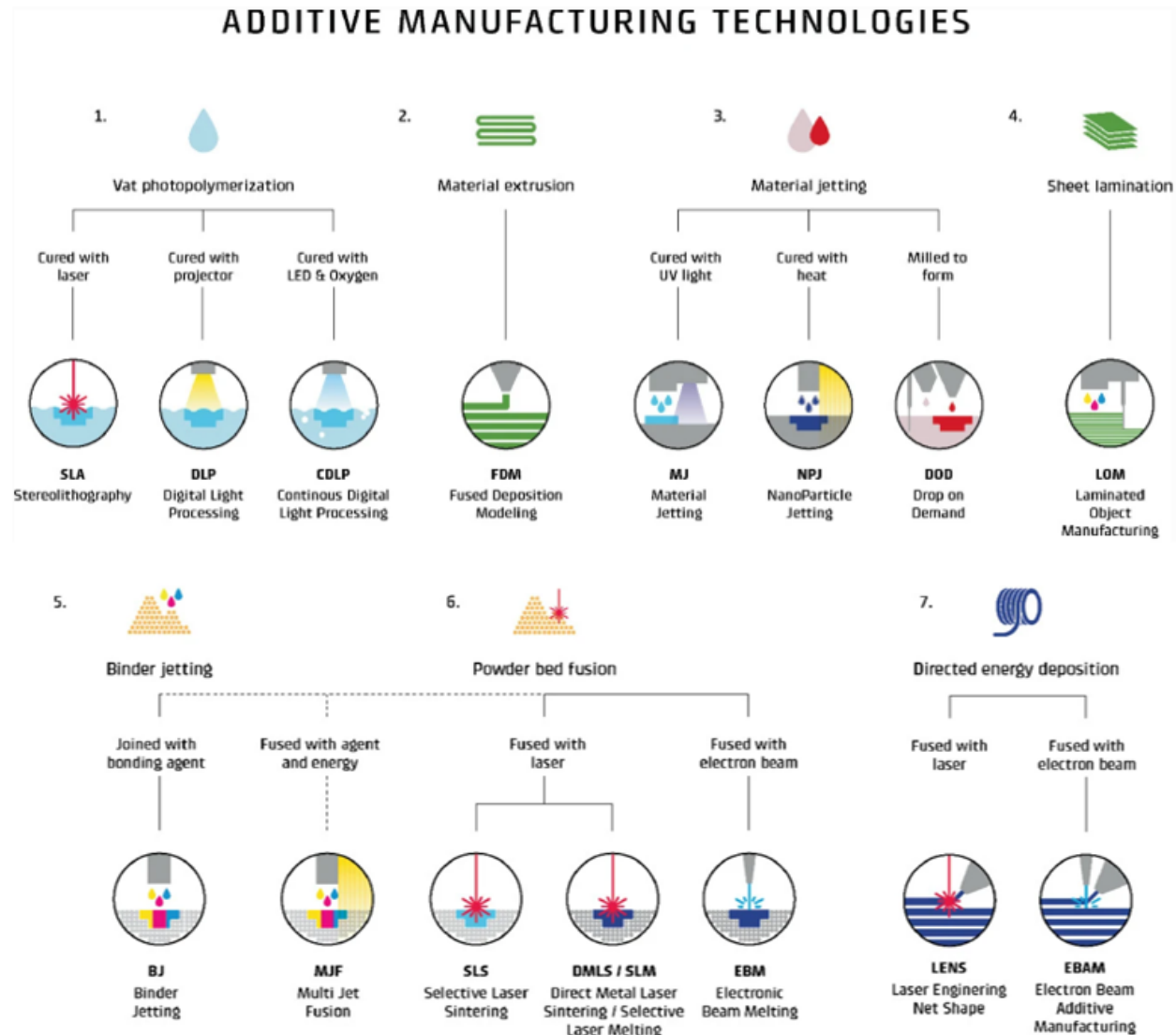
Etapas de la impresión de una hélice.



Nota. Adaptado de La Impresión 3D. [13]

Figura 12

Una visión general de las principales tecnologías de fabricación aditiva en 2022.



Nota. Adaptado de Additive Manufacturing. [11]

1.2.3.1. Procesos de fabricación aditiva.

En realidad, no existe una técnica de impresión 3D única, sino que hay muchas, y cada una de ellas con multitud de variantes. No requieren ni los mismos equipos, ni los mismos materiales, y producen resultados notablemente distintos. A grandes rasgos, se pueden clasificar

en tres grandes familias: los procesos basados en la fotopolimerización, los que consisten en ligar polvo y aquellos que consisten en el depósito progresivo de material [13].

La fotopolimerización es un proceso de impresión 3D que emplea polímeros líquidos que se solidifican al contacto con la luz. Está en la base de la técnica más antigua de impresión 3D, la estereolitografía.

1.2.3.1.1. La estereolitografía (SLA).

La estereolitografía (SLA), desarrollada por 3D Systems, Inc., fue el primer proceso de prototipado rápido y sigue siendo ampliamente utilizado. En el pasado, estos dos términos se utilizaban indistintamente. La estereolitografía es un proceso basado en líquidos que implica la solidificación o curado de un polímero fotosensible mediante la exposición de una resina al láser ultravioleta [14].

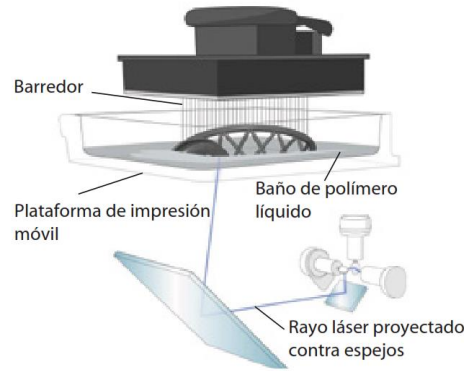
Las impresoras SLA están provistas de un depósito en el que caben varios litros de fotopolímeros líquidos, una plataforma móvil sumergida en dicho depósito, un láser de rayos ultravioleta y un ordenador que controla láser y plataforma móvil. El proceso comienza con un modelo en un programa de CAD y luego se traduce a un archivo STL en el que las piezas se "segmentan en láminas muy finas" de 0,05 a 0,1 mm que contienen la información de cada capa.

Se construye una plataforma para anclar la pieza y soportar las estructuras en voladizo. A continuación, se aplica el láser UV a la resina solidificando lugares específicos de cada capa según las indicaciones que le envía el ordenador. Una vez terminada la capa se baja la plataforma una fracción de milímetro para que el láser pueda trazar la siguiente. El proceso se repite capa tras capa hasta la obtención completa del modelo [13].

Al terminar la impresión, la plataforma vuelve a subir y ya puede recogerse el objeto. Es entonces cuando llega la fase de acabado.

Figura 13

Impresión 3D por estereolitografía.



Nota. Adaptado de La Impresión 3D.[13]

El objeto se lava en un disolvente, y después se coloca en un horno ultravioleta para que quede limpio por completo, se disuelvan todas las uniones de soporte y se refuerce la solidez. Se ha desarrollado una versión más reciente de este proceso con una mayor resolución y se denomina microestereolitografía. Con este proceso se puede conseguir un grosor de capa inferior a 10 μm . En la Figura se muestran las partes básicas de una máquina de estereolitografía.

1.2.3.1.2. La sinterización láser (SLS).

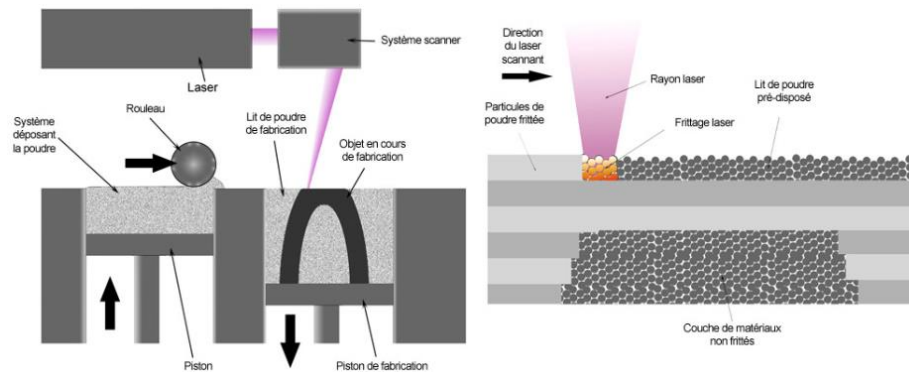
La impresión 3D mediante aglomeración de polvo agrupa los procesos de sinterización láser SLS y DMLS, además de las técnicas E-Beam, EBF y 3DP. Su particularidad consiste en que utiliza el polvo como material principal, aglomerándolo mediante diversas técnicas. La principal ventaja del polvo es que permite imprimir en una gran variedad de materiales, siendo el metal uno de los grandes avances en este terreno.

La tecnología SL, también conocida sencillamente como sinterización láser, fue desarrollada por la compañía EOS, ubicada en Alemania. Por medio de un láser muy potente se

logra fusionar minúsculas partículas de polvo. Igual que en el resto de técnicas de impresión 3D, un programa segmenta al principio el archivo CAD en finas láminas [13].

Figura 14

Esquema explicativo del proceso de impresión 3D mediante sinterización láser.



Nota. Adaptado de La Impresión 3D.[13]

A continuación, puede comenzar la impresión 3D. La bandeja de polvo se precalienta dentro de la máquina a una temperatura justo por debajo del punto de fusión. Un rodillo extiende una capa de polvo muy fina (de 0,1 mm de grosor) sobre la plataforma de impresión. El láser pasa entonces por encima del polvo siguiendo el trazado determinado por el ordenador y funde las partículas hasta que se fusionan entre sí.

Una vez fusionada la lámina, el rodillo extiende otra capa de polvo y el láser pasa de nuevo. El proceso se repite hasta que se completa la fabricación del objeto. Al terminar, hay que sacar la pieza de la bandeja de polvo y limpiarla para quitarle las partículas que no se han fusionado. El material básico del proceso de sinterización no es, por tanto, líquido sino polvo. Puede tratarse de polvo de plástico, cerámica, vidrio o metal (en este último caso, hablaríamos de direct metal laser sintering (DMLS) [13]. No obstante, la mayor de parte de las impresoras utiliza polvos que combinan dos compuestos; la única condición es que se disponga de partículas

uniformes y muy finas, del orden de 50 μm . El material más corriente es la poliamida, que permite producir prototipos y objetos acabados. El polvo es de color blanco, pero puede colorearse después de la impresión.

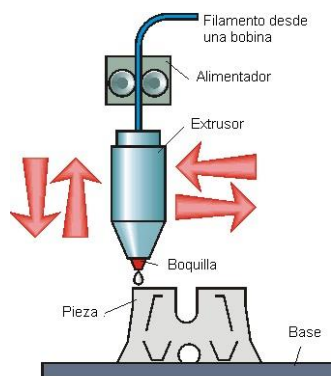
1.2.3.1.3. La técnica de modelado por fusión de material (FDM).

La tecnología FDM fue desarrollada a finales de la década de 1980 por S. Scott Crump, cofundador de Stratasys, y comenzó a comercializarse en la década de 1990. Después de la estereolitografía, es considerado uno de los primeros procesos de impresión 3D. En los últimos años, ha ganado popularidad debido al surgimiento de las impresoras 3D personales, siendo el proyecto Rep Rap y la compañía MakerBot los principales responsables de este avance.

Esta técnica consiste en depositar sucesivamente un filamento de plástico o metal. Una boquilla de extrusión, a través de la cual pasa el filamento, va depositando el material siguiendo el trazado definido por el archivo CAD. Se calienta a más de 185 $^{\circ}\text{C}$, fundiendo el material a medida que imprime. El material es depositado en capas muy finas (una media de 0,04 mm de grosor). El objeto se construye, por lo tanto, capa por capa, de la base a la cima [13].

Figura 15

Tecnología FDM.



Nota. Adaptado de Tecnología de los plásticos. [15]

La tecnología FDM utiliza principalmente materiales termoplásticos como ABS o PLA. Algunas impresoras también admiten el uso de policarbonatos (PC), policaprolactonas (PCL), polifenilensulfonas (PPSF), ULTEM 09085 (un plástico reconocido por su resistencia al fuego y su idoneidad en aplicaciones aeroespaciales) y ceras. En determinados casos, el cabezal de impresión puede ser reemplazado por una jeringa que permite depositar otros compuestos, como alimentos (las impresoras Fab@Home son capaces de imprimir queso), o células (las impresoras Organovo están especializadas en este ámbito).

1.3. Estado del arte.

De acuerdo con [16] el termoformado de películas y láminas de plástico ha experimentado un crecimiento significativo en los últimos 25 años y se ha convertido en un proceso ampliamente utilizado en la producción de envases de embalaje y molduras técnicas en diversas industrias. En la industria farmacéutica se utiliza envases tipo blíster fabricados con láminas de plástico termoformado para comprimidos y otros productos. Estos envases brindan protección y seguridad al tiempo que permiten una fácil visualización del contenido.

En la industria de alimentos, se producen millones de vasos y tapas termoformados para envasar una amplia variedad de productos. Estos envases son económicos, livianos y pueden ser personalizados para adaptarse a diferentes necesidades de embalaje. Del mismo modo, se utiliza en la fabricación de utensilios domésticos, juguetes y otros productos de consumo. Los tableros de instrumentos termoformados y resistentes a los impactos, así como los revestimientos protectores, son componentes estándar en la construcción de vehículos. Estos productos ofrecen

durabilidad y protección contra los impactos, al tiempo que cumplen con los requisitos estéticos y funcionales.

Como expresa [17] para seguir siendo competitivo con otros materiales y técnicas de fabricación, la industria del termoformado continúa desarrollando equipos especializados. Se busca mejorar la eficiencia del proceso, reducir los costos de producción y explorar nuevas posibilidades de diseño. Los avances en tecnología de calefacción, sistemas de vacío y moldes han permitido la producción de piezas más complejas y de alta calidad.

En definitiva, el termoformado de películas y láminas de plástico se ha convertido en un proceso clave en la producción de envases, molduras técnicas y componentes en diversas industrias. Este campo sigue evolucionando a medida que se desarrollan equipos y técnicas más avanzadas para mantener la competitividad y satisfacer las demandas cambiantes del mercado.

Dado que este proceso se utiliza en una amplia gama de procesos y aplicaciones, la optimización es fundamental en el proceso de termoformado, en varios aspectos como el proceso, las variables de diseño, los requisitos de modelización y los objetivos que deben alcanzarse para lograr resultados eficientes y satisfacer los requisitos específicos en cada caso.

En [18] la optimización del proceso implica encontrar la combinación óptima de estos parámetros para lograr los resultados deseados en términos de calidad, eficiencia y costos. Por ejemplo, se puede buscar una temperatura de calentamiento que permita una formación adecuada del material sin causar deformaciones o problemas de calidad. Del mismo modo, la presión de formado y la geometría del molde deben ser optimizadas para obtener la forma y el acabado deseados.

[19] ratifica que los desafíos de la optimización se centran en encontrar las condiciones de funcionamiento óptimas, como la distribución de temperatura adecuada en la lámina al final de

la etapa de calentamiento, así como en determinar la geometría ideal de la cavidad del molde para lograr una distribución de espesores uniforme o específica en la pieza termoformada.

Ante esto la fabricación aditiva es una tecnología de fabricación prometedora en la fabricación de moldes, de hecho [20] destaca la creación de moldes mediante la técnica FDM puesto que ofrece la posibilidad de generar moldes para pruebas de concepto de alta fidelidad.

Con esto en mente se quiere investigar ¿qué consideraciones se debe de tener en cuenta al utilizar moldes impresos en 3D para termoformado? Es decir, se quiere desarrollar criterios de optimización para el diseño de moldes de termoformado que son fabricados mediante impresión 3D, con el fin de lograr una fabricación más eficiente y personalizada.

En la bibliografía se pueden encontrar referencias de diseño de molde, termoformado e impresión 3D o fabricación aditiva.

II. Objetivos

2.1. Objetivo general.

El objetivo de este trabajo es desarrollar criterios de optimización para el diseño de moldes de termoformados fabricados mediante impresión 3D, con el fin de lograr una fabricación más eficiente y personalizada.

2.2. Objetivos particulares.

- Definir y comprender las variables y propiedades que influyen en el proceso de termoformado.
- Desarrollar modelos de simulación para evaluar el rendimiento de los moldes de termoformado.
- Investigar y analizar las características además de los requisitos específicos de los moldes de termoformados fabricados mediante impresión 3D.
- Analizar los efectos y las consecuencias que la temperatura tiene sobre la superficie del molde.

III. Desarrollo Sostenible

3.1. Industria Innovación e Infraestructura.

En el año 2015 las Naciones Unidas adoptaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como una llamada mundial a la acción para acabar con la pobreza, proteger el planeta y garantizar la paz y la prosperidad. Estos 17 ODS están integrados y reconocen que el desarrollo debe equilibrar la sostenibilidad social, económica y ambiental.[21]

Figura 16

Objetivos de desarrollo sostenible (ODS).



El objetivo de desarrollo sostenible busca promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación tecnológica. La impresión 3D se considera una tecnología innovadora con el potencial de transformar la industria al permitir una fabricación más eficiente, personalizada y sostenible.

Entre las metas específicas de este objetivo para el año 2030 se incluyen:

- Facilitar el desarrollo de infraestructuras sostenibles y resilientes en los países en desarrollo mediante un mayor apoyo financiero, tecnológico y técnico a los países africanos, los países menos adelantados, los países en desarrollo sin litoral y los pequeños Estados insulares en desarrollo.
- Promover una industrialización inclusiva y sostenible y, de aquí a 2030, aumentar significativamente la contribución de la industria al empleo y al producto interno bruto, de acuerdo con las circunstancias nacionales, y duplicar esa contribución en los países menos adelantados.
- Apoyar el desarrollo de tecnologías, la investigación y la innovación nacionales en los países en desarrollo, incluso garantizando un entorno normativo propicio a la diversificación industrial y la adición de valor a los productos básicos, entre otras cosas.

3.1.1. Sostenibilidad para la impresión 3D.

Si queremos lograr la sostenibilidad, es necesario que los consumidores cambien su comportamiento y perspectiva. Las organizaciones deben adoptar una gestión "verde" y desarrollar iniciativas en línea con los principios de la economía circular. Además, es importante tener en cuenta que los objetivos de las organizaciones ahora son tanto sociales como financieras.[22]

Por otro lado, los consumidores deben ser más conscientes de sus actitudes y preocupaciones en relación al medio ambiente. Es alentador ver que ya se están implementando algunas prácticas de consumo ecológico. A continuación, se presentan algunos ejemplos de comportamientos sostenibles que los consumidores pueden adoptar:

- Los consumidores deben evitar aquellos productos que tengan un impacto sobre el medio ambiente;

- Evitar los productos que contengan aerosoles;
- Preferir productos de base reciclada, por ejemplo, papel;
- Centrarse en los alimentos ecológicos;
- Alimentos: Preferir los locales;
- Preferir las tiendas locales para la compra.

La fabricación aditiva (AM), comúnmente conocida como impresión 3D, ha sido reconocida como una tecnología sostenible y eficiente. Esta tecnología ofrece a los fabricantes la capacidad de utilizar solo la cantidad necesaria de materiales, lo que conlleva ventajas económicas al reducir los costos tanto de materiales como de producción. Además, la impresión 3D mejora la eficiencia operativa al reducir los costos asociados con el diseño, la producción, el inventario, la gestión de almacenes, la distribución y el transporte. Estas mejoras conducen a prácticas industriales más sostenibles.[23]

La fabricación aditiva también permite eliminar las operaciones de la cadena de suministro asociadas con la producción convencional. Además, proporciona herramientas adicionales que permiten la reparación y reconstrucción de herramientas y matrices obsoletas o dañadas, lo cual contribuye a reducir la generación de residuos. Al eliminar la necesidad de utillaje y evitar el uso de procesos peligrosos para el medio ambiente, se promueve un enfoque más sostenible en la fabricación.

Los sistemas de fabricación aditiva, como la impresión 3D, suelen tener un tamaño reducido, lo que facilita su ubicación cercana a los mercados existentes. Esto a su vez reduce la necesidad de logística de transporte a nivel mundial. Además, las materias primas utilizadas en los sistemas de impresión 3D son comunes, lo que contribuye a una reducción neta en los costos de transporte.

IV. Metodología

4.1. Materiales.

Aunque es posible utilizar una amplia variedad de termoplásticos en el proceso de termoformado, existen ciertos materiales que son ampliamente utilizados en la industria. A continuación, se presentan los materiales utilizados en el termoformado, junto con algunas de sus propiedades clave y los productos finales más frecuentes.

4.1.1. Materiales para el termoformado.

4.1.1.1. Hojas Mayku Cast Sheets.

El Mayku es transparente y resistente a los alimentos, con hojas de 0,5 mm para fabricar moldes reutilizables. Contiene 30 hojas de fundición, con las siguientes características y ventajas:

- Fabricado en material de polietilenglicol tereftalato (PETG)
- Hojas versátiles blancas reciclables
- Se puede quitar fácilmente la superficie de la flexión ligera y la no pegajosa

Estas láminas tienen las siguientes aplicaciones:

- Se utiliza para crear moldes reutilizables
- Proyectos creativos de artesanía

Las hojas mayku cast sheets, es fabricado en London por la empresa Mayku dedicados al proceso de termoformado. Las propiedades más relevantes de las hojas mayku cast sheets utilizado para el termoformado de cada uno de los moldes se indican en la siguiente tabla:

Tabla 1

Especificaciones de la lámina Mayku Cast Sheets.

Atributo	Valor	Atributo	Valor
Material	PETg	Longitud	235 mm
Plataforma de conformado	200 x 200 mm	Ancho	235 mm
Profundidad del cajón	130 mm	Peso	1,10 Kg
Altura	16 mm		

Nota. Fuente: Empresa distribuidora RS Pro.[24]

4.1.2. Materiales utilizados en la impresión 3D por deposición de material fundido.

Las técnicas de impresión 3D han experimentado avances significativos en los últimos años, y su valor intrínseco no sería posible sin los materiales que las respaldan, los cuales han experimentado una notable diversificación. Actualmente, los materiales más ampliamente utilizados en la impresión 3D son los plásticos y los metales, pero también es importante destacar el creciente uso de cerámicas y materiales orgánicos.[13] Cada técnica de fabricación aditiva se ve complementada por materiales específicos, adaptados para optimizar los resultados del proceso.

La variedad de plásticos disponibles para la impresión 3D ha aumentado considerablemente, ofreciendo opciones con propiedades mecánicas diversas, como la flexibilidad, resistencia o durabilidad.

Estos materiales plásticos se emplean en una amplia gama de aplicaciones, desde la creación de prototipos hasta la fabricación de piezas finales en sectores como la industria automotriz, la aeroespacial y la medicina. A continuación, se detalla los materiales utilizados en la impresión 3D de los moldes para termoformado.

4.1.2.1. Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS).

Este material pertenece a la familia de los termoplásticos, es uno de los materiales más populares en la impresión 3D. La emplean todas las impresoras personales y constituye también el componente base del fabricante Stratasys. El ABS tiene un punto de fusión entre los 200 y los 250 °C, puede soportar temperaturas relativamente bajas hasta -80 °C y elevadas hasta los 80 °C. [13]

En realidad, existe una amplia variedad de clases de ABS, cada una con propiedades específicas que varían según la tecnología de impresión 3D asociada. El ABS se utiliza comúnmente en impresoras personales de depósito de filamento fundido (FDM), donde se presenta en forma de bobinas de filamento de 1,75 mm o 3 mm de diámetro en una amplia gama de colores. Además, se han desarrollado imitaciones de ABS para su uso en tecnologías como la estereolitografía, donde se utiliza en forma de polímeros líquidos, e incluso en la tecnología PolyJet desarrollada por Objet.

Este polímero combina las propiedades de sus tres componentes: acrílico, butadieno (caucho) y poliestireno. El acrílico proporciona un alto brillo y una buena resistencia a la intemperie. El caucho aumenta la resistencia al impacto y el poliestireno mejora la conformabilidad. Este material amorfo opaco se suele utilizar cuando se necesita una alta resistencia al impacto, pero no se requiere claridad. Entre las aplicaciones de termoformado más comunes se encuentran las carcasas de maletas y las carcasas. [5]

El filamento Smartfil ABS, es fabricado en España por la empresa Smart Materials 3D dedicados al diseño, fabricación y comercialización de filamentos para la impresión 3D. Las propiedades más relevantes del filamento de ABS utilizado para la impresión de uno de los moldes se indican en la siguiente tabla:

Tabla 2

Información técnica del filamento de marca Smartfil ABS.

Especificaciones del Filamento		Configuración de Impresión	
Diámetro	2,85 mm	Temperatura de impresión	230 - 250°C
Temperatura (Tg)	104°C	Temperatura de la cama	90 - 110°C
Peso neto del filamento	750 g	Velocidad	30 - 50 mm/s
Densidad	1,04 g/cm ³	Altura mínima de la capa	≥ 0,10 mm

Nota. Fuente: Smart Materials 3D. [25]

4.1.2.2. Ácido Poliláctico (PLA).

En general, las impresoras 3D de código abierto que utilizan la técnica de modelado por deposición fundida (FDM) suelen admitir únicamente dos tipos de materiales: ABS y PLA (poliácido láctico). El PLA se funde a una temperatura que oscila entre 160 y 220 °C, y a diferencia del ABS, se enfría y endurece rápidamente. Esto puede dificultar su manipulación.

Sin embargo, a diferencia del ABS, no requiere una bandeja de impresión térmica, ya que la impresión se realiza directamente sobre una placa acrílica o una plataforma de madera recubierta de adhesivo a una temperatura de 185 °C. Para complementar el PLA, algunas impresoras 3D utilizan un material de soporte conocido como PVA.[13]

El PLA destaca por sus excelentes propiedades medioambientales, ya que es un plástico fabricado a partir de almidón de maíz y no utiliza energía fósil en su producción. Además, es biodegradable y compostable, lo que significa que puede descomponerse en un compostador industrial a temperaturas superiores a 90 °C. Estas características han hecho que el PLA sea cada vez más popular entre los consumidores conscientes del medio ambiente.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el PLA es sensible a la humedad. El contacto repetido con el agua, como lavados frecuentes en máquina, o la exposición prolongada a la intemperie pueden debilitar y dañar los objetos fabricados con PLA. Esto se debe a que el PLA tiende a absorber la humedad del entorno, lo que puede afectar a su resistencia y durabilidad. Para preservar la calidad de los objetos de PLA, se recomienda evitar su exposición prolongada a la humedad y almacenarlos en un lugar seco. Además, es aconsejable protegerlos de la luz solar directa, ya que la radiación ultravioleta puede acelerar el proceso de degradación.

El filamento BCN3D, es fabricado en Países Bajos por la empresa Mitsubishi Chemical y distribuido por la empresa BCN3D dedicados a materiales de grado industrial. Las propiedades más relevantes del filamento de PLA utilizado para la impresión de uno de los moldes se indican en la siguiente tabla:

Tabla 3

Información técnica del filamento de PLA.

Especificaciones del Filamento		Configuración de Impresión	
Diámetro	2,85 mm	Temperatura del Extrusor	90 - 220°C
Desviación de Redondez Max	≥ 95%	Temperatura de la cama	65°C
Peso neto del filamento	750 g	Velocidad	10 - 70 mm/s
Gravedad específica	1,24 g/cm ³	Altura mínima de la capa	0,05 mm

Nota. Fuente: BCN3D Filamentos.[26]

4.1.2.3. Tereftalato de Polietileno Glicolizado (PETG).

El PETG es uno de los copolímeros más reconocidos y ampliamente utilizados en el campo de la impresión 3D. Este material es el resultado de la combinación del PET con glicol, lo que

permite mejorar las propiedades ya interesantes del PET mediante un proceso de glicolización.[27]

El PETG destaca por su notable resistencia y durabilidad, lo que lo convierte en una opción popular para una amplia variedad de aplicaciones en la impresión 3D. El proceso de glicolización del PET aporta mejoras significativas, como una mayor resistencia al impacto y una mayor flexibilidad en comparación con el PET estándar. Una característica destacada del PETG es su capacidad para resistir altas temperaturas, lo que lo convierte en una opción viable para piezas que estarán expuestas a condiciones de calor moderado. Esto permite utilizar el PETG en proyectos que requieren una mayor resistencia térmica en comparación con otros materiales comunes utilizados en la impresión 3D, como el PLA.

El filamento Smartfil PETG, es fabricado en España por la empresa Smart Materials 3D dedicados al diseño, fabricación y comercialización de filamentos para la impresión 3D. Las propiedades más relevantes del filamento de ABS utilizado para la impresión de uno de los moldes se indican en la siguiente tabla:

Tabla 4

Información técnica del filamento de marca Smartfil PETG.

Especificaciones del Filamento		Configuración de Impresión	
Diámetro	2,85 mm	Temperatura de impresión	225 - 245°C
Temperatura (Tg)	70°C	Temperatura de la cama	60 - 90°C
Peso neto del filamento	750 g	Velocidad	30 - 50 mm/s
Densidad	1,27 g/cm ³	Altura mínima de la capa	≥ 0,1 mm

Nota. Fuente: Smart Materials 3D. [25]

4.2. Procesos de fabricación.

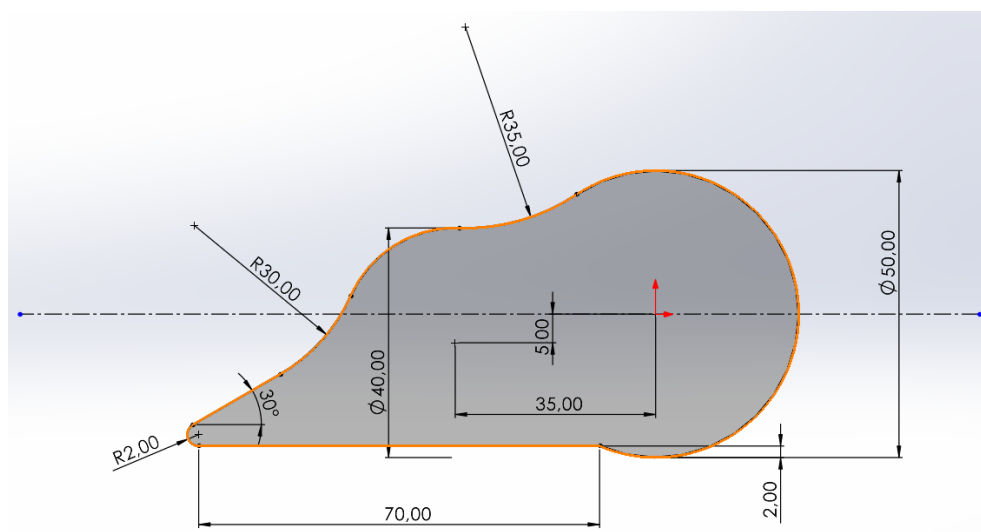
4.2.1. Proceso de modelado CAD.

Como se explicó anteriormente en el marco teórico, para fabricar moldes de termoformado mediante la impresión 3D como primer paso se debe tener un modelo digitalizado del blíster en formato 3D mediante un programa CAD, el cual permite obtener el objeto real. Por tal motivo para comenzar se realizó la compra de un típex en una librería, el cual se utilizó como muestra para obtener el blíster y establecer las medidas para realizar el prototipo en el programa CAD de SolidWorks.

El primer croquis que se realizó en el programa de SolidWorks tiene las siguientes medidas y en el cual se estableció relaciones de posición para así dejar completamente definido el boceto, como se puede observar en la figura 16.

Figura 17

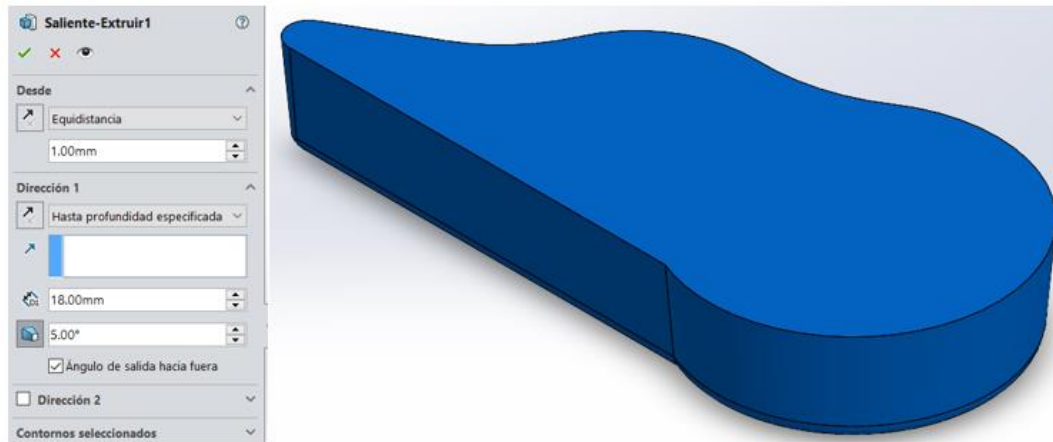
Plano de detalle de un blíster de un típex.



Luego se procede a extruir llenando los respectivos campos que solicita el programa obteniendo así:

Figura 18

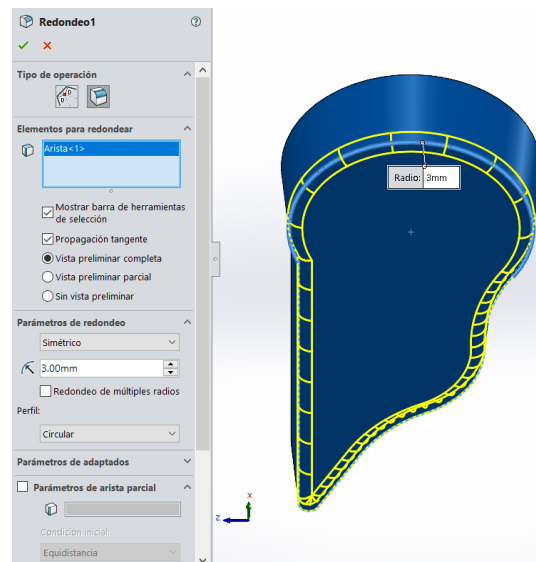
Operación de extrusión y ángulo de salida del boceto antes creado.



Para terminar el prototipo, se da un redondeo de 3mm en la arista que da la cara al blíster, como se muestra en la figura.

Figura 19

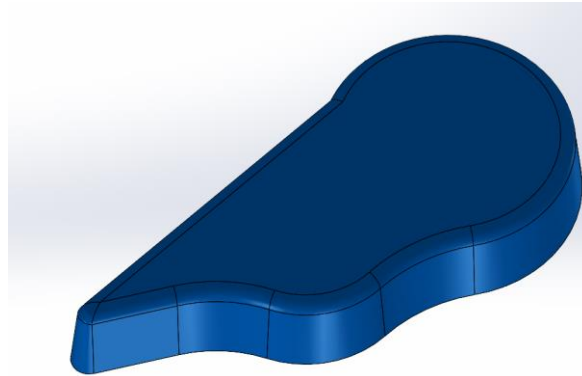
Operación de redondeo de una de las aristas el sólido antes creado.



Finalmente se ocupa la herramienta guardar como del programa de SolidWorks y se guarda el archivo en formato STL (*.stl), para así pasar al proceso de impresión 3D.

Figura 20

Prototipado del molde para termoformado, listo para proceder a imprimir.



4.2.2. Proceso de impresión 3D.

La impresión del molde se ha llevado a cabo en las instalaciones del Campus Universitario de Alcoy que cuenta con diferentes impresoras 3D lo que ha permitido aprovechar las ventajas tecnológicas disponibles en el lugar. A continuación, se detalla el equipo y los parámetros utilizados necesarios para llevar a cabo la impresión 3D.

4.2.2.1. Impresión del molde mediante la técnica de modelado por fusión de material (FDM).

El proceso de impresión mediante la técnica de modelado por fusión de material (FDM) se ha llevado a cabo en la impresora 3D Ultimaker S5 Pro Bundle de Impresoras3D.com de España, que presenta un volumen de impresión de 330x240x300 mm, cuenta con dos placas de construcción rápidamente intercambiables: una placa de vidrio endurecido y una placa de aluminio anodizado.

Tabla 5

Especificaciones de la impresora 3D Ultimaker S5 Pro Bundle.

Características	
Tecnología de impresión 3D:	FDM
Cabezal de impresión:	Doble extrusión con sistema de elevación
Diámetro de la boquilla:	0,25 mm, 0,40 mm, 0,80 mm
Temperatura de extrusor:	180 - 280 °C
Temperatura de la placa de construcción:	20 - 140 °C
Diámetro del filamento:	2,85 mm
Velocidad de construcción:	24 mm ³ /s
Materiales de impresión 3D:	PLA, ABS, CPE, CPE+, PC, TPU 95A, PP, PVA, PLA resistente, Nylon

Nota. Fuente: impresoras 3D.com. [28]

Figura 21

Impresora Ultimaker S5 Pro Bundle.

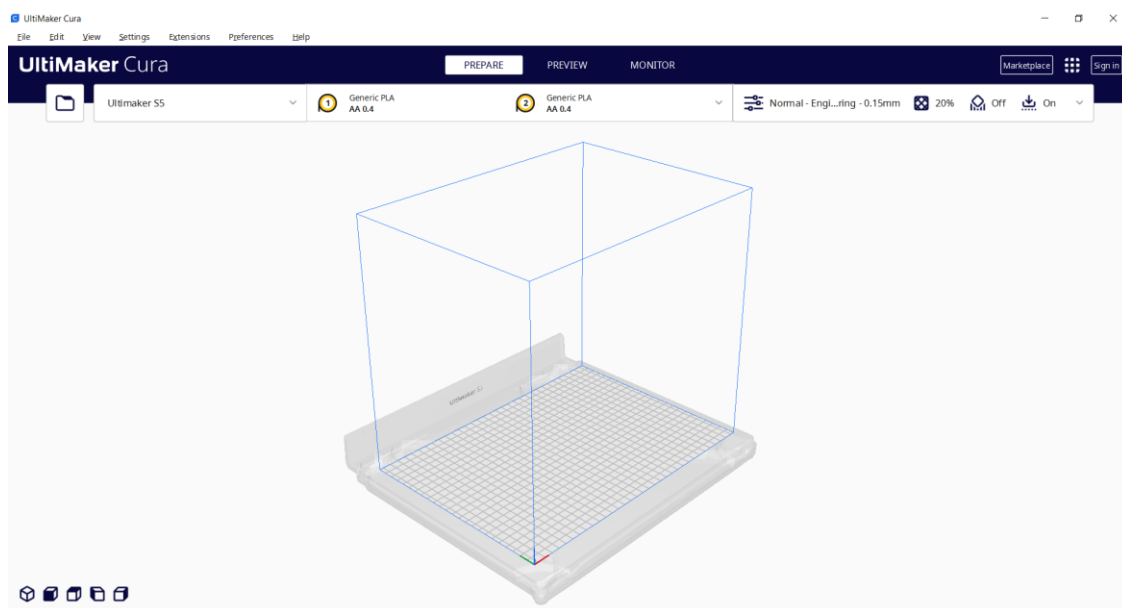


Nota. Este equipo se encuentra en el laboratorio de Generación Espontánea en las instalaciones del Campus Universitario de Alcoy.

Ultimaker Cura es el software para imprimir en 3D que utiliza la impresora Ultimaker S5 Pro Bundle, para asegurar el éxito de la impresión, es fundamental tener tanto la impresora como el software de modelado en 3D correctamente configurados. Es imprescindible seguir cuidadosamente las instrucciones de instalación y configuración. Una vez instalado, en la pantalla del ordenador se mostrará el área de impresión, que representa el volumen disponible en la impresora. Este espacio se utilizará para crear el objeto que será impreso posteriormente.

Figura 22

Entorno de trabajo del software Ultimaker Cura, instalado y configurado correctamente.



Ultimaker Cura destaca por su notable facilidad de uso, amplia compatibilidad con diferentes formatos de archivo y soporte para una amplia gama de impresoras 3D. Entre los formatos admitidos se encuentran STL, OBJ, X3D y 3MF, lo que permite trabajar con diversas fuentes de archivos y es un software 100% gratuito siendo una de las grandes ventajas de Ultimaker Cura. La interfaz del software es bastante intuitiva por tal motivo para llevar a cabo la impresión 3D se ha seguido los siguientes pasos activando cada una de las pestañas:

- Preparar
- Vista previa
- Supervisar

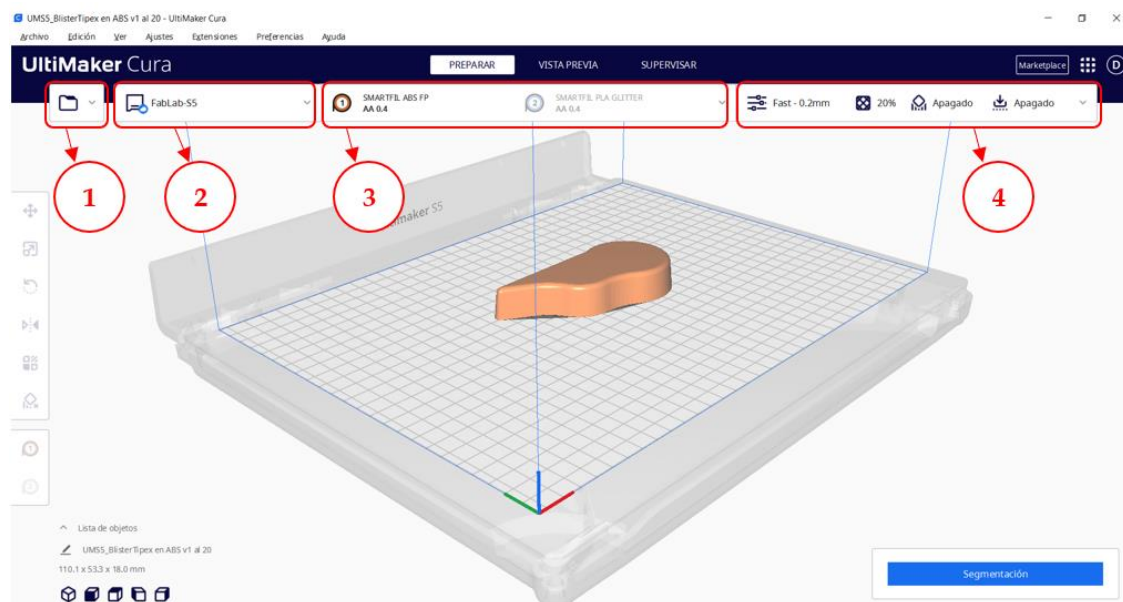
4.2.2.2. Preparar.

Esta herramienta del programa permite realizar las siguientes configuraciones y el mismo orden se observa en la figura 22:

1. Abrir el archivo .STL
2. Seleccionar la impresora
3. Seleccionar el tipo de material y la bandeja en que se encuentra en la impresora, y
4. Establecer los ajustes de impresión

Figura 23

Herramientas de la pestaña Preparar del software Ultimaker Cura.



De tal manera que se abre el archivo requerido, se selecciona la impresora y el material como la bandeja en que este se encuentra. En cuanto a los ajustes de impresión el software tiene

una interfaz simple que permite elegir entre dos modos desde el principio: el modo recomendado y el modo personalizado. Se ha elegido este último y entre los parámetros de ajustes de impresión más relevantes para conseguir una buena calidad de impresión, destacan los siguientes:

- Calidad
- Paredes
- Material
- Velocidad
- Adherencia de la placa de impresión
- Relleno

Por lo tanto, la configuración que se ha establecido para cada uno de los parámetros antes mencionados y para cada tipo de material se observa en las siguientes figuras:

Figura 24

Parámetros establecidos para el molde de material ABS con un relleno de: a) 20% y b) 40%.

Ajustes del perfil	Fast	Cambios actuales
Temperatura de la placa de impresión	85	110
Temperatura de volumen de impresión	30	50.0
Temperatura de impresión	225	240
Temperatura de impresión inicial	210	240
Temperatura de impresión final	205	240
Altura de capa	0.2	0.1
Altura de capa inicial	0.2	0.1
Tipo adherencia de la placa de impresión	brim	skirt
Recuento de líneas de falda	1	3
Expansión horizontal de la capa inicial	-0.1	-0.25
Recuento de líneas de pared	2	3
Recuento de líneas de pared	2	3
Velocidad de relleno	40	60

a)

Ajustes del perfil	Fast	Cambios actuales
Temperatura de la placa de impresión	85	110
Temperatura de volumen de impresión	30	50.0
Temperatura de impresión	225	240
Temperatura de impresión inicial	210	240
Temperatura de impresión final	205	240
Altura de capa	0.2	0.1
Altura de capa inicial	0.2	0.1
Tipo adherencia de la placa de impresión	brim	skirt
Recuento de líneas de falda	1	3
Densidad de relleno	20	40
Expansión horizontal de la capa inicial	-0.1	-0.25
Recuento de líneas de pared	2	3
Recuento de líneas de pared	2	3
Velocidad de relleno	40	60

b)

Figura 25

Parámetros establecidos para el molde de material PLA con un relleno de: a) 20% y b) 40%.

Ajustes del perfil	Fast	Cambios actuales
Altura de capa inicial	0.2	0.2
Altura de capa	0.2	0.1
Tipo adherencia de la placa de impresión	brim	skirt
Recuento de líneas de falda	1	3
Densidad de relleno	15	20
Temperatura de impresión inicial	195	205
Temperatura de impresión final	190	205
Expansión horizontal de la capa inicial	-0.1	-0.25
Recuento de líneas de pared	2	3
Recuento de líneas de pared	2	3

a)

Ajustes del perfil	Fast	Cambios actuales
Altura de capa inicial	0.2	0.2
Altura de capa	0.2	0.1
Tipo adherencia de la placa de impresión	brim	skirt
Recuento de líneas de falda	1	3
Densidad de relleno	15	40
Temperatura de impresión inicial	195	205
Temperatura de impresión final	190	205
Expansión horizontal de la capa inicial	-0.1	-0.25
Recuento de líneas de pared	2	3
Recuento de líneas de pared	2	3

b)

Figura 26

Parámetros establecidos para el molde de material PETG con un relleno de: a) 20% y b) 40%.

Ajustes del perfil	Fast	Cambios actuales
Altura de capa inicial	0.2	0.2
Altura de capa	0.2	0.1
Ancho de línea de la capa inicial	100.0	120
Tipo adherencia de la placa de impresión	skirt	brim
Recuento de líneas de falda	1	3
Recuento de líneas de borde	18	7
Distancia del borde	0	0.2
Temperatura de la placa de impresión	70	85
Temperatura de impresión inicial	230	235
Temperatura de impresión final	225	235
Flujo de pared interior de la capa inicial	95.0	98
Velocidad de capa inicial	40	30
Velocidad de relleno	40	60
Expansión horizontal de la capa inicial	-0.1	-0.25
Recuento de líneas de pared	2	3
Recuento de líneas de pared	2	3

a)

Ajustes del perfil	Fast	Cambios actuales
Altura de capa inicial	0.2	0.2
Altura de capa	0.2	0.1
Ancho de línea de la capa inicial	100.0	120
Tipo adherencia de la placa de impresión	skirt	brim
Recuento de líneas de falda	1	3
Recuento de líneas de borde	18	7
Distancia del borde	0	0.2
Temperatura de la placa de impresión	70	95
Temperatura de impresión inicial	230	235
Temperatura de impresión final	225	235
Flujo de pared interior de la capa inicial	95.0	98
Densidad de relleno	20	40
Velocidad de capa inicial	40	30
Velocidad de relleno	40	60
Expansión horizontal de la capa inicial	-0.1	-0.25
Recuento de líneas de pared	2	3
Recuento de líneas de pared	2	3

b)

Al respecto de estas configuraciones, cabe aclarar a qué se refiere la herramienta del porcentaje y tipo de patrones de relleno, características que se explican a continuación.

4.2.2.3. Porcentajes y tipos de patrones de relleno.

Es ampliamente conocido por los usuarios de impresoras 3D que las piezas impresas en 3D constan de dos componentes distintos y fundamentales: la carcasa (shell) y el relleno (infill).

La adecuada parametrización de estos dos elementos tiene un impacto significativo en la resistencia mecánica, el acabado superficial, el tiempo de impresión y el costo del proyecto. La carcasa (shell) comprende las paredes externas de la pieza, incluyendo tanto las capas en contacto con la base de impresión como las capas superiores que determinan el aspecto final del objeto.

Los programas de laminación, como Cura3D, Simplify3D, entre otros, nos brindan la capacidad de seleccionar la forma y el porcentaje de relleno deseado. A continuación, enumeraremos las configuraciones más relevantes y significativas en este sentido.

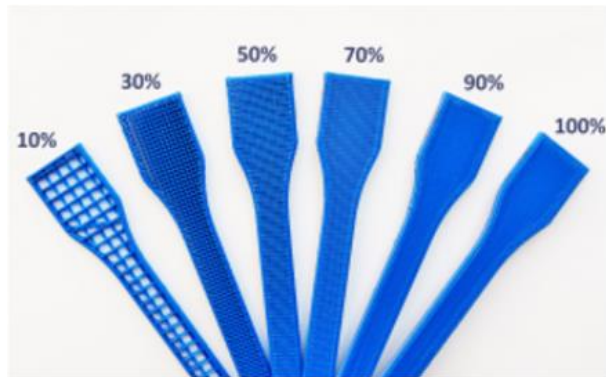
La correcta parametrización del relleno (infill) es de suma importancia, ya que influye en varias características clave de la pieza impresa en 3D. El porcentaje de relleno determina la cantidad de material utilizado en el interior de la pieza y puede afectar tanto la resistencia mecánica como el peso final del objeto. Un relleno denso y compacto proporciona una mayor resistencia, pero también puede aumentar el tiempo de impresión y el consumo de material. Por otro lado, un relleno ligero puede reducir el tiempo y el costo de impresión, pero podría comprometer la resistencia y estabilidad de la pieza.

El relleno en una pieza impresa en 3D se refiere a la cantidad de material que ocupa su parte interna. Los programas de laminación comúnmente permiten ajustar el porcentaje de relleno, desde un 0% (pieza hueca) hasta un 100% (pieza completamente sólida). Sin embargo, para determinar el valor ideal de porcentaje de relleno, es necesario considerar la aplicación final de la pieza, manteniendo constantes la altura de capa y el ancho de la carcasa.

En general, el porcentaje de relleno más utilizado y establecido como estándar en muchos programas de laminación es del 20%. Esta configuración proporciona piezas con una resistencia media a alta, un peso reducido y un tiempo de impresión eficiente. Como resultado, se obtienen piezas con una buena relación entre resistencia y costo.[29]

Figura 27

Porcentajes de relleno en la impresión 3D.

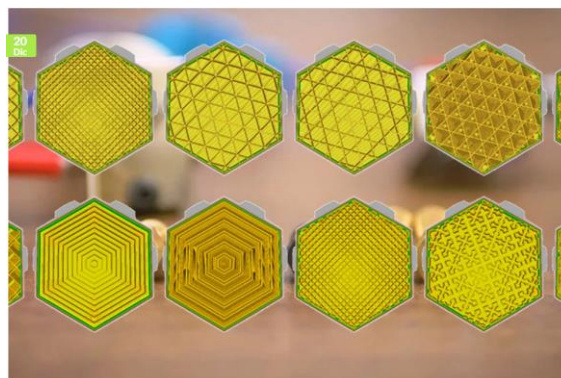


Nota. Adaptado de 3DWorks. [30]

Además del porcentaje de relleno, la forma del mismo también es relevante. Existen diferentes patrones de relleno disponibles, como cuadrículas, hexágonos, líneas rectas, entre otros. Cada patrón ofrece distintas características en términos de resistencia, flexibilidad y eficiencia de impresión. La elección del patrón de relleno adecuado dependerá de las necesidades específicas del proyecto, considerando factores como la resistencia requerida, el peso deseado y el tiempo de impresión aceptable.

Figura 28

Tipos de patrones de relleno.

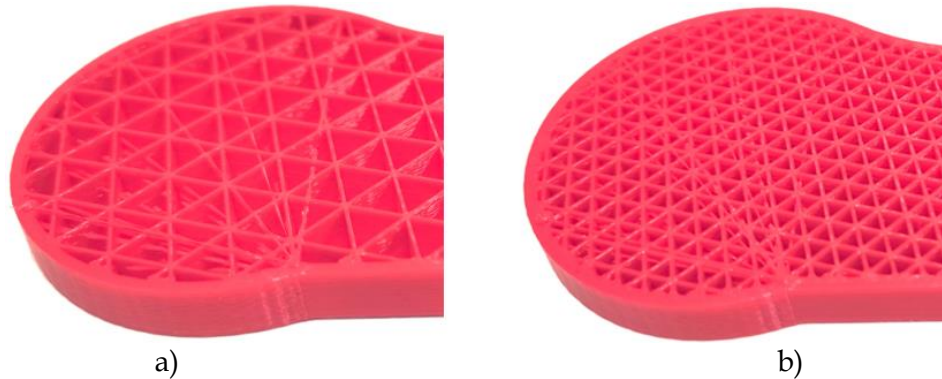


Nota. Adaptado de Impresoras3D.com.[31]

En el presente trabajo se ha realizado la impresión 3D de dos moldes de cada material con un relleno al 20 y 40% respectivamente.

Figura 29

Moldes impresos con un relleno de tipo triangular y con un porcentaje de: a) 20% y b) 40%.

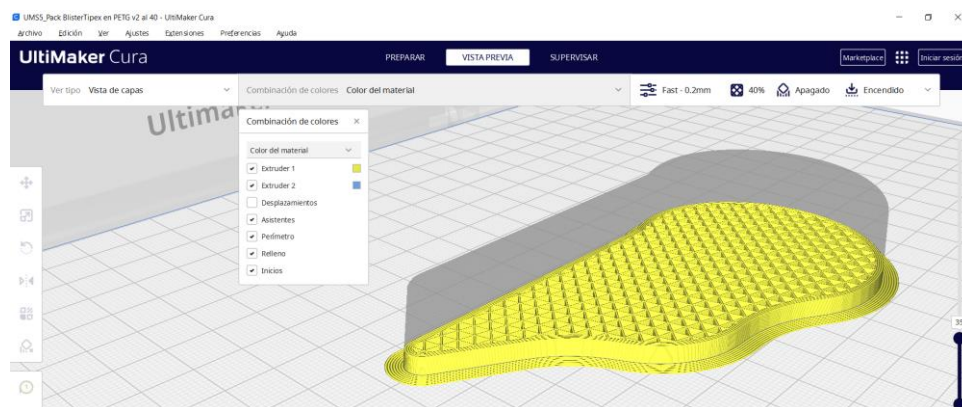


4.2.2.4. Vista Previa.

Una vez establecidos todos los parámetros del modo personalizado, se procede a realizar la segmentación y posteriormente activar la vista previa, en ella se puede visualizar desde la primera capa impresa alternando entre la vista y el grosor de capas conforme se crea conveniente avanzar el proceso de impresión, como se observa en la figura 29.

Figura 30

Herramienta de vista previa, con las opciones: ver tipo, combinación de colores y barra lateral.



4.2.2.5. Supervisar.

Una vez realizada la segmentación aparece en la parte inferior derecha de su pantalla el tiempo y la cantidad de material que se empleará en la impresión del molde. Además, puede seguir el proceso desde la pestaña de supervisar que forma parte de las herramientas del software. En la siguiente tabla se presenta los valores que se ocuparon en la impresión de cada uno de los moldes.

Tabla 6

Tiempo y cantidad de material utilizado en cada impresión de los diferentes moldes.

Material	Tiempo de Impresión	Cantidad de Material
ABS al 20%	4 horas 7 minutos	28,7 g
ABS al 40%	5 horas 20 minutos	40,6 g
PLA al 20%	3 horas 3 minutos	28,3 g
PLA al 40%	4 horas 10 minutos	41,5 g
PETG al 20%	3 horas 48 minutos	30,5 g
PETG al 40%	5 horas 3 minutos	43,8 g

Llegado a este punto se pone a punto la impresora y se procede a enviar el archivo para que se imprima el molde.

Figura 31

Impresora 3D Ultimaker S5 Pro Bundle en pleno funcionamiento.

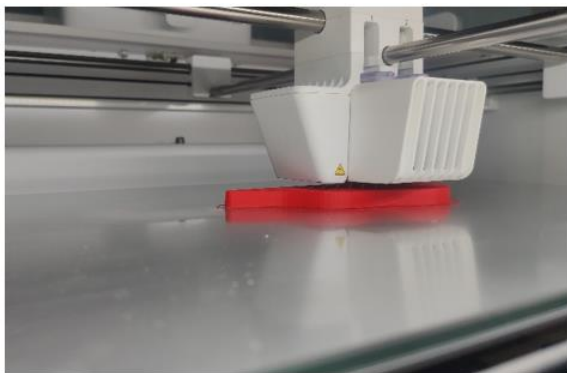
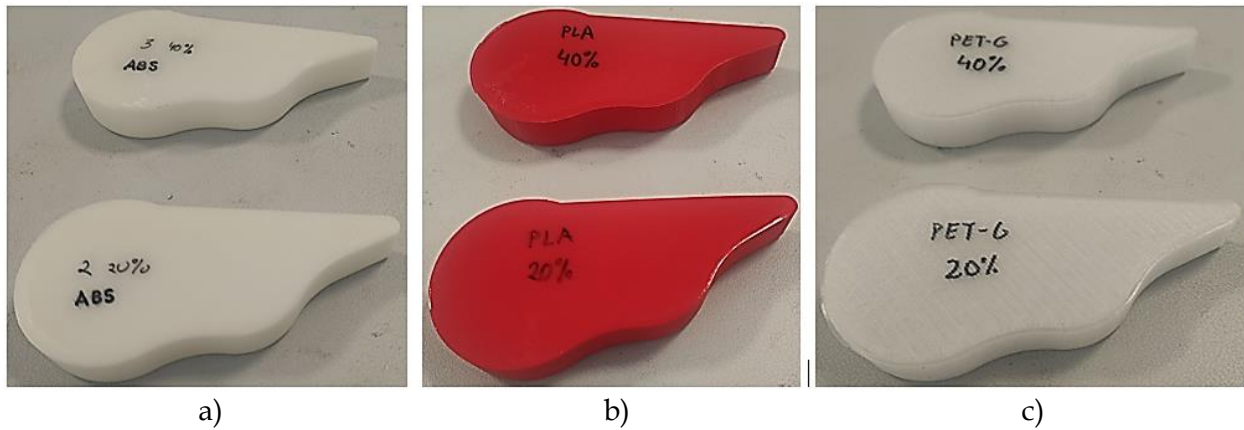


Figura 32

Moldes impresos con un relleno del 20 y 40% e identificados: a) ABS, b) PLA y c) PETG.



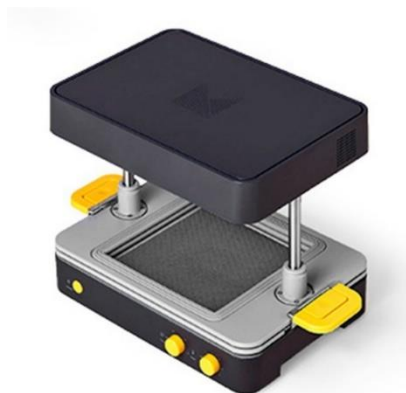
4.2.3. Proceso de termoformado.

Una vez que los moldes han sido fabricados, se procede al proceso de termoformado con el objetivo de examinar y comprender cómo se obtiene el blíster del producto final, como el típex.

El proceso de termoformado se ha llevado a cabo en una FormBox termoformadora 3D de Mayku (Inglaterra), que tiene un volumen de trabajo de 130x150x150 mm y una temperatura de termoformado de 160 °C a 340 °C. A esta máquina compacta de escritorio se le debe de acoplar una aspiradora doméstica para crear el vacío.

Figura 33

Equipo de termoformado FormBox termoformadora 3D de Mayku.

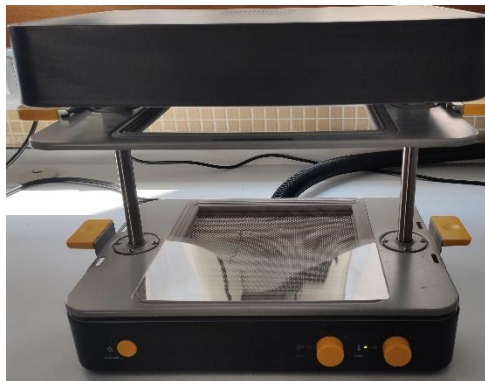


El proceso de fabricación del blíster se realiza siguiendo cuidadosamente los pasos del procedimiento de funcionamiento de la termoformadora 3D FormBox, que se detalla a continuación:

1. Conectar a la toma de corriente la máquina FormBox y la aspiradora.
2. Unir el tubo de la aspiradora a la máquina FormBox.
3. Encender el radiador de cerámica que tiene en su parte superior mediante la rueda de selección, el cual se regula mediante una rueda que va desde la posición de apagado hasta un nivel máximo de 6, hasta que la luz del palpador indicador se encienda sin intermitencias, que le tomara alrededor de 1 minuto 20 segundos.
4. En el presente trabajo se utiliza lámina de termoplástico Cast Sheet, a la que se debe de retirar el film protector para proceder a colocar en la máquina.
5. Se coloca la lámina de termoplástico Cast Sheet en una bandeja adaptada de la máquina.

Figura 34

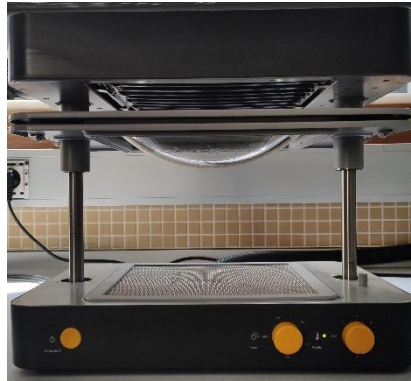
Lámina de plástico colocada en la bandeja adaptada.



6. Se eleva la bandeja hasta que se quede fija en la parte superior de la máquina, bajo el radiador cerámico, de tal forma que la lámina de termoplástico se caliente. Así, esta lámina se vuelve deformable.

Figura 35

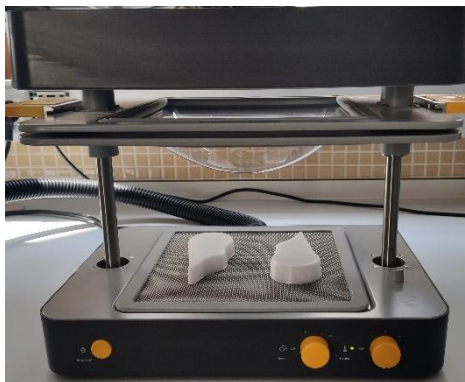
Proceso de calentamiento de la lámina de plástico.



7. Coloque el molde impreso en 3D en la placa de vacío de la máquina y proceda a encender la aspiradora.

Figura 36

Moldes ubicados en la placa de vacío de la máquina.



8. Se procede a bajar la bandeja hasta la base de la máquina, sobre la matriz. En ese momento, Mayku FormBox activa la succión de la aspiradora, que absorbe el aire que se encuentra entre la lámina y la matriz hasta crear el vacío.

Figura 37

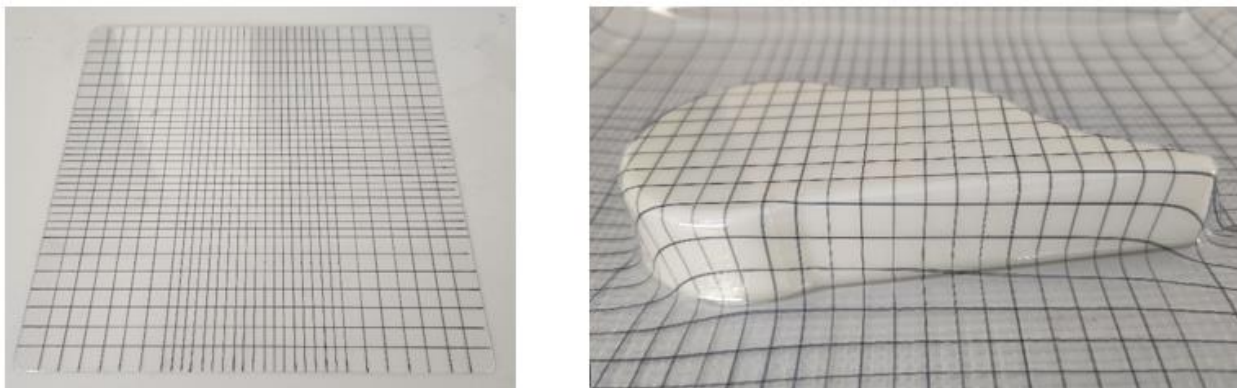
Acople de la lámina de plástico al molde mediante la generación de vacío de la máquina.



9. Para visualizar los espesores finales para la geometría del molde y predecir la distribución del espesor de pared, se prepara la lámina Mayku Cast Sheets de 235 cm x 235 cm y de 0,5 mm de espesor, en ella se traza una malla de elementos cuadrados de 10 mm x 10 mm en los lados y en el centro de 5 mm x 5 mm como indica la figura para luego evaluar la deformación de la lámina luego de ser aplicado el termoformado.

Figura 38

Lámina Cast Sheets: a) mallada en cuadrados, b) aplicado el termoformado.



10. Para revisar la temperatura que llega la superficie del molde se tomó una foto térmica con un grado de emisividad de 0,95 (valor recomendado para superficies de plástico) durante

una hora con intervalos de 15 min ya que la superficie del molde absorbe el calor de la lámina.

Figura 39

Registro de temperatura mediante una cámara térmica.



4.2.3. Análisis mediante elementos finitos (FEM).

Las simulaciones numéricas de termoformado pueden ser analizadas utilizando el módulo Polyflow del software especializado. Este módulo contiene algoritmos capaces de analizar sistemas que involucran deformaciones finitas dinámicas de elementos planos. A continuación, se detallará la simulación del proceso de termoformado mediante el software técnico de Ansys, haciendo uso del módulo Polyflow.

4.2.3.1. Termoformado de un blíster para un típex.

El termoformado de un blíster para el típex es un proceso esencial para la fabricación de envases de plástico que contienen y protegen el producto. Durante este proceso, se utiliza una lámina de plástico que se moldea mediante calor y presión para crear una cavidad específica en la cual se colocará el típex. La tabla a continuación muestra los principales parámetros utilizados en este proceso, los cuales se mencionarán más adelante.

Tabla 7

Principales parámetros empleados en la simulación de termoformado en Ansys.

	Material	PetG
Lámina	Densidad	1,27 g/cm ³
	Espesor inicial	0,5 mm
	Temperatura de proceso	260 °C
	Medida	235 mm x 235 mm
Molde	Tipo de molde	Negativo
	Transferencia de calor	Adiabático
	Velocidad	10 mm/s
Proceso	Presión de vacío	7 MPa
	Tiempo de proceso	2 s

Mediante la simulación con elementos finitos, tendremos la capacidad de evaluar la distribución de espesores y explorar el impacto que la presión de vacío genera en dicha distribución.

4.2.3.2. Geometría.

La geometría del blíster para el típex no es simétrica ya que la mayor parte de sus bordes no son rectos sino curvos, por lo tanto, se procede a crear una geometría rectangular para así tener bordes completamente rectos. Luego a las aristas de la lámina se le asignará un nombre ya que éstas estarán en contacto con las mordazas de sujeción. Se establece una distancia entre la lámina y el molde de 20 mm.

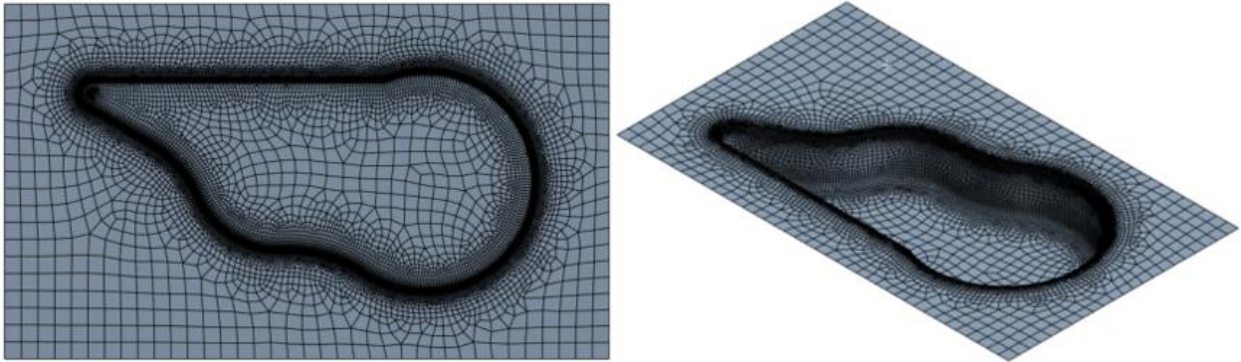
4.2.3.3. Mallado.

Para el molde se utiliza una malla cuadrilátera no estructura con un tamaño de 4 mm generando 20 009 elementos y 19 922 nodos, como se indica en la figura en vista que el programa

ocupara la superficie con esta malla como superficie de contacto entre la lámina y el molde. Motivo por el cual no es necesario refinarla ya que no interfiere en el análisis de deformación.

Figura 40

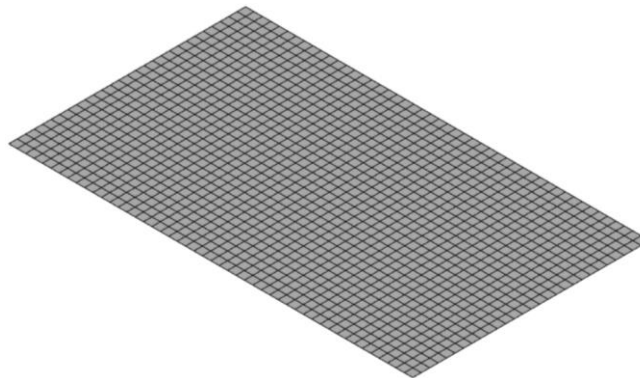
Molde mallado en el programa Ansys.



Para el mallado de la lámina se ocupan elementos de superficie cuadrada con un tamaño de 3 mm generando 1 344 elementos y 1 421 nodos, como se indica en la figura.

Figura 41

Lámina mallada en el programa Ansys.

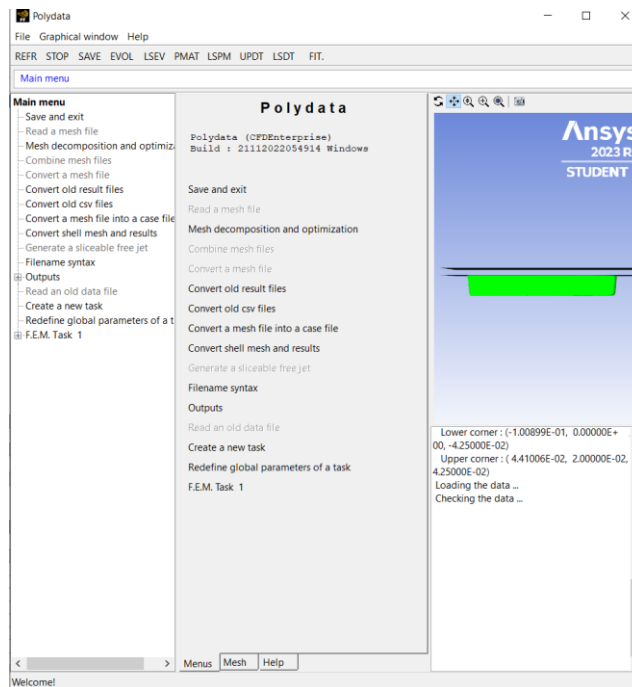


4.2.3.4. Configuración del Polydata.

Se ingresa a esta herramienta del software haciendo doble clic en la pestaña Setup del módulo de Poly – flow, en el polydata se ingresa la configuración establecida siguiendo paso a paso el tutorial facilitado por Ansys y así realizar la simulación de forma correcta.

Figura 42

Herramienta de cálculo Polydate para simular el termoformado de un blíster.

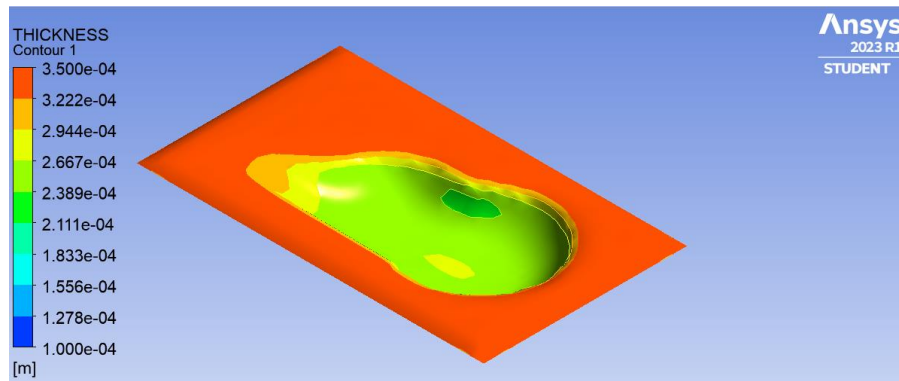


El análisis por elementos finitos será del tipo newtoniano generalizado isotérmico y el análisis será dependiente del tiempo. Es necesario tomar en cuenta la distancia que existe entre el molde y la lámina, para generar el movimiento del molde por una velocidad impuesta, la cual será producto de una función de rampa debido a que se tendrá movimiento solo hasta entrar en contacto con la lámina, para esto es necesario que recorra una distancia de 20 mm y luego se quede estático. La presión de vacío también será producto de una función de rampa, ya que se empieza actuar justo cuando el molde entra en contacto con la lámina, hasta los 2 segundos.

Debido a que los problemas son dependientes del tiempo se revisa la deformación a diferentes tiempos del proceso, para ello se ocupa las diferentes herramientas del módulo para proyectar el molde de análisis y tener una mejor apreciación gráfica del proceso. Se utiliza una paleta de colores con una escala lineal que indicará los niveles de medida en metros, como se puede apreciar en la figura 39.

Figura 43

Resultado obtenido mediante el módulo de Poly-flow de Ansys.



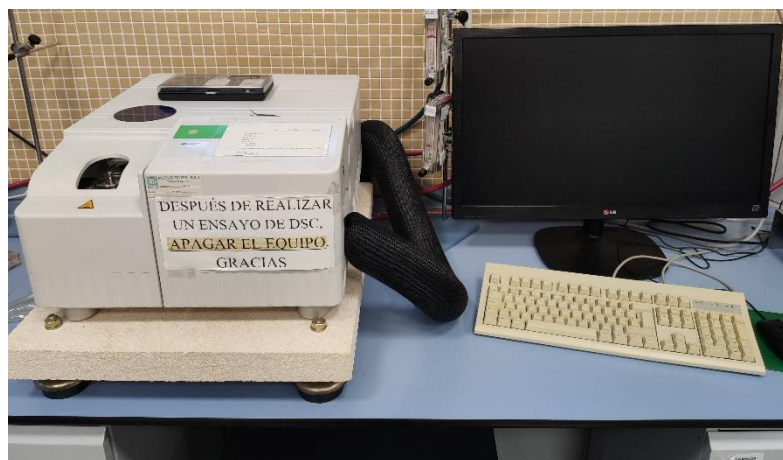
4.3. Técnicas y ensayos de caracterización.

4.3.1. Calorimetría diferencial de barrido (DSC).

Para estudiar las transiciones térmicas más relevantes de un polímero se realiza el ensayo de calorimetría diferencial de barrido (DSC). El equipo DSC empleado ha sido un Mettler - Toledo 821 suministrado por Mettler - Toledo Inc. (Schwerzenbach, Switzerland). Para la realización del ensayo de caracterización, se ha utilizado unas muestras con un peso entre 5 - 10 mg se introdujeron en crisoles de aluminio de 40 mL y se sellaron. Las muestras se sometieron a un ciclo dinámico desde 20 °C hasta 200 °C con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min en atmósfera de nitrógeno, con un caudal de 33 mL/min.

Figura 44

Equipo de calorimetría diferencial de barrido (DSC) del laboratorio.



V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

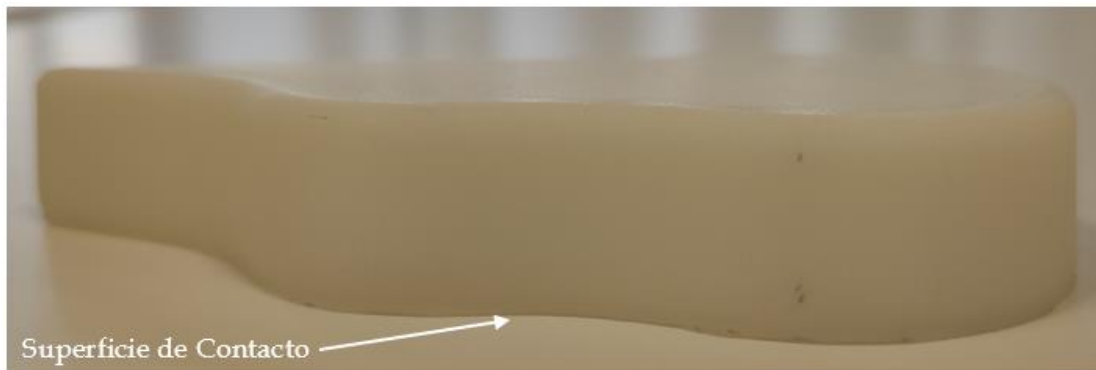
5.1. Impresión 3D de Moldes.

5.1.1. Impresión en material ABS.

La calidad de la impresión 3D del molde utilizando el material ABS resultó de buena calidad y con una superficie lisa. El utilizar una altura de capa pequeña beneficio una mejor resolución ya que la impresión 3D facilita un texturizado muy detallado. Se puede observar una buena precisión dimensional además de evitar la deformación ya que la impresión se llevó a cabo en la base de impresión y sin soportes. Además, se observa que no hace falta un proceso de mecanizado con el fin de mejorar el acabado superficial, y finalmente se puede visualizar que la base del molde es bastante horizontal a la superficie de contacto, como se observa en la figura 44.

Figura 45

Molde impreso en ABS.



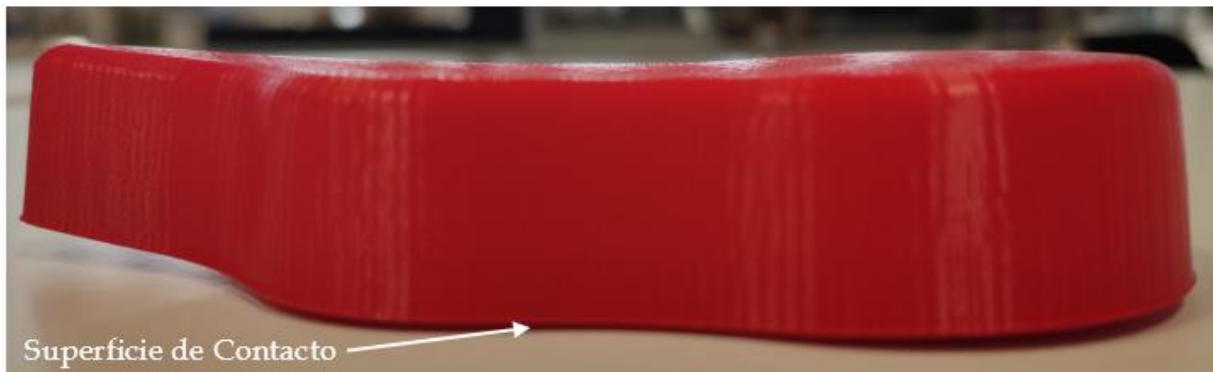
5.1.2. Impresión en material PLA.

El molde impreso en 3D utilizando el material PLA ha demostrado una muy buena calidad, presentando una superficie lisa. Al utilizar una baja altura de capa, se ha logrado una mayor resolución, permitiendo una impresión detallada con texturas precisas. Además, se ha

observado un déficit en la exactitud dimensional que no se ha podido evitar principalmente presenta deformación en la parte cóncava del molde a pesar de imprimir directamente en la base de impresión y sin la necesidad de soportes adicionales. Es importante destacar que no se requirió un proceso de mecanizado para mejorar el acabado superficial del molde. Por último, se ha notado que la base del molde no se encuentra nivelada de manera adecuada con respecto a la superficie de contacto que corresponde a la deformación antes mencionada, como se observa en la figura 45.

Figura 46

Molde impreso en PLA.



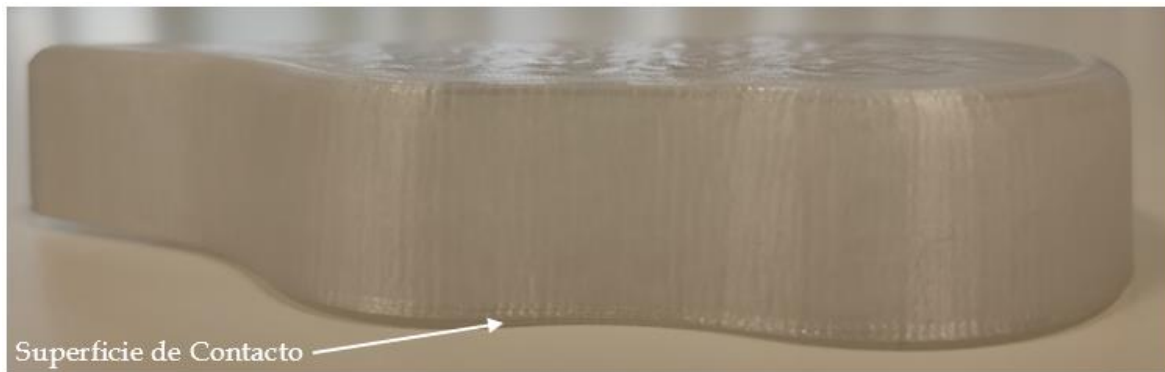
5.1.3. Impresión en material PETG.

La impresión 3D del molde utilizando material PETG resultó en una excelente calidad con una superficie lisa. Al utilizar una altura de capa pequeña, se logró una mayor resolución, permitiendo una textura detallada en la impresión 3D. Se pudo apreciar una precisión dimensional adecuada, y gracias a la impresión directa en la base sin necesidad de soportes, se evitó la deformación. Además, no fue necesario realizar ningún proceso de mecanizado para

mejorar el acabado superficial. Por último, se observó que la base del molde se encontraba nivelada de manera óptima en relación con la superficie de contacto.

Figura 47

Molde impreso en PETG.



5.2. Termoformado de un blíster - típex.

Al terminar el proceso de termoformado se observa que la lámina adquirió bastante bien la forma del molde a excepción de la geometría cóncava del molde en la cual se puede observar un pequeño rechupe. El ángulo de salida de 5° le permite al molde desacoplarse de la lámina fácilmente y al tener una buena calidad de impresión 3D se visualiza una buena calidad en las paredes del blíster ya que no hay rastro alguno de las capas que toman una forma de escalera debido al proceso de impresión. Cabe recalcar que el típex ingresa sin problema alguno en el blíster y que no queda bajo presión.

Este proceso de fabricación del blíster para un típex realizado en la máquina de termoformado FormBox nos permite observar la distribución de espesores finales de pared en el proceso de termoformado de polímeros. De tal manera definir las variables y las propiedades que influyen en el proceso de termoformado.

Figura 48

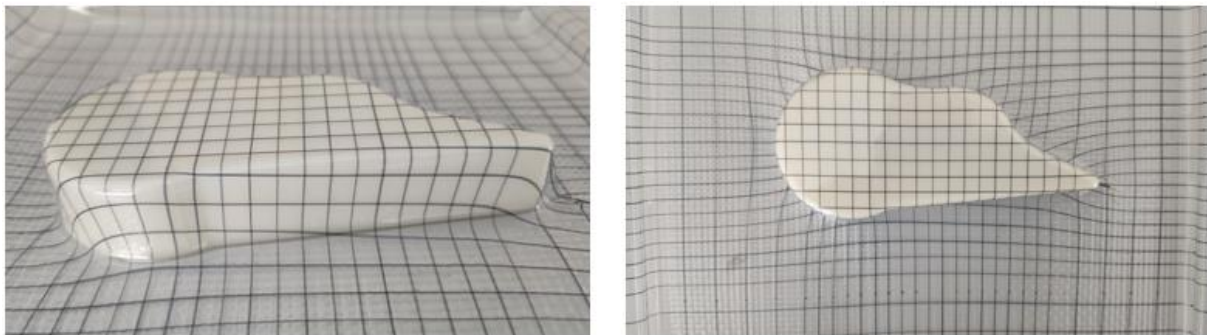
Típex colocado en el blíster después del proceso de termoformado.



Al examinar la malla dibujada en una cara de la lámina, se puede apreciar que, en la parte superior, donde el material entró en contacto inicialmente, no hay deformación con la ventaja que se trata de una superficie horizontal. Esta observación también se confirma al medir las cuadrículas y verificar que no presentan variaciones en sus dimensiones. Sin embargo, en la zona circular de contacto, las cuadrículas muestran un alargamiento de hasta 3,5 mm, tal como se muestra en la figura.

Figura 49

Termoformado del molde con una lámina cuadrículada para observar la deformación.

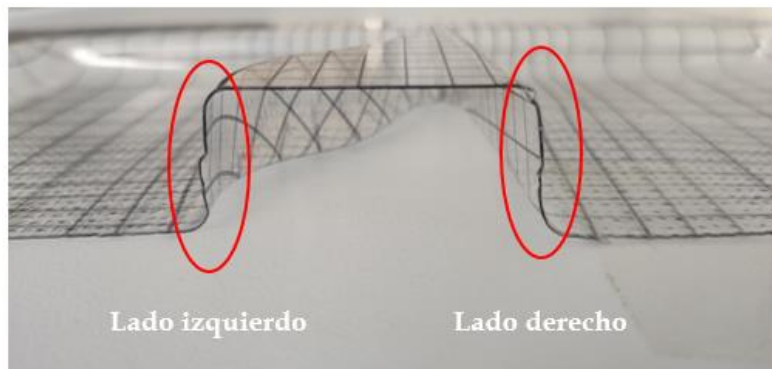


Para tener una mejor visualización se procede a realizar un corte transversal de la lámina termoformada como se observa en la figura 49. Al realizar una inspección visual se observa que, al lado izquierdo, la presión negativa estiro el material hasta la placa de vacío, mientras que en el

lado derecho la presión fue menor, dejando un espacio de 6 mm entre la superficie del blíster y la placa de vacío, por esta razón existe una diferencia de espesores de las zonas que están marcadas en rojo.

Figura 50

Corte transversal para observar la distribución de espesores.



Para nuestro estudio es importante medir la temperatura de los moldes de tal manera que se procedió a registrar la temperatura superficial del molde, y determinar su comportamiento o si sufren algún tipo de degradación. Los datos obtenidos de la temperatura tras el proceso de termoformado son:

Figura 51

Registro de temperatura del molde de ABS.

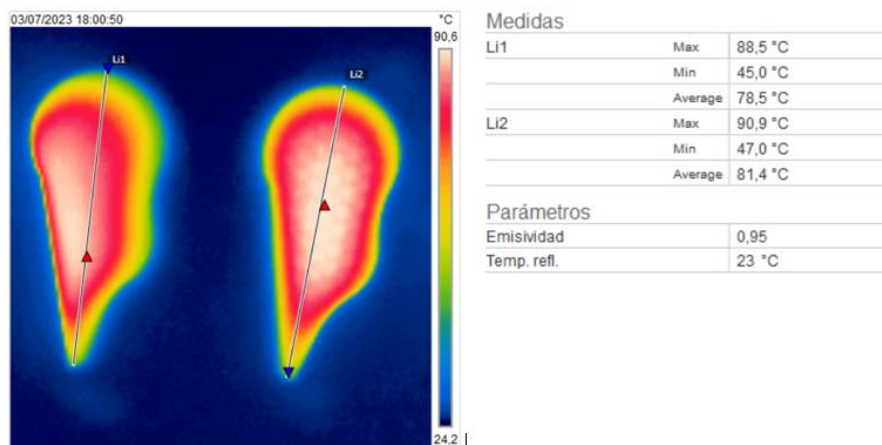


Figura 52

Registro de temperatura del molde PETG.

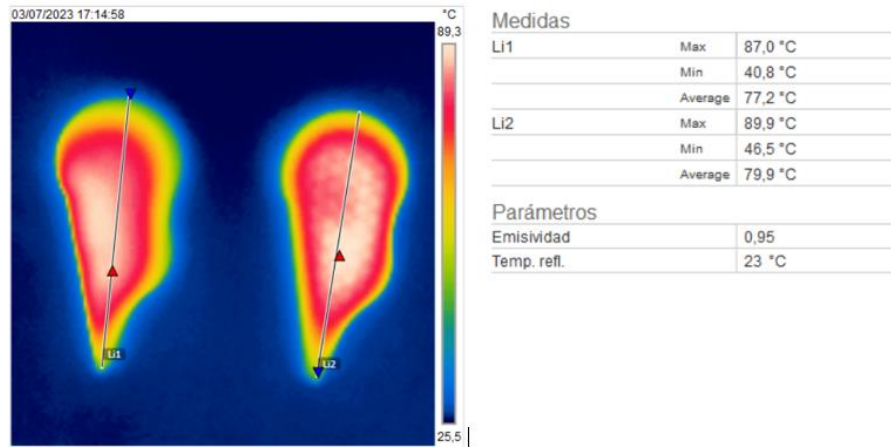
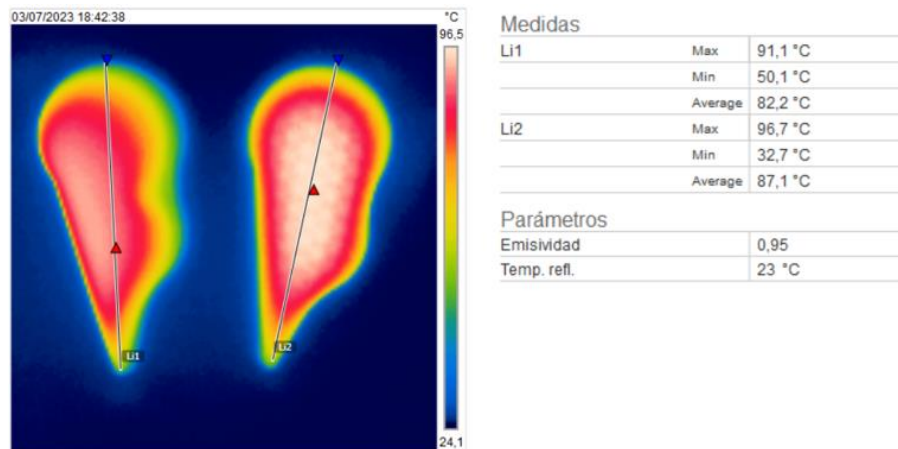


Figura 53

Registro de temperatura del molde PLA.



Lo que nos permite observar que la temperatura de la lámina que se utiliza para hacer el termoformado, se transfiere al molde modificando las propiedades superficiales del molde. Ya que la temperatura es alta así en el molde de ABS y PETG está entre 85°C a 95°C, lo que no sucede para el molde de PLA que está entre 90°C a 97°C, esta temperatura se mantiene a lo largo de la jornada de trabajo ya que los ciclos de trabajo de un molde son muy cortos.

5.3. Análisis mediante elementos finitos (FEM).

Esta simulación gráfica nos permite observar cómo la distribución de espesores varía como resultado de la aplicación de presión de vacío. En este proceso, el molde se colocó en contacto con una lámina y se aplicó una presión constante, lo que permitió que la lámina se acoplara al molde, obteniendo así el blíster para el típex. Mediante el módulo Polyflow de Ansys, se realiza una interpolación lineal de las variables del proceso, como el espesor, la velocidad y la posición, lo que nos brinda la posibilidad de visualizar cómo varía el espesor de la lámina a lo largo del tiempo.

Las figuras han sido ordenadas desde el inicio de la simulación hasta su finalización. Se ha logrado simular el proceso con el lo realizado experimentalmente en el laboratorio.

Figura 54

Evolución de la simulación de termoformado a un timestep de 11.

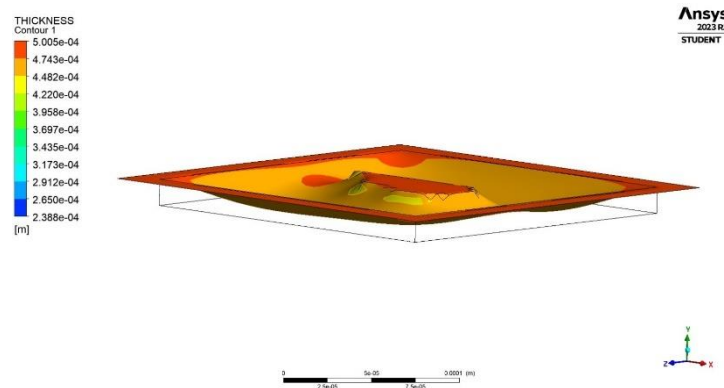


Figura 55

Evolución de la simulación de termoformado a un timestep de 22.

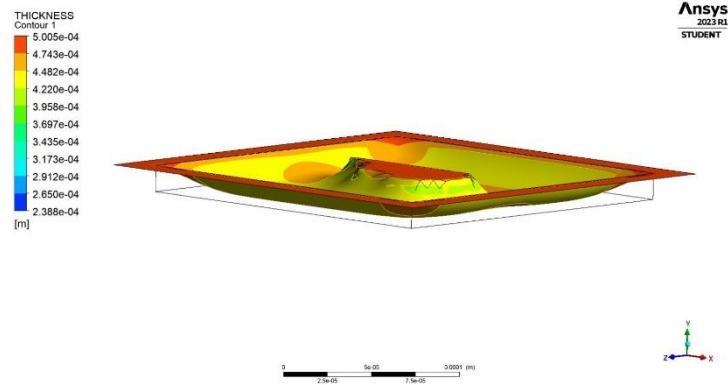


Figura 56

Evolución de la simulación de termoformado a un timestep de 33.

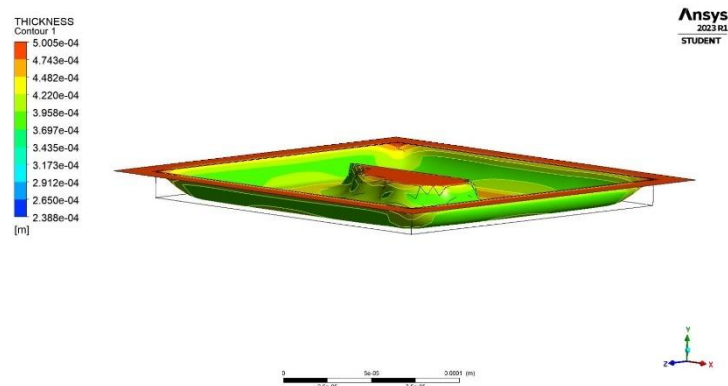


Figura 57

Evolución de la simulación de termoformado a un timestep de 44.

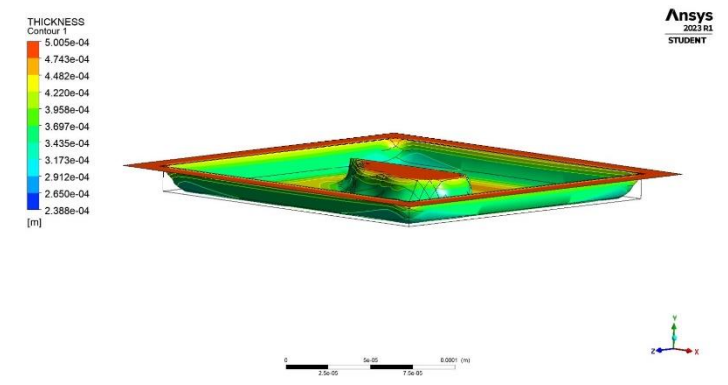
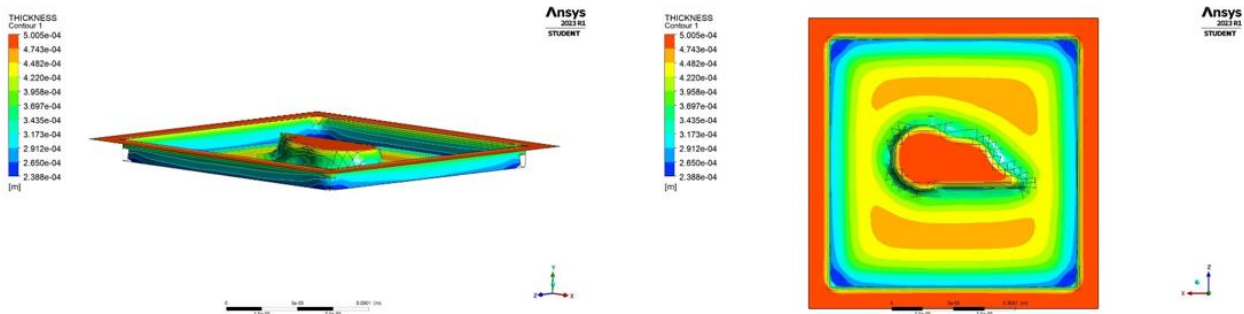


Figura 58*Simulación finalizada.*

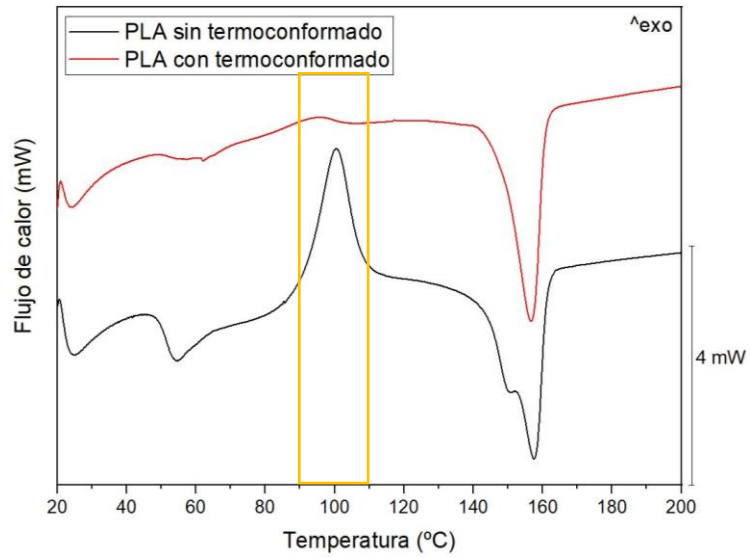
5.4. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).

El análisis de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) proporciona información altamente relevante al medir los cambios de entalpía que experimentan los materiales durante las variaciones en su estructura debido al aumento de la movilidad de sus cadenas poliméricas causado por la temperatura. En la figura 55 se muestra el termograma resultante de un ciclo, abarcando un rango de temperatura de 20°C a 200°C.

Como se puede observar en la gráfica, el PLA sin ingresar al proceso de termoformado presenta un pico exotérmico, que es indicativo de una recristalización, ya que se trata de un proceso que libera energía al producirse y un pico endotérmico característico del proceso de fusión de material que necesita un aporte de energía para producirse. En este caso las temperaturas de fusión en los dos casos no varían en exceso, estando comprendidas alrededor de los 157°C.

Figura 59

Gráfico DSC comparativo realizado al molde impreso en PLA.



VI. CONCLUSIONES

6.1. Conclusión general.

Los criterios de optimización desarrollados finalizado el presente trabajo de investigación son:

- Reducción del peso del molde mediante la impresión 3D ya que permite la creación de estructuras internas y optimizadas, lo que puede reducir el peso del molde sin comprometer su resistencia y funcionalidad. Esto puede conducir a una mayor eficiencia y menor consumo de materiales.
- Tiempo de producción de los moldes se reducen con el uso de la impresión 3D ya que acelera el proceso de fabricación de los moldes al eliminar la necesidad de mecanizado o ensamblaje complejo.
- Posibilidad de diseño y optimización de la funcionalidad del molde ya que la impresión 3D permite la creación de piezas con geometrías complejas.

6.2. Conclusiones particulares.

6.2.1. Con respecto a la Impresión 3D de moldes.

Es posible utilizar moldes con tecnología FDM para la producción en bajo volumen o en pruebas de una herramienta de nuevo diseño. Como se demostró en el caso analizado en este trabajo, este tipo de molde puede funcionar bien y se puede obtener un producto termoformado de buena calidad mientras que el tiempo de fabricación del molde suele ser corto.

6.2.2. Con respecto al termoformado de un blíster - típex.

Durante el proceso de termoformado, es necesario controlar adecuadamente la temperatura y el tiempo de calentamiento de la lámina de plástico. Esto garantizará una formación precisa y consistente de las cavidades, evitando deformaciones o irregularidades en el blíster. Además, se debe prestar atención a la presión de vacío ya que contribuye a una buena distribución de espesores.

6.2.3. Con respecto al análisis mediante elementos finitos (FEM).

La simulación por computadora puede ser una herramienta muy útil para predecir la calidad de las piezas termoformadas. El enfoque de utilizar la simulación en el primer paso del diseño puede ayudar a evitar áreas excesivamente delgadas del producto al rediseñar el molde antes de su fabricación.

6.2.4. Con respecto a la calorimetría diferencial de barrido (DSC).

Durante el proceso de termoformado, se han alcanzado altas temperaturas que han dado lugar a la cristalización en frío del material. Esta cristalización ha ocasionado cambios en las dimensiones del material, ya que al cristalizarse tiende a compactarse y ocupar menos volumen. Se ha observado que la cristalización en frío comienza aproximadamente a partir de los 90°C, lo cual es perceptible en las primeras etapas del proceso.

6.3. Líneas futuras.

Este trabajo de investigación establece una sólida base para explorar otros aspectos de los modelos basados en datos. El enfoque presentado en el desarrollo de criterios de optimización de diseño de moldes mediante impresión 3D ofrece una oportunidad invaluable para aprovechar técnicas avanzadas y algoritmos en la implementación de la visión artificial. La visión artificial se utiliza para inspeccionar y evaluar la calidad de los moldes impresos en 3D, lo cual es fundamental para garantizar resultados óptimos en el proceso de moldeo.

La implementación de la visión artificial en la inspección de los moldes impresos en 3D permite una evaluación precisa y eficiente de la calidad. Mediante el uso de algoritmos y técnicas avanzadas, los sistemas de visión artificial pueden identificar defectos, variaciones y errores de fabricación en los moldes. Esto no solo contribuye a la mejora de la calidad del molde, sino que también ayuda a prevenir problemas durante el proceso de moldeo y asegura la consistencia y conformidad con los estándares requeridos.

VII. REFERENCIAS

REFERENCIAS.

- [1] D. Kazmer, *Injection mold design engineering*. Munich: Hanser/Gardner, 2007.
- [2] A. K. Pal, A. K. Mohanty, y M. Misra, «Additive manufacturing technology of polymeric materials for customized products: recent developments and future prospective», 2021, doi: 10.1039/d1ra04060j.
- [3] «¿Termoformado o inyección? Ventajas en la industria». <https://www.plastico.com/es/noticias/inyeccion-o-termoformado> (accedido 13 de mayo de 2023).
- [4] K. A. Athanasiou, «Thermoforming Process Overview», pp. 17-26, 2009, doi: 10.1007/978-3-031-02392-7_3.
- [5] P. W. Klein, «Fundamentals of Plastics Thermoforming», 2009, doi: 10.1007/978-3-031-02392-7.
- [6] K. A. Athanasiou, «The Forming Process», pp. 27-34, 2009, doi: 10.1007/978-3-031-02392-7_4.
- [7] K. A. Athanasiou, «Introduction», pp. 1-7, 2009, doi: 10.1007/978-3-031-02392-7_1.
- [8] K. A. Athanasiou, «Mold /Tool Design», pp. 53-59, 2009, doi: 10.1007/978-3-031-02392-7_6.
- [9] K. A. Athanasiou, «Part Design», pp. 35-51, 2009, doi: 10.1007/978-3-031-02392-7_5.
- [10] «Moldeo por inyección con moldes impresos en 3D: Un estudio técnico | Formlabs». <https://3d.formlabs.com/libro-blanco-moldeo-por-inyeccion-con-moldes-impresos-en-3d-un-estudio-tecnico-de-un-lider-en-el-sector-de-los-plasticos-y-los-compuestos/> (accedido 24 de mayo de 2023).
- [11] J. Byskov y N. Vedel-Smith, «Additive Manufacturing», *The Future of Smart Production for SMEs*, pp. 357-362, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-15428-7_32.
- [12] M. N. O. Sadiku, A. J. Ajayi-Majebi, y P. O. Adebo, «Additive Manufacturing», *Emerging Technologies in Manufacturing*, pp. 109-121, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-23156-8_8.

- [13] M. Berchon, *La impresión 3D : guía definitiva para makers, diseñadores, estudiantes, profesionales, artistas y manitas en general*. Barcelona: Gustavo Gili, 2016.
- [14] K. V Wong y A. Hernandez, «A Review of Additive Manufacturing», *International Scholarly Research Network ISRN Mechanical Engineering*, vol. 2012, 2012, doi: 10.5402/2012/208760.
- [15] «Tecnología de los Plásticos: febrero 2013». <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/02/> (accedido 18 de junio de 2023).
- [16] G. Kuehne, «THERMOFORMING.», *Kunststoffe - German Plastics*, vol. 71, n.º 10, pp. 28-29, 1981, doi: 10.3139/9783446437197.010.
- [17] Sven. Engelmann, *Advanced thermoforming methods, machines and materials, applications and automation*. en Wiley series on polymer engineering and technology. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2012.
- [18] A. Gaspar-Cunha, J. A. Covas, y J. Sikora, «Optimization of Polymer Processing: A Review (Part I—Extrusion)», *Materials*, vol. 15, n.º 1, ene. 2022, doi: 10.3390/MA15010384.
- [19] A. Gaspar-Cunha, J. A. Covas, y J. Sikora, «Optimization of Polymer Processing: A Review (Part II-Molding Technologies)», *Materials*, vol. 15, n.º 3, feb. 2022, doi: 10.3390/MA15031138.
- [20] L. Rodríguez-Parada, P. F. Mayuet, y A. J. Gámez, «Industrial product design: Study of FDM technology for the manufacture of thermoformed prototypes», *Procedia Manuf*, vol. 41, pp. 587-593, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.09.046.
- [21] «Inicio | Programa De Las Naciones Unidas Para El Desarrollo». <https://www.undp.org/es> (accedido 7 de julio de 2023).
- [22] H. Almeida, E. Pei, y L. Vitorino, «Sustainability for 3D Printing», pp. 1-13, 2022, doi: 10.1007/978-3-030-75235-4_1.
- [23] M. Elgegren *et al.*, «Reciclaje químico de desechos plásticos», *Revista de la Sociedad Química del Perú*, vol. 78, n.º 2, pp. 105-119, 2012, Accedido: 14 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en:

- http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2012000200005&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [24] «MCA180100AA | Mayku Cast Sheets 30 pack | RS». <https://es.rs-online.com/web/p/termoformadoras/1785379> (accedido 18 de junio de 2023).
- [25] «Filamentos impresora 3D Filamentos Pla ABS Hips». <https://www.smartmaterials3d.com/> (accedido 16 de junio de 2023).
- [26] «BCN3D Filaments: Technical and Safety Datasheets». <https://www.bcn3d.com/technical-safety-datasheets/> (accedido 16 de junio de 2023).
- [27] «¿Qué es el PETG?» https://filament2print.com/es/blog/49_petg.html (accedido 17 de junio de 2023).
- [28] «Ultimaker S5 PRO Bundle - impresoras3d.com». <https://www.impresoras3d.com/producto/ultimaker-s5-pro-bundle/> (accedido 25 de junio de 2023).
- [29] «La importancia del tipo de relleno en impresión 3D». https://filament2print.com/es/blog/71_importancia-relleno-impresion-3d.html (accedido 26 de junio de 2023).
- [30] «Servicio impresión 3D Chile | Piezas Plastico, Maquetas y Trofeos | 3DWorks». <https://www.3dworks.cl/> (accedido 26 de junio de 2023).
- [31] «▷ Impresoras3D.com - La mejor tienda de impresoras 3D en España». <https://www.impresoras3d.com/> (accedido 25 de junio de 2023).