



MÁSTER UNIVERSITARIO INGENIERÍA EN INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MOLDE PARA TERMOFORMADO. COMPARATIVA ENTRE MOLDE MECANIZADO EN ALUMINIO Y MOLDE TEMOPLÁSTICO IMPRESO EN 3D

Autor: María Rodríguez-Rovira Giménez-Salinas

Director: Javier Manini Gumz

Co-Director: Dr. Mariano Jiménez Calzado

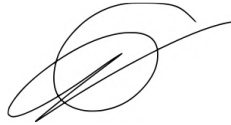
Madrid

Julio de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MOLDE PARA TERMOFORMADO. COMPARATIVA
ENTRE MOLDE MECANIZADO EN ALUMINIO Y MOLDE TEMOPLÁSTICO IMPRESO
EN 3D”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: María Rodríguez-Rovira Giménez-Salinas Fecha 15 / 07 /2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Javier Manini Gumz Fecha: 15 / 07 /2025

EL CODIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado Fecha: 15 / 07 /2025

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MOLDE PARA TERMOFORMADO. COMPARATIVA ENTRE MOLDE MECANIZADO EN ALUMINIO Y MOLDE TEMOPLÁSTICO IMPRESO EN 3D

Autor: Rodríguez-Rovira Giménez-Salinas, María.

Director: Manini Gumz, Javier.

Co-Director: Jiménez Calzado, Mariano

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia de Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Este trabajo presenta un estudio comparativo entre el mecanizado CNC y tres tecnologías de impresión 3D (FDM, SLA y MJF) para la fabricación de moldes de termoformado. A partir del diseño de una pieza tipo blíster, se analizaron la calidad superficial, la durabilidad, el coste y el tiempo de fabricación de los moldes. Los ensayos prácticos permitieron identificar ventajas, limitaciones y contextos óptimos de uso para cada tecnología. El estudio concluye con recomendaciones técnicas y abre líneas futuras de mejora en diseño de moldes y procesos de fabricación.

Palabras clave: Termoformado, moldes de fabricación, fabricación aditiva, impresión 3D, mecanizado CNC, SLA, MJF, FDM.

Introducción

El termoformado es una tecnología de fabricación ampliamente utilizada en sectores como el empaquetado, la automoción, la electrónica o la cosmética, debido a su bajo coste, rapidez y capacidad para producir piezas ligeras y funcionales. Según Allied Market Research, el mercado global de plásticos termoformados fue valorado en 40,5 mil millones de dólares en 2021, con una previsión de crecimiento de hasta 67,1 mil millones en 2031¹. Este crecimiento sostenido pone de manifiesto la demanda continua de métodos eficientes de fabricación de moldes que se adapten a distintas necesidades productivas.

¹ Allied Market Research, «Thermoformed Plastics Market by Product Type, Thermoforming Type and End-Use Industry: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2031,» [En línea]. Accesible en: <https://www.alliedmarketresearch.com/thermoformed-plastics-market>.

Uno de los elementos clave en el proceso de termoformado es el molde, cuya calidad y diseño impactan directamente en el resultado final del producto. Tradicionalmente, estos moldes se fabrican mediante mecanizado CNC, una técnica precisa, aunque con altos costes y largos tiempos de ingeniería y producción, lo que la hace poco eficiente para series cortas. En contraposición, la fabricación aditiva (impresión 3D) ha surgido como alternativa ágil, versátil y accesible para prototipado y producción limitada, aunque presenta dudas sobre su durabilidad, resistencia térmica y calidad superficial.

Este trabajo plantea un análisis comparativo técnico y económico entre ambos enfoques de fabricación: el mecanizado CNC y la fabricación aditiva mediante FDM, SLA y MJF. Para ello, se ha diseñado una pieza tipo blíster (véase Ilustración 1) que incorpora zonas geométricas representativas (cavidades cilíndricas y prismáticas). Este diseño permite evaluar de forma realista el rendimiento de cada tecnología en condiciones industriales simuladas.

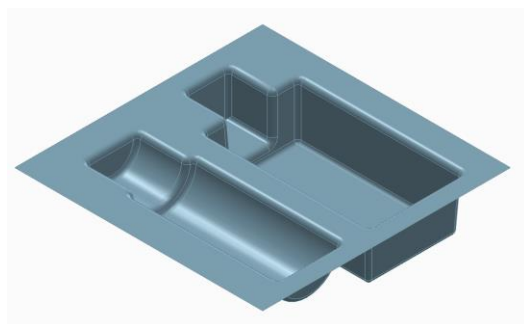


Ilustración 1: Pieza de estudio (Elaboración propia)

El objetivo principal del proyecto es ofrecer criterios técnicos objetivos que permitan seleccionar la tecnología de fabricación de moldes más adecuada según el contexto de uso (prototipado, serie corta o producción funcional), considerando factores como el tiempo, el coste, la durabilidad, la calidad superficial y el consumo de material.

Metodología

El presente proyecto sigue una metodología experimental, iterativa y comparativa. El objetivo es analizar el rendimiento de distintas tecnologías de fabricación de moldes en contextos industriales reales. El proceso se ha estructurado en siete etapas secuenciales, resumidas en la Ilustración 2.

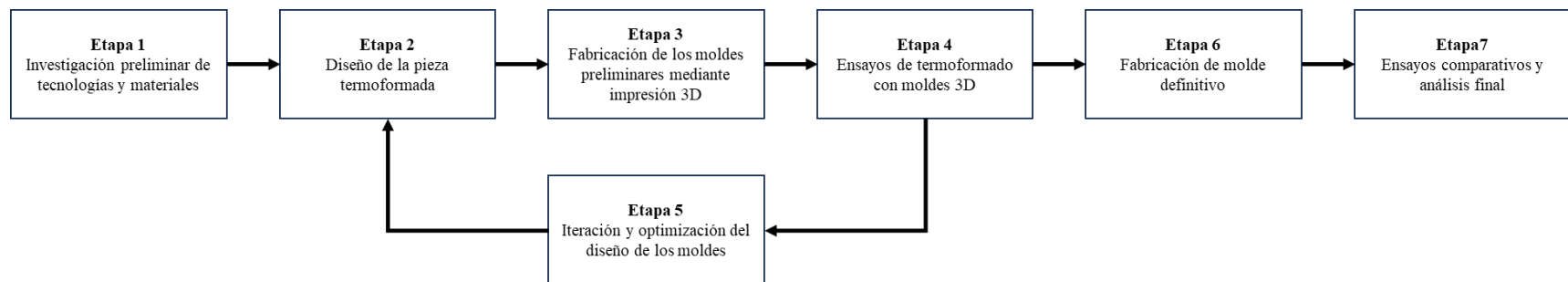


Ilustración 2: Etapas del proyecto (Elaboración propia)

Etapla 1: Investigación preliminar

Se realizó una revisión técnica de las tecnologías de fabricación disponibles en el entorno del laboratorio (FDM, SLA, MJF y mecanizado CNC), así como de los procesos y parámetros del termoformado. El objetivo fue identificar los materiales compatibles, las propiedades clave y las limitaciones técnicas de cada alternativa.

Etapla 2: Diseño de la pieza termoformada y moldes

Se diseñó una pieza tipo blíster con cavidades prismáticas y cilíndricas para inducir defectos comunes. A partir de este diseño se generaron modelos CAD de molde macho y hembra.

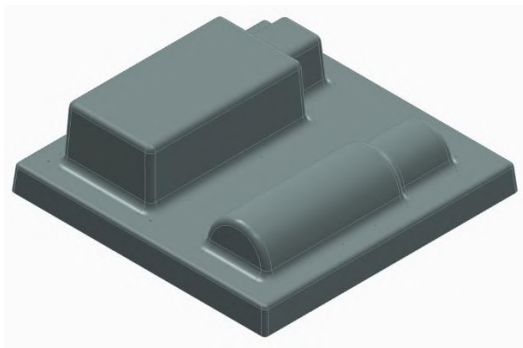


Ilustración 3: Molde macho (Elaboración propia)

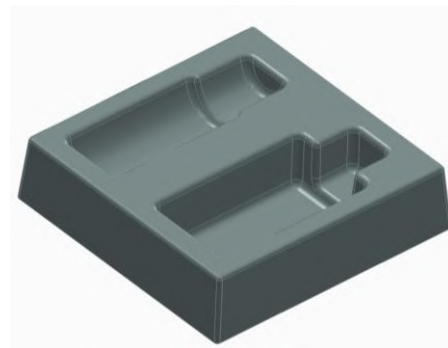


Ilustración 4: Molde hembra (Elaboración propia)

Etapla 3: Fabricación preliminar de moldes

Se imprimieron versiones iniciales de los moldes mediante impresión 3D (FDM, SLA, MJF), lo que permitió validar geometrías, detectar errores y anticipar limitaciones antes de pasar a la fabricación definitiva.

Etapla 4: Ensayos de termoformado con los moldes preliminares

Los moldes impresos se probaron con láminas de distintos materiales (PETG, PS, HIPS...) y espesores, evaluando la calidad superficial, los defectos (*webbing*, afinamientos, marcas) y el comportamiento térmico.

Etapas 5: Optimización del diseño

A partir de los resultados de los ensayos previos, se realizaron los siguientes ajustes al diseño del molde: modificación de radios, mejora del ángulo de desmoldeo, redondeo de aristas críticas y reposicionamiento de agujeros de vacío.

Etapas 6: Fabricación definitiva de los moldes

Se procedió a fabricar la versión final del molde en dos configuraciones:

- **Molde macho:** fabricado mediante mecanizado CNC en aluminio 5075 utilizando el centro Hartford HV-35.



Ilustración 5: Molde macho en aluminio (Elaboración propia)

- **Molde hembra y molde macho adicional:** fabricado mediante impresión 3D por tecnología SLA con resina Clear V4.



Ilustración 6: Molde macho (izquierda) y hembra (derecha) en SLA (Elaboración propia)

Etapas 7: Ensayos comparativos y análisis final

Los moldes definitivos fueron sometidos a ensayos de termoformado controlados, evaluando la calidad superficial de las piezas obtenidas, la durabilidad de los moldes tras varios ciclos, y la precisión dimensional. Paralelamente, se recopilaban datos de tiempo, consumo de material y coste para cada tecnología, permitiendo realizar un análisis técnico-económico comparativo completo.

A lo largo del desarrollo del proyecto, se mantuvo un registro sistemático de cada fase, documentando tanto los parámetros de fabricación como los tratamientos aplicados en cada caso (lijado, granallado, curado UV, limpieza química, entre otros). Esta trazabilidad no solo permitió interpretar mejor los resultados, sino que aportó una visión completa del impacto de los post-procesados en el rendimiento final de los moldes.

Resultados

Los resultados obtenidos permiten evaluar de forma comparativa el comportamiento técnico y económico de los moldes fabricados mediante mecanizado CNC e impresión 3D (SLA, FDM y MJF). Estos resultados incluyen los ensayos realizados tanto con los moldes preliminares, empleados para validar diseños y detectar errores iniciales; como con los moldes definitivos, optimizados tras sucesivas iteraciones.

A continuación, se resumen los hallazgos más relevantes respecto a la calidad de superficial obtenida con los distintos moldes, la durabilidad de los moldes tras varios ciclos de termoformado y el análisis técnico-económico. Respecto a este último, se han incluido parámetros como: el tiempo de fabricación, el consumo de material y el coste de fabricación; con el fin de comparar las diferencias observadas entre las tecnologías.

Calidad superficial de los moldes fabricados

Al evaluar la calidad superficial del producto final se ve determinado por el acabado superficial de los moldes, cuya calidad estética y funcional son claves. Por ello, la evaluación de la calidad superficial se centró en la textura superficial resultante, la fidelidad geométrica y los efectos del post-procesado en cada caso de estudio.

FDM: Los moldes fabricados mediante FDM presentan una superficie con alta rugosidad visible, derivada de la naturaleza de la impresión por capas. En particular, se aprecia un marcado efecto escalera. Las líneas de capa tienen continuidad y relieve perceptible al tacto, comprometiendo la estética y la fidelidad geométrica de la superficie resultante. Este acabado rugoso se transfiere directamente a la pieza termoformada, afectando a su calidad visual. En la Ilustración 7 se observa cómo las líneas de capa generadas en el molde impreso se replican en el blíster, especialmente en las superficies planas y verticales.

Cabe destacar que la orientación del molde durante la impresión influye directamente en la visibilidad del efecto capa. Cambiar la posición puede reducirlo en determinadas zonas, pero también puede generar nuevos problemas en otras áreas o requerir más soportes.



Ilustración 7: Molde fabricado por FDM (izquierda) y blíster obtenido mediante termoformado (derecha) (Elaboración propia)

SLA: Los moldes fabricados mediante impresión SLA presentan una mejora en la calidad superficial, con superficies lisas y bien definidas gracias a la baja altura de capa del proceso. Aun así, también es posible apreciar líneas de capa, aunque mucho menos notorias que en el caso de fabricación con FDM debido a su menor grosor.

Uno de los principales problemas detectados fueron las marcas generadas por los puntos de soporte, incluso después de aplicar lijado superficial. Estas marcas llegaron a transferirse al blíster termoformado, como se observa en la Ilustración 8. Además, se comprobó que el lijado excesivo puede comprometer tanto el acabado como la geometría del molde, por lo que requiere precaución, especialmente en zonas críticas.

En general, SLA permite obtener moldes funcionales con buena estética, siempre que se controlen cuidadosamente la orientación y el post-procesado.



Ilustración 8: Molde fabricado por SLA (centro) y blíster obtenido mediante termoformado (laterales) (Elaboración propia)

MJF: El molde fabricado mediante tecnología MJF presenta una superficie uniforme pero rugosa, con una textura granulosa típica del proceso de sinterizado de polvo. A pesar de haberse realizado un post-procesado mediante chorro abrasivo, no se logró eliminar completamente la textura arenosa. Esta rugosidad se transfiere de forma directa al blíster termoformado, como puede observarse en la Ilustración 9, afectando negativamente su apariencia visual.

Si bien esta textura puede ser aceptable para aplicaciones funcionales o prototipos técnicos, no resulta adecuada para piezas en las que el acabado superficial sea importante y se desee transmitir una imagen de calidad. En comparación con otras tecnologías aditivas como SLA, MJF sacrifica calidad estética a favor de otros aspectos técnicos.

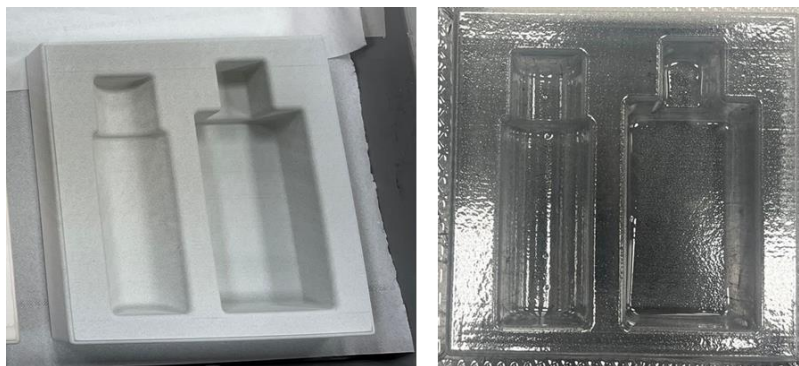


Ilustración 9: Molde fabricado por MJF (izquierda) y blíster obtenido mediante termoformado (derecha) (Elaboración propia)

MCNC: El molde fabricado en aluminio mediante mecanizado CNC presenta una superficie con alta fidelidad geométrica y excelente rigidez, pero con marcas visibles de las trayectorias de herramienta. Estas marcas, aunque no son perceptibles al tacto, sí resultan visibles sobre la superficie del blíster termoformado, como se aprecia en la Ilustración 10.

Este acabado es consecuencia de haber priorizado estrategias de desbaste rápidas para reducir tiempo de ingeniería y de mecanizado. No obstante, debe destacarse que puede mejorarse fácilmente mediante pasadas de acabado con fresas de menor radio o estrategias de pulido, si se desea una estética de mayor calidad.

En un ensayo parcial se aplicó chorreado abrasivo en una esquina del molde, observándose una textura arenosa que afectaba negativamente al acabado final. Por ello, se descartó su uso en el resto del molde.



Ilustración 10: Molde fabricado por MCNC (izquierda) y blíster obtenido mediante termoformado (derecha) (Elaboración propia)

Durabilidad de los moldes:

La durabilidad de los moldes varió significativamente en función de la tecnología y el material empleado, especialmente en lo relativo a la resistencia térmica, estabilidad estructural y comportamiento tras ciclos repetidos de termoformado.

- **FDM (PLA):** Fue la tecnología que presentó peor comportamiento. Tras varios ciclos, el molde mostró signos evidentes de degradación térmica, como brillo superficial, deformaciones localizadas (véase Ilustración 11) Esto se debe a la baja

temperatura de transición vítrea del PLA, lo que lo descarta para aplicaciones funcionales exigentes sin cambiar de material.

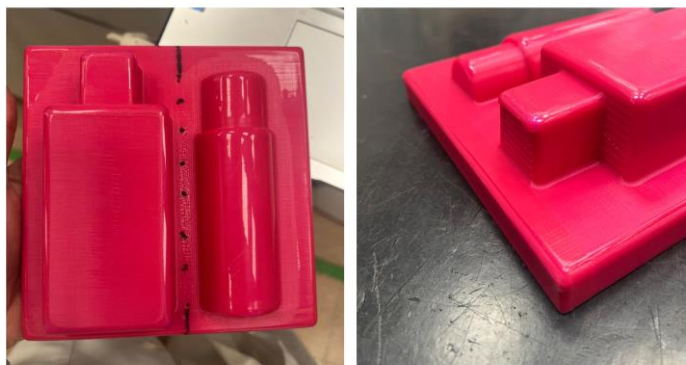


Ilustración 11: Degradación térmica del molde FDM (Elaboración propia)

- **SLA:** Los moldes impresos con resina Clear V4 mantuvieron la geometría en un primer uso, pero al reducirse el grosor de la base en una versión posterior, se observó una deformación térmica progresiva, especialmente en zonas planas, como puede verse en la Ilustración 12. Esto indica una limitación estructural bajo carga térmica repetida. Por el contrario, Rigid 10K mostró mayor estabilidad dimensional y rigidez, sin deformaciones apreciables.

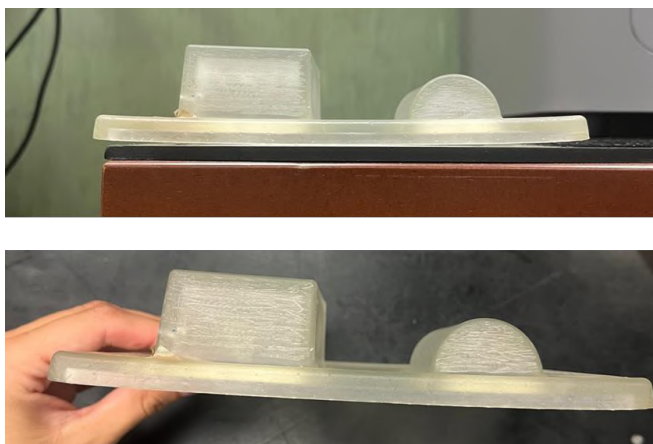


Ilustración 12: Degradación térmica del molde SLA (Elaboración propia)

- **MJF (PA12):** No mostró alteraciones térmicas ni mecánicas tras los ensayos. La pieza se mantuvo estable, con buena rigidez estructural, lo que valida su uso en moldes funcionales para series cortas o medias.

- **MCNC (Aluminio):** Fue la opción más estable y duradera. No presentó daños, deformaciones ni desgaste tras múltiples usos. Es la solución óptima para entornos exigentes o de producción prolongada.

Comparativa de tiempo, material y coste por tecnología

Uno de los objetivos clave del proyecto ha sido identificar la tecnología de fabricación más adecuada para la producción de moldes de termoformado, no solo en términos técnicos, sino también desde una perspectiva económica y operativa. Para ello, se recopilieron los datos de tiempo total de fabricación, el material consumido y el coste unitario asociados a la producción del molde tipo macho con cada una de las tecnologías empleadas en el proyecto: FDM, SLA, MJF y MCNC.

La Tabla 1 resume estos datos, considerando tanto la fase de fabricación como los procesos de preparación y post-procesado, así como el coste total estimado por unidad fabricada.

Tabla 1: Comparativa de tiempo, material y coste por tecnología de fabricación (Elaboración propia)

Técnica de fabricación	FDM	SLA	MJF	CNC
Material	PLA	Clear V4	PA12	Al 5075
Fabricación (h)	23.83	12.98	8.05	3.22
Pre y Post-procesado (h)	0.5	0.75	0.5	3
Tiempo total (h)	24.33	13.73	8.55	6.22
Material consumido	239 g	282.53 ml	180g (190 ml)	3890 g
Cost (€/unit)	31.22	73.63	63.39	315.24

Tiempo: El MCNC presenta el menor tiempo total hasta la obtención del molde (6.22 h), aunque incluye una etapa previa de programación CAM (3 h), lo que lo hace competitivo, pero no tan inmediato como parece a simple vista. La MJF destaca también por su rapidez (8.55 h), superando ampliamente a la tecnología SLA (13.73 h) y FDM (24.33 h).

Material: La tecnología MCNC, al ser sustractiva, implica el mayor consumo de material (3.89 kg de aluminio). Las tecnologías aditivas optimizan mejor este aspecto: FDM destaca por su bajo consumo gracias al uso de estructuras de relleno internas, y MJF logra buenos resultados con solo 180 g de PA12 sintetizado en la pieza final. No obstante, para que el proceso se pueda llevar a cabo, aunque inicialmente se requiere de una mayor cantidad de polvo en la cuba de impresión gran parte de este polvo no sinterizado puede reutilizarse en posteriores impresiones.

Coste: El método más económico es la impresión con FDM (31.22 €), aunque con importantes limitaciones en calidad y durabilidad. Le siguen la tecnología MJF (63.39 €) y la SLA (73.63 €), que ofrecen mejores propiedades funcionales. El mecanizado CNC, aunque es la opción más cara (315.24 €), puede resultar rentable a largo plazo por su elevada durabilidad, lo que mejora su coste por ciclo de uso.

Evaluación comparativa de tecnologías de fabricación

Para facilitar la comparación global entre tecnologías, se construyeron gráficos radar multicriterio que recogen cinco dimensiones clave: el tiempo de fabricación, el coste, el consumo de material, la durabilidad y la calidad superficial. Cada tecnología muestra un perfil distinto, lo que permite visualizar sus fortalezas y limitaciones relativas (véase Ilustración 13).

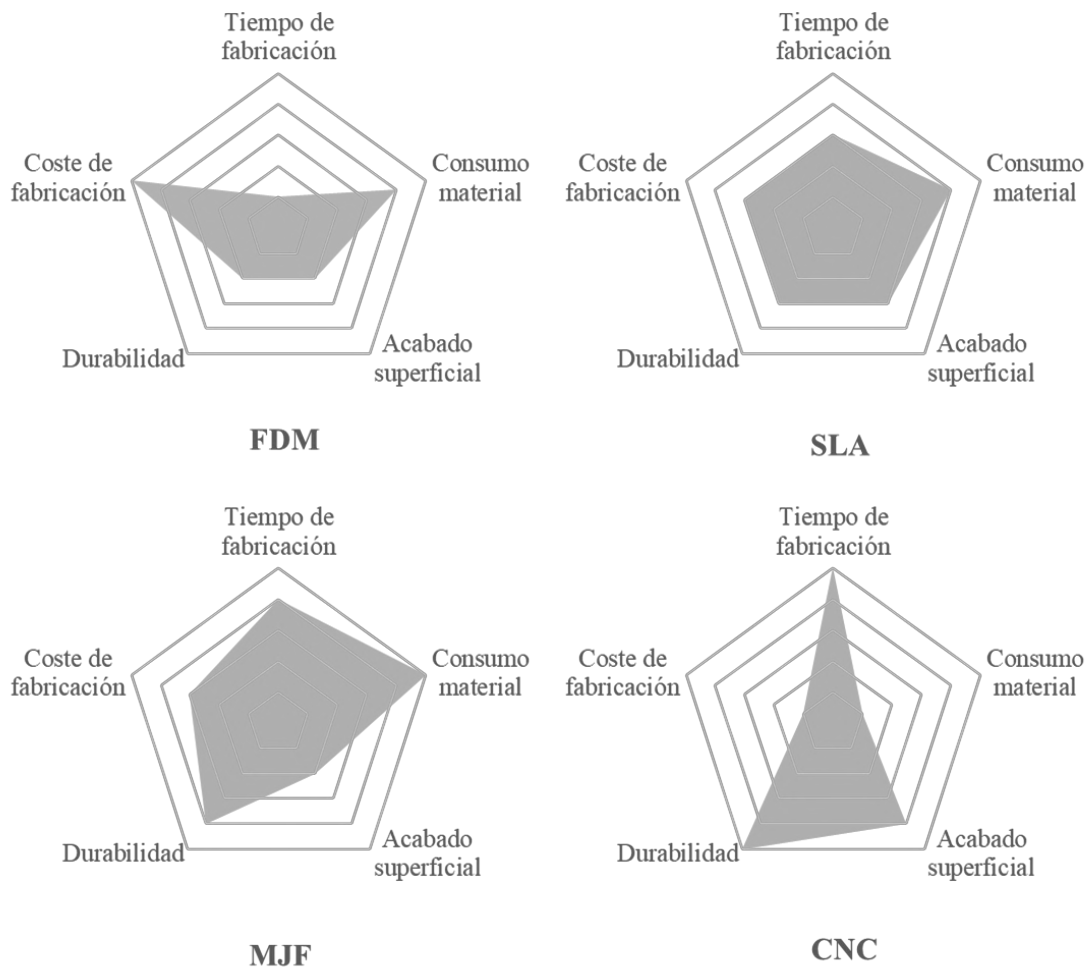


Ilustración 13: Evaluación comparativa de tecnologías de fabricación según criterios clave (Elaboración propia)

- FDM destaca por su bajo coste y bajo consumo de material, pero presenta claras limitaciones en durabilidad y acabado superficial, lo que hace que esta tecnología resulte adecuada únicamente para prototipos preliminares o verificación geométrica.
- SLA ofrece un buen equilibrio entre calidad superficial y tiempos razonables, con una curva de coste moderada. Es especialmente útil en contextos donde se priorice la estética del termoformado, como prototipos funcionales o series cortas en cosmética o electrónica. No obstante, su resistencia térmica debe considerarse cuidadosamente según el diseño.
- MJF se posiciona como una solución intermedia y versátil, con tiempos de producción rápidos, buena estabilidad dimensional y costes contenidos. Aunque su

calidad superficial no es apta para productos cuya estética sea prioritaria, sí ha mostrado un comportamiento robusto en los ensayos realizados, sin deformaciones ni fallos visibles. Esto sugiere su posible aplicación en entornos funcionales o pruebas preindustriales, aunque su durabilidad a largo plazo debería evaluarse en trabajos futuros.

- El mecanizado CNC sobresale en durabilidad, precisión y acabado potencial, pero con un coste muy elevado y gran consumo de material. Se reserva como opción idónea para producción funcional en serie o moldes definitivos, donde la inversión inicial se amortice por el volumen de uso.

Esta comparativa permite establecer criterios de selección tecnológica según el contexto de uso: desde validaciones conceptuales de bajo coste, hasta producciones de moldes robustos para series industriales.

Conclusiones

El presente trabajo ha permitido validar y comparar dos enfoques para la fabricación de moldes destinados a termoformado: el mecanizado CNC en aluminio y la fabricación aditiva mediante tecnologías FDM, SLA y MJF. A partir de una geometría diseñada para exponer zonas críticas del proceso, se han fabricado moldes equivalentes y se ha evaluado su comportamiento térmico, mecánico y funcional.

El proceso de termoformado, pese a su aparente sencillez, es una técnica de fabricación altamente sensible a variables prácticas como el espesor de la lámina, la distribución del vacío, el diseño geométrico o las condiciones ambientales. La experiencia práctica resulta clave para ajustar los parámetros más allá de los valores teóricos recomendados.

En cuanto al diseño geométrico del molde, se ha evidenciado que geometrías curvas favorecen una mejor distribución del material y reducen defectos como el *webbing* o los afinamientos, mientras que las formas prismáticas y zonas con proximidad entre cavidades o cuerpos son más propensas a la aparición de problemas. Factores como los ángulos de desmoldeo, los radios de redondeo y la correcta distribución del vacío son críticos para optimizar el proceso.

A nivel de tecnologías de fabricación de moldes, el mecanizado CNC sigue siendo la solución más robusta y precisa, especialmente adecuada para entornos industriales exigentes o de producción en serie prolongada. No obstante, las tecnologías aditivas se consolidan como alternativas cada vez más competitivas, gracias a su flexibilidad, rapidez y reducción de costes en series cortas. En particular, la tecnología MJF destaca por su estabilidad y precisión, mientras que SLA ofrece un buen acabado superficial con tiempos razonables. Aunque FDM presenta limitaciones en durabilidad y acabado, se mantiene como una opción económica y muy útil para prototipos geométricos. Además, el rápido avance tecnológico en impresión 3D permite anticipar mejoras significativas en prestaciones térmicas, mecánicas y funcionales, ampliando su aplicabilidad en el contexto industrial.

En conjunto, este proyecto ha demostrado la viabilidad técnica y funcional de distintas tecnologías de fabricación de moldes para termoformado, destacando el valor de las tecnologías aditivas como alternativas competitivas y en rápida evolución frente al mecanizado CNC en ciertos contextos. Además de sentar una base comparativa sólida, se han identificado múltiples líneas de trabajo futuras que permitirían profundizar y extender este estudio. Entre ellas se incluyen: la optimización geométrica del molde mediante simulaciones FEM para eliminar defectos como el *webbing*, la evaluación de tratamientos post-procesado (térmicos, químicos o superficiales) que mejoren la durabilidad y el acabado de los moldes impresos, la realización de ensayos cíclicos controlados que permitan establecer curvas de vida útil comparables entre tecnologías y materiales; y el análisis metrológico detallado de la precisión dimensional alcanzable con cada tecnología. Estas líneas abren la puerta a futuros desarrollos orientados a mejorar el rendimiento técnico, económico y funcional del termoformado en aplicaciones industriales reales.

DESIGN AND MANUFACTURING OF A THERMOFORMING MOLD. COMPARISON BETWEEN A MACHINED ALUMINUM MOLD AND A 3D-PRINTED THERMOPLASTIC MOLD

Author: Rodríguez-Rovira Giménez-Salinas, María.

Supervisor: Manini Gumz, Javier.

Co-Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia de Comillas.

ABSTRACT

This project presents a comparative study between CNC machining and three 3D printing technologies (FDM, SLA, and MJF) for the manufacturing of thermoforming molds. Starting from the design of a blister-type part that includes representative geometric features, the molds were analyzed in terms of surface quality, durability, production time, and cost. Practical thermoforming tests allowed for the identification of the strengths, limitations, and optimal application contexts for each manufacturing method. The study concludes with technical recommendations and proposes future research directions to improve mold design and manufacturing processes.

Keywords: Thermoforming, mold manufacturing, additive manufacturing, 3D printing, CNC machining, SLA, MJF, FDM.

Introduction

Thermoforming is a widely used manufacturing technology in sectors such as packaging, automotive, electronics, and cosmetics, due to its low cost, speed, and ability to produce lightweight and functional parts. According to Allied Market Research, the global thermoformed plastics market was valued at \$40.5 billion in 2021, with a projected growth to \$67.1 billion by 2031¹. This sustained growth highlights the ongoing demand for efficient mold production methods that are adaptable to varying manufacturing needs.

¹ Allied Market Research, «Thermoformed Plastics Market by Product Type, Thermoforming Type and End-Use Industry: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2031,» [Online]. Accessed through: <https://www.alliedmarketresearch.com/thermoformed-plastics-market>.

One of the key elements in the thermoforming process is the mold, as its quality and design directly influence the outcome of the final product. Traditionally, these molds are manufactured using CNC machining, a precise technique that involves high costs and long engineering and design times, making it inefficient for short production runs. In contrast, additive manufacturing (3D printing) has emerged as a fast, versatile, and accessible alternative for prototyping and for limited production of final-use parts, although concerns remain regarding its durability, thermal resistance, and surface finish

This work presents a technical and economic comparative analysis of two manufacturing approaches: CNC machining and additive manufacturing using FDM, SLA, and MJF. To that end, a blister-type part was designed (see Image 1), incorporating representative geometric features such as cylindrical and prismatic cavities. This design enables a realistic evaluation of each technology's performance under simulated industrial conditions.

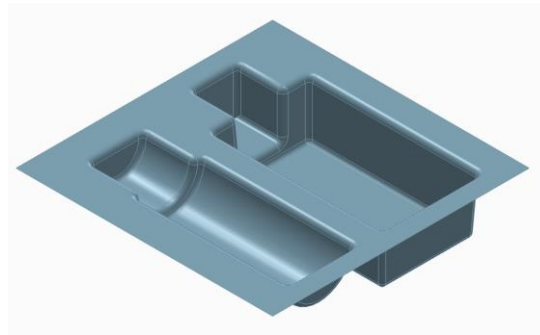


Image 1: Test piece (blister) (Own work)

The main objective of this project is to provide objective technical criteria for selecting the most suitable mold manufacturing technology according to the intended application context (prototyping, short-run, or functional production), considering factors such as time, cost, durability, surface quality, and material consumption.

Methodology

This project follows an experimental, iterative, and comparative methodology. The objective is to analyze the performance of different mold manufacturing technologies under realistic industrial conditions. The process was structured into seven sequential stages, summarized in Image 2.

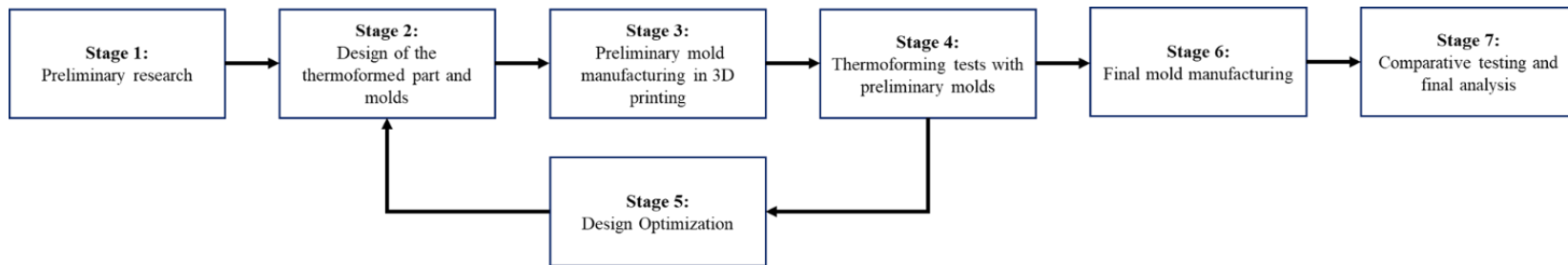


Image 2: Project stages (Own work)

Stage 1: Preliminary research

A technical review was carried out on the manufacturing technologies available in the laboratory environment (FDM, SLA, MJF, and CNC machining), along with an analysis of thermoforming processes and parameters. The goal was to identify compatible materials, key properties, and the technical limitations of each alternative.

Stage 2: Design of the thermoformed part and molds

A blister-type part was designed with prismatic and cylindrical cavities to represent typical geometric features associated with common forming issues. Based on this geometry, CAD models of both male and female molds were developed.

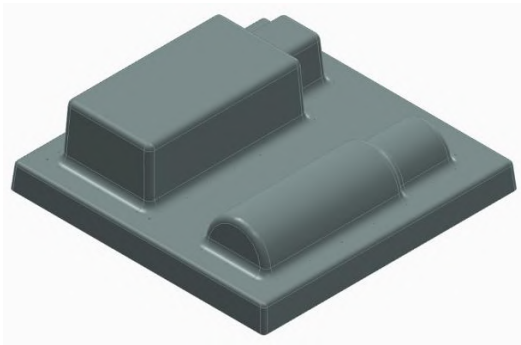


Image 3: Male mold (Own work)

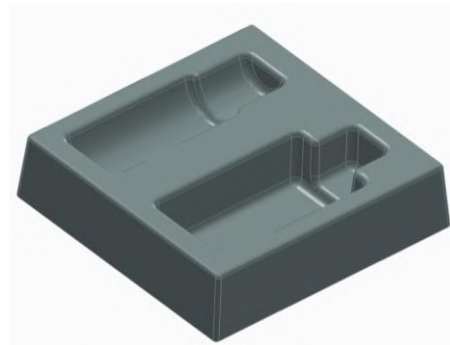


Image 4: Female mold (Own work)

Stage 3: Preliminary mold manufacturing

Initial versions of the molds were printed using 3D printing technologies (FDM, SLA, and MJF), allowing for geometry validation, early error detection, and identification of potential limitations prior to manufacturing the final versions.

Stage 4: Thermoforming tests with preliminary molds

The printed molds were tested using sheets of different materials (PETG, PS, HIPS...) and thicknesses, evaluating surface quality, typical defects (webbing, thinning, marks), and thermal behavior.

Stage 5: Design optimization

Based on the results of the previous tests, several adjustments were made to the mold design: modification of radii, improvement of draft angles, rounding of critical edges, and repositioning of vacuum holes.

Stage 6: Final mold manufacturing

The final version of the mold was manufactured in two configurations:

- **Male mold:** produced by CNC machining in 5075 aluminum using the Hartford HV-35 machining center.



Image 5: Male mold in aluminum (Own work)

- **Female mold and additional male mold:** manufactured using SLA 3D printing with Clear V4 resin.



Image 6: SLA-printed molds: male (left) and female (right) (Own work)

Stage 7: Comparative testing and final analysis

The final molds were subjected to controlled thermoforming tests, evaluating the surface quality of the resulting parts, the durability of the molds after several cycles, and dimensional accuracy. In parallel, data on production time, material consumption, and cost were collected for each technology, enabling a comprehensive technical-economic comparative analysis.

Throughout the development of the project, a systematic record of each stage was maintained, documenting both manufacturing parameters and the specific post-processing treatments applied (such as sanding, bead blasting, UV curing, or chemical cleaning). This traceability not only helped to better interpret the results, but also provided a comprehensive view of how post-processing affected the final performance of the molds.

Results

The results obtained enable a comparative evaluation of the technical and economic performance of molds manufactured using CNC machining and 3D printing technologies (SLA, FDM, and MJF). These results include tests carried out with both the preliminary molds, which were used to validate designs and detect initial errors, and the final molds, which were optimized through successive iterations.

The most relevant findings are summarized below, covering the surface quality achieved with each mold, mold durability after multiple thermoforming cycles, and the technical-economic analysis. For the latter, parameters such as manufacturing time, material consumption, and production cost were included to highlight the differences observed among the technologies.

Surface Quality of the Manufactured Molds

The surface quality of the final thermoformed product is directly influenced by the surface finish of the molds, whose aesthetic and functional characteristics are critical. For this reason, the evaluation focused on the resulting surface texture, geometric accuracy, and the effects of post-processing in each case studied.

FDM: Molds manufactured using FDM exhibit a surface with high visible roughness, inherent to the layer-by-layer nature of the printing process. A pronounced staircase effect

can be observed. The layer lines are continuous and have a noticeable relief to the touch, compromising both the aesthetic and geometric fidelity of the surface. This rough finish is directly transferred to the thermoformed part, affecting its visual quality. As shown in Image 7, the layer lines created during printing are replicated in the blister, especially on flat and vertical surfaces.

It is worth noting that the orientation of the mold during printing directly affects the visibility of the layer effect. Changing the position can reduce it in certain areas but may also introduce new issues in others or require additional supports.



Image 7: Mold manufactured by FDM (left) and thermoformed blister obtained from it (right) (Own work)

SLA: Molds manufactured using SLA printing show improved surface quality, with smooth and well-defined surfaces thanks to the low layer height of the process. Nonetheless, layer lines are still noticeable, although significantly less prominent than in FDM due to their reduced layer thickness.

One of the main issues observed was the presence of marks caused by support contact points, even after light sanding. These marks were transferred to the thermoformed blister, as shown in Image 8. Additionally, excessive sanding was found to compromise both the surface finish and the geometry of the mold, making it necessary to proceed with caution, especially in critical areas.

Overall, SLA is capable of producing functional molds with a high-quality finish, as long as printing orientation and post-processing are carefully managed.



Image 8: Mold manufactured using SLA (center) and thermoformed blisters obtained from it (sides) (Own work)

MJF: The mold manufactured using MJF technology exhibits a uniform yet rough surface, with a grainy texture typical of the powder sintering process. Although a post-processing step using abrasive blasting was applied, the sandy finish could not be fully removed. This surface roughness is directly transferred to the thermoformed blister, as shown in Image 9, negatively impacting its visual appearance.

While this texture may be acceptable for functional applications or technical prototypes, it is not suitable for parts where surface finish is critical and a high-quality appearance is desired. Compared to other additive technologies such as SLA, MJF sacrifices aesthetic quality in favor of other technical aspects.

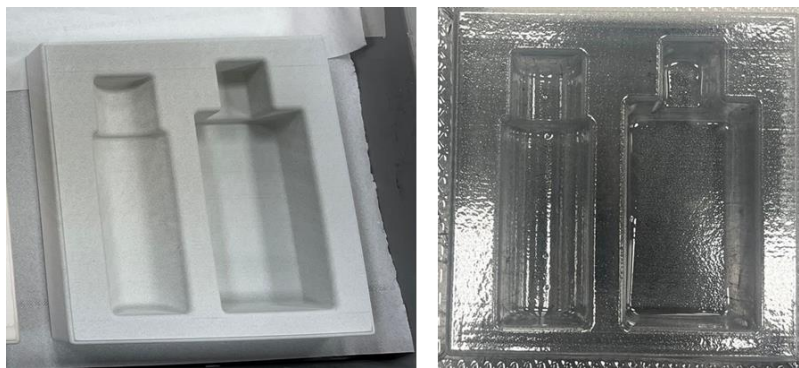


Image 9: Mold manufactured using MJF (left) and thermoformed blister obtained from it (right) (Own work)

MCNC: The aluminum mold manufactured by CNC machining shows high geometric accuracy and excellent rigidity, but also visible toolpath marks. Although these marks are not noticeable to the touch, they are visible on the surface of the thermoformed blister, as shown in Image 10.

This surface finish is the result of prioritizing fast roughing strategies to reduce engineering and machining time. However, it is worth noting that it can be easily improved by applying finishing passes with smaller-radius tools or polishing strategies, if a higher-quality aesthetic is required.

In a partial test, abrasive blasting was applied to one corner of the mold, resulting in a sandy texture that negatively affected the final surface finish. As a result, its use was discarded for the rest of the mold.



Image 10: Mold manufactured by MCNC (left) and thermoformed blister obtained from it (right) (Own work)

Mold Durability:

The durability of the molds varied significantly depending on the technology and material used, particularly in terms of thermal resistance, structural stability, and performance after repeated thermoforming cycles.

- **FDM (PLA):** This was the technology that showed the worst performance. After several cycles, the mold exhibited clear signs of thermal degradation, such as surface gloss and localized deformations (see Image 11). This behavior is due to the low glass transition temperature of PLA, making it unsuitable for demanding functional applications unless the material is changed.

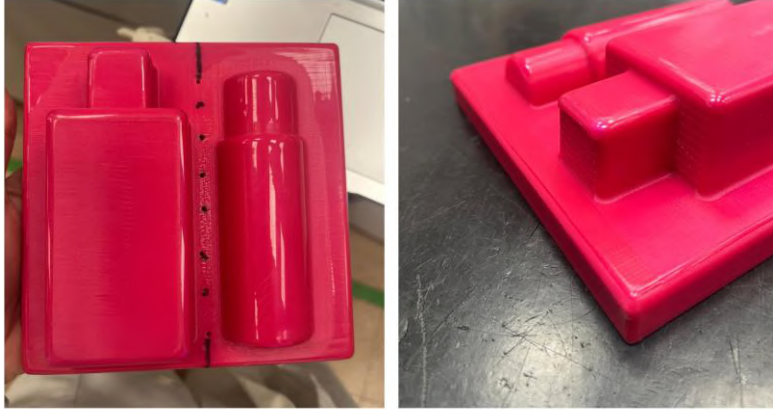


Image 11: Thermal degradation of the FDM mold (Own work)

- **SLA:** Molds printed with Clear V4 resin maintained their geometry during initial use. However, after the base thickness was reduced in a later version, progressive thermal deformation was observed, especially in flat areas, as shown in Image 12. This indicates a structural limitation under repeated thermal load. In contrast, Rigid 10K demonstrated greater dimensional stability and rigidity, with no noticeable deformations.

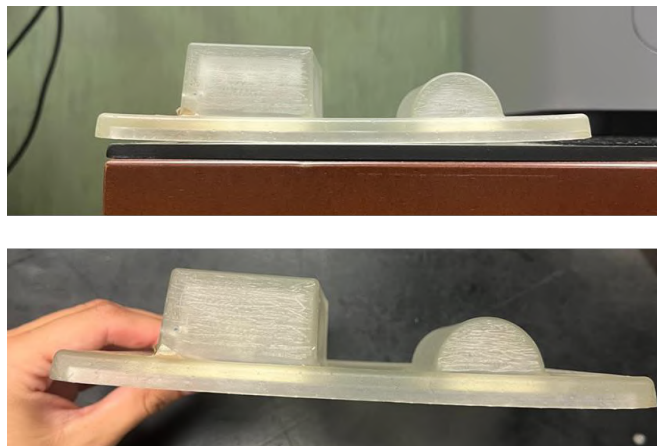


Image 12: Thermal degradation of the SLA mold (Own work)

- **MJF (PA12):** No thermal or mechanical alterations were observed after testing. The part remained stable, with good structural rigidity, supporting its suitability for functional molds in short or medium production runs.

- **MCNC (Aluminum):** It proved to be the most robust and long-lasting solution. No damage, deformation, or wear was observed after multiple uses. It is the optimal solution for demanding environments or extended production runs.

Comparison of time, material, and cost by technology

One of the key objectives of this project was to identify the most suitable manufacturing technology for producing thermoforming molds, not only from a technical standpoint but also considering economic and operational factors. To this end, data were collected on total manufacturing time, material consumption, and unit cost associated with producing the male mold using each of the technologies employed in the project: FDM, SLA, MJF, and MCNC.

Table 1 summarizes this data, taking into account both the manufacturing phase and the pre- and post-processing steps, as well as the estimated total cost per unit produced.

Table 1: Comparison of manufacturing time, material, and cost by technology (Own work)

Manufacturing technology	FDM	SLA	MJF	CNC
Material	PLA	Clear V4	PA12	Al 5075
Manufacturing (h)	23.83	12.98	8.05	3.22
Pre - and Post-processing (h)	0.5	0.75	0.5	3
Total time (h)	24.33	13.73	8.55	6.22
Material used	239 g	282.53 ml	180g (190 ml)	3890 g
Cost (€/unit)	31.22	73.63	63.39	315.24

Time: CNC machining shows the shortest total time to obtain the final mold (6.22 h), although this figure includes a prior CAM programming stage (3 h), making it competitive but not as immediate as it may initially appear. MJF also stands out for its speed (8.55 h), clearly outperforming SLA (13.73 h) and FDM (24.33 h).

Material: MCNC, being a subtractive technology, results in the highest material consumption (3.89 kg of aluminum). Additive manufacturing technologies are more efficient in this regard. FDM stands out for its low consumption due to the use of internal infill

structures, and MJF achieves good results with just 180 g of PA12 sintered in the final part. However, although a larger quantity of powder is initially required in the MJF printing chamber, most of the unsintered material can be reused in subsequent prints.

Cost: The most economical method is FDM printing (€31.22), although it presents significant limitations in terms of quality and durability. It is followed by MJF (€63.39) and SLA (€73.63), both offering better functional properties. CNC machining, while being the most expensive option (€315.24), can be cost-effective in the long term due to its high durability, which improves its cost per use cycle.

Comparative assessment between manufacturing technologies

To facilitate the overall comparison between technologies, multi-criteria radar charts were developed covering five key dimensions: manufacturing time, cost, material consumption, durability, and surface quality. Each technology displays a distinct profile, allowing for a visual understanding of its relative strengths and limitations (see Image 13).

- FDM stands out for its low cost and low material consumption, but it shows clear limitations in durability and surface finish. As a result, this technology is best suited for preliminary prototypes or basic geometric verification.
- SLA offers a good balance between surface quality and reasonable production times, with a moderate cost curve. It is particularly useful in contexts where the visual quality of the thermoformed part is a priority, such as functional prototypes or short production runs in cosmetics or electronics. However, its thermal resistance must be carefully considered depending on the mold design.
- MJF positions itself as a versatile and intermediate solution, with fast production times, good dimensional stability, and moderate costs. Although its surface quality is not suitable for products where aesthetics is a priority, it demonstrated robust performance in the tests, with no visible deformations or failures. This suggests its potential for use in functional environments or pre-industrial testing, although its long-term durability should be further assessed in future studies.
- CNC machining stands out for its durability, precision, and potential surface finish, but it comes with very high costs and significant material consumption. It is best

suited for serial functional production or final molds, where the initial investment can be justified by the usage volume.

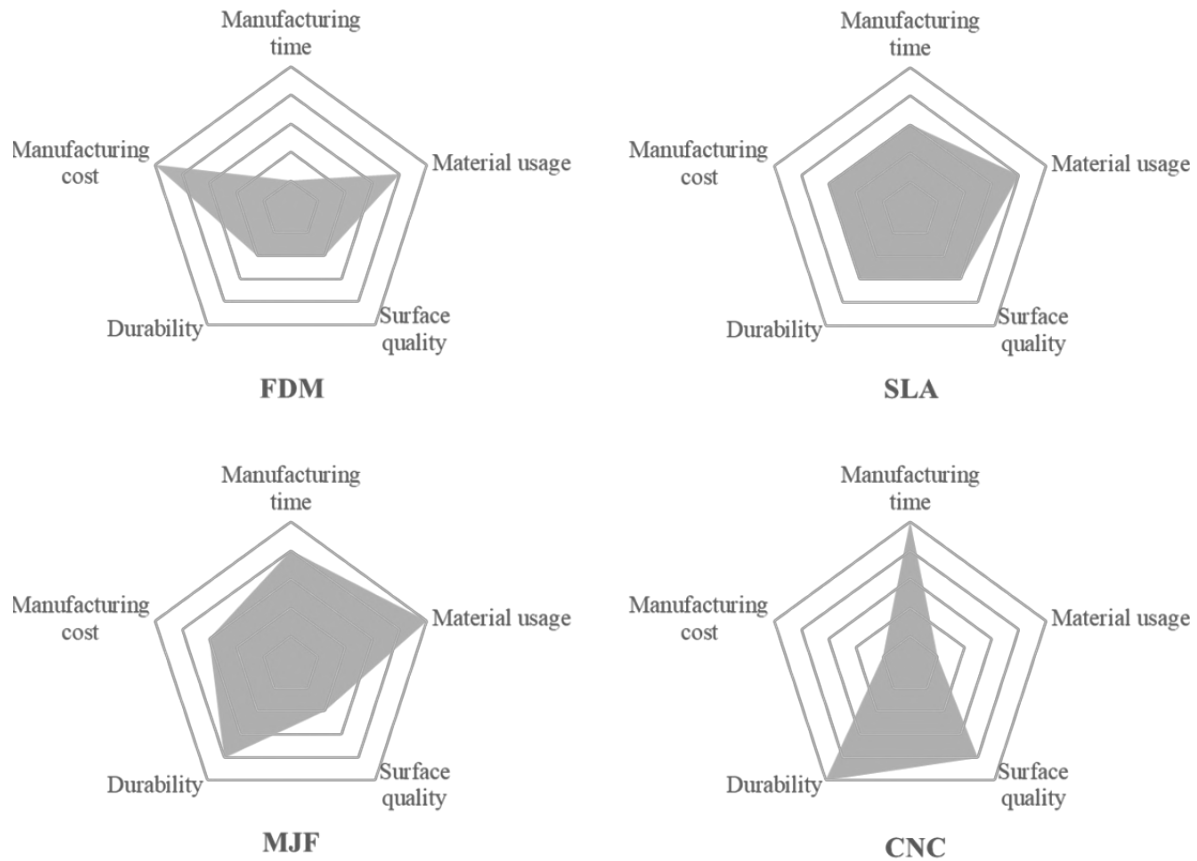


Image 13: Comparative assessment between technologies based on key criteria (Own work)

This comparative analysis enables the definition of technology selection criteria based on the application context, ranging from low-cost conceptual validations to the production of robust molds for industrial-scale manufacturing.

Conclusions

This project enabled a thorough and structured comparison of two manufacturing approaches for thermoforming molds: CNC machining in aluminum and additive manufacturing using FDM, SLA, and MJF technologies. A custom-designed geometry incorporating critical

thermoforming features was used to produce equivalent molds, which were then evaluated for their thermal, mechanical, and functional performance,

Despite its apparent simplicity, the thermoforming process is highly sensitive to practical variables such as sheet thickness, vacuum distribution, geometric design, and environmental conditions. Hands-on experience is essential for fine-tuning parameters beyond the recommended theoretical values.

Regarding mold geometry design, the study showed that curved shapes promote better material distribution and help reduce defects such as webbing and thinning. In contrast, prismatic features, and areas with close proximity between cavities or bodies are more prone to issues. Factors such as draft angles, fillet radii, and proper vacuum distribution are critical to optimizing the process.

In terms of mold manufacturing technologies, CNC machining remains the most robust and precise solution, particularly well-suited for demanding industrial environments or long production runs. However, additive manufacturing technologies are becoming increasingly competitive due to their flexibility, speed, and cost-effectiveness for short series. MJF, in particular, stands out for its dimensional stability and precision, while SLA offers a good surface finish with reasonable production times. Although FDM has limitations in terms of durability and finish quality, it remains a low-cost and highly useful option for geometric prototypes. Moreover, the rapid technological progress in 3D printing suggests significant future improvements in thermal, mechanical, and functional performance, further expanding its applicability in industrial contexts.

Overall, this project has demonstrated the technical and functional feasibility of various mold manufacturing technologies for thermoforming, highlighting the value of additive manufacturing as a competitive and rapidly evolving alternative to CNC machining in certain contexts. In addition to providing a solid comparative foundation, the study has identified several future research directions that could further deepen and expand this work. These include: geometric optimization of molds using FEM simulations to eliminate defects such as webbing; evaluation of post-processing treatments (thermal, chemical, or surface-based) to improve durability and surface quality of printed molds; controlled cyclic testing to

establish comparable service life curves across technologies and materials; and detailed metrological analysis of dimensional accuracy achievable with each method. These lines of investigation pave the way for future developments aimed at improving the technical, economic, and functional performance of thermoforming in real industrial applications.



MÁSTER UNIVERSITARIO INGENIERÍA EN INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MOLDE PARA TERMOFORMADO. COMPARATIVA ENTRE MOLDE MECANIZADO EN ALUMINIO Y MOLDE TEMOPLÁSTICO IMPRESO EN 3D

Autor: María Rodríguez-Rovira Giménez-Salinas

Director: Javier Manini Gumz

Co-Director: Dr. Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Julio de 2025

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	13
1.1 Motivación del proyecto.....	13
1.2 Objetivos del proyecto.....	14
1.3 Alineación con los ODS	15
1.3.1 ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura	15
1.3.2 ODS 12: Producción y Consumo Responsables.....	15
1.4 Metodología de trabajo.....	16
1.4.1 Enfoque general del proyecto.....	16
1.4.2 Etapas del proceso	16
1.4.3 Criterios de validación y comparación	20
1.4.4 Herramientas y recursos utilizados.....	20
Capítulo 2. Descripción de las tecnologías.....	23
2.1 Termoformado.....	23
2.1.1 Etapas del termoformado	23
2.1.2 Materiales y laminas termoplásticas.....	27
2.1.3 Ventajas del termoformado	29
2.1.4 Limitaciones del termoformado.....	30
2.2 Mecanizado en MHCN.....	30
2.2.1 Historia del MHCN	31
2.2.2 Etapas del proceso	32
2.2.3 Materiales comunes para la fabricación de moldes en MHCN	32
2.2.4 Ventajas del mecanizado CNC	33
2.2.5 Limitaciones del mecanizado CNC.....	34
2.3 Fabricación Aditiva	35
2.3.1 Historia de la fabricación aditiva	35
2.3.2 Tecnologías comunes de impresión 3D para la fabricación de moldes de termoformado	35
2.3.3 Ventajas de la fabricación aditiva.....	44
2.3.4 Limitaciones de la Fabricación Aditiva	45

Capítulo 3. Diseño del Caso de Estudio.....	46
3.1 Pieza seleccionada.....	46
3.1.1 Características de la pieza.....	47
3.2 Parámetros técnicos de diseño.....	48
3.2.1 Ángulos de desmoldeo.....	49
3.2.2 Radios de redondeo.....	49
3.2.3 Agujeros de vacío.....	49
3.3 Diseño de moldes.....	49
Capítulo 4. Fabricación de Moldes con Tecnologías de Impresión 3D.....	51
4.1 Archivos de impresión.....	51
4.2 Fabricación mediante FDM.....	52
4.2.1 Comparación de configuraciones de impresión.....	52
4.2.2 Parámetros de impresión para el molde de prueba.....	55
4.2.3 Resultado de la impresión.....	57
4.3 Fabricación Mediante SLA.....	58
4.3.1 Parámetros de impresión para el molde de prueba.....	58
4.3.2 Resultado de la impresión.....	60
4.3.3 Post-procesado de la impresión.....	61
4.3.4 Tratamiento adicional: granallado superficial.....	64
4.4 Fabricación mediante MJF.....	64
4.4.1 Parámetros de impresión para el molde de prueba.....	65
4.4.2 Resultado de la impresión.....	65
4.4.3 Post-procesado de la impresión.....	66
Capítulo 5. Ensayos de Termoformado con Moldes 3D.....	67
5.1 Ensayos con molde tipo macho.....	68
5.1.1 Sin agujeros de vacío.....	68
5.1.2 Con agujeros de vacío.....	71
5.1.3 Otras observaciones.....	77
5.2 Ensayos con moldes tipo hembra.....	80
5.2.1 Sin agujeros de vacío.....	80
5.2.2 Con agujeros de vacío.....	82
5.2.3 Otras observaciones.....	91

Capítulo 6. Iteración en el Diseño de los Moldes.....	92
6.1 Integración de agujeros de vacío.....	92
6.1.1 Resultados de impresión.....	93
6.1.2 Prueba de termoformado.....	94
6.2 Rediseño del molde macho: Segunda versión.....	95
6.2.1 Alteraciones del diseño original.....	95
6.2.2 Impresión de versión 2 del molde.....	97
6.3 Pruebas de termoformado con la versión 2 del molde.....	99
6.3.1 Pruebas iniciales.....	99
6.3.2 Ajuste de agujeros de vacío para eliminar el webbing.....	102
6.3.3 Ajuste geometría: Modificación de desmoldeo y redondeo.....	103
6.3.4 Prueba orientación del molde.....	105
6.4 Observaciones de degradación térmica del molde.....	107
Capítulo 7. Diseño y Fabricación de los Moldes Finales.....	109
7.1 Diseño de la versión final de los moldes.....	109
7.1.1 Diseño final del blíster.....	109
7.1.2 Diseño final de los moldes.....	110
7.2 Fabricación de los moldes mediante Impresión 3D.....	112
7.2.1 Impresión de los moldes.....	112
7.2.2 Resultado de la impresión.....	114
7.3 Fabricación de moldes mediante mecanizado CNC.....	115
7.3.1 Preparación del mecanizado.....	115
7.3.2 Proceso de mecanizado.....	120
7.3.3 Resultado del mecanizado.....	121
Capítulo 8. Evaluación Final de Resultados y Comparativa Tecnológica.....	124
8.1 Análisis dimensional de los moldes finales.....	124
8.2 Evaluación del Termoformado con Moldes Finales.....	127
8.2.1 Moldes Impresos mediante fabricación aditiva.....	127
8.2.2 Molde fabricado mediante mecanizado.....	138
8.2.3 Análisis del espesor de las láminas tras el termoformado.....	141
8.3 Comparativa técnica y económica: Impresión 3D vs Mecanizado.....	147
8.3.1 Comparación de tiempos de fabricación y consumo de material.....	147

8.3.2 Evaluación del acabado superficial	150
8.3.3 Evaluación de la durabilidad del molde.....	152
8.3.4 Análisis económico de las tecnologías	154
8.3.5 Consideraciones de aplicabilidad industrial.....	163
Capítulo 9. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	168
9.1 Conclusiones sobre el proceso de termoformado	168
9.2 Conclusiones sobre el diseño geométrico del molde.....	170
9.3 Conclusiones sobre las tecnologías del molde	171
9.4 Trabajos futuros.....	173
Bibliografía	175
ANEXO I. Mecanizado CNC.....	180
Listado de Herramientas MCNC	180
Listado de Herramientas MCNC de Fase 1	180
Listado de Herramientas MCNC de Fase 2	181
Listado de Operaciones CNC.....	182
Listado de Operaciones MCNC de Fase 1	182
Listado de Operaciones CNC de Fase 2	183
ANEXO II. Fichas Técnicas	184

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Etapas del proyecto (Elaboración propia)	19
Ilustración 2: Secuencia fabricación por termoformado al vacío (Fuente: [4])	25
Ilustración 3: Secuencia fabricación por termoformado al vacío (Fuente: [5])	26
Ilustración 4: Esquemática del proceso de FDM (Fuente: [17])	36
Ilustración 5: Esquemática del proceso de SLA (Fuente: [18])	39
Ilustración 6: Esquemática del proceso de SLS (Fuente: [20])	41
Ilustración 7: Pieza de estudio (Elaboración propia)	47
Ilustración 8: Croquis del blíster (Elaboración propia)	48
Ilustración 10: Molde Hembra (Elaboración propia)	50
Ilustración 9: Molde Macho (Elaboración propia)	50
Ilustración 11: Configuración de impresión de molde FDM con orientación horizontal (Elaboración propia)	54
Ilustración 12: Configuración de impresión final del molde prueba FDM (Elaboración propia)	56
Ilustración 13: Relleno de molde prueba FDM (Elaboración propia)	56
Ilustración 14: Resultado de la impresión del molde prueba FDM (Elaboración propia)	57
Ilustración 15: Resultado tras lijar la pieza (Elaboración propia)	58
Ilustración 16: Configuración de impresión molde prueba SLA (Elaboración propia) ..	59
Ilustración 17: Fallo de impresión SLA (Elaboración propia)	60
Ilustración 18: Resultado impresión molde hembra SLA Clear V4 (Elaboración propia)	61
Ilustración 19: Resultado impresión molde hembra SLA Rigid 10K (Elaboración propia)	61
Ilustración 20: Lavado con alcohol isopropílico (Elaboración propia)	62
Ilustración 21: Curado UV molde prueba Clear V4 (Elaboración propia)	62
Ilustración 22: Curado UV molde prueba Rigid 10K (Elaboración propia)	62
Ilustración 23: Puntos de Contacto de los Soportes SLA (Elaboración propia)	63
Ilustración 24: Granallado de los moldes de prueba SLA (Elaboración propia)	64
Ilustración 25: Molde hembra de prueba en el lecho de polvo (Elaboración propia)	66
Ilustración 26: Resultado post-procesado del molde hembra prueba en MJF (Elaboración propia)	66
Ilustración 27: Moldes de prueba (Elaboración propia)	67
Ilustración 28: Ensayo macho sin vacío - HIPS 1mm (Elaboración propia)	69
Ilustración 29: Ensayo macho sin vacío - PVC 1mm (Elaboración propia)	69
Ilustración 30: Ensayo macho sin vacío - PVC 0.7mm (Elaboración propia)	69

Ilustración 31: Ensayo macho sin vacío - PETG 0.5mm (Elaboración propia).....	69
Ilustración 32: Ensayo macho sin vacío - PS 1mm (Elaboración propia)	70
Ilustración 33: Ensayo macho sin vacío - PC 0.7mm (Elaboración propia).....	70
Ilustración 34: Agujeros de vacío del molde macho de prueba (Elaboración propia)....	72
Ilustración 35: Agujeros de 2mm hechos con broca – molde FDM (Elaboración propia)	72
Ilustración 36: Ensayo macho con vacío - PVC 0.7mm (Elaboración propia).....	75
Ilustración 37: Ensayo macho con vacío - PETG 0.5mm (Elaboración propia).....	75
Ilustración 38: Ensayo macho con vacío - PS 1mm (Elaboración propia)	76
Ilustración 39: Ensayo macho con vacío - PC 0.7mm (Elaboración propia).....	76
Ilustración 40: Calentamiento no uniforme de la lámina de termoformado (Elaboración propia).....	78
Ilustración 41: Acabado superficial blíster de prueba con macho FDM (Elaboración propia).....	79
Ilustración 42: Degradación térmica del molde macho (Elaboración propia)	80
Ilustración 43: Ensayo hembra sin vacío- Rigid 10K - HIPS 1mm (Elaboración propia)	81
Ilustración 44: Ensayo hembra sin vacío- Rigid 10K - PETG 0.5mm (Elaboración propia)	82
Ilustración 45: Primera configuración de agujeros de vacío (Imagen creada por ChatGPT. Fuente: [29])	83
Ilustración 46: Agujeros de 1.5mm hechos con broca – Molde Rigid 10K (Elaboración propia).....	84
Ilustración 47: Ensayo hembra con vacío (1.5mm) - Rigid 10K - PETG 0.5mm (Elaboración propia).....	84
Ilustración 48: Defectos observados en el ensayo hembra con vacío (1.5mm) (Elaboración propia).....	85
Ilustración 49: Agujeros de 1 mm hechos con broca – Molde Clear V4 (Elaboración propia).....	86
Ilustración 50: Ensayo hembra con vacío (1mm) - Clear V4 - PETG 0.5mm (Elaboración propia).....	86
Ilustración 51: Resultado del lijado de los moldes hembra (Elaboración propia)	87
Ilustración 52: Segunda configuración de agujeros de vacío (Imagen creada por ChatGPT. Fuente: [29])	87
Ilustración 53: Agujeros de 1 mm Hechos con Broca – Molde PA12 (Elaboración propia)	88
Ilustración 54: Ensayo hembra con vacío (1mm) - PA12 - PETG 0.5mm (I) (Elaboración propia).....	89

Ilustración 55: Tercera configuración de agujeros de vacío (Imagen creada por ChatGPT. Fuente: [29])	89
Ilustración 56: Ensayo hembra con vacío (1mm) - PA12 - PETG 0.5mm (II) (Elaboración propia).....	90
Ilustración 57: Acabado superficial con molde impreso en MJF (Elaboración propia) .	91
Ilustración 58: Piezas impresas para prueba de agujeros (Elaboración propia)	92
Ilustración 59: Termoformado con piezas de prueba de impresión de agujeros de vacío (Elaboración propia)	95
Ilustración 60: V2 del molde macho (Elaboración propia).....	96
Ilustración 61: Configuración de impresión molde V2 SLA (Elaboración propia).....	97
Ilustración 62: Resultado de la impresión del molde V2 (Elaboración propia).....	98
Ilustración 63: Resultado Post-procesado del Molde Macho V2 (Elaboración propia) .	98
Ilustración 64: Prueba inicial molde macho V2 - HIPS 1mm (Elaboración propia)	100
Ilustración 65: Prueba inicial molde macho V2 - PETG 0.5mm (Elaboración propia)	101
Ilustración 66: Prueba inicial molde macho V2 - PS 1mm (transparente) (Elaboración propia).....	101
Ilustración 67: Prueba inicial molde macho V2 - PS 1mm (blanco) (Elaboración propia)	101
Ilustración 68: Configuraciones de agujeros de vacío probadas para eliminar el pliegue en la esquina inferior del rectángulo (Elaboración propia)	102
Ilustración 69: Resultado de los ensayos de configuraciones de agujeros de vacío molde V2 (Elaboración propia)	103
Ilustración 70: Modelo de prueba simplificado con 5° de desmoldeo y radios de 3 mm (Elaboración propia).....	104
Ilustración 71: Resultado de las pruebas con el modelo de prueba simplificado (Elaboración propia)	105
Ilustración 72: Diferentes orientaciones del molde para los ensayos (Elaboración propia)	105
Ilustración 73: Resultado de los ensayos de cambio de orientación (Elaboración propia)	107
Ilustración 74: Degradación térmica del molde V2 (Elaboración propia).....	108
Ilustración 75: Diseño final del blíster (Elaboración propia)	109
Ilustración 76: Versión final del molde macho (Elaboración propia)	111
Ilustración 77: Versión final del molde hembra (Elaboración propia)	111
Ilustración 78: Configuración de impresión molde final macho (Elaboración propia)	113
Ilustración 79: Configuración de impresión molde final hembra (Elaboración propia)	113
Ilustración 80: Resultado de la impresión de los moldes finales (Elaboración propia)	114
Ilustración 81: Moldes finales fabricados con impresión 3D (Elaboración propia).....	114

Ilustración 82: Centro de mecanizado Hartford HV-35 de la Universidad con control Siemens (Captura realizada en Siemens NX).....	116
Ilustración 83: Cambios realizados al molde para la sujeción a placa base (Elaboración propia).....	117
Ilustración 84: Bloque de aluminio y placa base (Elaboración propia).....	117
Ilustración 85: Fase 1 del mecanizado (Elaboración propia).....	118
Ilustración 86: Fase 2 del mecanizado (Elaboración propia).....	118
Ilustración 87: Lista de operaciones CAM creadas por Javier Manini (Captura: Elaboración propia)	119
Ilustración 88: Ejemplo de pieza mecanizada disponible en el laboratorio con acabado superficial fino (Foto: Elaboración propia)	120
Ilustración 89: comparativa entre la simulación CAM en Siemens NX (izquierda) y el proceso real de mecanizado del molde tipo macho en aluminio (derecha) (Elaboración propia).....	120
Ilustración 90: Resultado del mecanizado de la pieza macho (Elaboración propia)	122
Ilustración 91: Prueba de termoformado del molde macho en Aluminio sin agujeros de vacío (Elaboración propia)	122
Ilustración 92: Efecto del chorreado en el blíster (Elaboración propia).....	123
Ilustración 93: Molde macho en Aluminio (Elaboración propia).....	123
Ilustración 94: Esquema de referencias dimensionales empleadas para el análisis de los moldes (Elaboración propia)	125
Ilustración 95: Ensayo termoformado - molde macho Impreso en 3D - PETG 0.7 mm (Elaboración propia).....	129
Ilustración 96: Ensayo termoformado - molde macho Impreso en 3D - PETG 1.0 mm (Elaboración propia).....	129
Ilustración 97: Ensayo termoformado - molde macho Impreso en 3D - PS 0.5 mm (Elaboración propia).....	129
Ilustración 98: Ensayo termoformado - molde macho en 3D - PS 1.0 mm (Elaboración propia).....	130
Ilustración 99: Ensayo termoformado - molde macho en 3D - PVC 0.7 mm (Elaboración propia).....	130
Ilustración 100: Ensayo termoformado - molde macho en 3D - PC 0.75 mm (Elaboración propia).....	130
Ilustración 101: Sistema de varillas de guiado (Elaboración propia)	131
Ilustración 102: Ensayos del modelo macho con sistema de varillas de guiado – PETG 0.7 mm (Elaboración propia).....	133
Ilustración 103: Ensayos del modelo macho con sistema de varillas de guiado – PETG 1.0 mm (Elaboración propia).....	133

Ilustración 104: Ensayos del modelo macho con sistema de varillas de guiado – PS 0.5 mm (Elaboración propia).....	133
Ilustración 105: Ensayos del modelo macho con sistema de varillas de guiado – PS 1.0 mm (Elaboración propia).....	133
Ilustración 106: Ensayos del modelo macho con sistema de varillas de guiado – PVC 0.7 mm (Elaboración propia).....	134
Ilustración 107: Ensayos del modelo macho con sistema de varillas de guiado – PC 0.75 mm (Elaboración propia).....	134
Ilustración 108: Ensayo termoformado - molde hembra impreso en 3D - PETG 0.7 mm (Elaboración propia).....	136
Ilustración 109: Ensayo termoformado - molde hembra impreso en 3D - PETG 1.00 mm (Elaboración propia).....	136
Ilustración 110: Ensayo termoformado - molde hembra impreso en 3D - PS 0.7 mm (Elaboración propia).....	137
Ilustración 111: Ensayo termoformado - molde hembra impreso en 3D - PS 1.0 mm (Elaboración propia).....	137
Ilustración 112: Ensayo termoformado - molde hembra impreso en 3D 0.7 mm (Elaboración propia).....	137
Ilustración 113: Ensayo termoformado - molde hembra impreso en 3D - PC 0.75 mm (Elaboración propia).....	137
Ilustración 114: Ensayo termoformado - molde macho mecanizado - PETG 0.70 mm (Elaboración propia).....	139
Ilustración 115: Ensayo termoformado - molde macho mecanizado - PETG 1.00 mm (Elaboración propia).....	140
Ilustración 116: Ensayo termoformado - molde macho mecanizado - PS 0.50 mm (Elaboración propia).....	140
Ilustración 117: Ensayo termoformado - molde macho mecanizado - PS 1.00 mm (Elaboración propia).....	140
Ilustración 118: Ensayo termoformado - molde macho mecanizado - PVC 0.70 mm (Elaboración propia).....	141
Ilustración 119: Ensayo termoformado - molde macho mecanizado - PC 0.75 mm (Elaboración propia).....	141
Ilustración 120: Identificación de las zonas de medición de espesor en el blíster para el análisis de contracción del material tras termoformado (Elaboración propia).....	142
Ilustración 121: Simulación de fabricación del molde final macho con FDM (Elaboración propia).....	148
Ilustración 122: Simulación de fabricación del molde final macho con MJF (Elaboración propia).....	148
Ilustración 123: Fractura del molde macho Clear V4 (Elaboración propia).....	153

Ilustración 124: Evaluación comparativa de tecnologías de fabricación según criterios clave (Elaboración propia)	165
--	-----

Índice de tablas

Tabla 1: Materiales empleados en procesos de termoformado (Elaboración propia)	28
Tabla 2: Diferencias entre laminas gruesas y láminas delgadas (Fuente: [8])	29
Tabla 3: Materiales comúnmente empleados para la fabricación de moldes por CNC para termoformado (Elaboración propia)	33
Tabla 4: Materiales empleados para la fabricación de moldes mediante FDM (Fuente: [19])	37
Tabla 5: Materiales empleados para la fabricación de moldes mediante SLS (Elaboración propia)	41
Tabla 6: Comparativa de tiempos de impresión y espesores de capa (Elaboración propia)	55
Tabla 7: Parámetros de impresión primera versión del molde FDM (Elaboración propia)	55
Tabla 8: Parámetros de impresión primera versión del molde SLA (Elaboración propia)	58
Tabla 9: Temperaturas y Tiempos de Curado SLA (Elaboración propia)	63
Tabla 10: Parámetros de termoformado de los ensayos sin agujeros de vacío con molde macho	68
Tabla 11: Parámetros de termoformado de los ensayos con agujeros de vacío con molde macho (Elaboración propia)	72
Tabla 12: Parámetros de termoformado de los ensayos sin agujeros de vacío con molde hembra (Elaboración propia)	81
Tabla 13: Parámetros de termoformado de los ensayos con agujeros de vacío con molde hembra (Elaboración propia)	82
Tabla 14: Diámetros de las pruebas de Impresión de agujeros de vacío (en mm) (Elaboración propia)	93
Tabla 15: Parámetros de termoformado de los ensayos iniciales del molde V2 (Elaboración propia)	99
Tabla 16: Parámetros de termoformado de los ensayos de configuraciones de agujeros de vacío molde V2 (Elaboración propia)	102
Tabla 17: Parámetros de termoformado de los ensayos del modelo de prueba simplificado (Elaboración propia)	104
Tabla 18: Parámetros de termoformado de los ensayos de cambio de orientación (Elaboración propia)	106
Tabla 19: Variables de impresión de los moldes finales (Elaboración propia)	113
Tabla 20: Tiempos de mecanizado del molde (Elaboración propia)	121
Tabla 21: Material empleado para el mecanizado (Elaboración propia)	121

Tabla 22: Comparativa entre dimensiones teóricas y medidas reales del molde tipo macho (mm) (Elaboración propia)	125
Tabla 23: Comparativa entre dimensiones teóricas y medidas reales del molde tipo hembra fabricado por impresión 3D (mm) (Elaboración propia).....	126
Tabla 24: Parámetros de termoformado de los ensayos del modelo macho impreso en 3D (Elaboración propia)	127
Tabla 25: Parámetros de termoformado de los ensayos del modelo macho con sistema de varillas de guiado (Elaboración propia)	131
Tabla 26: Parámetros de termoformado de los ensayos del modelo hembra impreso en 3D (Elaboración propia)	134
Tabla 27: Parámetros de termoformado de los ensayos del modelo macho mecanizado (Elaboración propia)	138
Tabla 28: Promedio de espesores medidos de las distintas zonas del blíster para distintos materiales de termoformado (mm) (Elaboración propia)	143
Tabla 29: Tiempos de fabricación del molde macho y consumo de materiales con distintas tecnologías de fabricación (Elaboración propia)	149
Tabla 30: Coste de fabricación del molde macho mediante tecnología FDM (Elaboración propia).....	156
Tabla 31: Coste de fabricación del molde macho mediante tecnología SLA (Elaboración propia).....	158
Tabla 32: Coste de fabricación del molde macho mediante tecnología MJF (Elaboración propia).....	160
Tabla 33: Coste de fabricación del molde macho mediante tecnología MCNC (Elaboración propia).....	161
Tabla 34: Comparativa de costes de fabricación por tecnología (Elaboración propia) ..	163

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

En el contexto industrial en el que nos encontramos existe una demanda creciente de eficiencia, personalización y sostenibilidad, por ende, los procesos de fabricación deben adaptarse rápidamente a nuevas exigencias técnicas, económicas y ambientales. Uno de los procesos más relevantes y extendidos en la fabricación de piezas plásticas es el termoformado, gracias a su versatilidad, bajo coste, y rapidez de producción.

El termoformado es una tecnología de fabricación ampliamente utilizada en sectores como el empaquetado, la automoción, la electrónica, la aeronáutica y el sector médico. Esto se debe a que esta técnica permite la producción de piezas funcionales, ligeras y resistentes. Según Allied Market Research, el mercado global de plásticos termoformados fue valorado en 40,5 mil millones de dólares en 2021 y se espera que alcance los 67,1 mil millones en 2031, con una tasa de crecimiento anual compuesta del 5,2 % [1]. Este crecimiento sostenido pone de manifiesto la demanda continua de métodos eficientes de fabricación de moldes que se adapten a distintas necesidades productivas.

Uno de los elementos clave de este proceso de fabricación es el molde, cuya precisión, durabilidad y coste impactan directamente a la calidad de la pieza final. Tradicionalmente, estos moldes se han fabricado mediante mecanizado en máquinas herramientas de control numérico (MHCN), una técnica precisa y robusta, pero con limitaciones en términos de costes y tiempo de fabricación, especialmente con bajos volúmenes de producción.

La irrupción de la fabricación aditiva, comúnmente denominada impresión 3D, ha brindado una alternativa que permite fabricar moldes complejos de forma más rápida y con supuestamente menor desperdicio y coste inicial.

Este proyecto se plantea una como una comparativa técnica y económica entre estas dos metodologías de fabricación de moldes. A través del estudio de aspectos como el coste, el

tiempo, y la durabilidad, se pretende contribuir al análisis del potencial de la fabricación aditiva como herramienta industrial viable y sostenible.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo general de este proyecto es realizar una comparativa técnica y económica entre distintas tecnologías de fabricación de moldes para termoformado, evaluando su aplicabilidad en función del tipo de uso previsto. En particular, se analizan tanto procesos sustractivos (mecanizado CNC en aluminio) como aditivos (impresión 3D mediante tecnologías FDM, SLA y MJF), considerando criterios como tiempo, coste, durabilidad, consumo de material y calidad superficial.

A partir de este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar en CAD una geometría representativa para termoformado, así como los moldes necesarios para su fabricación.
- Fabricar moldes funcionales empleando las siguientes tecnologías:
 - o Mecanizado CNC en aluminio.
 - o Impresión 3D mediante FDM (PLA), SLA (Clear V4 y Rigid 10K) y MJF (PA12).
- Realizar ensayos de termoformado utilizando los distintos moldes, evaluando tanto el proceso como los resultados obtenidos en la pieza final.
- Recoger y comparar los resultados obtenidos en base a los siguientes criterios:
 - o Tiempo total de fabricación del molde (incluyendo post-procesado).
 - o Consumo de material en cada tecnología.
 - o Coste de fabricación estimado por unidad.
 - o Calidad del acabado superficial obtenido.
 - o Durabilidad del molde frente al uso repetido.
- Analizar la aplicabilidad industrial de cada tecnología según el tipo de uso (prototipado, series cortas, producción exigente).

1.3 ALINEACIÓN CON LOS ODS

Este proyecto se alinea con varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) definidos por la Agenda 2030 de Naciones Unidas [2], al promover prácticas de fabricación más eficientes, sostenibles y accesibles. A continuación, se detallan los ODS más relevantes a los que contribuye:

1.3.1 ODS 9: INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA

Este objetivo promueve la modernización de la industria mediante tecnologías sostenibles, acceso equitativo a la innovación y mejora de los sistemas de producción.

Este proyecto pretende investigar la viabilidad de uso de tecnologías innovadoras como la fabricación aditiva, evaluando su capacidad para reducir tiempos, costes y consumo de recursos frente a métodos convencionales como el mecanizado CNC para la fabricación de moldes de termoformado. También ayuda a analizar si las PYMES y sectores con recursos limitados pueden acceder a técnicas avanzadas de diseño y producción gracias a la fabricación de moldes con tecnologías más asequibles y flexibles como la fabricación aditiva.

1.3.2 ODS 12: PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES

Este ODS busca promover conductas sostenibles de producción, optimizando el uso de recursos y reduciendo residuos.

Este proyecto contribuye al ODS 12 al comparar tecnologías de fabricación en términos de consumo de material, desperdicio y durabilidad. Se analiza cómo opciones como FDM permiten reducir el material utilizado mediante estructuras no macizas, mientras que el MCNC implica un mayor desperdicio debido a su naturaleza sustractiva. La evaluación objetiva de cada tecnología según su eficiencia funcional y económica permite fomentar decisiones más responsables en el uso de recursos en procesos de fabricación de moldes.

1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

1.4.1 ENFOQUE GENERAL DEL PROYECTO

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño y fabricación de un molde para termoformado. La pieza empleada se diseñará de tal manera que permite comparar el comportamiento del material en zonas de distinta geometría y profundidad. Partiendo de esa base, el trabajo se orienta hacia un análisis comparativo entre dos enfoques de fabricación de molde: fabricación aditiva (impresión 3D) y fabricación sustractiva (mecanizado CNC).

Para garantizar la comparativa final se realice sobre un molde técnicamente válido y funcional, se ha planteado una fase previa de validación de diseño, centrada en la fabricación de moldes preliminares empleando diferentes tecnologías de impresión 3D (FDM, SLA, y MJF). Esta fase tiene carácter iterativo y experimental, y permite identificar posibles errores de diseño, ajustar parámetros críticos (radios, ángulos de desmoldeo, espesores, etc.) y definir el molde óptimo para termoformado.

Una vez validados los aspectos geométricos funcionales del diseño, se procede a la fabricación definitiva de los moldes fabricados con todas las tecnologías. Esto permite realizar una comparación técnica realista entre ambos métodos de fabricación, no solo en términos geométricos, sino también considerando factores como la calidad superficial, el comportamiento durante el proceso de termoformado, la resistencia del molde y la viabilidad práctica.

En conjunto, el proyecto se desarrolla siguiendo un enfoque experimental comparativo. A través de esta metodología, se busca no solo obtener un molde funcional, sino también aportar criterios técnicos útiles para seleccionar la tecnología de fabricación más adecuada en función del contexto de uso, recursos disponibles y requisitos del producto final.

1.4.2 ETAPAS DEL PROCESO

El proyecto se ha desarrollado en una serie de etapas secuenciales que permiten abordar de forma estructurada el diseño, fabricación, validación y comparación de moldes para

termoformado (Ilustración 1). Esta forma de trabajo combina fases exploratorias, iterativas y experimentales, con el objetivo de obtener conclusiones sobre la viabilidad técnica de distintas tecnologías de fabricación.

Etapas 1: Investigación preliminar de tecnologías y materiales

Se realiza un análisis de las distintas tecnologías de fabricación disponibles en el entorno de laboratorio (FDM, SLA, MJF, mecanizado CNC) y de los materiales compatibles con cada una. Se recopila información técnica sobre las propiedades mecánicas, térmicas y de procesamiento de materiales. Esta etapa permite definir la estrategia de fabricación más adecuada y anticipar posibles limitaciones técnicas

Etapas 2: Diseño de la pieza termoformada

Se modela una pieza tipo blíster con cavidades de diferente geometría (cilíndrica y rectangular), diseñada para combinar requisitos funcionales y criterios técnicos del termoformado. A partir del diseño del blíster se obtienen los moldes correspondientes para el termoformado. El diseño se realiza en Solid Edge, generando los archivos base para la fabricación de los moldes.

Etapas 3: Fabricación de los moldes preliminares mediante impresión 3D

Se fabrican moldes utilizando tecnologías de impresión 3D (FDM, SLA, MJF) como primera aproximación experimental. Estos moldes permiten validar la geometría del diseño y detectar posibles errores antes de fabricar el molde definitivo.

Etapas 4: Ensayos de termoformado con moldes 3D

Los moldes preliminares se utilizan para termoformar láminas de distintos espesores y materiales. Durante esta fase se analiza el comportamiento del conjunto molde-lámina en condiciones reales, lo que permite ver tanto errores de diseño que dan lugar a la aparición de defectos, como la calidad superficial de la pieza.

Además, esta etapa se aprovecha para evaluar la necesidad de incorporar agujeros de vacío en el molde. Se estudia tanto su ausencia o presencia, tamaño, y ubicación óptima, con el fin de garantizar una correcta adaptación de la lámina al molde y mejorar el nivel de detalle en

zonas críticas. Esta información resulta clave para ajustar el diseño final del molde antes de pasar a la fabricación definitiva.

Etapas 5: Iteración y optimización del diseño de los moldes

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos, se ajusta el diseño del molde: modificación de radios, incorporación de agujeros de vacío, corrección de geometrías conflictivas, aplicación de tratamientos superficiales (lijado, granallado, etc.). El objetivo es alcanzar una versión optimizada y técnicamente válida para fabricar el molde definitivo.

Etapas 6: Fabricación de molde definitivo

Una vez validado y optimizado el diseño del molde a través de las fases de ensayo, se procede a su fabricación definitiva utilizando la tecnología de impresión 3D SLA y mecanizado CNC en aluminio. Esta decisión permite realizar una comparación directa entre tecnologías, utilizando un mismo diseño geométrico como base de referencia.

Para cada tecnología se documentan los parámetros de fabricación utilizados, el tiempo de producción, el consumo de material, el acabado superficial obtenido y cualquier necesidad de post-procesado adicional.

Etapas 7: Ensayos comparativos y análisis final

Se realizan nuevos ensayos de termoformado empleando los distintos moldes fabricados con las distintas tecnologías. Esto permite evaluar el rendimiento de cada tecnología en términos de calidad del termoformado, fidelidad geométrica, acabado superficial, aparición de defectos, etc.

Para ello, se utilizan láminas de distintos materiales y espesores (PETG, PS, PVC y PC en espesores de 0,5 a 1 mm), lo que permite observar cómo se comportan los moldes frente a condiciones variables de termoformado. Esta diversidad de condiciones aporta una visión más completa del desempeño funcional de cada tecnología y refuerza la comparativa posterior.

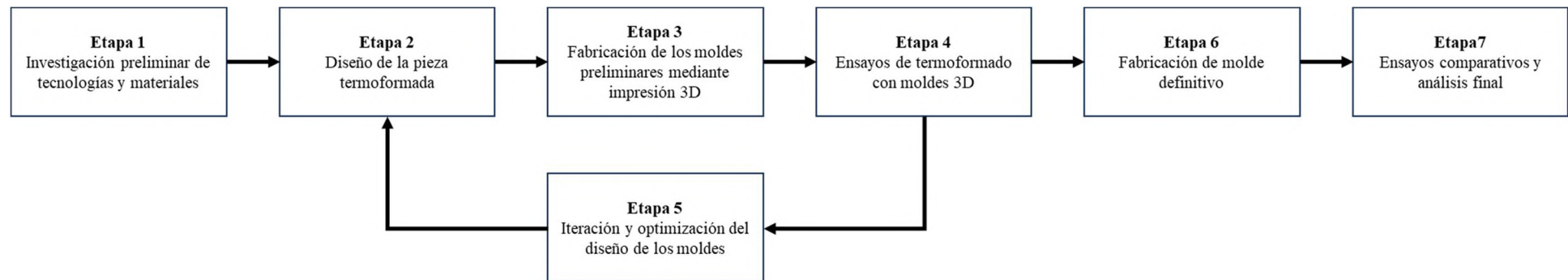


Ilustración 1: Etapas del proyecto (Elaboración propia)

1.4.3 CRITERIOS DE VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN

Con el objetivo de evaluar de forma objetiva y comparable el rendimiento de las distintas tecnologías de fabricación analizadas, se establecieron cinco criterios clave que permiten valorar su aplicabilidad a la producción de moldes para termoformado:

- **Tiempo de fabricación total:** incluye tanto el tiempo directo de producción como las tareas asociadas de post-procesado o preparación técnica (por ejemplo, generación de código CAM en mecanizado).
- **Consumo de material:** se ha cuantificado el volumen o masa total de material utilizado para la fabricación del molde, considerando también pérdidas o desperdicios inherentes al proceso.
- **Calidad del acabado superficial:** evaluada a partir de la textura obtenida en los ensayos, la presencia de marcas o irregularidades, y la idoneidad del acabado para reproducir detalles en piezas termoformadas.
- **Durabilidad del molde:** estimada en base a observaciones durante los ensayos, posibles signos de degradación térmica o mecánica, y resistencia frente a impactos accidentales o uso repetido.
- **Coste de fabricación:** incluye amortización de equipos, materiales, mano de obra, operaciones de post-procesado y margen comercial simulado, permitiendo una estimación proporcional realista entre tecnologías.

Estos criterios fueron aplicados de forma homogénea a todas las tecnologías consideradas (FDM, SLA, MJF y MCNC) y sirvieron de base para el análisis comparativo. Su combinación permite valorar no solo el rendimiento técnico individual, sino también la viabilidad global de cada alternativa en función del contexto de uso.

1.4.4 HERRAMIENTAS Y RECURSOS UTILIZADOS

Para el desarrollo del proyecto se han hecho uso de diversas herramientas digitales, equipos de fabricación y medios de laboratorio disponibles en el entorno de la Escuela Técnica

Superior de Ingeniería (ICAI). A continuación, se detallan los recursos utilizados, organizados por categoría:

Software de diseño y modelado CAD: El diseño de la pieza termoformada y de los distintos moldes se ha llevado a cabo íntegramente con el software Solid Edge 2024, plataforma CAD utilizada en el entorno académico. Este software ha permitido modelar tanto las cavidades como los bloques de molde a partir de la pieza de estudio, generando versiones adaptadas a cada tipo de fabricación. La exportación de los archivos se ha realizado en formato STL, con control sobre la tolerancia de conversión y el ángulo de plano de superficie.

Software de laminado y preparación de impresión 3D: Para preparar los archivos para impresión 3D, se han utilizado los siguientes programas:

- Ultimaker Cura 5.10.0, para impresiones FDM
- PreForm 3.40.1, para impresiones con resina mediante tecnología SLA (Formlabs) y para la impresión de la impresión MJF

Estos softwares han permitido ajustar parámetros como la orientación del modelo, la altura de capa, la generación de soportes y la estimación de tiempo y consumo de material. El proceso de segmentación se ha realizado directamente en estas plataformas.

Equipos de fabricación aditiva: Se han utilizado varias impresoras 3D, cada una seleccionada en función de la tecnología y el material requerido:

- **FDM:** Impresora Prusa i3 MK3S+, empleada para fabricar moldes preliminares en PLA.
- **SLA:** Impresoras Formlabs Form 3 y Formlabs Form 3L, utilizadas con resinas Rigid 10K y Clear V4 respectivamente.
- **MJF:** HP Jet Fusion 580C, utilizada para fabricar un molde en Nylon PA12, con una mezcla de 30% material nuevo y 70% reutilizado.

Centro de Mecanizado CNC: Para la fabricación del molde en aluminio se empleó el centro de mecanizado vertical de 3 ejes Hartford HV-35, disponible en el laboratorio de fabricación

de ICAI. Este equipo permite mecanizar con alta precisión componentes metálicos mediante control numérico computarizado (CNC).

El código de mecanizado se generó utilizando el módulo CAM del software Siemens NX. Este software no solo facilita la generación del código G-code compatible con la máquina, sino que también permite simular el proceso de mecanizado completo sobre el modelo digital de la Hartford HV-35, lo que ayuda a prever colisiones, tiempos de mecanizado y trayectoria de herramientas. Esta simulación previa es clave para optimizar el proceso y minimizar errores durante la fabricación real

Máquina de termoformado: Los ensayos de termoformado se han llevado a cabo utilizando la máquina Formech 300XQ. Esta máquina calienta la lámina mediante resistencias eléctricas distribuidas en distintas zonas del marco térmico: superior, inferior, laterales y zona central, lo que permite un control diferencial de la temperatura según las características geométricas del molde. En lugar de fijar una temperatura directa, el sistema permite ajustar la potencia de cada zona en porcentaje, lo que facilita la adaptación del calentamiento a las necesidades de cada material y reduce el riesgo de sobrecalentamiento localizado.

Una vez alcanzada la temperatura adecuada, se activa el sistema de vacío, que extrae el aire de la cámara inferior para adherir la lámina caliente al molde. A diferencia de otras máquinas más avanzadas, esta termoformadora no permite la generación previa de una burbuja de pre-estirado, lo cual puede limitar el rendimiento en cavidades profundas y zonas con relieve acusado. Este aspecto se ha tenido en cuenta a la hora de analizar los resultados y los posibles defectos de formado.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

A continuación, se explicarán las principales tecnologías de fabricación que se van a emplear en este proyecto.

2.1 TERMOFORMADO

El termoformado es un proceso de fabricación ampliamente utilizado para transformar láminas termoplásticas en productos tridimensionales mediante la aplicación de calor, fuerza mecánica o presión. El proceso implica calentar una lámina plástica hasta que alcanza un estado viscoelástico, momento en el cual se conforma sobre un molde por medio de vacío, presión, o una combinación de ambos. Tras la conformación, la pieza se enfría, se desmolda y se recorta para obtener el producto final con las dimensiones y forma deseadas [3] [4].

El proceso de termoformado se puede dividir en etapas fundamentales que se explicarán a continuación.

2.1.1 ETAPAS DEL TERMOFORMADO

2.1.1.1 Calentamiento de la lámina

El proceso de termoformado comienza con el calentamiento controlado de la lámina termoplástica hasta alcanzar su temperatura de conformado, siendo esta el rango térmico en el cual el material pasa de un estado rígido a uno maleable o viscoelástico. Dicha temperatura dependerá, entre otras cosas, de lo siguiente:

- **El material empleado:** Cada material tiene un punto específico de transición vítrea (T_g), temperatura a la que un polímero amorfo pasa de tener un estado duro a un estado blando o gomoso, y viceversa. También tienen distintos rangos de temperatura de fusión o ablandamiento (T_f), que es la temperatura a la que el material pasa de un estado sólido a un estado líquido, viscoso o de flujo.

- **Espesor de la lámina:** Láminas con mayor grosor requerirán de mayor tiempo de calentamiento o de temperatura para asegurar un calentamiento uniforme a través de todo su volumen.
- **Colorantes o aditivos:** La adición de estos puede cambiar las propiedades de los materiales. Adicionalmente, los materiales con colores más oscuros absorben más rápido la energía térmica que los translúcidos o claros.

Para el calentamiento de la lámina se pueden emplear distintos métodos:

- **Radiación infrarroja (IR):** comúnmente empleado por su eficiencia y rapidez de calentamiento sin necesidad de contacto físico. Este método emplea emisiones de radiación infrarroja para calentar la superficie de la lámina mediante radiación térmica.
- **Convección de aire caliente:** es un método útil para espesores mayores o materiales que requieran de un calentamiento más homogéneo.
- **Contacto directo con placas calientes:** Se emplea cuando es necesario un calentamiento localizado.

El proceso de calentamiento de la lámina es crítico para el éxito del termoformado, siendo la uniformidad térmica una de las claves del éxito del proceso. Zonas frías harán que se quede rígido el material y que no se ajuste bien a la geometría del molde. Por otro lado, el sobrecalentamiento puede hacer que se adelgace la lámina en exceso generando defectos. Por tanto, es importante controlar la temperatura, la distancia entre lámina y fuente de calor, así como el tiempo de exposición.

2.1.1.2 Formado sobre el molde

Una vez la lámina ha alcanzado su temperatura de conformado, se posiciona sobre un molde donde se aplica vacío, presión o contacto mecánico para darle forma. Existen diversas técnicas de conformado, cada una con características particulares:

Termoformado al vacío

Consiste en aplicar vacío entre la lámina y el molde, haciendo que el plástico se adhiera a la superficie del molde. Es el método más simple y económico, ideal para geometrías sencillas y producción a pequeña o mediana escala. Según Throne [3], esta técnica requiere una lámina con buena capacidad de elongación para evitar roturas o acumulaciones de material en zonas curvas. En este proyecto se empleará este tipo de termoformado.

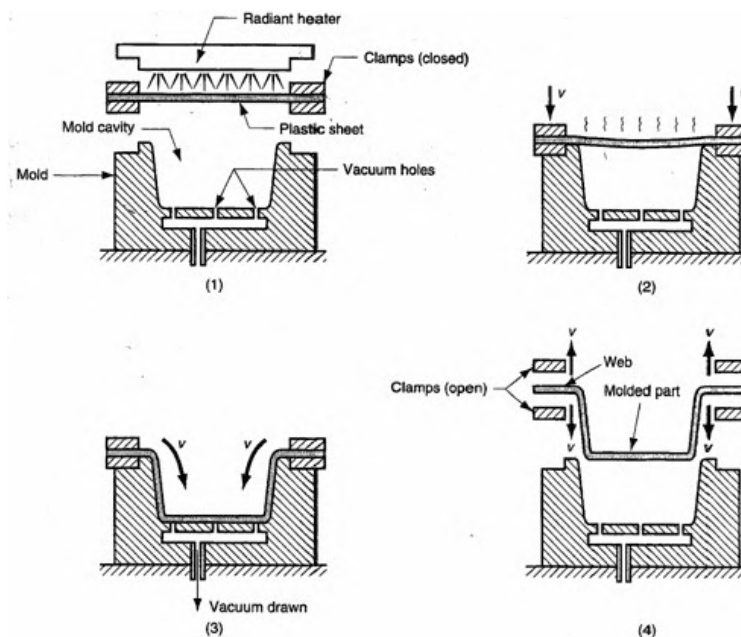


Ilustración 2: Secuencia fabricación por termoformado al vacío (Fuente: [4])

Termoformado a presión

Se combina vacío en la parte inferior del molde con presión de aire comprimido (hasta 1 MPa) desde la parte superior. Esto permite un mejor copiado de los detalles finos del molde y una mayor calidad superficial. Esta técnica permite tolerancias más estrictas y acabados comparables al moldeo por inyección.

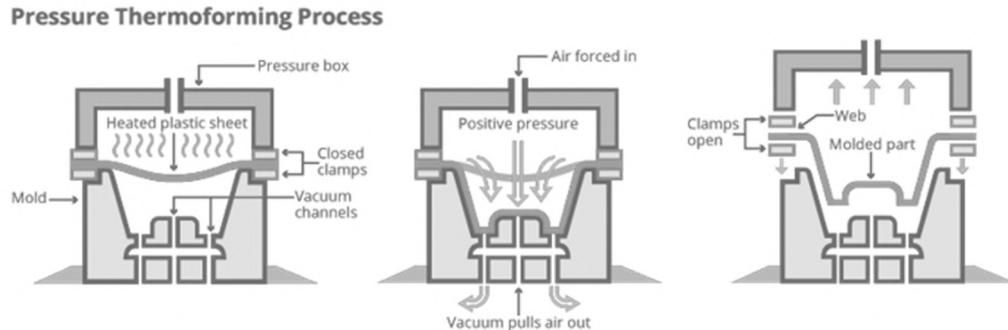


Ilustración 3: Secuencia fabricación por termoformado al vacío (Fuente: [5])

Termoformado en Caliente (*Hot Drape Forming*)

Consiste en calentar la lámina termoplástica y permitir que esta caiga sobre el molde, utilizando únicamente la gravedad o presión mecánica, sin la asistencia de vacío ni presión de aire. Es una técnica útil para fabricar piezas de gran tamaño y geometrías suaves, como cubiertas o revestimientos interiores. Aunque su precisión dimensional es limitada, ofrece ventajas en términos de simplicidad del equipo y bajo coste de operación.

Termoformado de doble lámina (*Twin-Sheet*)

Consiste en calentar dos láminas de forma simultánea, las cuales se presionan entre sí dentro de un molde doble. Permite fabricar piezas huecas o estructurales como conductos o depósitos, y se usa en aplicaciones donde se necesita rigidez sin peso añadido. Esta técnica requiere sincronización precisa y moldes más complejos.

Termoformado de burbuja libre (*Free Bubble*)

Se sopla aire dentro de la lámina para crear una burbuja libre antes de aplicar el vacío. Esta técnica mejora la uniformidad del espesor en piezas profundas, ya que permite un pre-estiramiento controlado de la lámina.

2.1.1.3 Enfriamiento

Una vez formada la pieza, se mantiene en el molde mientras se enfría. El enfriamiento se puede realizar con aire, agua o sistemas de refrigeración en el molde. El tiempo de enfriamiento depende del espesor del material y la conductividad térmica del molde.

2.1.1.4 Desmoldeo

Una vez enfriada la pieza, se separa del molde. En moldes con geometrías complejas o zonas con retención, pueden utilizarse sistemas neumáticos o de expulsión mecánica para facilitar este proceso y evitar daños en la pieza o el molde.

2.1.1.5 Recorte

Cuando la pieza está desmoldada. Se procede a eliminar el material sobrante de la pieza mediante corte mecánico con fresas, láser o cuchilla caliente.

2.1.2 MATERIALES Y LAMINAS TERMOPLÁSTICAS

2.1.2.1 Materiales comunes

Para los procesos de termoformado, se emplean principalmente láminas de termoplásticos. La elección del termoplástico a emplear dependerá de las propiedades necesarias para el uso de la pieza final. En la Tabla 1 se resumen algunos de los materiales más empleados junto con sus propiedades, aplicaciones comunes, y el rango de temperaturas a la que se suele realizar el termoformado.

Tabla 1: Materiales empleados en procesos de termoformado (Elaboración propia en base a distintas referencias)

Material	Propiedades	Aplicaciones comunes	Temperatura de Termoformado (°C)	Ref.
ABS Acilonitrilo Butadieno Estireno	Alta resistencia al impacto, buena estabilidad	Blísteres industriales, carcasas protectoras	120-180	[7]
PS Poliestireno	Buena rigidez, fácil de moldear, bajo coste	Envases alimentarios, blísteres de cosmética	120-150	[7]
PETG Tereftalato de polietileno modificado con glicol	Transparente, buena resistencia química y térmica	Blísteres de cosmética y farmacéuticos	140-170	[8]
PVC Policloruro de vinilo	Buena resistencia química, sellable al calor	Interiores de automóviles, embalajes	120-160	[7]
PP Polipropileno	Alta resistencia química, resistencia a fatiga, flexible	Envases alimentarios, industriales	145-200	[7]
PC Policarbonato	Alta resistencia al impacto, transparencia, buena estabilidad dimensional	Piezas técnicas, cubiertas protectoras, elementos ópticos	180-230	[7]
HIPS Poliestireno de alto impacto	Buena resistencia al impacto, fácil de termoformar, económico	Embalajes industriales, piezas desechables	170-180	[7]

2.1.2.2 Tipos de láminas

El espesor de la lámina termoplástica es uno de los factores determinantes del proceso de termoformado, afectando a la selección del equipo como a los parámetros operativos (tiempo de calentamiento, temperatura y presión aplicadas). Las láminas se clasifican habitualmente en dos categorías principales: termoformado de lámina delgada (Thin Gauge) o termoformado de lámina gruesa (Heavy Gauge). En la Tabla 2 se presentan algunas de las principales diferencias entre las dos clasificaciones.

Tabla 2: Diferencias entre laminas gruesas y láminas delgadas (Fuente: [8])

	Lamina Gruesa	Lámina Fina
Espesor	1.5-9.5 mm	< 3mm
Alimentación del equipo	Láminas individuales	Rollos continuos
Materiales típicos	ABS, HDPE, PP	PET, PETG, PVC
Aplicaciones	Carcasas, pallets, bañeras, maletas	Blísteres cosméticos, envases alimentarios

2.1.3 VENTAJAS DEL TERMOFORMADO

El termoformado es una de las tecnologías más consolidadas en la transformación de material plásticos debido a una serie de beneficios técnicos, económicos y operativos que lo hacen atractivo para múltiples sectores industriales. A continuación, se detallan sus principales ventajas:

Reducción de costes: En comparación con otros métodos de fabricación, como sería la inyección de plásticos, el termoformado requiere moldes más simples y económicos, lo cual reduce significativamente la inversión inicial. Throne [2] estima que los costes de moldes para termoformado pueden ser entre 3 y 10 veces menores que los de inyección, dependiendo de la complejidad.

Flexibilidad de diseño: el proceso admite modificaciones de diseño con rapidez y bajo coste, lo que permite iteraciones ágiles en fases de desarrollo o personalización de productos.

Compatibilidad con una amplia gama de materiales: Se pueden emplear prácticamente todos los termoplásticos fácilmente, ofreciendo un amplio rango de propiedades mecánicas y estéticas.

Rapidez de producción: Los ciclos de fabricación son cortos, especialmente en líneas automatizadas, pudiendo producirse varias piezas por minuto.

Reducción de desperdicio: Aunque existe recorte posterior, el espesor de la lámina inicial se ajusta a las necesidades de la pieza final, reduciendo el volumen de material sobrante en comparación con procesos sustractivos.

2.1.4 LIMITACIONES DEL TERMOFORMADO

A pesar de sus múltiples ventajas, el proceso de termoformado presenta una serie de limitaciones técnicas que deben ser consideradas.

Menor precisión dimensional: En comparación con procesos como la inyección de plásticos, el termoformado puede presentar variaciones dimensionales mayores, especialmente si el control térmico no es homogéneo o si el molde carece de rigidez suficiente. Según Throne [3], estas variaciones pueden superar ± 1 mm en piezas grandes, dependiendo del diseño del molde y la calidad del vacío.

Desperdicio de material por recorte: Una característica inherente al proceso es la necesidad de recortar la pieza después del conformado, lo que genera un porcentaje de desperdicio que puede alcanzar el 30 % en geometrías complejas [9]. Aunque parte de este material puede ser reciclado, implicaría etapas adicionales en la línea de producción.

Limitaciones geométricas: El proceso es menos adecuado para reproducir detalles internos profundos, cortes negativos o paredes muy delgadas, debido al estiramiento desigual del material durante la conformación. Existe una pérdida significativa del espesor en algunas zonas de la pieza si no se emplea un pre-estiramiento adecuado.

Dependencia del tipo de material: Algunos termoplásticos como el policarbonato requieren condiciones de procesamiento muy controladas, lo que encarece la operación. Además, materiales con baja elongación a la rotura presentan riesgo de fisuración durante el proceso.

2.2 MECANIZADO EN MHCN

El mecanizado mediante MHCN (Máquinas-Herramienta de Control Numérico) es un proceso de fabricación sustractiva que utiliza herramientas de corte controladas automáticamente para remover material de una pieza en bruto hasta obtener la forma deseada. Esta tecnología es una evolución directa de los tornos y fresadoras tradicionales, con la diferencia de que en esta se emplea una programación digital de movimientos,

velocidad y profundidad de corte, que permite una fabricación más precisa, eficiente y repetible [10].

El proceso de mecanizado CNC puede involucrar múltiples operaciones, como fresado, torneado, taladrado y mandrinado, y puede realizarse en máquinas de 3, 4 o 5 ejes. La configuración multieje permite el acceso a superficies complejas desde varios ángulos sin necesidad de reposicionar la pieza, lo cual es especialmente útil para la fabricación de moldes con cavidades internas y superficies curvas.

2.2.1 HISTORIA DEL MHCN

El mecanizado por control numérico comienza tras la Segunda Guerra Mundial, cuando el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) desarrolló las primeras máquinas herramienta automáticas utilizando servomecanismos y tarjetas perforadas, en colaboración con la Fuerza Aérea de los Estados Unidos [11]. El objetivo era automatizar procesos de fabricación complejos que hasta entonces requerían gran habilidad manual. A partir de los años 60, estas máquinas fueron incorporando sistemas computarizados más avanzados, dando lugar al CNC (*Computer Numerical Control*), lo cual permitió una mayor flexibilidad, precisión y velocidad en la producción.

Durante los años 70 y 80, el MCNC se consolidó como una tecnología clave en la industria manufacturera global. La introducción de lenguajes estandarizados como el G-code, la integración con software de diseño CAD/CAM, y la aparición de centros de mecanizado multieje ampliaron su aplicación a sectores como la aeronáutica, automoción, moldes industriales y herramientas de precisión.

En la actualidad, este proceso de fabricación es uno de los pilares de la fabricación avanzada. En el caso específico del termoformado, la necesidad de moldes con alta estabilidad térmica, precisión dimensional y repetibilidad ha convertido al MCNC en una herramienta indispensable. Gracias a esta tecnología, es posible mecanizar moldes complejos a partir de bloques de aluminio o acero, logrando acabados superficiales adecuados.

2.2.2 ETAPAS DEL PROCESO

Las etapas principales del proceso son las siguientes:

Modelado CAD (Diseño Asistido por Computadora): Se genera un modelo tridimensional detallado de la pieza deseada utilizando software CAD como Siemens NX o SolidWorks.

Programación CAM (Fabricación Asistida por Computadora): El modelo se traduce en un programa de control (G-code) mediante software CAM, que define la secuencia de operaciones, parámetros de corte, selección de herramientas y trayectorias.

Simulación: Se realiza una simulación virtual para verificar colisiones, tiempos de ciclo y calidad de acabado, y luego se adapta el código para el controlador específico de la máquina.

Mecanizado: La pieza se fija en el banco de trabajo de la máquina CNC y comienza la operación controlada por ordenador. La precisión del corte depende del tipo de herramienta, velocidad de rotación (RPM), avance (mm/min) y profundidad de pasada.

Post-mecanizado: Una vez mecanizada la pieza, se inspecciona dimensionalmente con calibres, micrómetros u otros sistemas de medición. Pueden aplicarse procesos como anodizado, chorreado o recubrimientos funcionales si el molde lo requiere [12].

2.2.3 MATERIALES COMUNES PARA LA FABRICACIÓN DE MOLDES EN MHCN

La tecnología de MHCN permite trabajar con una amplia gama de materiales mecánicos y plásticos. Se escogerá el material a emplear en función de sus propiedades térmicas, mecánicas y maquinabilidad. La elección de este material influye directamente en la vida útil del molde, la calidad de la pieza final y la eficiencia del proceso de fabricación. En la Tabla 3 se resumen algunos de los materiales que se emplean comúnmente en la fabricación de moldes para termoformado en MHCN con sus propiedades relevantes.

Tabla 3: Materiales comúnmente empleados para la fabricación de moldes por CNC para termoformado
(Elaboración propia en base a distintas referencias)

Material	Propiedades	Aplicaciones comunes	Ref.
Aluminio (6061, 7075)	Alta conductividad térmica (170–200 W/m·K) Buena maquinabilidad Baja densidad	Moldes de termoformado de media duración	[13]
Acero (AISI P20, 1045, H13)	Alta dureza Buena resistencia al desgaste Admite tratamiento térmico	Moldes de alta producción y mayor vida útil	[12]
Cobre-berilio / Latón	Conductividad térmica superior (>250 W/m·K) Buena resistencia mecánica	Inserciones térmicamente exigentes	[10]
Termoplásticos técnicos (PA6, POM)	Fácil mecanizado Bajo coste Baja resistencia térmica (<100 °C)	Moldes de validación o prototipos	[13]

Para este caso de uso, el aluminio destaca por su buen balance entre coste, conductividad térmica u fácil mecanizado. Permite realizar moldes complejos con alta calidad superficial y tiempos de ciclo reducidos, lo que mejora la eficiencia del proceso de termoformado y garantiza una buena estabilidad dimensional durante los ciclos térmicos repetido [13].

Por otro lado, los aceros como el acero P20 y el H13 son utilizados cuando se requieren moldes con una vida útil más larga, mayor resistencia al desgaste o compatibilidad con presiones más altas, aunque a un coste de mecanizado más elevado y tiempos de producción más largos [12]. Los termoplásticos mecanizables, si bien no ofrecen la misma durabilidad, son útiles para pruebas de concepto y reducen significativamente el coste de iteración en fases tempranas del diseño.

2.2.4 VENTAJAS DEL MECANIZADO CNC

El mecanizado CNC ofrece una serie de ventajas significativas cuando se utiliza para la fabricación de moldes destinados al termoformado.

Alta precisión: Las máquinas CNC modernas pueden alcanzar tolerancias de ± 0.01 mm o incluso inferiores, especialmente en sistemas de alta velocidad con control de vibraciones y compensación térmica. Esta precisión es crucial para garantizar que el molde tenga

superficies perfectamente planas o curvas según especificaciones, lo que se traduce en piezas termoformadas uniformes y con menos defectos [12].

Repetibilidad y consistencia: La automatización del proceso mediante códigos G garantiza la capacidad de producir múltiples moldes idénticos con mínima desviación entre lotes. Esto es esencial en contextos donde se requiere una producción estandarizada, como en series de componentes automotrices [13].

Acabado superficial: El mecanizado de alta velocidad permite alcanzar acabados con rugosidades inferiores a $Ra\ 0.8\ \mu m$ sin necesidad de tratamientos adicionales. Esto es especialmente importante en moldes donde se busca transmitir una textura específica a la superficie de la pieza termoformada [10].

2.2.5 LIMITACIONES DEL MECANIZADO CNC

A pesar de sus múltiples ventajas, el mecanizado CNC presenta también ciertas limitaciones que deben considerarse durante la fase de diseño y producción de moldes:

Costes iniciales elevados: las máquinas de MHCN de 3 a 5 ejes pueden tener un coste inicial elevado, superando los 100.000 € en configuraciones industriales con sistemas de refrigeración, husillos de alta velocidad y cambiadores automáticos de herramientas. A esto se suman los gastos asociados a la adquisición de herramientas de corte, licencias de software CAD/CAM y formación especializada del personal [13].

Residuos: El mecanizado es un proceso sustractivo que genera una considerable cantidad de virutas metálicas. Aunque el material puede reciclarse, esto implica pasos adicionales de gestión de residuos y pérdida de materia prima en comparación con procesos aditivos.

Limitación de geometrías internas complejas: Cavidades con geometrías muy cerradas, ángulos negativos o estructuras internas intrincadas requieren herramientas especiales o múltiples configuraciones, lo que incrementa el tiempo de mecanizado y el riesgo de errores.

2.3 *FABRICACIÓN ADITIVA*

La fabricación aditiva, comúnmente conocida como la impresión 3D, representa un conjunto de tecnologías que permiten la creación de objetos tridimensionales mediante la deposición sucesiva de material capa por capa. A diferencia del proceso de mecanizado explicado anteriormente, la impresión 3D añade material sólo donde es necesario, convirtiéndose en una alternativa eficiente en términos de material y flexibilidad de diseño. En el contexto de la fabricación de moldes para termoformado, la impresión 3D ha emergido como una solución cada vez más utilizada, especialmente en prototipos, gracias a su capacidad para reducir tiempos y costes en las fases iniciales del desarrollo.

2.3.1 HISTORIA DE LA FABRICACIÓN ADITIVA

La fabricación aditiva, surgió en la década de 1980 con la invención de la estereolitografía (SLA) por Charles Hull en 1983 [14]. Esta tecnología supuso una revolución al permitir la creación de objetos tridimensionales a partir de un modelo digital, mediante la adición capa por capa de material. A partir de ahí, surgieron otras tecnologías clave como el *Fused Deposition Modeling* (FDM) desarrollado por Scott Crump en 1989 y el *Selective Laser Sintering* (SLS), ambas ampliamente adoptadas en aplicaciones industriales [15].

Inicialmente, esta técnica se implementó para hacer prototipos de manera rápida pero la impresión 3D ha evolucionado hacia aplicaciones funcionales, incluyendo herramientas y moldes. Su aplicación en la fabricación de moldes para termoformado comenzó a ganar interés a partir de la década de 2010, cuando las impresoras comenzaron a ofrecer mayor precisión y materiales más resistentes térmicamente [16]. En el contexto del termoformado, la impresión 3D permite fabricar moldes de forma rápida y económica.

2.3.2 TECNOLOGÍAS COMUNES DE IMPRESIÓN 3D PARA LA FABRICACIÓN DE MOLDES DE TERMOFORMADO

Existen varias tecnologías de impresión 3D. La elección de la tecnología de impresión 3D para fabricar moldes de termoformado depende de factores como la geometría requerida, la

temperatura de trabajo del polímero a conformar, el coste del molde, la precisión y la duración esperada. A continuación, se analizan con mayor profundidad las principales tecnologías que se suelen emplear para la fabricación de moldes de termoformado mediante fabricación aditiva.

2.3.2.1 Modelado por Deposición Fundida (FDM)

El Modelado por Deposición Fundida (FDM, por sus siglas en inglés), es una tecnología de fabricación aditiva que ha experimentado un crecimiento exponencial desde su invención. Este proceso de fabricación se basa en la extrusión controlada de un filamento termoplástico a través de una boquilla calentada. El material se deposita capa por capa sobre una cama de construcción. La solidificación del material se produce mediante enfriamiento, resultando en una pieza sólida tridimensional.

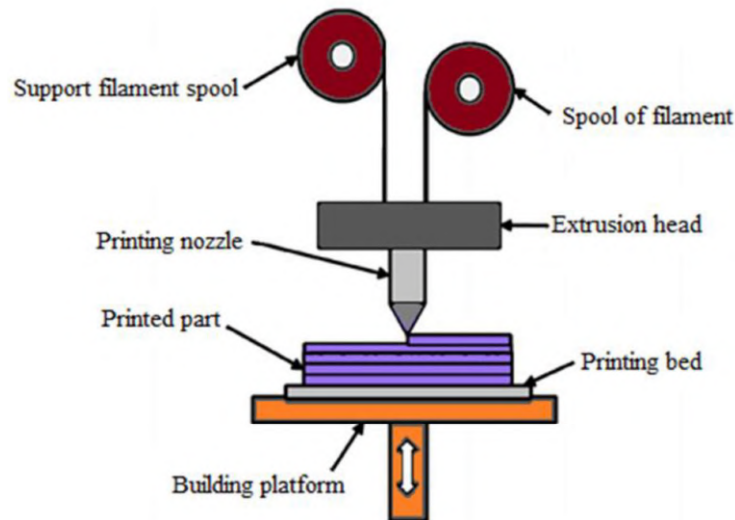


Ilustración 4: Esquemática del proceso de FDM (Fuente: [17])

La calidad de la impresión depende significativamente de variables como la temperatura de boquilla, la velocidad de extrusión y el diámetro del filamento. Cada material debe alcanzar una temperatura lo suficientemente alta como para pasar del estado sólido al estado viscoelástico fundido, lo que le permite fluir de forma controlada y adherirse correctamente a la capa anterior. Alcanzar esta temperatura garantiza la correcta deposición, cohesión y estabilidad dimensional de cada capa durante la fabricación aditiva.

La boquilla se desplaza a lo largo de los ejes X, Y, y Z mediante motores paso a paso controlados numéricamente.

La adherencia interlaminar es crítica para la resistencia estructural de la pieza. Parámetros como la temperatura de la base, la velocidad de enfriamiento y la altura de capa influyen directamente en la cohesión entre capas y, por tanto, en la integridad mecánica de la pieza final [18].

Materiales

Esta tecnología trabaja principalmente con materiales termoplásticos debido a su facilidad de extrusión y buenas capacidades térmicas. No obstante, la versatilidad de la tecnología FDM permite el uso de distintos materiales de ingeniería más avanzados, como policarbonatos (PC), materiales compuestos o reforzados con fibra de carbono o vidrio. Sin embargo, para emplear este tipo de materiales a menudo se requieren de impresoras especializadas o procesos adicionales.

En la Tabla 4 se resumen algunos de los distintos materiales comúnmente empleados en la fabricación de moldes mediante FDM y sus respectivos rangos de temperatura de extrusión, su temperatura vítrea, y características clave. Alcanzar estos rangos de temperatura garantiza la correcta deposición, cohesión y estabilidad dimensional de cada capa durante la fabricación aditiva.

Tabla 4: Materiales empleados para la fabricación de moldes mediante FDM (Fuente: [19])

Material	Temperatura de extrusión (°C)	Temperatura de Transición vítrea (°C)	Características
PLA	180–220	60	Biodegradable, fácil de imprimir
ABS	220–250	105	Resistencia al impacto y al calor, requiere cama cerrada
PETG	220-250	80	Buena resistencia química y térmica

Ventajas y Desventajas del FDM

Una de las principales ventajas del FDM es su bajo coste de entrada, tanto en maquinaria como en materiales, lo que lo convierte en una opción accesible para universidades, centros tecnológicos y pequeñas empresas. Su facilidad de implementación, junto con la amplia disponibilidad de impresoras y filamentos, permite a los usuarios producir piezas de forma rápida sin requerir una infraestructura industrial compleja. Esto resulta especialmente útil en la fase de prototipado, donde se necesitan iteraciones ágiles y económicas. Además, para piezas de tamaño medio o pequeño, el FDM ofrece un tiempo de producción razonable y un control aceptable sobre las formas geométricas.

Sin embargo, presenta varias limitaciones importantes cuando se considera para la producción de moldes funcionales. La resolución superficial obtenida mediante FDM es generalmente inferior a la de otras tecnologías aditivas, lo que obliga a realizar procesos de post-procesado como lijado, recubrimiento o barnizado para lograr acabados aceptables.

En cuanto a sus propiedades térmicas, los materiales comunes de FDM, como PLA y PETG, no alcanzan la resistencia térmica necesaria para soportar múltiples ciclos de termoformado con materiales que requieren temperaturas elevadas. Asimismo, la precisión dimensional puede verse afectada si la impresora no está correctamente calibrada o si se utilizan parámetros de impresión inadecuados, lo que puede comprometer la calidad del molde resultante.

2.3.2.2 Estereolitografía (SLA)

La Estereolitografía (SLA), una de las tecnologías pioneras en el ámbito de la fabricación aditiva, se fundamenta en el principio de fotopolimerización selectiva de resinas líquidas mediante luz ultravioleta (UV). El proceso de SLA consiste en solidificar selectivamente una resina líquida mediante la exposición controlada a un haz de luz ultravioleta que provoca la reacción química de los componentes de la resina (monómeros y oligómeros), generando una red polimérica sólida capa por capa [20].

Este método emplea un sistema óptico, generalmente un láser o un proyector digital, que traza el contorno de cada capa del objeto a imprimir sobre la superficie de la resina contenida en un tanque. A medida que cada capa es curada, una plataforma de construcción se mueve verticalmente permitiendo que una nueva capa de resina cubra la anterior, y el proceso se repite sucesivamente. Este principio de construcción capa por capa permite alcanzar resoluciones extremadamente altas, con capas tan delgadas como 25 micras, lo que convierte a la SLA en una de las tecnologías más precisas de fabricación aditiva disponibles en la actualidad [16]. Este método permite producir piezas con detalles finos, precisión dimensional y acabados superficiales más suaves que la tecnología FDM.

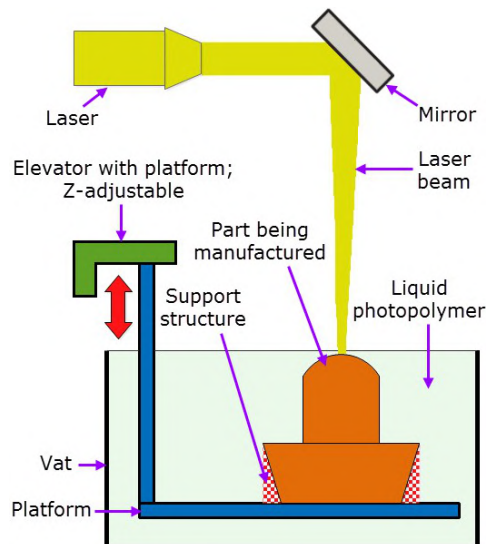


Ilustración 5: Esquemática del proceso de SLA (Fuente: [18])

Materiales:

Esta tecnología se basa en el uso de materiales termoestables, como las resinas fotopoliméricas líquidas. Una vez curadas con la luz ultravioleta, los polímeros forman estructuras rígidas que ya no pueden fundirse. La gama de resinas compatibles con SLA es extensa:

- **Resinas estándar:** Utilizadas para prototipos visuales o modelos de presentación. Presentan buena precisión y acabado, pero limitadas propiedades mecánicas.
- **Resinas técnicas:** Formuladas para ofrecer propiedades funcionales específicas como elasticidad, resistencia al impacto o dureza mecánica.

- **Resinas de alta temperatura:** Capaces de soportar temperaturas de deformación superiores a 230°C bajo carga, como la High Temp Resin de Formlabs. Son adecuadas para moldes de termoformado de alta exigencia térmica [22].

Ventajas y Desventajas del SLA

La estereolitografía se mantiene como una de las tecnologías aditivas más precisas y versátiles, siendo una opción óptima para la fabricación de moldes de alta precisión y piezas funcionales donde el detalle, el acabado y la estabilidad dimensional son prioritarios. Gracias a las resinas técnicas y de alta temperatura, es posible emplearlo para aplicaciones funcionales que requieren exigencias térmicas moderadas. No obstante, presenta retos técnicos y económicos, como el coste más elevado frente al FDM, la fragilidad relativa de ciertas resinas y la necesidad de procesos de post-procesado, como el curado UV y el lavado. Además, la velocidad de fabricación sigue siendo limitada, lo que restringe su uso en entornos de producción en serie. Las líneas actuales de investigación se enfocan en optimizar las resinas, automatizar el post-procesado.

2.3.2.3 Sinterizado Selectivo por Láser (SLS)

El sinterizado selectivo por láser (SLS) es una tecnología de fabricación aditiva que permite la creación de piezas tridimensionales a partir de polvo termoplástico, el cual es sinterizado capa por capa mediante la acción de un láser de alta potencia. Una fina capa de polvo termoplástico (por ejemplo, PA12 o Nylon) se extiende sobre una plataforma de construcción. A continuación, un láser escanea y sinteriza selectivamente las áreas correspondientes a la geometría de la pieza, elevando la temperatura del material justo por debajo de su punto de fusión para que las partículas se fusionen entre sí. Una vez completada cada capa, la plataforma desciende y se aplica una nueva capa de polvo, repitiendo el proceso capa por capa hasta completar la pieza [23].

Una característica distintiva del SLS es que no requiere estructuras de soporte externas, ya que el polvo no sinterizado actúa como soporte natural durante la fabricación. Esto permite la producción de geometrías complejas, cavidades internas y piezas ensambladas.

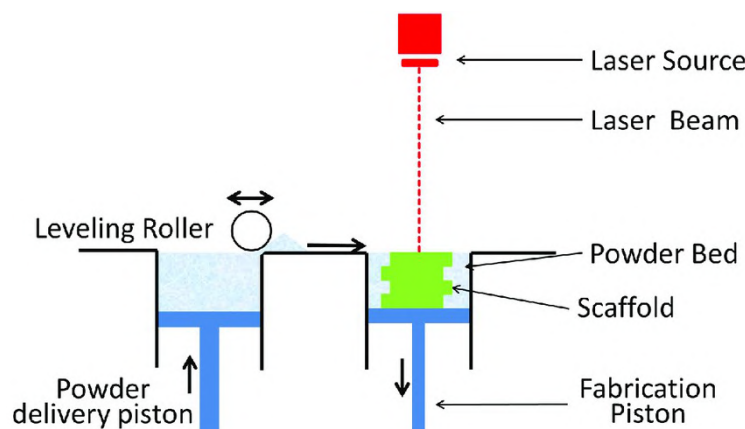


Ilustración 6: Esquemática del proceso de SLS (Fuente: [20])

Materiales

SLS utiliza materiales en polvo que presentan propiedades mecánicas avanzadas y buena resistencia térmica. Entre los más comunes se encuentra el PA12 (Poliamida 12), material termoplástico muy utilizado en aplicaciones industriales. Ofrece excelente resistencia al impacto, estabilidad dimensional, resistencia química y temperaturas de hasta 200 °C. Es el más empleado en moldes para termoformado por su comportamiento térmico y resistencia mecánica [25].

Tabla 5: Materiales empleados para la fabricación de moldes mediante SLS (Elaboración propia)

Material	Temperatura de trabajo (°C)	Características	Ref.
PA12 Poliamida	170-200	Excelente resistencia mecánica y térmica, buena estabilidad dimensional, ligera.	[21]
TPU Poliuretano Termoplástico	80-100	Flexibilidad, resistencia al desgaste, adecuado para piezas blandas y flexibles	[22]

Ventajas y Desventajas del SLS

Las principales ventajas del SLS incluyen su elevada resistencia mecánica y térmica, su estabilidad dimensional y la capacidad de imprimir sin soportes, lo que lo hace especialmente adecuado para geometrías complejas. Además, el acabado superficial puede ser aceptable para muchas aplicaciones industriales, aunque en ciertos casos puede requerirse post-procesado (chorreado, recubrimiento, lijado).

Sin embargo, esta tecnología presenta algunas limitaciones relevantes. El coste de los equipos de SLS industriales suele ser elevado, a menudo superando los 100.000 €, lo que limita su adopción a grandes empresas o centros tecnológicos. El proceso también genera residuos de polvo no sinterizado que, si bien puede ser reciclado parcialmente, requiere manejo y control adecuados para evitar contaminaciones cruzadas o pérdida de calidad en lotes futuros.

2.3.2.4 Multi Jet Fusion (MJF)

La tecnología Multi Jet Fusion (MJF) es un proceso de impresión 3D desarrollado por HP que pertenece a la familia de la fabricación aditiva por lecho de polvo. A diferencia de otras técnicas similares como SLS (sinterizado selectivo por láser), MJF utiliza agentes químicos y calor dirigido para crear las piezas capa a capa con alta velocidad y precisión [27].

El funcionamiento básico de esta tecnología puede resumirse en los siguientes pasos:

- **Extensión del polvo:** Se deposita una fina capa de polvo de material termoplástico (normalmente poliamida PA12) sobre una plataforma.
- **Inyección de agentes:** Un cabezal de impresión recorre la superficie e inyecta selectivamente dos tipos de agentes:
 - Un agente de fusión sobre las zonas donde se desea que el polvo se funda.
 - Un agente de detallado en los bordes de la geometría para mejorar la definición.
- **Aplicación de calor:** Una lámpara térmica pasa sobre la capa, activando los agentes inyectados. El polvo donde se ha aplicado el agente de fusión se funde selectivamente, mientras que el resto permanece intacto.
- **Repetición del proceso:** El ciclo se repite capa a capa hasta formar la pieza completa.

Una vez finalizado el proceso, la pieza se deja enfriar dentro del bloque de polvo antes de retirarla. El polvo no fusionado puede reutilizarse parcialmente en futuras impresiones.

Este sistema permite obtener piezas con buena precisión, propiedades mecánicas homogéneas y una alta productividad, ya que no necesita estructuras de soporte y puede imprimir múltiples piezas a la vez en el volumen de trabajo.

Materiales

La tecnología Multi Jet Fusion (MJF) trabaja principalmente con polvos termoplásticos, que deben tener buena fluidez, estabilidad térmica y capacidad de sinterización controlada. Aunque el PA12 (poliamida 12) es el material más extendido y optimizado para este proceso, existen actualmente diversas opciones desarrolladas para adaptarse a distintas necesidades funcionales o mecánicas.

- **PA12 (Poliamida 12):** el más común. Ofrece una buena rigidez, resistencia al impacto, precisión dimensional y estabilidad térmica. Es adecuado para piezas funcionales que requieren comportamiento mecánico consistente y buen acabado dimensional. Además, permite un cierto grado de reutilización del polvo no fusionado.
- **TPU (Poliuretano termoplástico):** material flexible y elástico, utilizado para piezas que requieren deformación controlada, como juntas, amortiguadores o componentes biomecánicos.
- **PA12 cargado con fibra de vidrio o carbono:** formulaciones reforzadas que mejoran la rigidez, resistencia a la deformación térmica y la estabilidad dimensional, lo que las hace útiles en aplicaciones técnicas o estructurales. El refuerzo también implica mayor abrasividad y rugosidad superficial.

Cada material requiere una gestión específica del entorno de impresión, incluyendo condiciones de temperatura, estrategia de empaquetado y tasas de renovación del polvo. Las posibilidades actuales de MJF la sitúan como una tecnología versátil en el campo de la fabricación de piezas funcionales, tanto para prototipos avanzados como para series cortas de producción.

Ventajas y Desventajas del MJF

Entre las principales ventajas de la tecnología MJF cabe destacar su alta productividad, al permitir la fabricación simultánea de múltiples piezas sin necesidad de estructuras de soporte. Las piezas obtenidas presentan buenas propiedades mecánicas, con una resistencia considerable a tracción e impacto, y una precisión dimensional constante, incluso en geometrías complejas. Además, el proceso permite reutilizar una parte del polvo no fusionado, lo que contribuye a reducir el desperdicio de material.

Sin embargo, MJF también presenta una serie de limitaciones relevantes. El acabado superficial rugoso es inherente al proceso y puede requerir tratamientos adicionales si se desea una estética cuidada o una mejor reproducción de detalle. Por otro lado, el coste tanto de los equipos como de los materiales es elevado, lo que limita su competitividad en aplicaciones de bajo volumen. También existen restricciones geométricas, ya que las cavidades cerradas pueden dificultar la evacuación del polvo sinterizado, y la gestión del proceso requiere un entorno más controlado que en otras tecnologías de impresión 3D.

2.3.3 VENTAJAS DE LA FABRICACIÓN ADITIVA

La impresión 3D aplicada a la fabricación de moldes para termoformado presenta una serie de ventajas significativas frente a los métodos tradicionales.

Flexibilidad geométrica: A diferencia de los métodos sustractivos, la impresión 3D permite fabricar moldes con geometrías complejas, cavidades internas, texturas personalizadas o canales de vacío integrados. Esto abre la puerta a diseños funcionales más eficientes, sin necesidad de herramientas adicionales ni ensamblajes complicados.

Acceso a la tecnológica: Tecnologías como FDM, SLA o incluso SLS en versiones compactas están hoy al alcance de universidades, centros de innovación, startups y pymes. Esta democratización de la fabricación permite experimentar con nuevas ideas sin grandes barreras económicas ni logísticas, y favorece entornos de innovación distribuida.

Rapidez en el desarrollo: La fabricación aditiva permite iterar diseños de forma ágil, reduciendo drásticamente los tiempos de espera entre fases de diseño, validación y prueba. Esto acorta significativamente los ciclos de desarrollo de producto.

2.3.4 LIMITACIONES DE LA FABRICACIÓN ADITIVA

A pesar de sus ventajas, la fabricación aditiva aplicada a moldes de termoformado presenta una serie de limitaciones importantes que deben considerarse al evaluar su viabilidad para determinadas aplicaciones industriales.

Durabilidad limitada: La resistencia al desgaste térmico y mecánico de los moldes impresos en 3D suele ser inferior a la de los moldes mecanizados en metal, especialmente en procesos donde el molde está expuesto repetidamente a temperaturas elevadas y ciclos de presión. Esto restringe su uso prolongado en líneas de producción automatizadas o en la fabricación de series largas, donde se requiere una estabilidad dimensional sostenida.

Post-procesado necesario: En la mayoría de las tecnologías aditivas, especialmente FDM y SLS, es necesario realizar operaciones de acabado posterior para mejorar la superficie del molde. Esto incluye lijado, recubrimientos con resinas epoxi, barnizado o incluso mecanizado puntual. El post-procesado busca tanto mejorar el acabado superficial como aumentar la resistencia al desgaste térmico y mecánico, pero implica una inversión adicional de tiempo y recursos.

Propiedades térmicas y mecánicas inferiores: Los materiales poliméricos utilizados en impresión 3D por lo general presentan menor conductividad térmica y resistencia estructural comparados con metales como el aluminio. Esto impacta la eficiencia del proceso de termoformado, ya que los moldes pueden tardar más en enfriarse o deformarse bajo condiciones de carga térmica y presión elevadas, disminuyendo así la calidad y la repetibilidad del proceso.

Capítulo 3. DISEÑO DEL CASO DE ESTUDIO

3.1 *PIEZA SELECCIONADA*

La pieza final fabricada mediante termoformado es una pieza de empaquetado. En concreto, un blíster de uso popular para empaquetados cosmetológicos, el cual podrá albergar:

- Un frasco rectangular de perfume
- Un envase cilíndrico de crema

Se trata de un ejemplo representativo de envase industrial, fabricado habitualmente por termoformado debido a su bajo coste y rapidez de producción.

Este tipo de aplicación es idóneo para el estudio comparativo de moldes ya que combina zonas planas y cavidades de distinta profundidad y geometría, lo que permite estudiar cómo se comporta el material termoplástico bajo distintas condiciones de deformación durante el termoformado. Además, exige un nivel elevado de detalle y calidad superficial dado que este tipo de envase está orientado al consumidor final y debe ofrecer una presentación cuidada.

En este contexto, se ha optado por diseñar cavidades de forma cilíndrica y prismática rectangular, por tratarse de formas geométricas básicas y contrastadas que permiten estudiar un amplio abanico de fenómenos relevantes en el termoformado.

- La cavidad cilíndrica representa una forma con simetría radial, que permite evaluar cómo se distribuye el material de forma uniforme alrededor de una curvatura continua. Es útil para estudiar el comportamiento del material frente a estiramiento controlado, adherencia en superficies curvas, y efectos de succión uniforme. Además, su base circular facilita la detección de asimetrías térmicas o de vacío.
- La cavidad prismática rectangular, por su parte, introduce caras planas, vértices y aristas redondeadas, que suponen un mayor reto desde el punto de vista del termoformado. En especial, las transiciones entre caras perpendiculares tienden a generar tensiones internas que pueden derivar en arrugas, pérdida de espesor o

dificultades en el desmoldeo. Esta forma permite estudiar fenómenos como el *webbing* (formación de pliegues o bolsas no deseadas del material debido a una distribución desigual durante el conformado) y la capacidad de copia de detalles angulares.

La combinación de ambas geometrías en una misma pieza permite obtener una visión más completa del desempeño del molde, tanto en zonas de flujo progresivo y homogéneo como en zonas de flujo complejo y ángulos cerrados. Así, se convierte en un banco de pruebas versátil para validar y comparar distintas tecnologías de fabricación de moldes, como la impresión 3D o el mecanizado, en condiciones técnicas variadas pero representativas del entorno industrial.

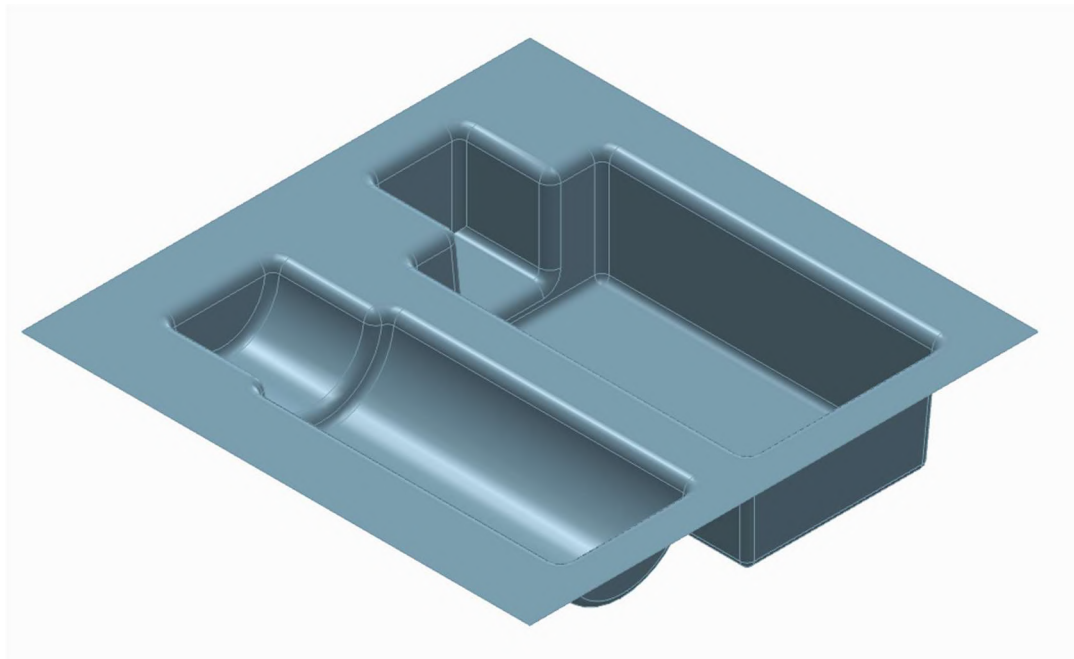


Ilustración 7: Pieza de estudio (Elaboración propia)

3.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA PIEZA

La propuesta de pieza inicial es un blíster de geometría cuadrada, con dimensiones generales de 140x140 mm y una altura máxima de 30 mm. La cavidad cilíndrica tiene un diámetro de aproximadamente 36 mm y altura 80 mm, mientras que el cuello tiene un diámetro de

aproximadamente 30 mm y altura 32 mm. La cavidad rectangular tiene una base de 50 mm, altura 90 mm, y profundidad 30 mm. La cavidad para el tapón del perfume de 24 x 25 mm, con una profundidad de 24 mm.

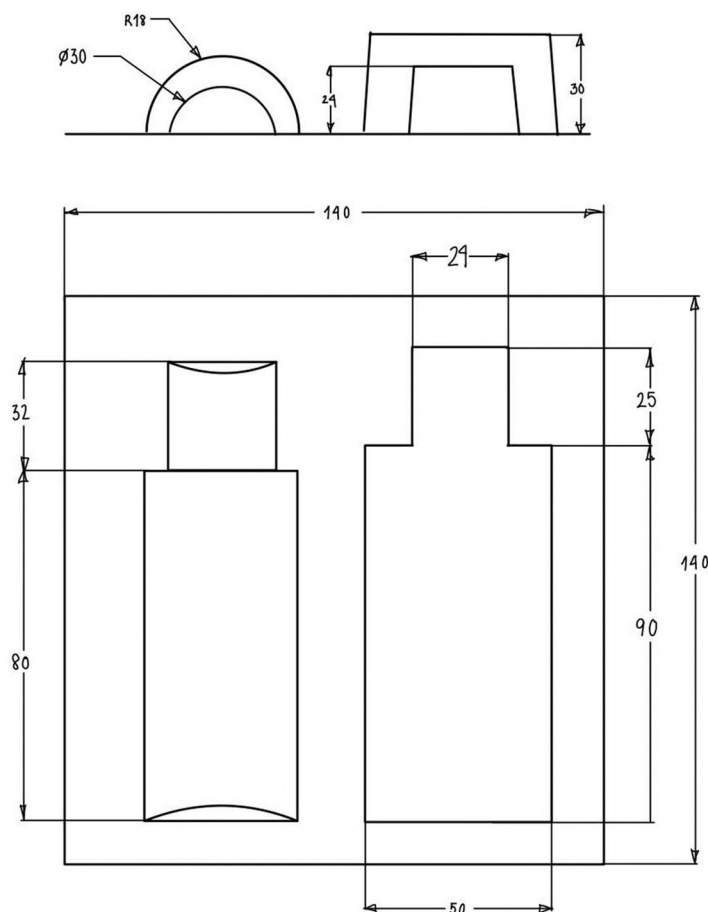


Ilustración 8: Croquis del blíster (Elaboración propia)

3.2 PARÁMETROS TÉCNICOS DE DISEÑO

Los parámetros geométricos del diseño del molde tienen un impacto directo en la calidad del termoformado, la facilidad de desmoldeo y la aparición de defectos. A continuación, se detallan los principales criterios aplicados en el diseño de las cavidades del blíster objeto de estudio, obteniendo el resultado mostrado en la Ilustración 7.

3.2.1 ÁNGULOS DE DESMOLDEO

Se ha aplicado un ángulo estándar de 3° en todas las paredes verticales de las cavidades. Este valor facilita el desmoldeo de las piezas termoformadas, especialmente en configuraciones de molde hembra, donde el contacto entre pieza y cavidad es más extenso. El ángulo también contribuye a evitar marcas o desgarros durante la extracción.

3.2.2 RADIOS DE REDONDEO

Las transiciones geométricas han sido diseñadas con radios de 2 mm en zonas cóncavas (interiores) y 3 mm en zonas convexas (exteriores). Estos valores son habituales en aplicaciones de termoformado, ya que permiten un equilibrio entre la fidelidad del detalle geométrico y la fluidez del material durante el proceso, reduciendo el riesgo de concentraciones de tensiones o formación de arrugas.

3.2.3 AGUJEROS DE VACÍO

En las primeras versiones del molde no se incluirán agujeros de vacío, ya que se pretende evaluar inicialmente la calidad del conformado sin asistencia localizada de succión. En función de los resultados obtenidos en los ensayos preliminares, se valorará su incorporación posterior, tanto en lo referente a su número como a su ubicación y diámetro. Esta fase experimental permitirá determinar de forma empírica si son necesarios para mejorar el acabado en zonas profundas o de geometría compleja, y optimizar así el diseño del molde.

3.3 DISEÑO DE MOLDES

Para la fabricación del blíster, se estudian dos tipos de molde diferentes, molde macho y molde hembra, con el objetivo de analizar cómo influye la geometría del molde en el proceso de termoformado y en la calidad de la pieza final. Esta comparación es fundamental para identificar diferencias en el comportamiento del material, la aparición de defectos y la definición geométrica de las cavidades.

Ambos moldes se han generado a partir del modelo 3D del blíster diseñado en el software Solid Edge, siguiendo una metodología común: se parte de un bloque sólido al que se le sustrae la geometría del blíster, eliminando así el volumen que no forma parte del molde útil.

- En el caso del molde macho, se ha eliminado el contorno exterior del blíster, conservando únicamente el volumen que sobresale del plano base. De este modo, se obtiene un molde en positivo cuya geometría representa los cuerpos que sobresalen y sobre los cuales se deforma la lámina termoplástica por presión o vacío.
- En el caso del molde hembra, se ha eliminado el volumen que representa el blíster en su totalidad, generando una cavidad negativa en el bloque. Este molde simula la succión de la lámina hacia el interior de una cavidad, lo cual es típico en configuraciones de termoformado asistidas por vacío.

Al utilizar una misma pieza base para ambos tipos de molde, se garantiza la comparabilidad directa entre configuraciones bajo condiciones de ensayo equivalentes.

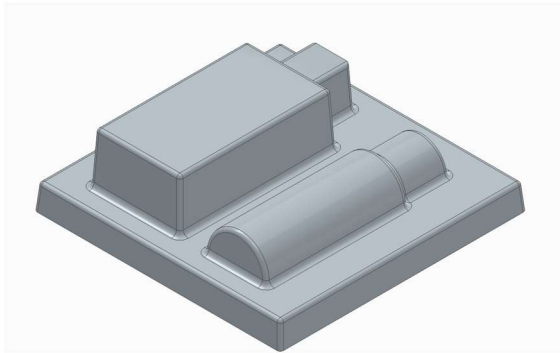


Ilustración 10: Molde Macho (Elaboración propia)

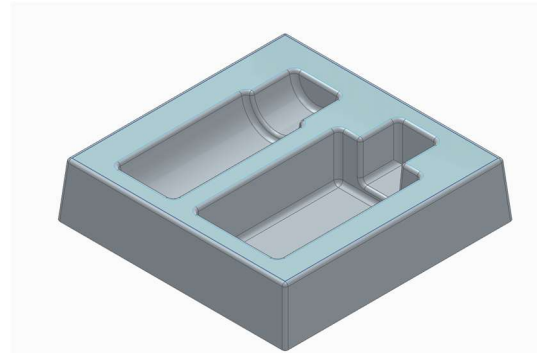


Ilustración 9: Molde Hembra (Elaboración propia)

Capítulo 4. FABRICACIÓN DE MOLDES CON TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D

Con el objetivo de validar el diseño geométrico del molde antes de su fabricación definitiva mediante mecanizado CNC, se ha realizado una fase preliminar basada en la fabricación de moldes utilizando distintas tecnologías de impresión 3D. Esta etapa inicial ha permitido disponer de moldes funcionales sobre los que verificar, de manera práctica, aspectos como la definición de detalles, la adecuación de dimensiones y geometrías, y la compatibilidad con el proceso de termoformado.

Durante esta fase, se han fabricado distintas versiones de moldes utilizando las tres tecnologías de impresión 3D disponibles. El objetivo principal de esta etapa no es aún la comparación entre tecnologías, sino la evaluación del proceso de fabricación aditiva en sí mismo, en relación con la geometría del molde y su viabilidad para ser utilizado en ensayos reales de termoformado.

Asimismo, esta fase ha permitido determinar qué parámetros de impresión son más adecuados para cada tecnología, así como los post-procesados necesarios (como lijado, granallado o curado adicional) para mejorar la funcionalidad del molde en contacto con láminas termoplásticas calientes.

4.1 ARCHIVOS DE IMPRESIÓN

Para proceder a la fabricación de los moldes mediante las tecnologías de impresión 3D, es necesario preparar los modelos digitales en un formato adecuado para su procesamiento por las distintas impresoras. A partir del modelo CAD original del molde (desarrollado en Solid Edge), se ha realizado una exportación a formato .STL empleando los siguientes parámetros de conversión de malla:

- Tolerancia de conversión: 0.01mm
- Ángulo de plano de superficie: 3.00°

Esta configuración ha permitido generar archivos con buena definición geométrica, especialmente en zonas curvas o de transición, sin comprometer la eficiencia del proceso de laminado.

Una vez obtenido el archivo, se ha de emplear un software de laminado específico para cada tecnología de impresión:

- Ultimaker Cura (versión 5.10.0) para impresiones 3D
- PreForm para impresoras SLA y MJF

Desde estas plataformas se definen los parámetros de impresión, incluyendo orientación del modelo, altura de capa, generación de soportes, etc.

Posteriormente, se ha llevado a cabo el proceso de segmentación (*slicing*), mediante el cual el modelo tridimensional se convierte en instrucciones capa a capa para la impresora. Este proceso permite estimar con precisión tanto el tiempo de impresión como el peso de material requerido, así como analizar visualmente la disposición de los soportes y prever posibles incidencias durante la fabricación.

Una vez finalizado el laminado, los archivos resultantes se han exportado en formato .GCODE, compatibles con las impresoras del laboratorio.

4.2 FABRICACIÓN MEDIANTE FDM

La primera fase de fabricación de moldes se llevó a cabo mediante tecnología FDM, utilizando la impresora Prusa i3 MK3S+, empleando filamento PLA. El molde corresponde a una versión macho.

4.2.1 COMPARACIÓN DE CONFIGURACIONES DE IMPRESIÓN

Con el objetivo de seleccionar los parámetros más adecuados para la fabricación del molde, se han probado distintas configuraciones e impresión. Las variables analizadas han sido principalmente:

- La resolución vertical (altura de capa)
- Orientación del modelo
- Tiempo estimado de fabricación
- Calidad superficial
- Cantidad y disposición de soportes generados

En primer lugar, se evaluó la opción de imprimir el molde en orientación horizontal (véase Ilustración 11) con el objetivo de eliminar por completo la necesidad de soportes y así reducir el tiempo de post-procesado. Esta configuración permitiría apoyar toda la base del modelo sobre la cama de impresión, generando una estructura más estable y eficiente desde el punto de vista del consumo de material auxiliar.

Sin embargo, tras analizar la distribución de capas y la proyección de superficies curvas, se observó que esta orientación presentaba una desventaja significativa en el acabado superficial, especialmente en la zona del cilindro. Al quedar su superficie lateral paralela al eje Z, el patrón de laminado generaba escalonamientos visibles entre capas, lo que afectaba directamente la calidad de la superficie. Esta rugosidad acumulada podría trasladarse al termoformado final, comprometiendo el resultado estético de la pieza.

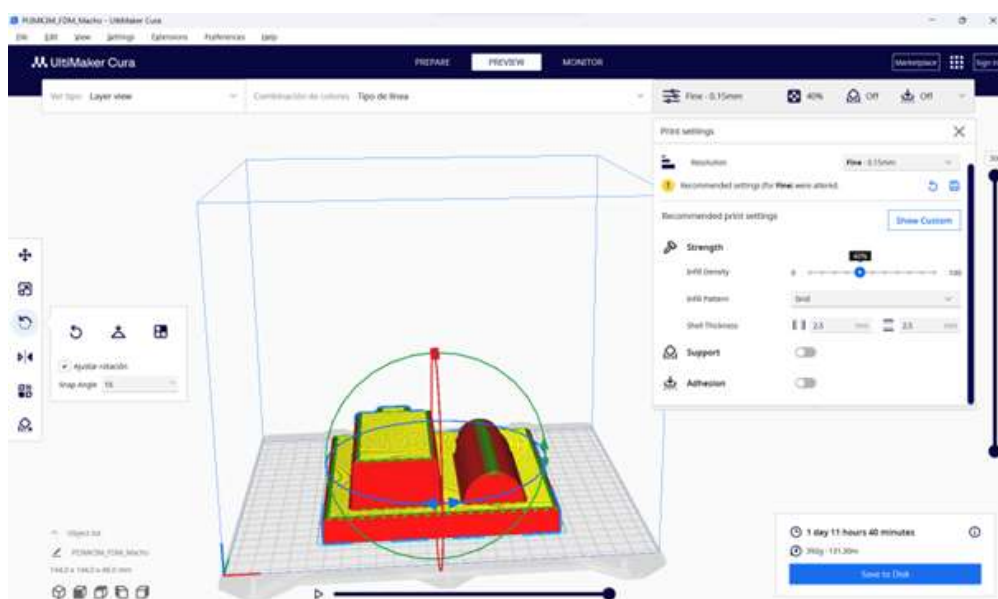


Ilustración 11: Configuración de impresión de molde FDM con orientación horizontal (Elaboración propia)

Tras descartar la orientación horizontal, se evaluaron distintas configuraciones en orientación vertical, manteniendo las cavidades principales en posición elevada. Esta disposición favorece un mejor acabado en las superficies visibles del molde, ya que la curvatura del cilindro queda alineada con el eje de impresión y las marcas de capa afectan menos al resultado. Como inconveniente, esta orientación requiere estructuras de soporte, especialmente bajo salientes, lo que incrementa el tiempo y la necesidad de post-procesado.

En la Tabla 6 se presentan los distintos perfiles de resolución evaluados durante la impresión del molde en orientación vertical, indicando el espesor de capa asociado a cada perfil y el tiempo estimado de fabricación. Como puede observarse, a medida que se reduce el espesor de capa, el tiempo de impresión aumenta de forma significativa. Para equilibrar la calidad superficial del molde con la eficiencia en tiempo de fabricación, se seleccionó finalmente la configuración Normal (0.15 mm), al considerarse una opción intermedia adecuada para los objetivos de esta fase del proyecto.

Tabla 6: Comparativa de tiempos de impresión y espesores de capa (Elaboración propia)

Resolución	Espesor de Capa	Tiempo de Impresión (h)
Extra Fino	0.06	82.8
Fino	0.10	39.4
Normal	0.15	26.5
Borrador	0.2	24.9

4.2.2 PARÁMETROS DE IMPRESIÓN PARA EL MOLDE DE PRUEBA

Una vez seleccionada la configuración óptima en términos de resolución y orientación, se definieron los parámetros finales de impresión para la fabricación del molde de prueba mediante tecnología FDM. Estos parámetros se han establecido con el objetivo de garantizar un equilibrio adecuado entre calidad superficial, resistencia estructural y tiempo de fabricación, tomando como base el perfil estándar “Normal” del software de laminado. En la Tabla 7 se recogen los parámetros finales de impresión.

Tabla 7: Parámetros de impresión primera versión del molde FDM (Elaboración propia)

Altura de Capa	0.15 mm (perfil estándar “Normal”)
Boquilla utilizada	0.4 mm
Espesor de perímetro	2.5 mm
Densidad de relleno	40%
Patrón de relleno	<i>Grid</i>
Estrategia de adhesión a base	<i>Brim</i>
Soportes	Generados automáticamente en modo <i>Everywhere</i> .

En la Ilustración 12 se muestra la vista previa de impresión, correspondiente a la configuración final. Puede observarse la disposición de las capas y los soportes generados automáticamente. En la Ilustración 13 se pudo observar el relleno empleado en patrón *Grid* con una densidad del 40%.

Para esta configuración, el tiempo estimado de fabricación es de 1 día y 2 horas y 29 minutos, y se prevé un consumo de 393 gramos de material, equivalentes a aproximadamente 131.71

metros de filamento PLA. Esta información resulta clave para planificar tanto los recursos como la duración del proceso de fabricación del molde.

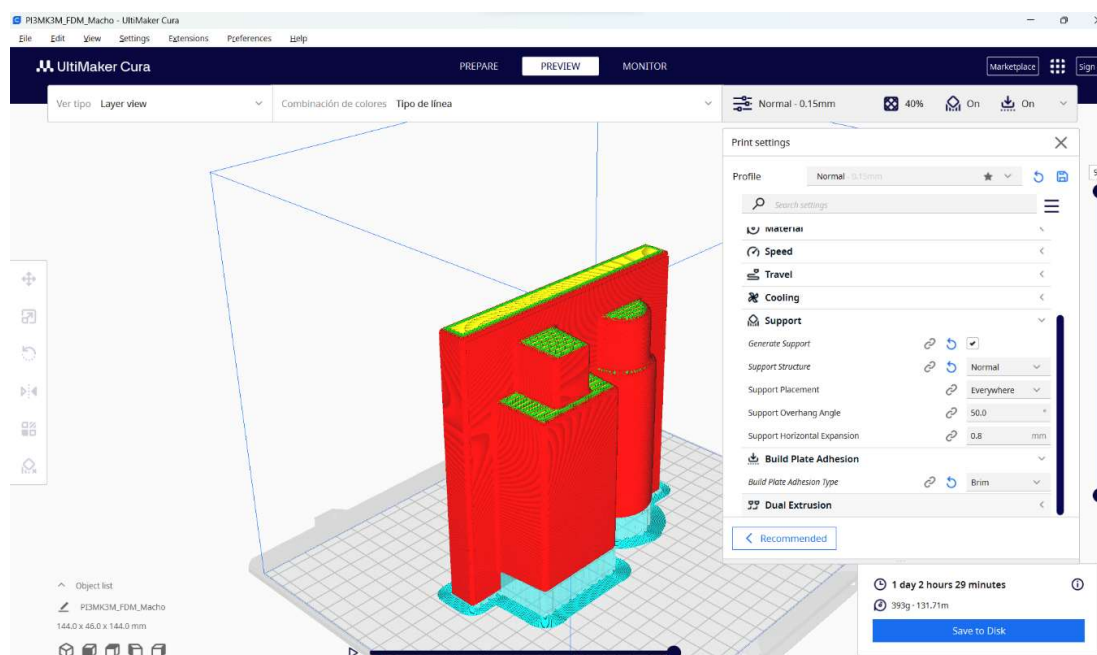


Ilustración 12: Configuración de impresión final del molde prueba FDM (Elaboración propia)

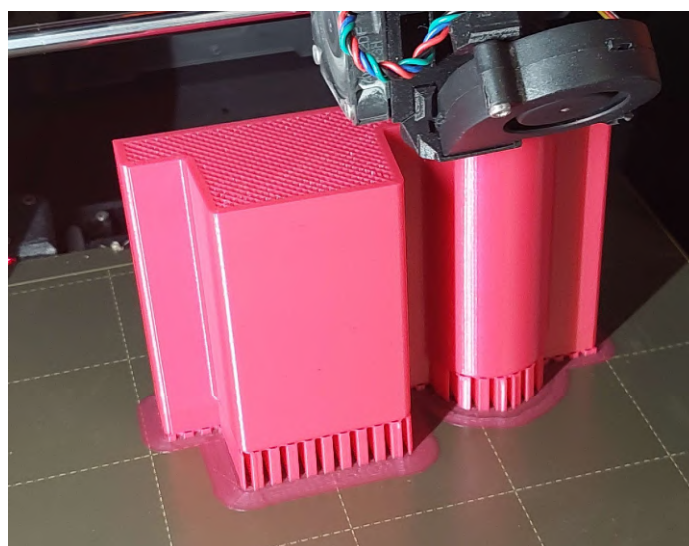


Ilustración 13: Relleno de molde prueba FDM (Elaboración propia)

4.2.3 RESULTADO DE LA IMPRESIÓN

La Ilustración 14 muestra el molde impreso en PLA. Puede observarse claramente la estructura de soportes generada automáticamente en las zonas de voladizo. Una vez retirados manualmente, quedan visibles las marcas en la superficie donde los soportes estaban adheridos, lo cual requiere un proceso de post-procesado adicional, como el lijado, para suavizar dichas zonas.

Para ello, se utilizaron diversas herramientas manuales y eléctricas (alicates, pinzas, espátulas, lijas y lijadora rotativa de precisión). Sin embargo, al tratarse de un proceso manual, existe cierto margen de error humano, especialmente durante el lijado, donde es fácil aplicar presión excesiva o eliminar más material del deseado. Este tipo de intervención puede, en algunos casos, afectar a la precisión dimensional o al acabado superficial del molde, por lo que se recomienda extremar las precauciones si se requiere una fidelidad geométrica elevada. En la Ilustración 15 se muestra el resultado del post-procesado.

Además, se aprecia de forma evidente la textura generada por la altura de capa, creando un efecto escalera, característica de la tecnología FDM. Estas líneas de impresión podrían traspasarse a la lámina termoformada.

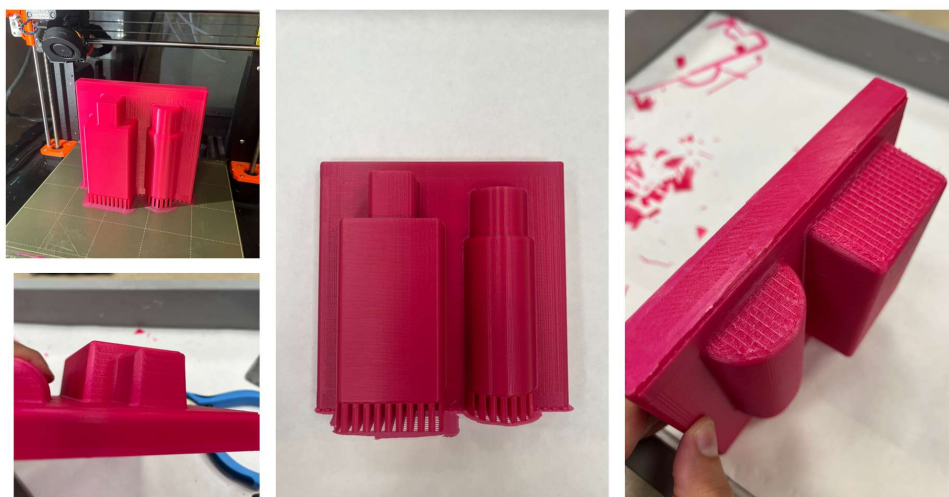


Ilustración 14: Resultado de la impresión del molde prueba FDM (Elaboración propia)



Ilustración 15: Resultado tras lijar la pieza (Elaboración propia)

4.3 FABRICACIÓN MEDIANTE SLA

Más adelante se procedió a hacer pruebas de impresión del molde hembra con la tecnología SLA, empleando resinas de Formlabs. Se emplearon dos resinas distintas:

- Resina Rigid 10K con la impresora Form 3, seleccionada por su alta rigidez, estabilidad dimensional y resistencia térmica.
- Resina Clear V4 con la impresora Form 3L, que permite fabricar moldes con buena definición superficial y facilita la inspección del molde.

4.3.1 PARÁMETROS DE IMPRESIÓN PARA EL MOLDE DE PRUEBA

La configuración de impresión incluyó la generación automática de soportes por parte del software PreForm, con los parámetros resumidos en la Tabla 8. Estos parámetros se seleccionaron para asegurar el equilibrio entre la resistencia mecánica durante el curado y la facilidad de eliminación de soportes. Una densidad de 0.80 ofrece una estructura de soporte robusta sin llegar a dificultar en exceso el post-procesado, mientras que un punto de contacto de 0.40 mm proporciona buena estabilidad sin dejar marcas demasiado profundas en la superficie del molde.

Tabla 8: Parámetros de impresión primera versión del molde SLA (Elaboración propia)

Tipo de base	<i>Full Raft</i>
Densidad de soporte	0.8
Tamaño de punto de contacto	0.4 mm

En cuanto a la orientación del modelo, se optó por inclinar el molde ligeramente respecto a todos sus ejes para evitar superficies completamente planas paralelas a la base de impresión, ya que estas pueden provocar problemas como succión de resina, deformaciones o curado irregular.

La Ilustración 16 muestra la configuración de la impresión de los moldes de prueba fabricados mediante SLA. Para esta configuración, el tiempo estimado de fabricación es de 15 horas y 12 minutos, y se prevé un consumo de 391,35 ml de material con 1748 capas.

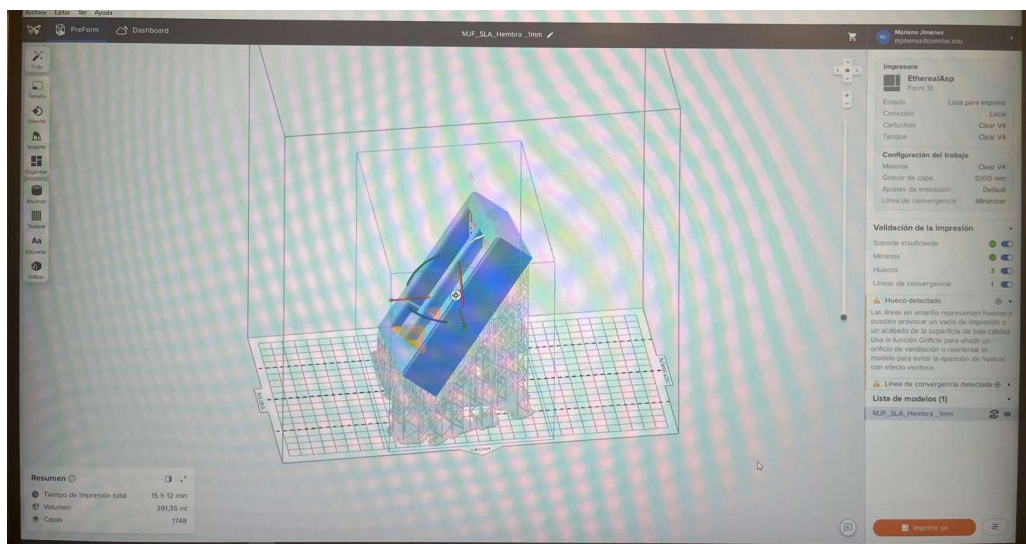


Ilustración 16: Configuración de impresión molde prueba SLA (Elaboración propia)

En el caso de la impresión con SLA, a diferencia de con la impresión FDM, no es recomendable la fabricación de piezas macizas, especialmente con piezas de volúmenes elevados. Una pieza sólida implicaría un elevado consumo de resina, tiempos de impresión muy prolongados y una mayor probabilidad de fallos durante el curado o post-procesado debido a tensiones internas acumuladas y a la dificultad de asegurar un curado uniforme en el interior.

Por este motivo, en el diseño del molde se ha optado por vaciar la zona interna no funcional, manteniendo un espesor constante de 5 mm en las paredes externas. Esta estrategia permite reducir significativamente el uso de material, minimizar deformaciones, acortar el tiempo de

impresión y facilitar el curado posterior, sin comprometer la funcionalidad estructural del molde durante el proceso de termoformado.

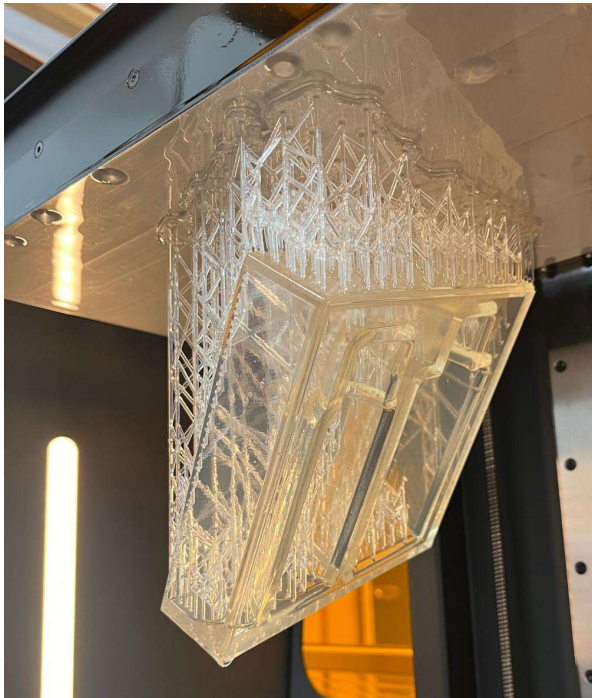
4.3.2 RESULTADO DE LA IMPRESIÓN

En un primer intento de impresión con la resina Rigid 10K, la fabricación falló a mitad del proceso (Ilustración 17). El fallo estuvo relacionado con la presencia de restos de resina curada solidificada en el fondo del tanque, lo que provocó que el sistema de escaneado láser (LPU) no pudiera desplazarse correctamente durante el barrido de capas. Esta obstrucción causó la parada automática de la impresión.



Ilustración 17: Fallo de impresión SLA (Elaboración propia)

En la Ilustración 19 e Ilustración 18 se muestra el resultado de la impresión del molde hembra en Clear V4 y Rigid 10K, respectivamente.



*Ilustración 19: Resultado impresión molde hembra
SLA Clear V4 (Elaboración propia)*



*Ilustración 18: Resultado impresión molde hembra
SLA Rigid 10K (Elaboración propia)*

4.3.3 POST-PROCESADO DE LA IMPRESIÓN

Una vez impresos los moldes se llevó a cabo el post-procesado estándar recomendado por Formlabs [23]. Este proceso consta de tres etapas principales: retirada de soportes, lavado con alcohol isopropílico, y curado térmico/UV.

En primer lugar, se retiraron manualmente los soportes generados durante la impresión. Se realizó con delicadeza para evitar daños en la superficie del molde.

A continuación, las piezas fueron lavadas con alcohol isopropílico (IPA) como se muestra en la Ilustración 20. El objetivo de este paso es eliminar completamente los restos de resina líquida no curada adherida a la superficie. Dado que el tamaño del molde era manejable, este proceso se realizó de forma manual, asegurando el acceso a las zonas internas y de difícil alcance.

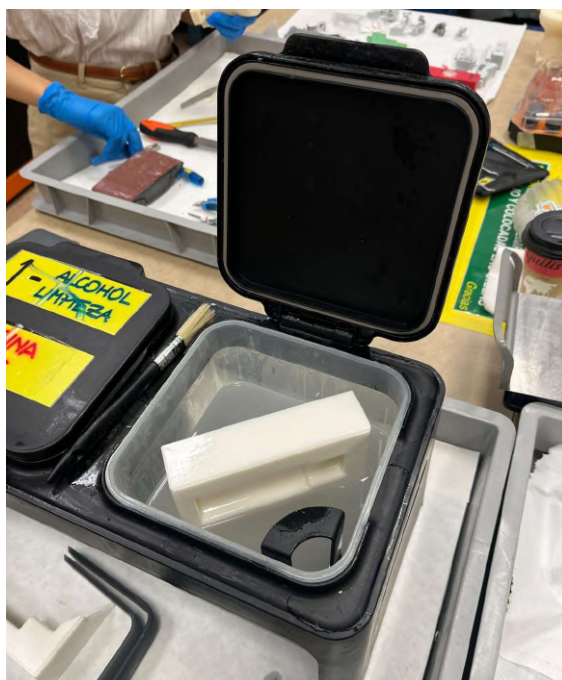
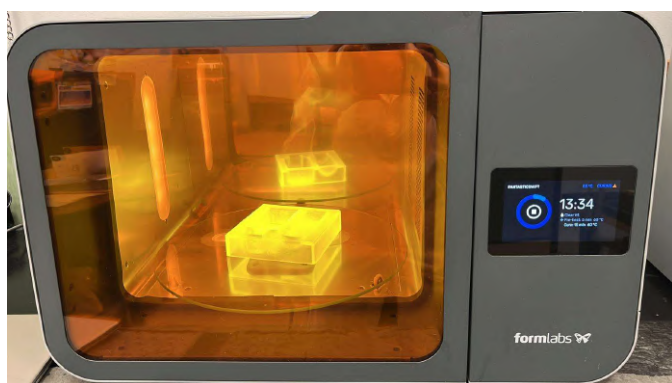


Ilustración 20: Lavado con alcohol isopropílico (Elaboración propia)



*Ilustración 21: Curado UV molde prueba Clear V4
(Elaboración propia)*



*Ilustración 22: Curado UV molde prueba Rigid 10K
(Elaboración propia)*

Una vez limpias y secas, las piezas se someten a un curado térmico con luz ultravioleta (UV) utilizando la máquina Form Cure de Formlabs (Ilustración 21 e Ilustración 22). Este sistema actúa como cámara de curado con temperatura controlada y luz UV integrada.

Para ambos materiales se debe precalentar el horno a 60°C. Los tiempos y temperaturas de curado dependen del material y se recogen en la Tabla 9. Estos valores permiten completar

la polimerización y asegurar que las propiedades finales del material se estabilicen según las especificaciones del fabricante.

Tabla 9: Temperaturas y Tiempos de Curado SLA (Elaboración propia)

Material	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
Clear V4	15	60
Rigid 10K	60	70

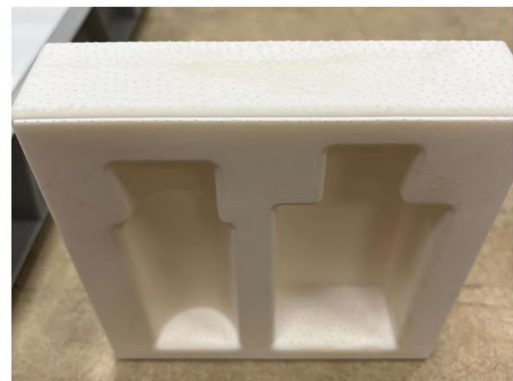


Ilustración 23: Puntos de Contacto de los Soportes SLA (Elaboración propia)

En la Ilustración 23 se pueden observar los moldes tras el proceso de impresión, limpieza y durado. A pesar de haber retirado los soportes con cuidado, quedan visibles los puntos de contacto, especialmente en las cavidades. Estos restos son comunes en piezas impresas en SLA.

Se realizarán unos ensayos preliminares de termoformado directamente sobre estas piezas, con el fin de comprobar cómo afecta la presencia de estos puntos al comportamiento de la lámina y su acabado.

Posteriormente, está previsto aplicar un lijado superficial localizado, como se hizo con el molde FDM, con el objetivo de suavizar esas zonas y optimizar la calidad de contacto entre el molde y la lámina.

4.3.4 TRATAMIENTO ADICIONAL: GRANALLADO SUPERFICIAL

Con el objetivo de observar el efecto de un tratamiento superficial adicional sobre el molde, se realizó un granallado localizado en la zona rectangular correspondiente al frasco de perfume. Esta operación se aplicó sobre una porción limitada del molde en ambos materiales, Clear V4 y Rigid 10K como se muestra en la Ilustración 24, para comparar resultados estéticos y funcionales.

En el caso del material Rigid 10K, el fabricante indica que el granallado aumenta la temperatura de flexión bajo carga. Según la ficha técnica del fabricante, este valor pasa de 163°C a 238°C (a 0.45 MPa) tras someterse a granallado. Este dato refuerza el interés por aplicar tratamientos superficiales para mejorar la resistencia térmica del molde durante el termoformado.



Ilustración 24: Granallado de los moldes de prueba SLA (Elaboración propia)

4.4 FABRICACIÓN MEDIANTE MJF

Como parte de la validación del diseño definitivo del molde, se ha realizado su fabricación mediante la tecnología Multi Jet Fusion (MJF). En este caso, se ha utilizado el mismo diseño del molde hembra previamente impreso en SLA, con una geometría vaciada internamente

para reducir el consumo de material, manteniendo un espesor constante de 5 mm en las paredes.

4.4.1 PARÁMETROS DE IMPRESIÓN PARA EL MOLDE DE PRUEBA

La impresión se ha llevado a cabo en Nylon 12 utilizando la impresora HP Jet Fusion 580C, siguiendo los criterios de fabricación establecidos para lograr una pieza funcional, rígida y adecuada para ensayos de termoformado. Se ha empleado una mezcla de 30% polvo nuevo y un 70% de polvo reutilizado, lo que permite un uso más sostenible del material.

Al simular la impresión en el software de preparación de MJF, se estimó un tiempo de fabricación de 11 horas y 2 minutos, con un total de 1461 capas y un espesor de capa de 0,11 mm. El volumen total de polvo utilizado fue de 5.27 litros, de los cuales 0.28 litros (0.27 kg) corresponden al material efectivamente sinterizado en la pieza.

4.4.2 RESULTADO DE LA IMPRESIÓN

La pieza fue impresa correctamente, sin defectos visibles ni errores de capa. El molde salió íntegro, sin deformaciones, y con una buena definición geométrica general. En este caso, gracias a la estrategia de vaciado previa en el diseño, se consiguió una pieza más ligera, con tiempos de impresión optimizados y un consumo razonable de material.

En la Ilustración 25, se puede observar el molde aún dentro del volumen de polvo tras la impresión, antes de la limpieza inicial. La pieza aparece recubierta completamente por el polvo sinterizado, lo que es característico del proceso MJF y requiere un post-procesado específico para dejar la superficie completamente operativa.



Ilustración 25: Molde hembra de prueba en el lecho de polvo (Elaboración propia)

4.4.3 POST-PROCESADO DE LA IMPRESIÓN

Tras la impresión, el molde fue retirado del lecho de polvo y se procedió a su limpieza inicial mediante cepillado y aire comprimido, con el objetivo de eliminar el polvo superficial no sinterizado. A continuación, se aplicó un chorreado abrasivo, procedimiento habitual en esta tecnología que consiste en proyectar granillo sobre la pieza para eliminar completamente los residuos adheridos y unificar el acabado superficial.

Este paso no solo garantiza una correcta limpieza del molde, sino que también mejora la textura final, evitando acumulaciones de polvo en zonas críticas y dejando la superficie lista para su uso en ensayos de termoformado, Ilustración 26.



Ilustración 26: Resultado post-procesado del molde hembra prueba en MJF (Elaboración propia)

Capítulo 5. ENSAYOS DE TERMOFORMADO CON MOLDES 3D

En este capítulo se presentan los resultados de los primeros ensayos experimentales realizados con los moldes de prueba fabricados mediante tecnologías aditivas, tanto de tipo macho como de tipo hembra.

El objetivo principal de esta fase es evaluar el comportamiento de los moldes durante el proceso de termoformado, identificar posibles defectos asociados a la geometría, configuración de vacío, tipo de material o espesor de la lámina, y extraer conclusiones que permitan optimizar el diseño final.

Los ensayos se han llevado a cabo con diferentes configuraciones, variando tanto los parámetros de fabricación del molde como las condiciones de termoformado, con el fin de analizar el efecto de cada variable sobre la calidad del resultado. Gracias a estos ensayos, se analizarán los defectos más comunes observados que servirá como base para definir las condiciones óptimas de fabricación y uso en la fase comparativa del proyecto.



Ilustración 27: Moldes de prueba (Elaboración propia)

5.1 ENSAYOS CON MOLDE TIPO MACHO

Este subapartado recoge los ensayos de termoformado realizados con el molde tipo macho fabricado en PLA mediante impresión FDM, correspondiente a una de las primeras versiones funcionales utilizadas en fase experimental.

Se utilizaron distintas combinaciones de materiales y espesores de lámina, con especial atención a las zonas críticas del molde, como esquinas, transiciones y fondos de cavidad. Los resultados obtenidos permitieron detectar limitaciones térmicas del propio PLA, así como establecer configuraciones más efectivas para ensayos posteriores.

5.1.1 SIN AGUJEROS DE VACÍO

Como primer paso en la fase experimental, se han realizado ensayos de termoformado con el molde tipo macho sin incluir ningún agujero de vacío. El objetivo de esta etapa es identificar las limitaciones del diseño base del molde y ver en que zonas son necesarios estos agujeros de vacío.

Se han ensayado diferentes materiales y espesores representativos del entorno industrial, concretamente los mostrados en la Tabla 10, donde también se recogen la temperatura y los tiempos de calentamiento.

Tabla 10: Parámetros de termoformado de los ensayos sin agujeros de vacío con molde macho

(Elaboración propia)

Material	Espesor (mm)	Temperatura de calentamiento (°C)	Tiempo de calentamiento (s)
HIPS	1.00	160	180
PVC	1.00	115	70
PVC	0.70	120	65
PETG	0.50	140	70
PS	1.00	140	105
PC	0.70	180	160



*Ilustración 28: Ensayo macho sin vacío - HIPS 1mm
(Elaboración propia)*



*Ilustración 29: Ensayo macho sin vacío - PVC
1mm (Elaboración propia)*



*Ilustración 30: Ensayo macho sin vacío - PVC
0.7mm (Elaboración propia)*



*Ilustración 31: Ensayo macho sin vacío - PETG
0.5mm (Elaboración propia)*



*Ilustración 32: Ensayo macho sin vacío - PS 1mm
(Elaboración propia)*



*Ilustración 33: Ensayo macho sin vacío - PC
0.7mm (Elaboración propia)*

A la vista de los resultados obtenidos en estos ensayos, se puede identificar con claridad, que la zona más conflictiva del molde es la parte central, donde se encuentra la cavidad más profunda entre los dos cuerpos. En todos los ensayos se observa que la lámina no llega a adaptarse correctamente a los cuerpos extruidos, quedando las figuras mal definidas.

Por otro lado, el comportamiento térmico ha variado según el material:

- El PVC (en ambos espesores) no se adapta bien a la geometría, incluso cuando las condiciones térmicas son correctas. Aunque es un material flexible y de fácil conformado, en ausencia de vacío localizado le cuesta alcanzar el fondo de las cavidades, lo que da lugar a zonas elevadas sin conformar.
- El PETG (0.5 mm) presenta un comportamiento similar al PVC, mostrando dificultades para adherirse a la geometría del molde, especialmente en las zonas profundas (ver Ilustración 31). A pesar de alcanzar correctamente la temperatura de termoformado, la lámina no logra ajustarse con precisión al relieve, lo que confirma que la falta de vacío localizado impide una conformación completa de los detalles.

- El PS (1 mm) mostró un comportamiento similar a los anteriores en cuanto a la adaptación de la lámina a la geometría del molde. Por otro lado, este material se vuelve muy rígido al enfriarse, lo que dificulta el desmoldeo y provoca fracturas en zonas críticas como esquinas y rebordes, donde se acumulan tensiones (ver Ilustración 32). Este material necesita ser desmoldeado con más cuidado o antes de que alcance una temperatura demasiado baja.
- El PC (0.7 mm), a pesar de ser calentado hasta 180 °C, no se adaptó correctamente al molde, lo que valida la necesidad de un sistema de vacío (ver Ilustración 33).
- El mejor resultado se ha obtenido la lámina el HIPS (1 mm), que ha mostrado una conformación bastante buena en comparación al resto de ensayos, con mejor adaptación general al volumen del molde, aunque también queda claro que necesita asistencia por vacío para lograr una definición completa en las zonas más conflictivas como el centro del molde y las esquinas de los cuerpos (Ilustración 28).

5.1.2 CON AGUJEROS DE VACÍO

Tras los primeros ensayos sin asistencia de vacío, se realiza una modificación directa sobre el molde macho con el fin de mejorar la adaptabilidad de la lámina en las zonas más críticas. Para ello, se introdujeron agujeros de vacío de 2 mm de diámetro distribuidos a lo largo de la zona central del molde, correspondiente al espacio entre las dos cavidades principales (cilíndrica y rectangular).

Esta zona fue seleccionada por ser la más conflictiva durante los primeros ensayos, donde se observó que la lámina no conseguía adherirse correctamente al fondo de las figuras, lo que daba lugar a superficies mal definidas o elevadas. Los orificios se realizaron manualmente empleando un torno con una broca de 2 mm, y una separación aproximada pero no exacta entre agujeros, ya que se buscaba una intervención rápida y localizada para evaluar el efecto funcional del vacío adicional. La Ilustración 34 muestra el resultado del molde tras agujerearlo.

Para comprobar la correcta ejecución de los agujeros, se utilizó un microscopio digital de medición. Como se muestra en la Ilustración 35;

referencia., la inspección permite analizar tanto el diámetro efectivo de los orificios como la calidad de sus bordes, detectando la presencia de rebabas y deformaciones producidas por el proceso manual de taladrado.

Se observó que el diámetro real de los agujeros resultó mayor al previsto inicialmente (2.1mm en vez de 2.0mm) lo que puede influir negativamente en el acabado superficial del blíster, generando marcas visibles no deseadas. Por ello, este tipo de análisis resulta fundamental para ajustar el proceso de perforación y asegurar la funcionalidad del vacío sin comprometer la estética ni la precisión del termoformado.



Ilustración 34: Agujeros de vacío del molde macho de prueba (Elaboración propia)

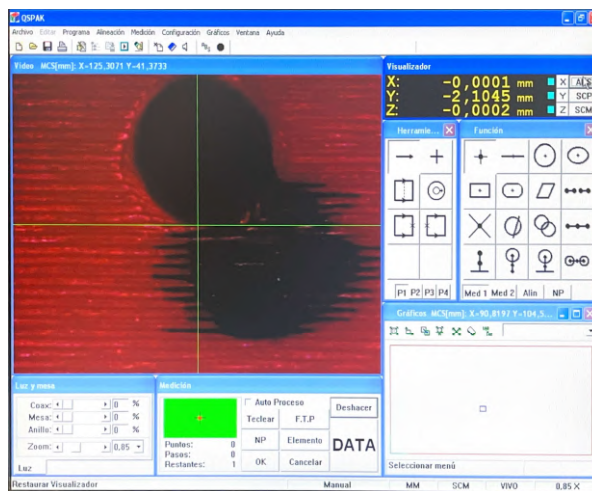


Ilustración 35: Agujeros de 2mm hechos con broca – molde FDM (Elaboración propia)

A continuación, se presentan en la Tabla 11 los resultados de los nuevos ensayos realizados con esta configuración modificada del molde.

Tabla 11: Parámetros de termoformado de los ensayos con agujeros de vacío con molde macho (Elaboración propia)

Material	Espesor (mm)	Temperatura de calentamiento (°C)	Tiempo de calentamiento (s)
PVC	0.70	130	80
PETG	0.50	148	80
PS	1.00	150	125
PC	0.70	197	170

A partir de la incorporación de agujeros de vacío de 2 mm en la zona central del molde, se han obtenido mejoras notables en la definición del termoformado, especialmente en las zonas profundas entre los dos cuerpos. Sin embargo, los resultados varían significativamente en función del material y espesor de la lámina, así como de los parámetros térmicos aplicados.

A continuación, se comentan los principales hallazgos por material:

- El PVC (0.7 mm) muestra mejores resultados con respecto a los ensayos sin vacío, pero la lámina no termina de adaptarse completamente en las zonas profundas del molde (ver Ilustración 36). Aunque se aplicaron 130 °C durante 80 s, la conformación sigue siendo insuficiente en el centro, y algunas superficies quedan parcialmente sin definir. Se plantea como posible mejora el aumento ligero de la temperatura de calentamiento, aumentando el tiempo de termoformado, o bien incrementar la potencia de los calentadores centrales en la Formech para que la lámina alcance mejor temperatura justo en la zona más conflictiva del molde.
- El PETG (0.5 mm) se ha adaptado mejor a la geometría del molde gracias a la incorporación de los agujeros de vacío, siendo la definición de los cuerpos buena. Sin embargo, al tratarse de una lámina tan fina, sufre una pérdida de rigidez estructural significativa tras el calentamiento, lo que hace que ceda fácilmente en las zonas más profundas. Como consecuencia, el espesor residual en el fondo del molde se reduce tanto que la pieza adquiere un aspecto casi translúcido, y basta con aplicar una ligera presión con los dedos para notar cómo la lámina se deforma o se dobla hacia dentro.

En algunas zonas también se aprecian pliegues por concentración de esfuerzos (*webbing*), especialmente en las esquinas inferiores y entre los cuerpos (ver Ilustración 37).

- El PS (1 mm), como en el caso del PETG, la incorporación de agujeros de vacío ha permitido mejorar la adaptación de la lámina al molde, especialmente en las zonas profundas entre cavidades (ver Ilustración 38). Se aprecia una mejor definición de contornos y una mayor fidelidad geométrica respecto al ensayo sin vacío. Sin

embargo, aparecen los pliegues entre los cuerpos y en las esquinas inferiores, sobre todo en la esquina de la base del rectángulo grande.

Tal como ya se observó en el ensayo sin vacío, la lámina es muy frágil una vez enfriada, y presenta una alta sensibilidad al desmoldeo. La pieza puede llegar a fracturarse al retirarla del molde, especialmente en las zonas de transición o en esquinas con tensiones acumuladas. Esto limita su idoneidad para moldes con geometrías profundas o sin redondeos suaves.

- El PC (0.7 mm) sigue sin dar resultados satisfactorios (véase Ilustración 39). Aunque se aplicó una temperatura elevada (197 °C), la lámina no se adaptó correctamente al molde, incluso con vacío. Se sospecha que la temperatura de calentamiento sigue siendo insuficiente para este material.

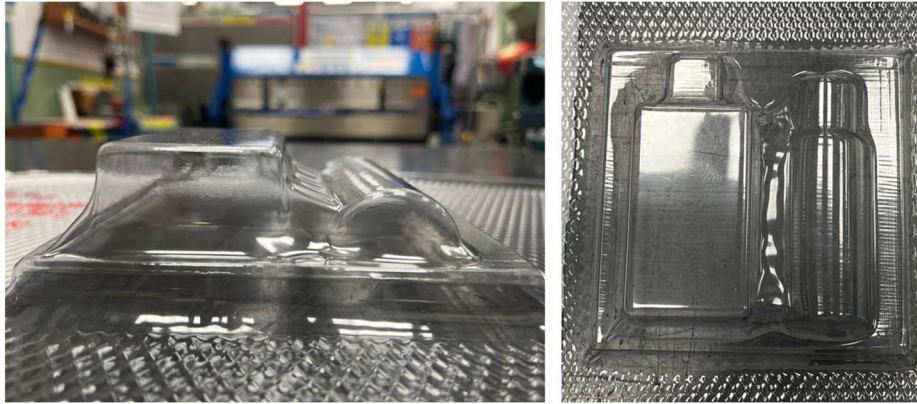


Ilustración 36: Ensayo macho con vacío - PVC 0.7mm (Elaboración propia)



Ilustración 37: Ensayo macho con vacío - PETG 0.5mm (Elaboración propia)



Ilustración 38: Ensayo macho con vacío - PS 1mm (Elaboración propia)



Ilustración 39: Ensayo macho con vacío - PC 0.7mm (Elaboración propia)

Los efectos observados se tendrán en cuenta en la siguiente iteración del diseño, donde se propone incrementar la distancia entre ambos volúmenes del molde con el objetivo de reducir la concentración de tensiones y minimizar la aparición de pliegues en la lámina termoformada. Además, se evaluará un aumento de la temperatura de calentamiento para alcanzar conformado más eficaz en aquellos materiales que han mostrado dificultades de adaptación, como el PC o el PVC.

Por otro lado, en los ensayos realizados con PETG y PS, que han sido los materiales que mejor se han adherido al molde gracias al vacío, se ha observado un efecto no deseado: las marcas de los agujeros de vacío son claramente visibles en el blíster final. Este detalle

compromete el acabado superficial de la pieza, algo especialmente relevante en aplicaciones donde la estética es crítica. Por ello, se realizarán pruebas variando el diámetro de los orificios y su disposición geométrica en los distintos moldes hembra, con el objetivo de lograr una succión eficiente sin dejar marcas visibles sobre la lámina termoformada.

5.1.3 OTRAS OBSERVACIONES

5.1.3.1 Calentamiento no uniforme de la lámina de termoformado

En algunos ensayos se ha podido observar que la distribución térmica sobre la lámina no es uniforme, lo que genera diferencias significativas en el comportamiento del material durante el termoformado. En particular, el caso mostrado en la Ilustración 40 (PVC 0,7 mm, calentado 70 s hasta 135 °C), se aprecia cómo la zona superior de la lámina ha sobrepasado su temperatura óptima, adquiriendo un tono blanquecino característico de un exceso de calentamiento, mientras que otras zonas no han alcanzado el mismo grado de reblandecimiento.

Este sobrecalentamiento también da lugar a la aparición de pliegues o arrugas irregulares, donde el material cede de forma descontrolada en ciertas zonas por estar demasiado reblandecido en unas áreas y aún rígido en otras. Este tipo de defectos compromete tanto la calidad del termoformado como la reproducibilidad del proceso.

El origen de este problema se debe, en parte, a la regulación limitada de los calentadores de la termoformadora utilizada (Formech 300XQ), la cual permite ajustar zonas generales (superior, inferior, centro y laterales), pero sin un control preciso sobre la temperatura real que alcanza cada una de ellas. Esto dificulta lograr un calentamiento homogéneo en toda la lámina, especialmente en materiales sensibles al exceso o defecto térmico. Esta situación pone de manifiesto la importancia de ajustar cuidadosamente los porcentajes de potencia por zona, en función del material y espesor empleados, con el objetivo de compensar las variaciones térmicas y minimizar defectos como pliegues, arrugas o blanqueamiento localizado.

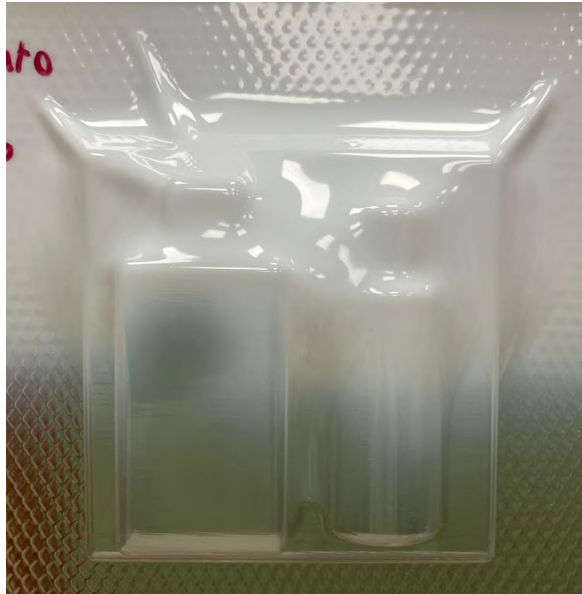


Ilustración 40: Calentamiento no uniforme de la lámina de termoformado (Elaboración propia)

5.1.3.2 Acabado superficial del blíster

Se ha observado que el acabado superficial del blíster termoformado a partir del molde impreso en FDM no es completamente liso. La superficie presenta la textura característica del proceso de deposición de filamento, donde se marcan levemente las líneas de capa generadas durante la impresión, como se ve en la Ilustración 41. Este efecto es especialmente visible en las paredes verticales de las cavidades del blíster, donde aparece el conocido efecto escalera. Aunque en aplicaciones funcionales este acabado puede ser aceptable, en contextos donde se requiera una estética cuidada, este nivel de rugosidad limita el uso directo del molde FDM sin post-procesado adicional (como lijado o barnizado).

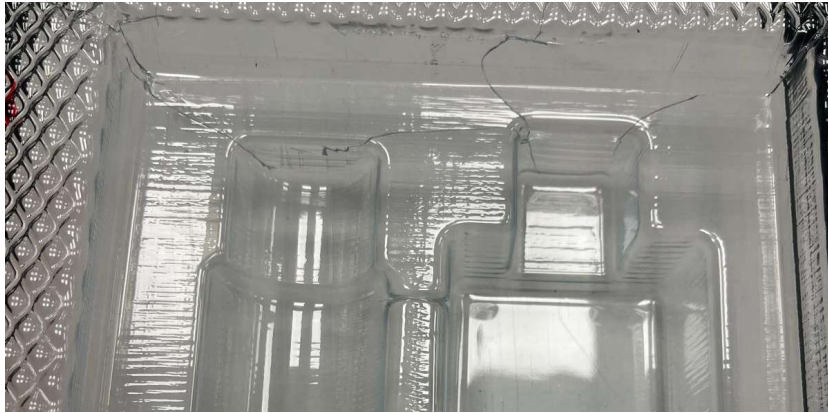


Ilustración 41: Acabado superficial blister de prueba con macho FDM (Elaboración propia)

5.1.3.3 Degradación térmica del molde

Por último, tras varios ciclos de termoformado, se ha observado que el molde impreso en PLA presenta signos visibles de degradación térmica (ver Ilustración 42). En las zonas sometidas a mayor temperatura, especialmente las más expuestas al contacto directo con la lámina caliente, se aprecia un brillo anómalo y deformaciones localizadas, lo que indica que el material ha comenzado a fundirse o reblandecerse. Esta degradación afecta directamente a la precisión geométrica del molde y a la repetibilidad de los ensayos.

Este comportamiento confirma que, aunque el PLA puede ser una opción válida para fases tempranas de diseño o prototipado rápido, no resulta adecuado para termoformar materiales que requieren temperaturas elevadas (como el PC o el PS), ya que su temperatura de reblandecimiento es inferior al rango operativo de muchos termoplásticos. Por tanto, para un uso prolongado o con materiales más exigentes térmicamente, será necesario optar por moldes fabricados con materiales de mayor resistencia térmica.

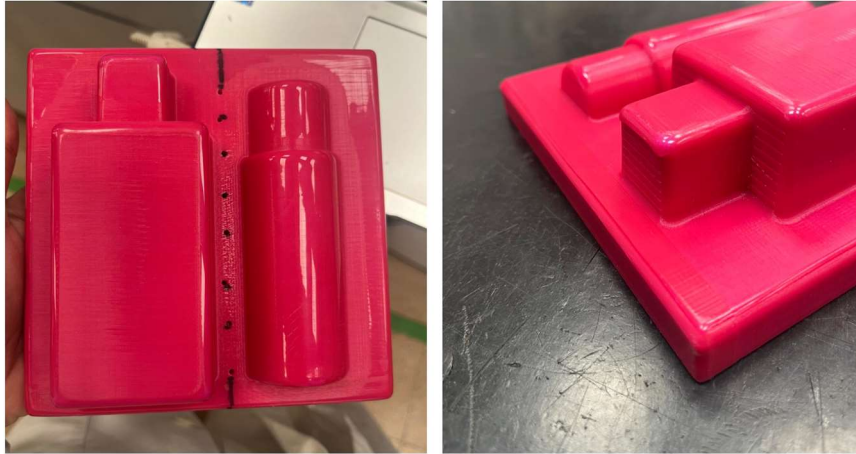


Ilustración 42: Degradación térmica del molde macho (Elaboración propia)

5.2 ENSAYOS CON MOLDES TIPO HEMBRA

Este subapartado recoge los ensayos de termoformado realizados con moldes tipo hembra, fabricados utilizando distintas tecnologías, mencionados anteriormente. Los ensayos se realizaron combinando diferentes materiales y espesores de lámina de termoformado, con especial atención a la capacidad de reproducción del detalle en las cavidades y al comportamiento térmico durante el proceso. En esta etapa se evaluó también la eficacia del vacío en zonas de geometría compleja.

5.2.1 SIN AGUJEROS DE VACÍO

Como primer paso con moldes tipo hembra, se realizaron ensayos sin incorporar agujeros de vacío. El objetivo principal era observar las limitaciones de diseño base y evaluar el comportamiento de la lámina termoformada en ausencia de vacío. Para esta fase, se empleó el molde impreso en resina Rigid 10K, impresa mediante tecnología SLA. Los parámetros de los ensayos realizados se recogen en la Tabla 12 a continuación:

*Tabla 12: Parámetros de termoformado de los ensayos sin agujeros de vacío con molde hembra
(Elaboración propia)*

Material	Espesor (mm)	Temperatura de calentamiento (°C)	Tiempo de calentamiento (s)
HIPS	1.00	190	130
PETG	0.50	152	90

Tal y como se anticipaba, los resultados obtenidos (ver Ilustración 43 e Ilustración 44) muestran que, en ausencia de agujeros de vacío, la lámina no llega a adaptarse correctamente a la geometría del molde.

Esto se debe a que, al tratarse de un molde hembra, la lámina debe vencer la resistencia del aire atrapado dentro de las cavidades profundas, lo que resulta imposible sin un sistema de extracción de dicho aire. Estas pruebas sirven como referencia inicial para evidenciar la necesidad del vacío en moldes tipo hembra, especialmente cuando se trata de geometrías con volúmenes profundos, como ocurre en este caso.



Ilustración 43: Ensayo hembra sin vacío- Rigid 10K - HIPS 1mm (Elaboración propia)



Ilustración 44: Ensayo hembra sin vacío- Rigid 10K - PETG 0.5mm (Elaboración propia)

5.2.2 CON AGUJEROS DE VACÍO

Una vez confirmada la necesidad de aplicar vacío para lograr un buen conformado en moldes tipo hembra, se realizaron diferentes ensayos incorporando orificios de succión. Para ello se han empleado los moldes fabricados en resina (SLA) y mediante MJF, en los que se probaron diámetros de agujero de 1.5 mm y 1 mm, así como distintas configuraciones. El objetivo principal, encontrar una configuración que garantice una buena adherencia de la lámina a las cavidades profundas, minimizando la visibilidad de las marcas de los agujeros en el blíster final.

En la Tabla 13 se incluyen los parámetros de termoformado de todos los ensayos realizados con los modelos hembra con agujeros de vacío.

Tabla 13: Parámetros de termoformado de los ensayos con agujeros de vacío con molde hembra (Elaboración propia)

Material	Material	Espesor (mm)	Temperatura de calentamiento (°C)	Tiempo de calentamiento (s)
Rigid 10K	PETG	0.50	158	90
Clear V4	PETG	0.50	160	95
PA12	PETG	0.50	155	80
PA12	PETG	0.50	157	85

5.2.2.1 Agujeros de vacío 1.5mm – Rigid 10K

El primer ensayo con vacío para moldes tipo hembra se realizó con el molde Rigid 10K, introduciendo manualmente orificios de 1.5 mm de diámetro mediante el uso de un torno con broca correspondiente. Estos se distribuyeron a lo largo de los ejes de simetría de cada una de las cavidades profundas, seleccionando esta zona por ser la zona crítica donde la lámina no se adapta adecuadamente en los ensayos previos (ver Ilustración 45).

La elección del diámetro 1.5 mm se basa en la intención de reducir la visibilidad de los orificios en el blíster final, ya que en los ensayos anteriores con el molde macho y agujeros de 2 mm las marcas eran excesivamente evidentes y afectaban al acabado del blíster.

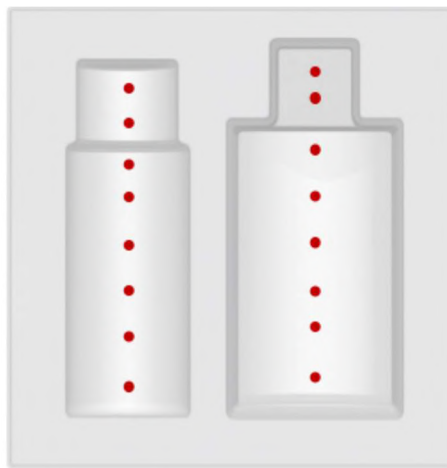


Ilustración 45: Primera configuración de agujeros de vacío (Imagen creada por ChatGPT. Fuente: [29])

La Ilustración 46 muestra el resultado del agujereado observado bajo microscopio digital. El análisis revela que el diámetro nominal es de 1.525 mm, lo cual se considera aceptable. Además, no se detectaron rebabas ni irregularidades significativas en los bordes de los orificios.

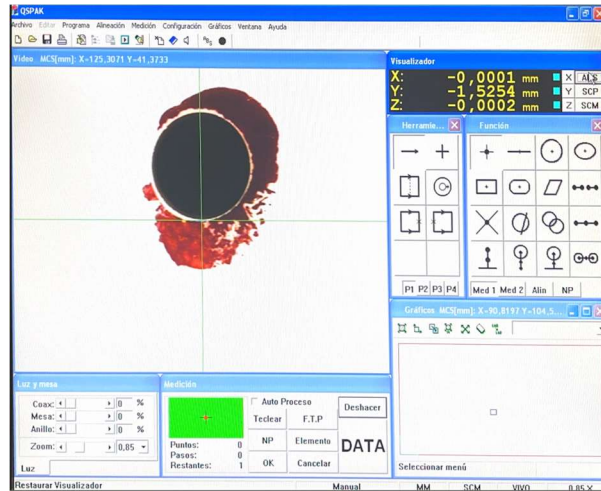


Ilustración 46: Agujeros de 1.5mm hechos con broca – Molde Rigid 10K (Elaboración propia)

Para este primer ensayo, se empleó una lámina de PETG de 0.5 mm. El calentamiento se realizó hasta alcanzar una temperatura de 158 °C durante 90 segundos. El resultado obtenido (Ilustración 47) mostró una adecuada conformación general, con la lámina adaptándose completamente al molde. Sin embargo, se aprecia un adelgazamiento significativo en las esquinas, donde el material se vuelve excesivamente fino. Además, los agujeros practicados en el molde se marcan con claridad en el blíster final, afectando negativamente al acabado superficial.

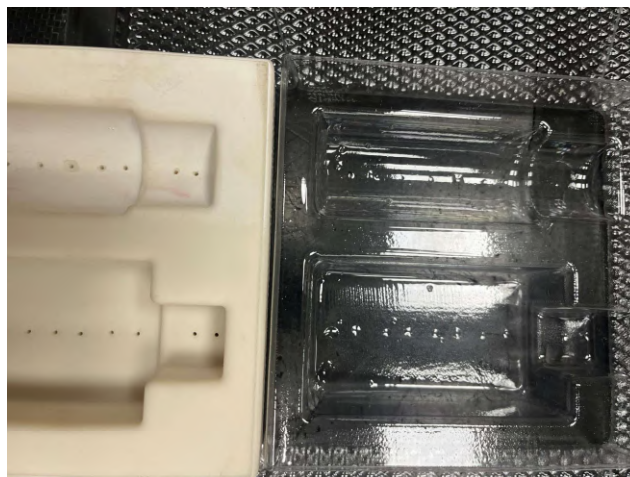


Ilustración 47: Ensayo hembra con vacío (1.5mm) - Rigid 10K - PETG 0.5mm (Elaboración propia)

Además de la notable visibilidad de los agujeros de vacío en el blíster, se identificaron otros defectos mostrados en la Ilustración 48. En primer lugar, se aprecia en algunas zonas la textura correspondiente a las alturas de capa de la impresión 3D, lo que impacta negativamente al acabado del blíster. Asimismo, los puntos de contacto de los soportes de impresión de han transferido al blíster, generando marcas localizadas. De cara a los siguientes ensayos, se ha lijado cuidadosamente estas zonas con el fin de eliminar dichas imperfecciones sin comprometer la geometría del molde ni introducir nuevos defectos por sobre-lijado.

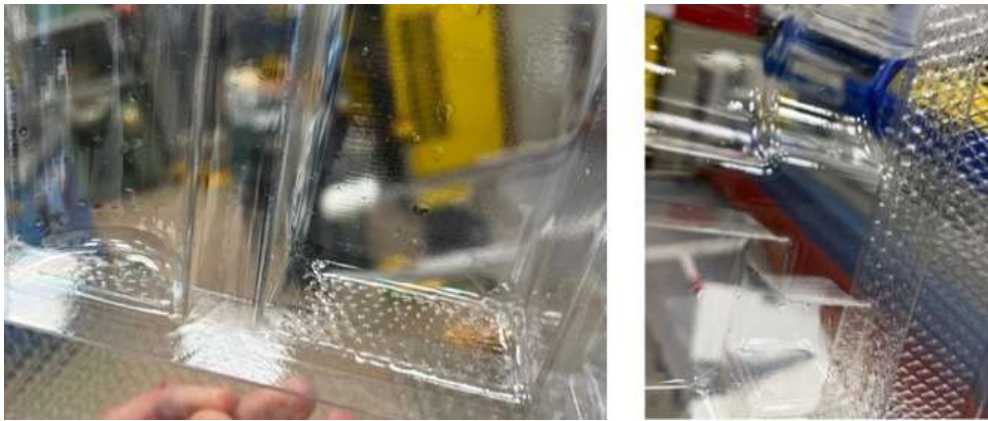


Ilustración 48: Defectos observados en el ensayo hembra con vacío (1.5mm) (Elaboración propia)

5.2.2.2 Agujeros de vacío 1 mm – Clear V4

Para el siguiente ensayo, se utilizó el molde fabricado en Clear V4, replicando la misma configuración de agujeros de vacío alineados con los ejes de simetría de las cavidades profundas. En esta ocasión, se emplea una broca de 1 mm con el objetivo de reducir la visibilidad de las marcas en el blíster. En la Ilustración 49 se muestra uno de los orificios inspeccionado.

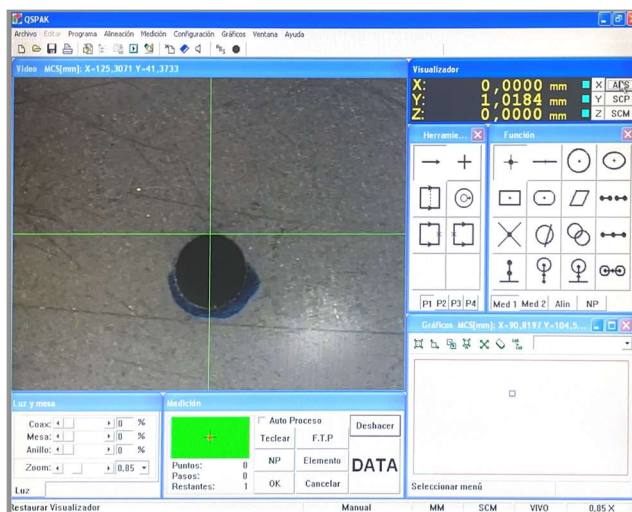


Ilustración 49: Agujeros de 1 mm hechos con broca – Molde Clear V4 (Elaboración propia)

Una vez más, se empleó una lámina de PETG de 0.5 mm hasta 160°C durante 95 segundos. El resultado obtenido se muestra en la Ilustración 50, donde se aprecia una buena adaptación de la lámina al molde. Disminuyendo el diámetro de los agujeros de vacío se reduce la visibilidad de estos en el blíster, sin embargo, estos siguen siendo perceptibles a la vista (poco apreciables en la ilustración).



Ilustración 50: Ensayo hembra con vacío (1mm) - Clear V4 - PETG 0.5mm (Elaboración propia)

Este ensayo también permite ver el resultado obtenido tras el lijado manual aplicado para eliminar las marcas de los puntos de soporte, Ilustración 51. Se puede observar que las pasadas de la lija no son homogéneas y dejan huella en el molde, que posteriormente se

transfiere a la lámina termoformada, afectando al acabado del blíster. Para evitar este tipo de defectos, es fundamental realizar el lijado uniforme y controlado. Como alternativa, se plantea optimizar la orientación de impresión del molde, minimizando la necesidad de soportes en zonas críticas para el acabado superficial.



Ilustración 51: Resultado del lijado de los moldes hembra (Elaboración propia)

5.2.2.3 Agujeros de vacío 1 mm – PA12

En esta tercera configuración se empleó un molde fabricado en PA12 mediante tecnología MJF, en el que se realizaron orificios de 1mm de diámetro distribuidos según el patrón mostrado en la Ilustración 52. El objetivo de esta prueba es comprobar si con esta configuración se reduce la visibilidad de los orificios en el blíster final.

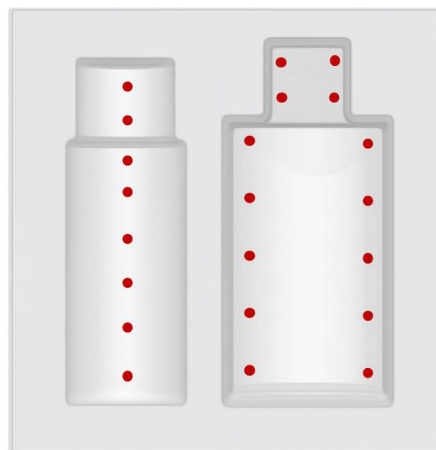


Ilustración 52: Segunda configuración de agujeros de vacío (Imagen creada por ChatGPT. Fuente: [29])

En la Ilustración 53 se observa el resultado del agujereado bajo microscopio digital, indicando un diámetro nominal de 1.0591mm.

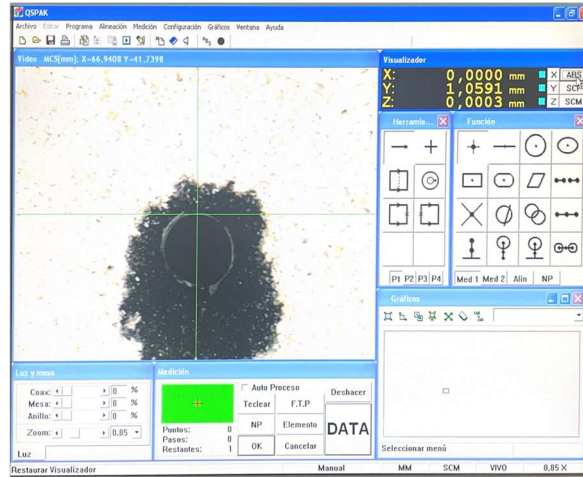


Ilustración 53: Agujeros de 1 mm Hechos con Broca – Molde PA12 (Elaboración propia)

El ensayo se realizó, una vez más, con una lámina de PETG de 0.5 mm de espesor, calentada hasta 155 °C durante 80 segundos. Los resultados, mostrados en la Ilustración 54 evidencian una buena adaptación general de la lámina al molde, confirmando la eficacia de esta configuración de agujeros de vacío.

En cuanto a las marcas de los orificios, se observa una notable mejora en el cuerpo rectangular, donde los puntos de vacío son poco apreciables. Sin embargo, las marcas del cilindro son significativamente visibles.



Ilustración 54: Ensayo hembra con vacío (1mm) - PA12 - PETG 0.5mm (I) (Elaboración propia)

Para reducir las marcas de vacío en el cilindro, se optó por modificar la configuración manteniendo el mismo molde. Para ello, se procedió a taponar los agujeros practicados previamente en el eje central del cilindro, y se realizó una nueva distribución como se muestra en la Ilustración 55.

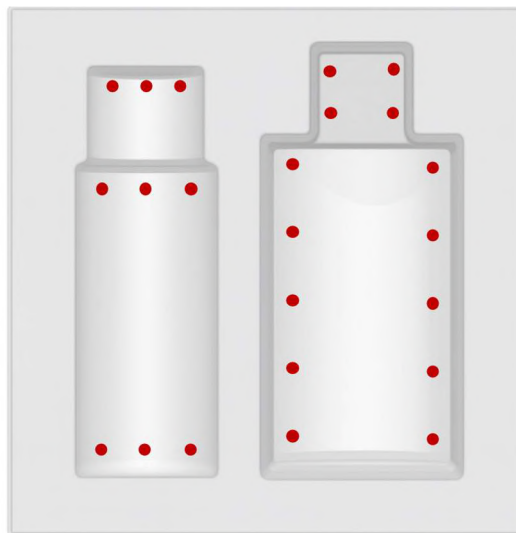


Ilustración 55: Tercera configuración de agujeros de vacío (Imagen creada por ChatGPT. Fuente: [29])

Se emplea la misma lamina empleada en ensayos anteriores, calentada a hasta 157°C durante 85 segundos. Los resultados obtenidos fueron positivos (ver Ilustración 56). Las marcas de

los nuevos orificios son mucho menos visibles. No obstante, se aprecian las huellas de los agujeros tapados previamente, un defecto que desaparecería en un molde definitivo sin modificaciones previas.

Por otro lado, se confirma nuevamente el espesor de 0.5 mm no resulta adecuado para zonas de geometría compleja como las esquinas: el material se adelgaza en exceso, perdiendo rigidez y provocando arrugas o deformaciones no deseadas. Esto limita la idoneidad de espesores bajos para aplicaciones que exijan estabilidad dimensional.

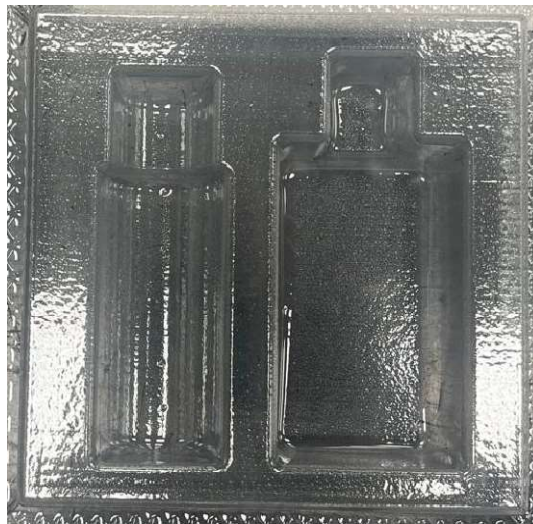


Ilustración 56: Ensayo hembra con vacío (1mm) - PA12 - PETG 0.5mm (II) (Elaboración propia)

La Ilustración 57 muestra un acabado superficial claramente granuloso, característico de la tecnología aditiva MJF, que se transfiere directamente al blíster final. Este tipo de textura puede ser aceptable para aplicaciones funcionales o de bajo requerimiento estético, pero no resulta idóneo para envases donde se busque transmitir una imagen de calidad. Por tanto, para aplicaciones comerciales donde el blíster forme parte de la percepción del producto, sería necesario considerar otras opciones de post-procesado.

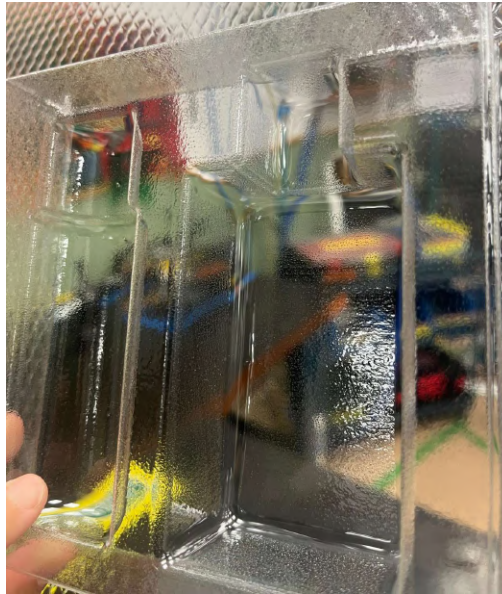


Ilustración 57: Acabado superficial con molde impreso en MJF (Elaboración propia)

5.2.3 OTRAS OBSERVACIONES

5.2.3.1 Degradación térmica del molde

Tras la realización de los distintos ensayos de termoformado, no se ha observado una degradación térmica significativa en ninguno de los tres moldes tipo hembra empleados (Rigid 10K, Clear V4 y PA12). A diferencia del molde macho de PLA, que mostró evidencias claras de deformación por efecto del calor, los moldes hembra han mantenido su integridad dimensional y funcional a lo largo de los ensayos.

Esto indica una mayor resistencia térmica de los materiales utilizados en estos moldes, lo que los hace más adecuados para ciclos repetidos de termoformado y condiciones más exigentes sin comprometer la calidad del resultado.

Capítulo 6. ITERACIÓN EN EL DISEÑO DE LOS MOLDES

6.1 INTEGRACIÓN DE AGUJEROS DE VACÍO

Tras comprobar en los ensayos previos la importancia de los orificios de vacío para conseguir una correcta adaptación de la lámina al molde, se propuso una mejora clave en el diseño: integrar directamente los agujeros en el modelo CAD del molde antes de su fabricación, evitando así la necesidad de taladrado manual posterior. Esta solución busca no solo simplificar el proceso, sino también garantizar una mayor precisión dimensional y un mejor acabado superficial del blíster final, al reducir el riesgo de rebabas o marcas producidas por el mecanizado.

Para ello, se diseñó una pieza de prueba con diferentes orificios distribuidos verticalmente y con los siguientes diámetros nominales: 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm y 2.5 mm.

La misma pieza fue fabricada en PLA mediante impresión FDM y en Clear V4 y Rigid 10K mediante impresión SLA, con el objetivo de analizar cómo influye la tecnología y el material en la calidad del orificio. Esta comparación permite observar posibles diferencias en resolución, precisión dimensional de los diámetros y definición de los bordes, aspectos clave para garantizar un acabado óptimo en el blíster termoformado.

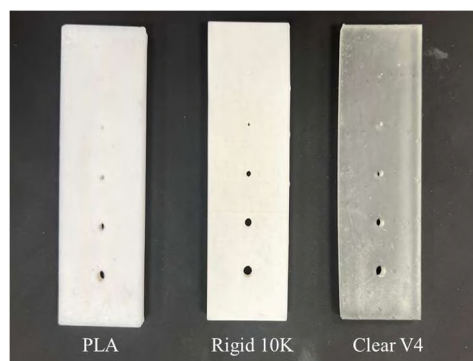


Ilustración 58: Piezas impresas para prueba de agujeros (Elaboración propia)

6.1.1 RESULTADOS DE IMPRESIÓN

En la Tabla 14 se muestran los resultados obtenidos de las mediciones del diámetro efectivo de los orificios impresos en las diferentes tecnologías y materiales empleados, en comparación con el diámetro nominal diseñado:

Tabla 14: Diámetros de las pruebas de Impresión de agujeros de vacío (en mm) (Elaboración propia)

Diámetro Nominal	PLA	Rigid 10K (post-curado)	Clear V4 (pre-curado)	Clear V4 (post-curado)
0.5	-	-	-	-
1.0	0.61	0.68	0.80	0.84
1.5	1.1	1.16	1.38	1.38
2.0	1.66	1.71	1.84	1.88
2.5	1.95	2.16	2.32	2.26

En primer lugar, se observa que en ninguno de los casos ha sido posible reproducir correctamente el agujero de 0.5 mm, lo que indica que dicho tamaño se encuentra por debajo del umbral de resolución real de las tecnologías utilizadas.

En el caso del PLA, los resultados muestran una subestimación significativa del diámetro en todos los tamaños. Por ejemplo, el agujero nominal de 1 mm se imprimió con un diámetro efectivo de tan solo 0.61 mm, mientras que el de 2.5 mm se redujo a 1.95 mm. Este comportamiento es coherente con las limitaciones inherentes a la impresión FDM, que presenta menor resolución y precisión en elementos pequeños.

Por su parte, el Rigid 10K presenta un comportamiento similar al PLA, donde se obtienen valores inferiores al nominal. Por ejemplo, el agujero de 2 mm presenta un diámetro efectivo de 1.71 mm, y el de 2.5 mm alcanza los 2.16 mm.

En el caso del material Clear V4, el efecto del curado sobre el diámetro de los agujeros no es uniforme. Para algunos agujeros como el de 1.0 mm y 2.0 mm se observa un ligero aumento del diámetro tras el curado (posiblemente por relajación térmica), para tamaños mayores como 2.5 mm se produce una leve reducción. Esto sugiere que el curado puede inducir pequeñas deformaciones dimensionales que dependen del tamaño del orificio y de la

distribución de tensiones internas del material, por lo que se recomienda siempre realizar las mediciones finales tras el curado para garantizar la precisión en aplicaciones funcionales.

En conjunto, estos resultados demuestran que la impresión directa de los agujeros en el diseño es viable para diámetros a partir de 1 mm, especialmente utilizando tecnologías SLA. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el diámetro real obtenido parece ser inferior al nominal, por lo que se recomienda realizar ajustes en el diseño en función de la tecnología utilizada.

Bajo inspección con microscopio digital, no se detectaron rebabas ni imperfecciones en ninguno de los casos, lo que valida la buena calidad superficial de los orificios obtenidos. Además, es importante tener en cuenta que parámetros como la orientación de impresión, el grosor de capa o la resolución influyen directamente en el acabado del canal, pudiendo aparecer irregularidades internas o el efecto escalera, que pueden afectar tanto al funcionamiento como a la apariencia del blíster final.

6.1.2 PRUEBA DE TERMOFORMADO

Para evaluar el impacto visual de los distintos orificios impresos en el resultado final del blíster, se realizó una prueba de termoformado utilizando una lámina de HIPS de 1 mm de espesor. La lámina fue calentada hasta alcanzar una temperatura de 167 °C durante 127 segundos. Como se muestra en la Ilustración 59, aunque en la imagen las marcas puedan parecer sutiles, en persona se aprecia que todos los agujeros dejan alguna huella visible sobre la superficie del blíster.

No obstante, el orificio de diámetro nominal de 1 mm destaca por ser el que presenta menor visibilidad, especialmente teniendo en cuenta que el diámetro real impreso tiende a ser ligeramente inferior al nominal. Por tanto, se concluye que, si bien es inevitable cierta marca, el uso de orificios de 1 mm constituye una opción válida para lograr un equilibrio entre funcionalidad del vacío y calidad estética del producto final.

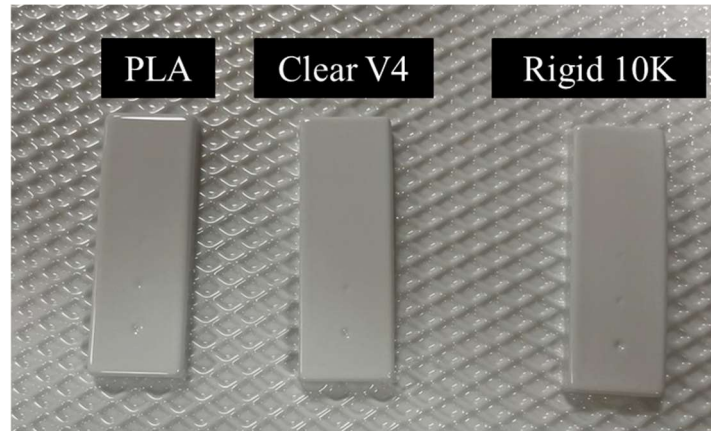


Ilustración 59: Termoformado con piezas de prueba de impresión de agujeros de vacío (Elaboración propia)

6.2 REDISEÑO DEL MOLDE MACHO: SEGUNDA VERSIÓN

6.2.1 ALTERACIONES DEL DISEÑO ORIGINAL

Tras comprobar que los ensayos con molde tipo hembra ofrecían buenos resultados, se decidió centrar los esfuerzos de mejora en el molde tipo macho, cuya geometría había generado más complicaciones durante el termoformado. El objetivo de esta segunda versión (V2) es reducir defectos como el *webbing*, los pliegues marcados en las esquinas, así como facilitar el desmoldeo y evitar roturas en las láminas.

Para ello, se realizaron las siguientes modificaciones de diseño:

- Se aumentó el ángulo de desmoldeo a 4°, con la intención de facilitar la extracción de la lámina termoformada sin comprometer su integridad.
- Se incrementaron en 1 mm los radios de redondeo de las esquinas de la figura rectangular (pasando de 2 mm y 3 mm a 3 mm y 4 mm respectivamente), con el objetivo de suavizar las transiciones geométricas y reducir la aparición de pliegues en zonas críticas.
- Para evitar el *webbing* detectado entre el cilindro y el rectángulo, se aumentó la separación entre ambos cuerpos hasta los 35 mm. Esta modificación obligó también a ampliar el área total del molde, que pasó a tener unas dimensiones de 170 x 160

mm. Cabe señalar que, si bien este cambio se introduce en el contexto experimental para evaluar posibles mejoras, en un entorno de producción real no sería viable. El diseño del blíster suele estar condicionado por las necesidades del departamento de diseño de empaquetado y marketing, que definen dimensiones más ajustadas por motivos de presentación y reducción de costes. Aumentar el área del envase, en ese contexto, estaría completamente descartado.

- En esta versión se redujo la altura de la base del molde a 10 mm con el objetivo de minimizar el consumo de material durante la impresión

Por último, se incorporaron orificios de vacío distribuidos a lo largo del perímetro de los cuerpos, utilizando un diámetro nominal de 1 mm como muestra la Ilustración 60. Esta elección responde a los resultados previos, que demostraron que dicho diámetro permite generar vacío sin dejar marcas apreciables en la lámina termoformada, ya que el valor final impreso resulta inferior al nominal. Con esta configuración se busca mejorar la adherencia del material al molde reduciendo defectos visibles en el blíster final.

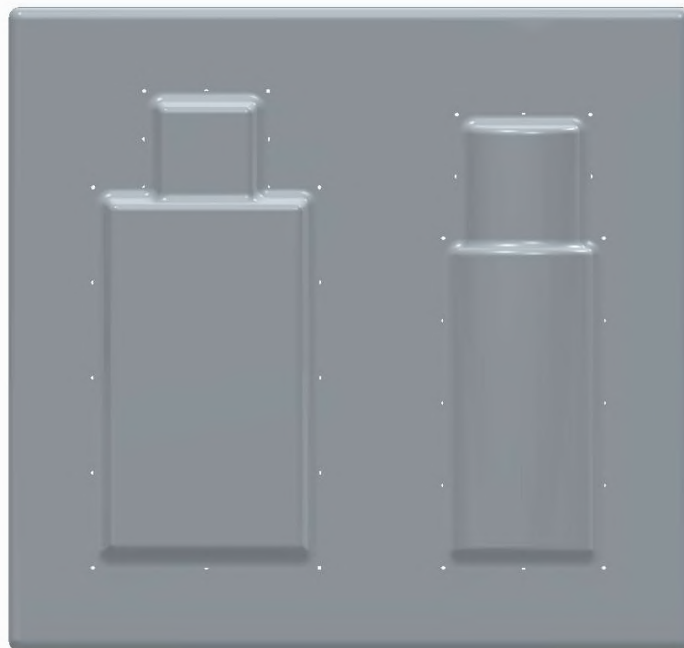


Ilustración 60: V2 del molde macho (Elaboración propia)

6.2.2 IMPRESIÓN DE VERSIÓN 2 DEL MOLDE

La segunda versión del molde tipo macho se imprimió utilizando la resina Clear V4, seleccionada por ofrecer un buen equilibrio entre coste, calidad superficial y resistencia térmica, lo que la convierte en una opción adecuada para ensayos funcionales. La impresión se realizó con un grosor de capa de 0.1 mm para asegurar una resolución suficiente en geometrías curvas, y se orientó la pieza de forma adecuada en el software de preparación para reducir soportes innecesarios (ver Ilustración 61). Estos se generaron automáticamente con una densidad de puntos de soporte de 1 y un tamaño de 0.5 mm.

El consumo total de resina fue de 324.56 ml, y el tiempo estimado de impresión fue de 14 horas y 23 minutos. A modo comparativo, la versión anterior del molde consumió 391.35 ml y tardó 15 horas y 12 minutos, a pesar de tener una base de menor tamaño. Esta diferencia se debe principalmente a la reducción en la altura de la base en la nueva versión, lo que permite una fabricación más eficiente.

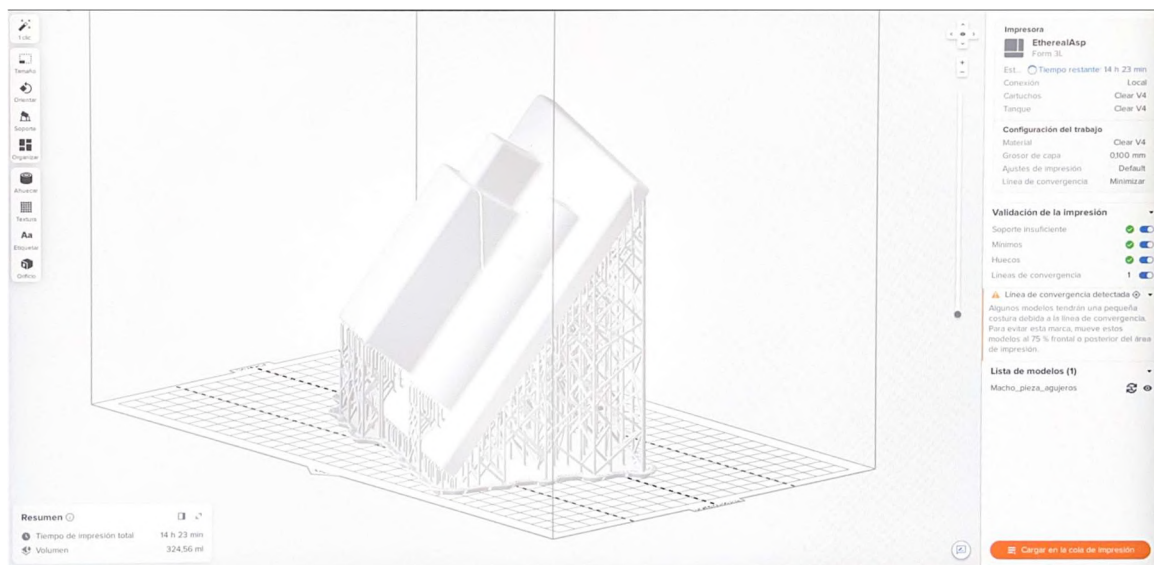


Ilustración 61: Configuración de impresión molde V2 SLA (Elaboración propia)

En la Ilustración 62 se muestra el resultado directamente tras la impresión, aún con los soportes. Posteriormente, se realizó el post-procesado habitual: se retiraron los soportes, se lavó la pieza con alcohol isopropílico y se procedió al curado térmico con los parámetros

recomendados para la resina Clear V4. Este proceso consistió en un precalentamiento de 5 minutos hasta alcanzar los 60 °C, seguido de 15 minutos de curado a esa misma temperatura.



Ilustración 62: Resultado de la impresión del molde V2 (Elaboración propia)

El resultado final del molde puede verse en la Ilustración 63, con una geometría limpia y una superficie uniforme, lista para su utilización en los ensayos. Cabe destacar que los agujeros de vacío, diseñados con un diámetro nominal de 1 mm, se imprimieron finalmente con un diámetro efectivo de 0.976 mm, valor que se considera adecuado y cercano al nominal.



Ilustración 63: Resultado Post-procesado del Molde Macho V2 (Elaboración propia)

6.3 PRUEBAS DE TERMOFORMADO CON LA VERSIÓN 2 DEL MOLDE

En este apartado se recogen los ensayos realizados con la segunda versión del molde tipo macho, desarrollada a partir de las observaciones obtenidas en los ensayos previos. El objetivo de estas pruebas es evaluar si las modificaciones introducidas en el diseño permiten mejorar el resultado del termoformado y, en caso de que persistan defectos, analizar si estos pueden ser corregidos mediante ajustes en los parámetros del proceso.

6.3.1 PRUEBAS INICIALES

En la Tabla 15 se recogen los parámetros, materiales, y espesores de la lámina de termoformado empleadas para realizar las primeras pruebas con este nuevo molde.

Tabla 15: Parámetros de termoformado de los ensayos iniciales del molde V2 (Elaboración propia)

Material	Espesor (mm)	Temperatura de calentamiento (°C)	Tiempo de calentamiento (s)
HIPS	1.00	167	127
PETG	0.50	158	85
PS (transparente)	1.00	150	130
PS (blanco)	1.00	156	150

La primera prueba realizada con la nueva versión del molde tipo macho se llevó a cabo utilizando una lámina de HIPS de 1 mm de espesor. Como puede observarse en la Ilustración 64, el resultado muestra mejoras respecto a versiones anteriores: el pliegue central entre cuerpos ha desaparecido completamente, lo que indica que el aumento de la separación entre volúmenes ha sido efectivo. Sin embargo, se sigue observando un pliegue localizado en la esquina inferior del cuerpo rectangular, mientras que el resto de las esquinas no presenta defectos de este tipo. Esto es recurrente en las otras pruebas realizadas.

Por otro lado, los agujeros de vacío impresos son funcionales y no generan marcas visuales significativas sobre la lámina, lo cual valida el empleo de diámetros de 1 mm en esta configuración como una solución adecuada.

Durante la primera prueba, se pueden observar unas pequeñas marcas asociadas a los puntos de contacto de los soportes de impresión, por lo que se decide realizar un lijado más exhaustivo en la siguiente prueba para intentar eliminarlas por completo.



Ilustración 64: Prueba inicial molde macho V2 - HIPS 1mm (Elaboración propia)

Además del pliegue en la esquina inferior, en los ensayos con HIPS se observan unas marcas características en la lámina que indican la presencia de esfuerzos durante el desmoldeo, especialmente en la zona de las esquinas del cuerpo rectangular. Este efecto también se ha detectado en el caso del PS transparente, donde el problema resulta aún más acusado debido a la mayor fragilidad del material, lo que provoca que la lámina llegue a rasgarse en esas zonas críticas (véase Ilustración 66). Para mitigar este defecto, se podría aumentar aún más el radio de desmoldeo, especialmente en las transiciones del volumen rectangular, ya que en el caso del cilindro no se han observado problemas significativos relacionados con el desmoldeo.



Ilustración 65: Prueba inicial molde macho V2 - PETG 0.5mm (Elaboración propia)



Ilustración 66: Prueba inicial molde macho V2 - PS 1mm (transparente) (Elaboración propia)



Ilustración 67: Prueba inicial molde macho V2 - PS 1mm (blanco) (Elaboración propia)

6.3.2 AJUSTE DE AGUJEROS DE VACÍO PARA ELIMINAR EL *WEBBING*

Tras comprobar que el pliegue en la esquina inferior del cuerpo rectangular persistía en todos los primeros ensayos, se decidió modificar la configuración de los agujeros de vacío en esa zona para intentar eliminar este defecto.

Como se muestra en la Ilustración 68, se realizaron tres disposiciones distintas con el objetivo de favorecer una mejor succión del material justo en la zona crítica donde tiende a formarse el pliegue. Los nuevos taladros (de 1 mm) se colocaron estratégicamente alrededor de la esquina conflictiva, variando tanto su cantidad como su posición relativa respecto a los bordes. El propósito de estas pruebas es evaluar cuál de las configuraciones consigue una adaptación más precisa de la lámina al molde, evitando la acumulación de material que genera la deformación observada.

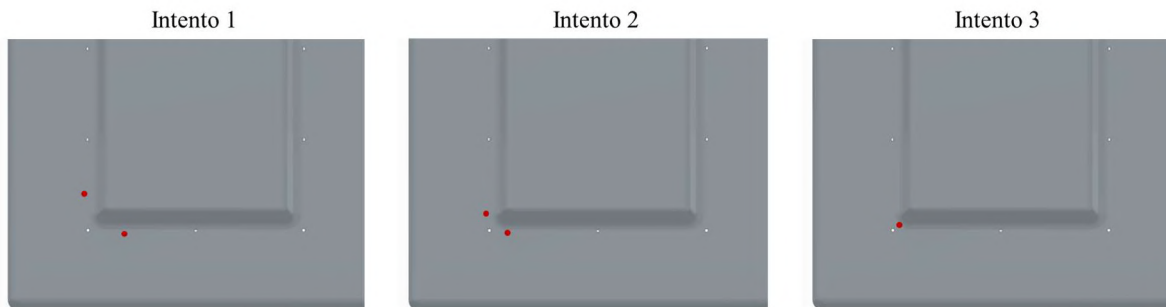


Ilustración 68: Configuraciones de agujeros de vacío probadas para eliminar el pliegue en la esquina inferior del rectángulo (Elaboración propia)

Se realizaron pruebas de termoformado con las tres configuraciones utilizando láminas de HIPS de 1 mm, aplicando los parámetros indicados en la Tabla 16.

Tabla 16: Parámetros de termoformado de los ensayos de configuraciones de agujeros de vacío molde V2 (Elaboración propia)

Ensayo	Material	Espesor (mm)	Temperatura de calentamiento (°C)	Tiempo de calentamiento (s)
Intento 1	HIPS	1.00	176	180
Intento 2	HIPS	1.00	160	140
Intento 3	HIPS	1.00	164	146

Como se aprecia en los resultados obtenidos (ver Ilustración 69), ninguna de las configuraciones logra resolver completamente el defecto, aunque se observan ligeras variaciones en la forma y el tamaño del pliegue. Esto indica que, si bien la distribución del vacío puede influir, el problema podría requerir una modificación adicional en el diseño geométrico del molde.

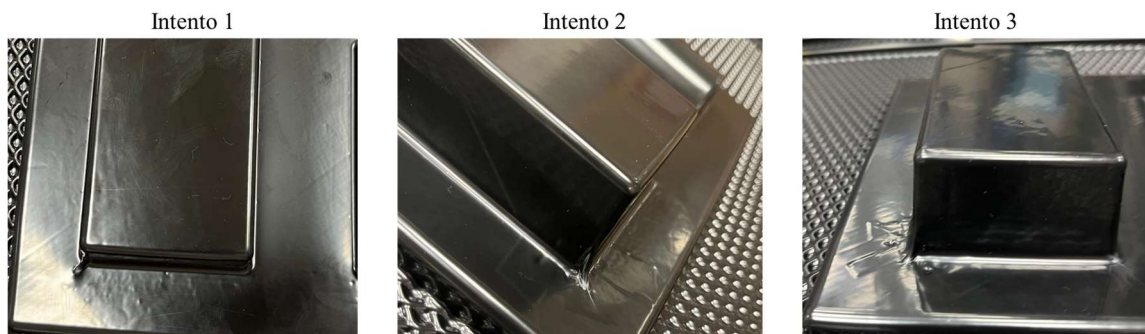


Ilustración 69: Resultado de los ensayos de configuraciones de agujeros de vacío molde V2 (Elaboración propia)

6.3.3 AJUSTE GEOMETRÍA: MODIFICACIÓN DE DESMOLDEO Y REDONDEO

Con el objetivo de analizar si el pliegue en la esquina inferior del cuerpo rectangular puede deberse a la propia geometría del diseño, se decide realizar una prueba adicional basada en una alteración geométrica. Para ello, se imprime un cubo que representa exclusivamente la parte inferior del cuerpo rectangular, con las mismas dimensiones de base que la pieza original, como muestra la Ilustración 70.

En esta nueva versión se aumenta el ángulo de desmoldeo a 5°, y se emplean radios de redondeo de 3 mm en todas las aristas. La intención es favorecer una caída más suave y progresiva de la lámina durante el proceso de termoformado, reduciendo así la aparición de concentraciones de tensión que puedan provocar la formación de pliegues.

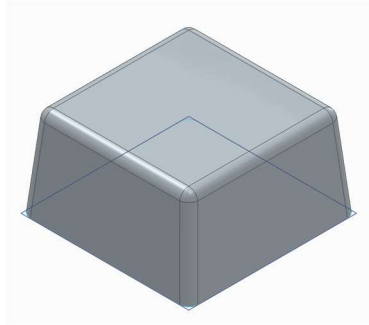


Ilustración 70: Modelo de prueba simplificado con 5° de desmoldeo y radios de 3 mm (Elaboración propia)

Se realizaron dos pruebas de termoformado utilizando este modelo simplificado (ver condiciones en la Tabla 17), cuyos resultados se recogen en la Ilustración 71. Como puede observarse, los pliegues en la esquina inferior continúan apareciendo, si bien con una intensidad algo menor respecto a las versiones anteriores. Esto sugiere que el aumento del ángulo de desmoldeo y el redondeo de aristas contribuyen a mejorar el comportamiento de la lámina durante la conformación, aunque no son suficientes por sí solos para eliminar completamente el defecto.

Tabla 17: Parámetros de termoformado de los ensayos del modelo de prueba simplificado (Elaboración propia)

Material	Espesor (mm)	Temperatura de calentamiento (°C)	Tiempo de calentamiento (s)
HIPS	1.00	160	240
PETG	0.50	158	85

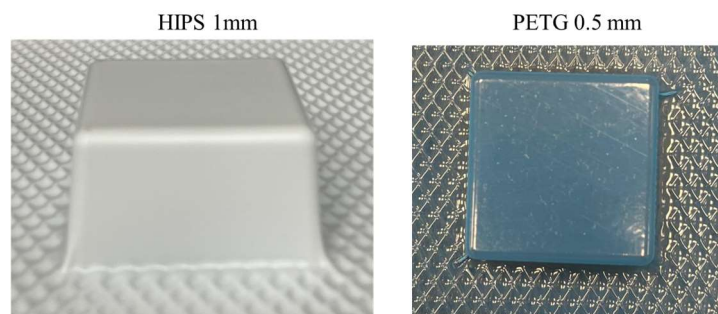


Ilustración 71: Resultado de las pruebas con el modelo de prueba simplificado (Elaboración propia)

6.3.4 PRUEBA ORIENTACIÓN DEL MOLDE

Como último conjunto de ensayos con esta versión del molde, se realizaron pruebas variando su orientación dentro de la máquina de termoformado, tal y como se muestra en Ilustración 72. Se utilizó como referencia el bloque de prueba colocado junto al molde, manteniéndolo fijo para identificar la rotación relativa en cada caso.

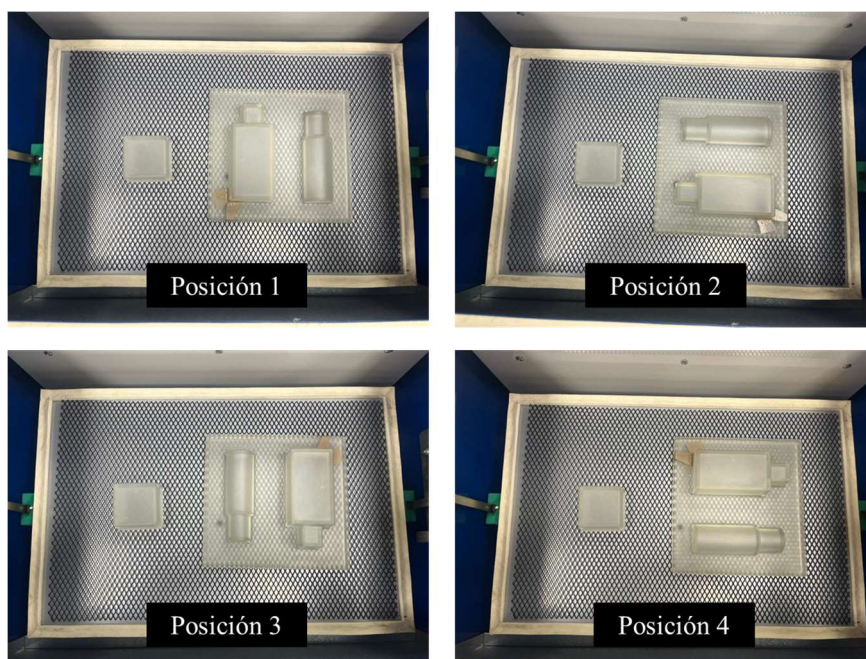


Ilustración 72: Diferentes orientaciones del molde para los ensayos (Elaboración propia)

El objetivo de estas pruebas es evaluar si el defecto observado de forma persistente en la esquina inferior del cuerpo rectangular podría estar relacionado con una distribución

desigual de temperatura durante el calentamiento. La máquina empleada dispone de cuatro zonas de calentamiento independientes, lo que podría provocar que ciertas áreas de la lámina no alcancen la misma temperatura, afectando negativamente su capacidad de deformación.

Para ello, se realizaron cuatro termoformados girando el molde en incrementos de 90°, cuyos parámetros se recogen en la Tabla 18. Los resultados obtenidos permitirán valorar si la causa del pliegue está asociada a la posición de la pieza respecto al sistema de calentamiento.

Tabla 18: Parámetros de termoformado de los ensayos de cambio de orientación (Elaboración propia)

Posición	Material	Espesor (mm)	Temperatura de calentamiento (°C)	Tiempo de calentamiento (s)
1	HIPS	1.00	163	190
2	HIPS	1.00	158	160
3	HIPS	1.00	165	160
4	HIPS	1.00	160	240

La Ilustración 73 recoge los resultados de los ensayos. Aunque el pliegue en la esquina inferior del cuerpo rectangular sigue presente en los cuatro casos, se observa una diferencia significativa entre posiciones. En particular, en las posiciones 3 y 4, dicho defecto es mucho menos pronunciado y resulta prácticamente imperceptible en las imágenes.

Esto podría deberse a la proximidad de la zona conflictiva a los calentadores de la máquina en dichas posiciones. Al estar más cerca de las fuentes de calor, la lámina podría mantenerse a una temperatura más elevada durante el proceso, evitando un enfriamiento prematuro que dificultaría la correcta adaptación del material en esa zona.

Estos resultados apuntan a que, para las siguientes pruebas, sería recomendable aplicar el vacío de forma más rápida tras alcanzar la temperatura objetivo, reduciendo así el tiempo en que la lámina puede enfriarse antes de deformarse completamente. Adicionalmente, podría considerarse un ligero incremento de temperatura o un refuerzo localizado del calentamiento en esa área crítica.



Ilustración 73: Resultado de los ensayos de cambio de orientación (Elaboración propia)

6.4 OBSERVACIONES DE DEGRADACIÓN TÉRMICA DEL MOLDE

Tras finalizar todos los ciclos de ensayo, se observó un efecto claro de degradación térmica en la base del molde fabricado en Clear V4, tal y como se muestra en la Ilustración 74.

Concretamente, se detecta una deformación en la zona plana de apoyo del molde, lo que sugiere que el espesor de 10 mm de la base resulta insuficiente para resistir las sucesivas exposiciones térmicas sin sufrir deformaciones.

Este comportamiento pone de manifiesto una limitación importante del uso de moldes impresos con resinas fotopoliméricas en procesos de termoformado repetitivos. Aunque ofrecen buenos resultados a corto plazo y permiten una fabricación ágil y precisa, su resistencia térmica y estructural puede no ser adecuada para soportar un número elevado de ciclos sin presentar daños. Por tanto, se recomienda considerar un mayor espesor en la base o explorar alternativas más robustas en caso de necesitar una mayor durabilidad en producción continua.

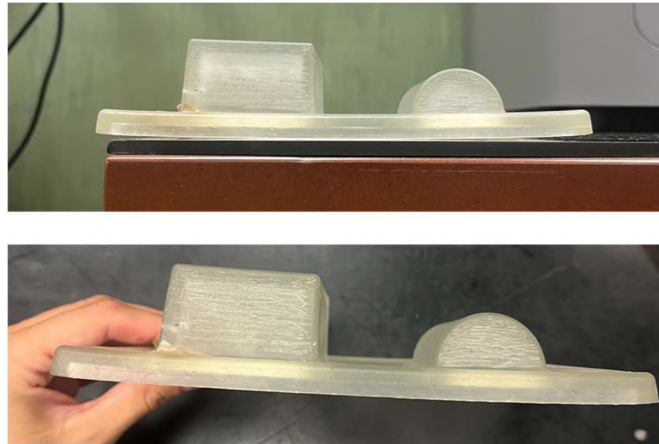


Ilustración 74: Degradación térmica del molde V2 (Elaboración propia)

Capítulo 7. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LOS MOLDES FINALES

7.1 DISEÑO DE LA VERSIÓN FINAL DE LOS MOLDES

7.1.1 DISEÑO FINAL DEL BLÍSTER

A partir de las observaciones extraídas durante las distintas pruebas de termoformado, se ha procedido al rediseño de la pieza y los moldes con el objetivo de minimizar los defectos detectados, especialmente los pliegues y marcas en las esquinas, sin comprometer el diseño original ni las dimensiones establecidas. Se ha mantenido la restricción de que la pieza no supere los 140x140 mm, ya que, en un entorno real de producción, estas dimensiones estarían condicionadas por los requisitos de *packaging*, logística o marketing, y no serían modificables libremente por el fabricante del molde.

La pieza final conserva la geometría original: un blíster cuadrado de 140x140 mm, con una altura máxima de 30 mm. La cavidad cilíndrica presenta un diámetro de aproximadamente 36 mm y una altura de 80 mm, mientras que el cuello del envase tiene un diámetro de 30 mm y una altura de 32 mm. La cavidad rectangular cuenta con una base de 50 mm, una altura de 90 mm y una profundidad de 30 mm. Por último, la cavidad para el tapón del perfume tiene unas dimensiones de 24x25 mm y una profundidad de 24 mm.

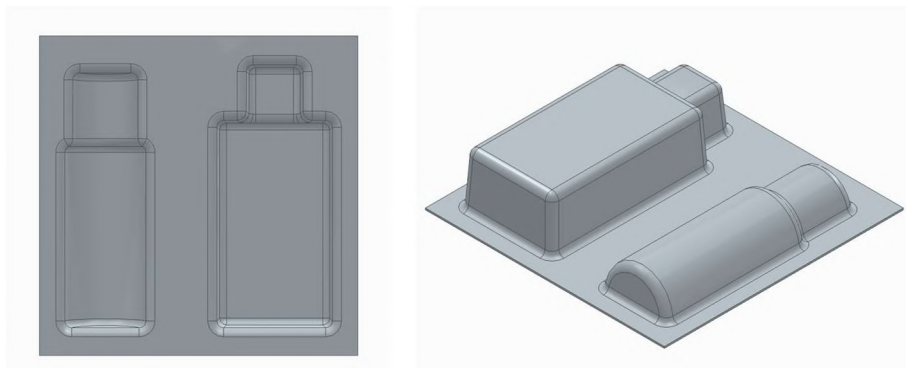


Ilustración 75: Diseño final del blister (Elaboración propia)

Los principales cambios incorporados en esta versión final son los siguientes:

- Se ha incrementado la separación entre cuerpos a 30 mm (coincidente con la altura máxima de la pieza), ya que se observó en la versión 2 que una mayor distancia entre volúmenes contribuía a la desaparición de los pliegues centrales.
- Se ha ajustado el ángulo de desmoldeo de todas las cavidades a 4º, lo que facilitará el desmoldeo y reducirá esfuerzos en zonas críticas. Además, se empleará un spray de desmoldeo de silicona para minimizar la posibilidad de roturas durante la extracción de la pieza.
- Se han aumentado en 1 mm los radios de redondeo respecto a la primera versión (pasando de 2 mm y 3 mm a 3 mm y 4 mm en las zonas cóncavas y convexas respectivamente). Esta decisión se fundamenta en los resultados obtenidos en los ensayos anteriores, en los que se comprobó que un mayor redondeo suaviza la caída de la lámina durante el termoformado y ayuda a reducir la aparición de pliegues en las esquinas.

Con estos ajustes, se espera conseguir una versión final del molde más robusta frente a los defectos detectados, sin comprometer la fidelidad geométrica ni las restricciones funcionales del blíster original.

7.1.2 DISEÑO FINAL DE LOS MOLDES

Una vez definido el diseño final del blíster, se generaron de nuevo los moldes tipo macho y tipo hembra a partir de dicha geometría.

El molde tipo macho ha sido generado directamente a partir de la geometría final del blíster, y se muestra en la Ilustración 76. En esta versión, se han incorporado directamente en el diseño los orificios de vacío, de forma que estos se impriman directamente en el molde, evitando operaciones de taladrado posteriores. Se han utilizado agujeros de 1 mm de diámetro, distribuidos de forma estratégica alrededor de los cuerpos principales. Además, se ha incrementado la densidad de orificios en las esquinas inferiores del volumen rectangular, consideradas zonas conflictivas por la aparición recurrente de pliegues y dificultades de

adaptación en ensayos anteriores. Esta configuración busca optimizar el vacío y mejorar la definición del termoformado en esas áreas críticas. Así mismo, se ha incrementado la altura de la base del molde a 14 mm para mejorar su rigidez y evitar deformaciones térmicas durante el termoformado, especialmente con láminas que requieren mayor temperatura.

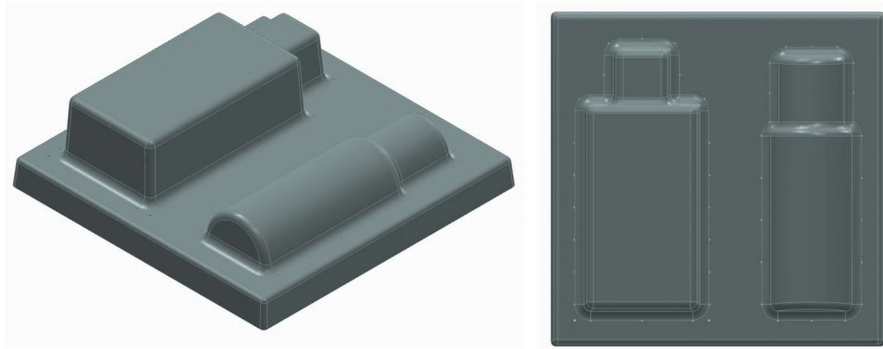


Ilustración 76: Versión final del molde macho (Elaboración propia)

En el molde hembra también se han incorporado agujeros de vacío de 1 mm de diámetro, distribuidos a lo largo del borde de las cavidades en su base, tal como se observa en la Ilustración 77. Esta disposición fue la que en los ensayos previos permitió reducir significativamente la visibilidad de las marcas de vacío en el blíster. Además, al tratarse de un molde más profundo, se ha definido un ángulo de desmoldeo de 5° para facilitar la extracción de la lámina termoformada sin dañar el producto.

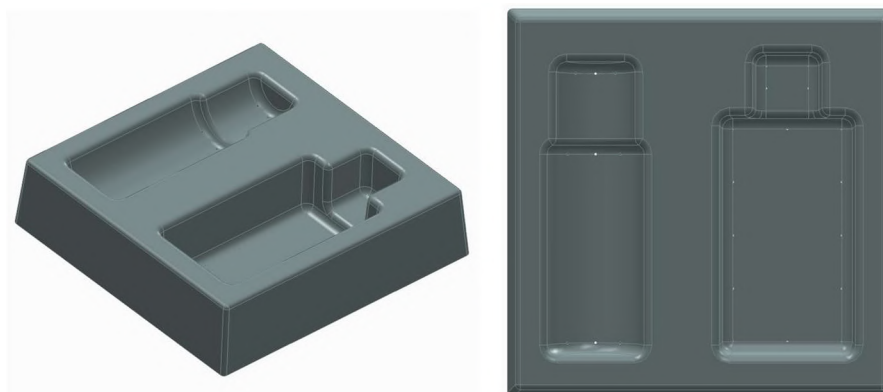


Ilustración 77: Versión final del molde hembra (Elaboración propia)

Es importante destacar que el diseño del blíster se ha planteado con un espesor de lámina de 1 mm. Si bien en el caso del molde macho este valor no afecta significativamente al diseño, en el molde hembra sí resulta determinante. Esto se debe a que, al tratarse de una cavidad, el diseño del molde hembra debe considerar el volumen que ocupará la lámina deformada durante el proceso. Por tanto, un mayor espesor de lámina generará huecos más amplios, mientras que un espesor más reducido los disminuirá. En este trabajo, se ha optado por un espesor estándar de 1 mm con el fin de ilustrar los resultados de manera general. No obstante, si se quisiera utilizar el molde hembra para obtener blísteres con un espesor concreto, sería necesario redimensionar previamente el diseño del blíster original, teniendo también en cuenta el posible encogimiento del material tras el termoformado.

7.2 *FABRICACIÓN DE LOS MOLDES MEDIANTE IMPRESIÓN 3D*

7.2.1 IMPRESIÓN DE LOS MOLDES

Para la fabricación de los moldes finales, se ha optado nuevamente por la impresión 3D utilizando resina Clear V4, debido a su buen equilibrio entre acabado superficial, resistencia térmica y coste, tal como se analizó en apartados anteriores. Ambos moldes, macho y hembra, se imprimen en la impresora Formlabs 3L, permitiendo obtener las geometrías requeridas con buena precisión dimensional y con buen acabado superficial. La impresión se realiza con un grosor de capa de 0,1 mm, una densidad de soportes de 0,8 y un tamaño de punto de contacto de 0,4 mm, con el objetivo de facilitar su retirada y minimizar las marcas en la superficie final.

La Tabla 19 recoge las variables de impresión de los moldes, incluyendo el tiempo estimado de fabricación y el volumen de material consumido, obtenidos a partir de la configuración de impresión en PreForm para los moldes macho y hembra, como se muestra en Ilustración 78 e Ilustración 79, respectivamente.

Estos datos corresponden al caso en que cada molde se imprimiera de forma independiente, tal como ocurriría si solo se necesitara uno de los dos. No obstante, en la práctica se optó por

imprimir ambos moldes simultáneamente en una misma tirada. El tiempo total de impresión conjunta fue de 23 horas y 8 minutos, con un consumo total de resina de 690,48 ml.

Tabla 19: Variables de impresión de los moldes finales (Elaboración propia)

Molde	Tiempo	Material (mL)	Número de Capas
Macho	12 h 58 min	282.53	1754
Hembra	14 h 13 min	403.30	1324

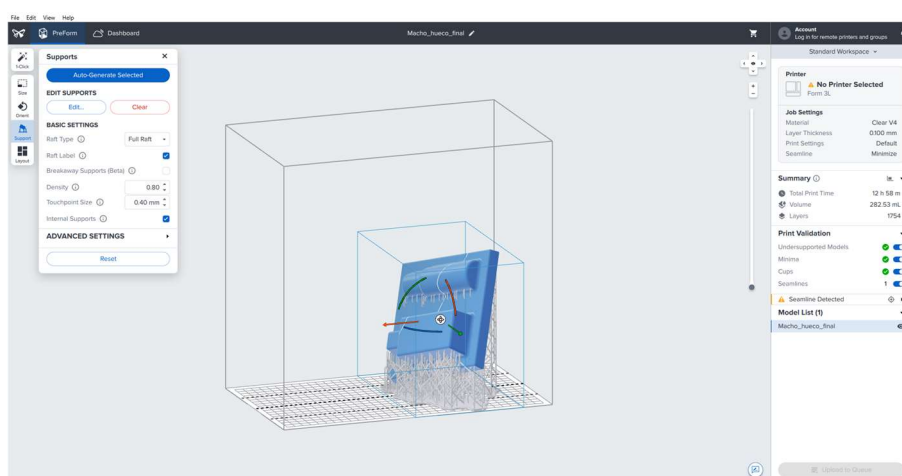


Ilustración 78: Configuración de impresión molde final macho (Elaboración propia)

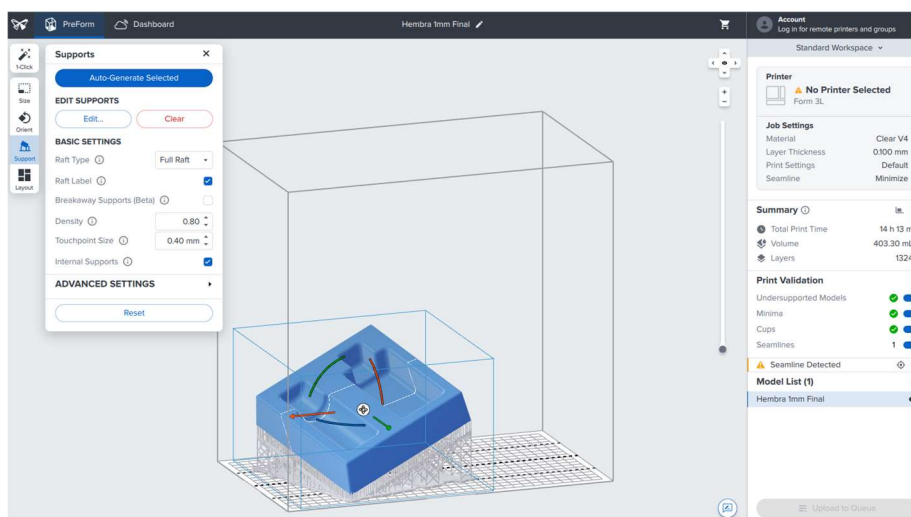


Ilustración 79: Configuración de impresión molde final hembra (Elaboración propia)

7.2.2 RESULTADO DE LA IMPRESIÓN

Se obtiene la impresión de ambos moldes sin incidencias, como se aprecia en Ilustración 80. A continuación, se lleva a cabo el post-procesado siguiendo los mismos pasos aplicados en versiones anteriores: se retiran los soportes, se lavan las piezas con alcohol isopropílico, se realiza el curado térmico y se eliminan las posibles marcas de soporte mediante un lijado suave. El resultado final son los moldes definitivos fabricados en impresión 3D, mostrados en la Ilustración 81.



Ilustración 80: Resultado de la impresión de los moldes finales (Elaboración propia)



Ilustración 81: Moldes finales fabricados con impresión 3D (Elaboración propia)

7.3 FABRICACIÓN DE MOLDES MEDIANTE MECANIZADO CNC

A diferencia del enfoque seguido con impresión 3D, en este caso únicamente se ha fabricado el molde macho, debido a restricciones de tiempo y recursos disponibles. Aun así, esta pieza permite evaluar aspectos clave como la calidad superficial obtenida por mecanizado, la estabilidad térmica del molde y la viabilidad de su uso en ensayos reales de termoformado.

7.3.1 PREPARACIÓN DEL MECANIZADO

El código de mecanizado, o trayectoria de herramientas, fue generado por Javier Manini (Director de este Proyecto) a partir del modelo CAD diseñado en Solid Edge, utilizando el software Siemens NX. Este programa permite no solo definir las operaciones de mecanizado necesarias, sino también simular el proceso completo, estimar los tiempos de fabricación y prevenir posibles colisiones o errores antes de pasar el archivo a la máquina real.

Para el mecanizado de la pieza macho en aluminio. Se ha empleado una pieza de AL 5075, seleccionada por disponibilidad en el taller, aunque se reconoce que no es necesariamente el aluminio óptimo para altas exigencias térmicas o de desgaste. El proceso de mecanizado se llevó a cabo en el centro de mecanizado Hartford HV-35, disponible en el laboratorio de fabricación de ICAI, utilizando control Siemens (Ilustración 82).

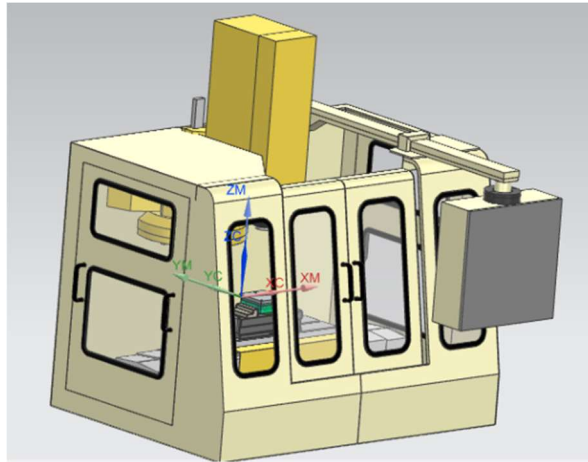


Ilustración 82: Centro de mecanizado Hartford HV-35 de la Universidad con control Siemens (Captura realizada en Siemens NX)

El proceso de mecanizado se divide en dos fases, y requiere del uso de una placa base de sujeción. Esta base es necesaria debido a que el diseño del molde presenta todas sus paredes con ángulos de desmoldeo, lo cual impide una sujeción directa convencional. Para ello se añadieron al molde unos taladros roscados con inserciones helicoidales M6 para garantizar la correcta fijación del molde a la base. También se previeron dos fijas de centrado, cuyo objetivo es asegurar el correcto posicionamiento entre la placa base y el molde durante las operaciones de mecanizado (Ilustración 83).

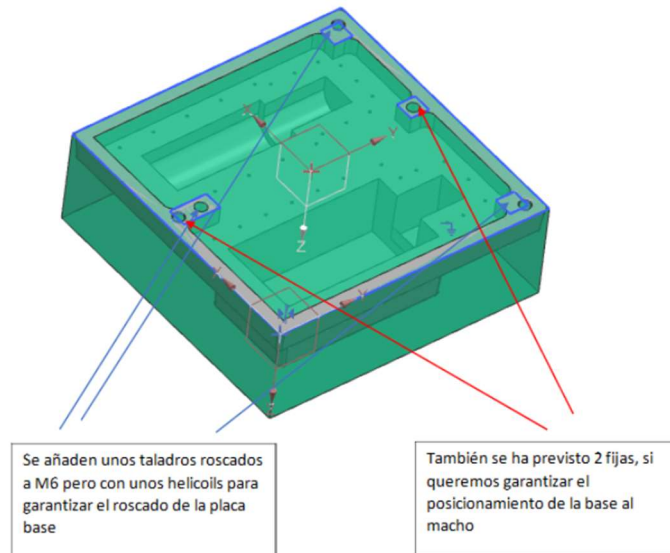


Ilustración 83: Cambios realizados al molde para la sujeción a placa base (Elaboración propia)

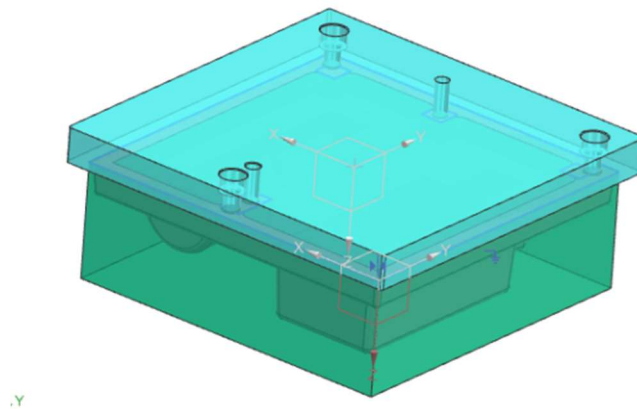


Ilustración 84: Bloque de aluminio y placa base (Elaboración propia)

Las fases del mecanizado son las siguientes:

- **Fase 1:** Se realiza la sujeción entre mordazas para mecanizar la cara inferior del molde. Esta fase permite realizar el vaciado del interior del molde y los agujeros que permitirán la unión de la pieza con la pieza base. Ver Ilustración 85.
- **Fase 2:** Se realiza la sujeción entre mordazas, pero esta vez de la pieza base. Se mecaniza la cara opuesta para realizar el contorno del molde. Ilustración 86.

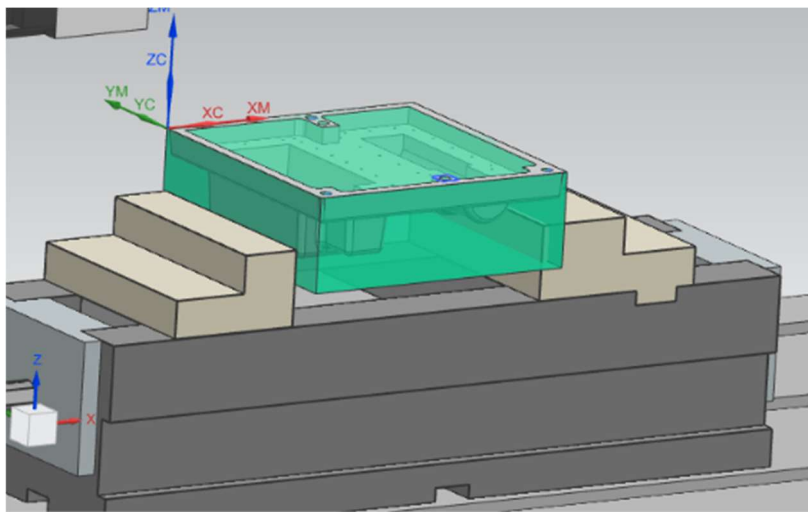


Ilustración 85: Fase 1 del mecanizado (Elaboración propia)

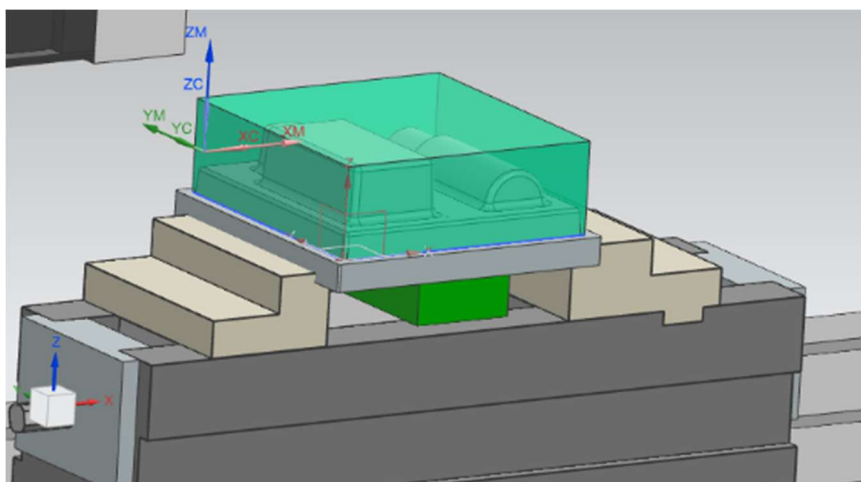


Ilustración 86: Fase 2 del mecanizado (Elaboración propia)

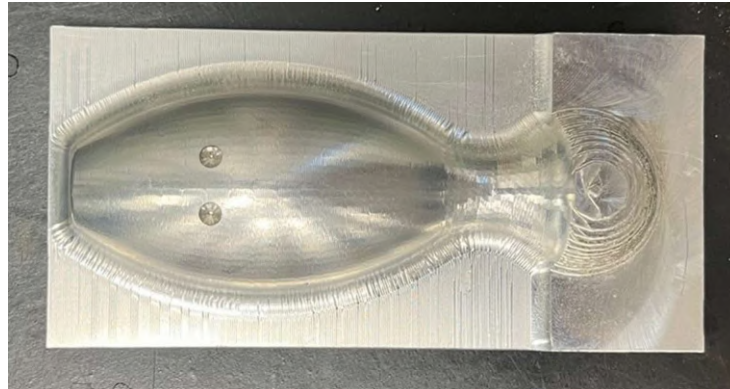
La Ilustración 87 muestra una captura de las operaciones del mecanizado. Estas operaciones se pueden encontrar de forma más detallada en el ANEXO I. Mecanizado CNC, junto con el listado de herramientas necesarias en cada fase.

Título	Traye..
GEOMETRY	
Items no utilizados	
MCS_MILL	
WORKPIECE	
FASE1	
CAJAS	✓
PLAN-BASE	✓
PUNTEADO-PLACA	✓
PLANAR_PROFILING	✓
PERFMACHO	✓
PUNTEADO08	✓
PUNTEADO08_COPY	✓
2	
FASE2	
CAVITY_MILL	✓
REST_MILLING	✓
ZLEVEL_PROFILE_STEEP	✓
AREA_MILL	✓
AREA_MILL_1	✓
DRILLING	✓
DRILLING 1	✓

Ilustración 87: Lista de operaciones CAM creadas por Javier Manini (Captura: Elaboración propia)

Para el realizado del molde, al tratarse de un prototipo y no de una pieza de producción final, se priorizó la viabilidad y rapidez del proceso por encima de la calidad superficial, por lo que las herramientas seleccionadas y las pasadas empleadas fueron relativamente agresivas. Esto implica que las marcas de las trayectorias de herramienta pueden quedar visibles en la superficie final del molde.

No obstante, es importante destacar que, en un entorno industrial, el acabado superficial puede mejorarse significativamente mediante el uso de fresas de menor diámetro, estrategias de pasada más finas y parámetros de corte optimizados (ver Ilustración 88). Por tanto, aunque este molde mecanizado presenta ciertas limitaciones estéticas, resulta válido para los objetivos del presente trabajo y permite extraer conclusiones representativas sobre la calidad y viabilidad del mecanizado como proceso de fabricación de moldes para termoformado.



*Ilustración 88: Ejemplo de pieza mecanizada disponible en el laboratorio con acabado superficial fino
(Foto: Elaboración propia)*

7.3.2 PROCESO DE MECANIZADO

Una vez definido el programa, este se transfiere al centro de mecanizado Hartford HV-35 para su ejecución. La Ilustración 89 recoge la comparación entre la simulación generada en el entorno CAM y las imágenes reales del proceso de mecanizado.

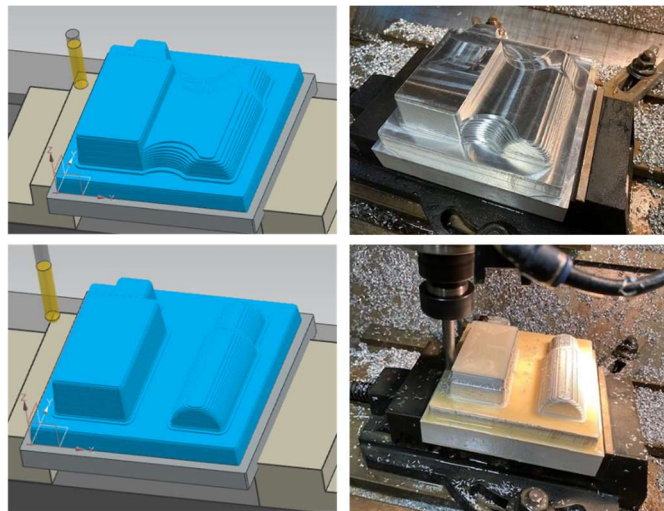


Ilustración 89: comparativa entre la simulación CAM en Siemens NX (izquierda) y el proceso real de mecanizado del molde tipo macho en aluminio (derecha) (Elaboración propia)

El programa también permite medir el tiempo de mecanizado de las dos fases. Estos tiempos se recogen en la Tabla 20. El tiempo total estimado es de 3 horas y 13 minutos, sin embargo, es importante señalar que este tiempo corresponde a una estrategia de mecanizado enfocado

a obtener un prototipo funcional en un plazo razonable. En el caso de querer un acabado más fino y homogéneo, se requeriría de mayores tiempos de ejecución.

Tabla 20: Tiempos de mecanizado del molde (Elaboración propia)

Fase	Tiempo (min)
Fase 1	72.34
Fase 2	120.66
Total	193.00

Además del tiempo de mecanizado, se ha calculado el volumen de material necesario para la fabricación del molde. La Tabla 21 recoge los pesos estimados del material utilizado, incluyendo:

- El bloque de aluminio bruto del que se parte para mecanizar el molde
- La pieza base adicional fabricada para facilitar la sujeción de la pieza en la fase 2 del proceso.

Tabla 21: Material empleado para el mecanizado (Elaboración propia)

Fase	Peso (kg)
Bloque	2.874
Pieza Base	1.012
Total	3.886

Cabe destacar que, del volumen total del bloque original, únicamente se utiliza alrededor de un 16% para conformar el molde final. El resto de material se elimina durante las operaciones de desbaste. Esta baja eficiencia volumétrica es común en procesos de mecanizado de moldes.

7.3.3 RESULTADO DEL MECANIZADO

El resultado del mecanizado del molde tipo macho puede observarse en la Ilustración 90. La operación se llevó a cabo sin incidencias, obteniéndose una geometría fiel al modelo original. No obstante, como era de esperar dadas las condiciones del prototipado, las marcas de las pasadas de herramienta son claramente visibles en la superficie del molde.

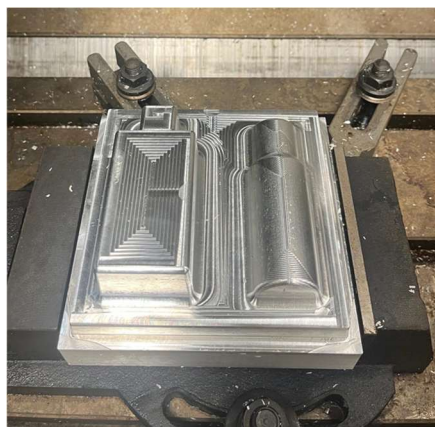


Ilustración 90: Resultado del mecanizado de la pieza macho (Elaboración propia)

En esta fase inicial, los orificios de vacío aún no se habían incorporado al molde. Para evaluar la necesidad de estos, se realizaron un par de ensayos preliminares de termoformado sin vacío, ver Ilustración 91. Tal y como se preveía, la ausencia de agujeros provocó una mala adaptación de la lámina al molde, confirmando la importancia de este sistema. Se procedió a realizar los agujeros de vacío con una broca de 1 mm de diámetro, para asegurar un buen sistema de vacío.



Ilustración 91: Prueba de termoformado del molde macho en Aluminio sin agujeros de vacío (Elaboración propia)

Como prueba adicional, se sometió la esquina superior izquierda del molde a un proceso de chorreado para evaluar cómo esto podía afectar a acabado superficial de la pieza y a la calidad del blíster final. Tras hacer una prueba de termoformado con esta configuración se observó que el chorreado se transfiere mucho a la superficie del blíster, generando una textura grumosa no deseada, como muestra la Ilustración 92. Esta textura compromete el acabado visual del envase por lo que se decide no aplicar un chorreado al resto del molde. En consecuencia, la calidad superficial de esta esquina no se tendrá en cuenta en la evaluación de los resultados de termoformado obtenidos con este molde mecanizado.



Ilustración 92: Efecto del chorreado en el blíster (Elaboración propia)

El resultado final del molde en aluminio puede observarse en la Ilustración 93.



Ilustración 93: Molde macho en Aluminio (Elaboración propia)

Capítulo 8. EVALUACIÓN FINAL DE RESULTADOS Y COMPARATIVA TECNOLÓGICA

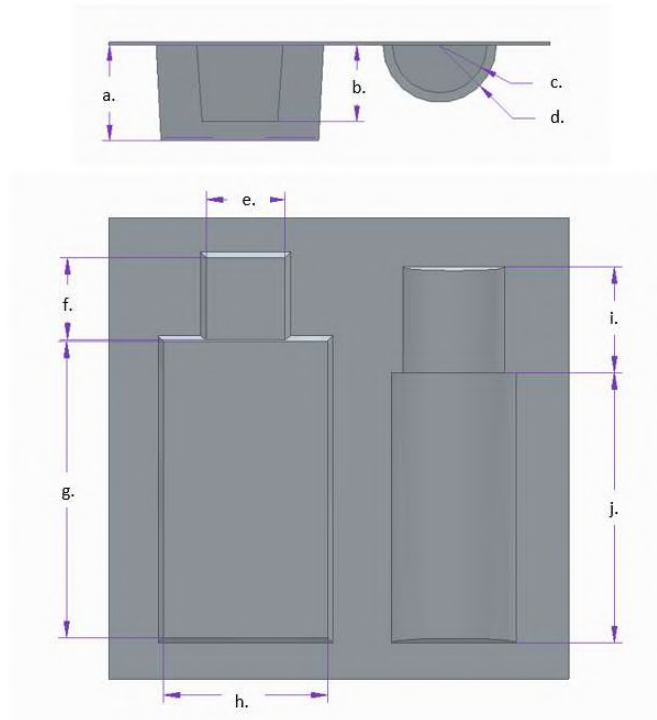
En este capítulo se realiza una evaluación completa de los resultados obtenidos en el proyecto, con especial atención a los moldes finales fabricados. Se analizan los resultados de los ensayos de termoformado realizados con estos moldes, así como su comportamiento térmico, su funcionalidad y su precisión dimensional. No obstante, con el objetivo de ofrecer una visión más amplia, se revisitan también otras tecnologías de fabricación empleadas en fases anteriores del proyecto, comparando aspectos como coste, tiempo de fabricación y calidad superficial.

Además, se incluye un análisis complementario sobre el comportamiento de los distintos materiales termoformados en cuanto a la variación de espesor, lo que permite valorar su adecuación para diseños con geometrías similares. Esta visión global permite establecer conclusiones sólidas sobre la viabilidad y limitaciones de cada alternativa evaluada.

8.1 ANÁLISIS DIMENSIONAL DE LOS MOLDES FINALES

Con el fin de evaluar la precisión dimensional de los moldes fabricados frente a sus respectivos modelos de diseño, se ha realizado una serie de mediciones directas sobre las piezas obtenidas. Este análisis permite identificar las posibles desviaciones en función del proceso de fabricación utilizado (impresión 3D o mecanizado) y valorar si estas diferencias pueden tener un impacto significativo en la funcionalidad del blíster termoformado.

Para facilitar la identificación de cada medida y su correspondencia con las tablas de resultados, la Ilustración 94 muestra la nomenclatura empleada para cada dimensión evaluada. A continuación, se presentan en la Tabla 22 y en la Tabla 23 los resultados de las obtenidas de los moldes macho y del molde hembra, respectivamente.



*Ilustración 94: Esquema de referencias dimensionales empleadas para el análisis de los moldes
(Elaboración propia)*

*Tabla 22: Comparativa entre dimensiones teóricas y medidas reales del molde tipo macho (mm)
(Elaboración propia)*

Medida	Teórica	Impresión 3D	Desviación	Mecanizado	Desviación
a	30	29.98	-0.07%	30.02	0.07%
b	24	23.75	-1.04%	23.98	-0.08%
c	30	29.65	-1.17%	29.72	-0.93%
d	18	17.97	-0.17%	18.05	0.28%
e	24	23.86	-0.58%	23.93	-0.29%
f	25	25.02	0.08%	25.01	0.04%
g	90	90.27	0.30%	90.00	0.00%
h	50	50.07	0.14%	50.03	0.06%
i	32	31.92	-0.25%	31.96	-0.12%
j	80	79.80	-0.25%	80.05	0.06%

Tabla 23: Comparativa entre dimensiones teóricas y medidas reales del molde tipo hembra fabricado por impresión 3D (mm) (Elaboración propia)

Medida	Teórica	Impresión 3D	Desviación
a	31	30.82	-0.58%
b	26	25.95	-0.19%
c	32	31.88	-0.38%
d	19	18.83	-0.89%
e	27	26.45	-2.04%
f	26	25.81	-0.73%
g	92	92.10	0.11%
h	52	51.99	-0.02%
i	33	32.92	-0.24%
j	82	81.79	-0.26%

Es importante destacar que el proceso de medición presenta ciertas limitaciones debido a la geometría del molde. Las zonas con ángulos de desmoldeo y radios de redondeo, junto con las superficies curvas, dificultan la identificación precisa de los puntos de referencia, lo que introduce un posible error humano en las mediciones.

A pesar de ello, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Moldes macho: Comparación entre impresión y mecanizado

- El molde mecanizado muestra desviaciones más equilibradas, con errores que oscilan entre -0.93% y 0.28% y un promedio de -0.09%. Frente al molde impreso en 3D cuyas desviaciones se concentran entre -1.17% y 0.3%, y un promedio de -0.3%.
- Las desviaciones en el molde impreso en 3D suelen ser negativas, indicando que la pieza impresa a tendido a ser ligeramente más pequeña que el modelo CAD. Esto puede ser debido a una ligera contracción térmica del material sufrido durante la fotopolimerización y el post-curado.
- Aparecen mayores desviaciones en elementos verticales o de geometría estrecha (como los cuellos).

Molde Hembra: Impresión 3D

- El molde hembra en 3D tiene desviaciones que oscilan entre -2.04% y 0.11%, con un promedio superior al del macho de -0.52%.
- Esta menor precisión puede deberse a que la geometría hembra presenta cavidades más profundas lo que podría dificultar una fotopolimerización homogénea en toda la pieza y favorecer deformaciones por tensiones internas acumuladas.

Como conclusión genera, el mecanizado en aluminio presenta mejor fidelidad geométrica y menor dispersión de errores, que lo convierte en una opción más fiable para la fabricación de piezas con tolerancias dimensionales estrictas.

8.2 EVALUACIÓN DEL TERMOFORMADO CON MOLDES FINALES

En este apartado se recogen los ensayos de termoformado realizados usando la versión final de los moldes desarrollados mediante impresión 3D (SLA con resina Clear V4) y mecanizado CNC en aluminio. Para cada tipo de molde (macho y hembra), se han utilizado láminas de distintos materiales y espesores con el objetivo de evaluar la calidad del termoformado, el comportamiento de los moldes en condiciones reales de uso y la fidelidad geométrica del blíster obtenido.

8.2.1 MOLDES IMPRESOS MEDIANTE FABRICACIÓN ADITIVA

8.2.1.1 Molde Macho Impreso en 3D

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al termoformar distintas láminas sobre el molde tipo macho fabricados mediante impresión 3D. Los parámetros de termoformado, junto con los materiales y espesores de las láminas utilizadas, se recogen en la Tabla 24.

Tabla 24: Parámetros de termoformado de los ensayos del modelo macho impreso en 3D (Elaboración propia)

Material	Espesor (mm)	Temperatura de calentamiento (°C)	Tiempo de calentamiento (s)
PETG	0.70	152	190

PETG	1.00	154	140
PS	0.50	156	50
PS	1.00	159	85
PVC	0.70	151	70
PC	0.75	223	240

Los ensayos realizados con el molde macho muestran resultados coherentes con los ensayos realizados previamente:

- PETG 0.7 mm (Ilustración 95): Se mantiene el pliegue característico en la esquina inferior del cuerpo rectangular, lo que confirma que la geometría sigue generando zonas de concentración de material. Además, son visibles las marcas de los puntos de soporte, incluso tras el lijado. Esto se mantiene a lo largo de los ensayos con los demás materiales.
- PETG 1.0 mm (Ilustración 96): Mejora ligeramente la rigidez del blíster, pero persisten las marcas de soporte y no se elimina el pliegue.
- PS 0.5 mm (Ilustración 97): El material resulta muy frágil, adoptando un tono más translúcido tras el termoformado. Aparecen marcas de tensión en las esquinas del rectángulo, donde la lámina sufre mayor esfuerzo durante el desmoldeo.
- PS 1.0 mm (Ilustración 98): Se obtiene un acabado más estable gracias al mayor espesor, pero continúan presentes defectos como el *webbing* en la esquina y las huellas de los soportes.
- PVC 0.7 mm (Ilustración 99): Se obtiene un buen resultado, con una buena fidelidad geométrica (excepto por el pliegue recurrente de la esquina. Como los demás ensayos se nota las marcas de líneas de capa y alguna marca de los puntos de contacto de los soportes.
- PC 0.75 mm (Ilustración 100): Este ensayo presenta los mismos problemas destacados en las pruebas con los otros materiales. Además, en esta ocasión se observa una menor adaptación del material en la transición entre los cuerpos y la base, donde la geometría resulta más redondeada de lo esperado. Esta pérdida de definición puede deberse a un enfriamiento prematuro del material, que, aunque ha

sido calentado adecuadamente, no ha mantenido su temperatura lo suficiente como para ajustarse con precisión a los detalles del molde en esas zonas críticas.

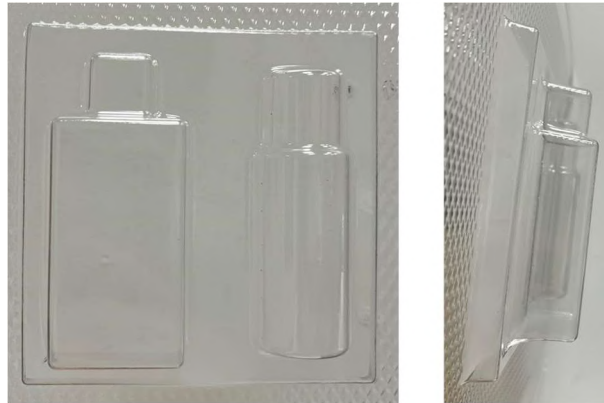


Ilustración 95: Ensayo termoformado - molde macho Impreso en 3D - PETG 0.7 mm (Elaboración propia)

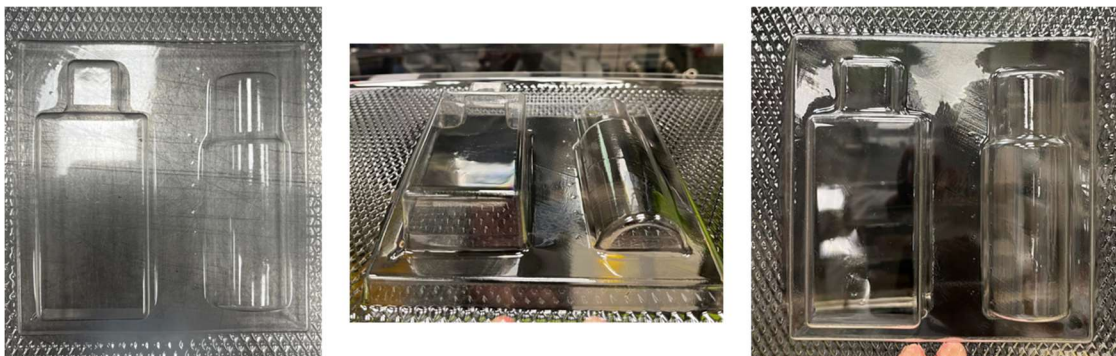


Ilustración 96: Ensayo termoformado - molde macho Impreso en 3D - PETG 1.0 mm (Elaboración propia)

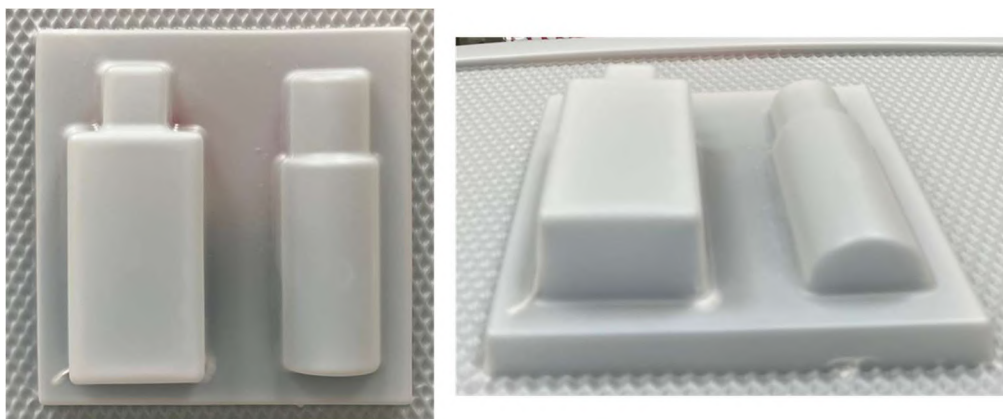


Ilustración 97: Ensayo termoformado - molde macho Impreso en 3D - PS 0.5 mm (Elaboración propia)



Ilustración 98: Ensayo termoformado - molde macho en 3D - PS 1.0 mm (Elaboración propia)



Ilustración 99: Ensayo termoformado - molde macho en 3D - PVC 0.7 mm (Elaboración propia)

Ilustración 100: Ensayo termoformado - molde macho en 3D - PC 0.75 mm (Elaboración propia)

Intento final de corrección del pliegue mediante varillas de guiado

Como último intento para eliminar el pliegue persistente en la esquina inferior del rectángulo durante el termoformado con el molde tipo macho, se optó por seguir la recomendación de un experto en la industria del termoformado, Pedro Doblado de la empresa Ferpack. Según este profesional, una solución común para prevenir la formación de pliegues es el uso de varillas de guiado, colocadas de forma perpendicular a la dirección del pliegue. Estas varillas

actúan como barreras físicas que controlan el descenso y la deformación de la lámina durante el conformado.

Para evitar que el material se adhiriera a las varillas, estas se recubren con cinta de teflón. En base a esta sugerencia, se diseñó e implementó un sistema experimental con varillas colocadas estratégicamente en la zona crítica del molde, como se muestra en la Ilustración 101. Se realizaron posteriormente varios ensayos de termoformado, cuyos parámetros se recogen en la Tabla 25, con el objetivo de evaluar la eficacia del sistema en la eliminación del defecto.

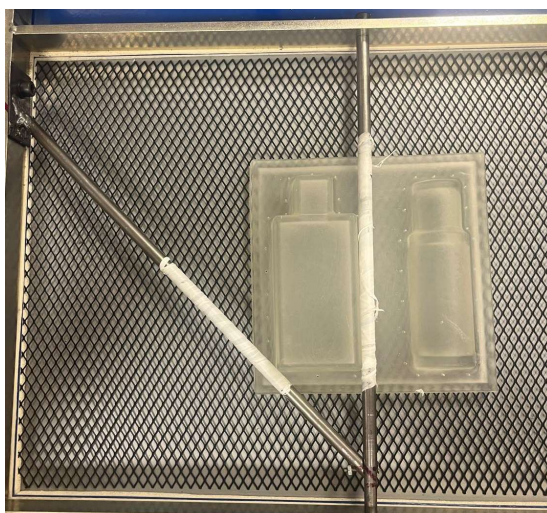


Ilustración 101: Sistema de varillas de guiado (Elaboración propia)

Tabla 25: Parámetros de termoformado de los ensayos del modelo macho con sistema de varillas de guiado (Elaboración propia)

Material	Espesor (mm)	Temperatura de calentamiento (°C)	Tiempo de calentamiento (s)
PETG	0.70	140	150
PETG	1.00	147	170
PS	0.50	160	95
PS	1.00	155	120
PVC	0.70	130	90
PC	0.75	220	150

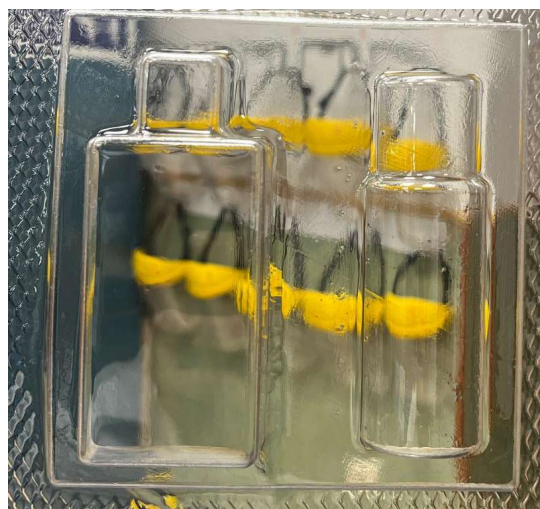
Los resultados de las pruebas muestran que las varillas ayudan a reducir significativamente el pliegue en la esquina conflictiva, en algunos casos eliminarla por completo (ver Ilustración 102 e Ilustración 103). Sin embargo, se generan nuevos pliegues en esquinas opuestas, esta vez en dirección paralela a la varilla central.

Además, se observan marcas o deformaciones en la zona cercana a las varillas, visibles especialmente en la Ilustración 105 y, de forma más acusada, en la Ilustración 107. Esto sugiere que las varillas acumulan calor en exceso, incluso a pesar del recubrimiento de teflón. La causa parece estar relacionada con la configuración de la máquina de termoformada empleada, ya que las varillas están ubicadas muy próximas a las resistencias superiores, lo que acaba resultando en un sobrecalentamiento localizado del material.

Por tanto, en estas condiciones, el sistema de varillas no solo no resuelve el problema original, sino que introduce nuevos defectos. Se descarta así su uso en los ensayos con moldes mecanizados de aluminio. Para futuros trabajos, se propone explorar alternativas de pre-estiramiento o regulación más precisa del calentamiento, empleando equipos con control de temperatura más avanzado o sistemas de asistencia neumática.



*Ilustración 102: Ensayos del modelo macho con sistema de varillas de guiado – PETG 0.7 mm
(Elaboración propia)*



*Ilustración 103: Ensayos del modelo macho con sistema de varillas de guiado – PETG 1.0 mm
(Elaboración propia)*



*Ilustración 104: Ensayos del modelo macho con sistema de varillas de guiado – PS 0.5 mm
(Elaboración propia)*



*Ilustración 105: Ensayos del modelo macho con sistema de varillas de guiado – PS 1.0 mm
(Elaboración propia)*



*Ilustración 106: Ensayos del modelo macho con sistema de varillas de guiado – PVC 0.7 mm
(Elaboración propia)*



*Ilustración 107: Ensayos del modelo macho con sistema de varillas de guiado – PC 0.75 mm
(Elaboración propia)*

8.2.1.2 Molde hembra impreso en 3D

Se realizaron ensayos de termoformado similares con el molde hembra, los parámetros resumidos en la Tabla 26.

Tabla 26: Parámetros de termoformado de los ensayos del modelo hembra impreso en 3D (Elaboración propia)

Material	Espesor (mm)	Temperatura de calentamiento (°C)	Tiempo de calentamiento (s)
PETG	0.70	160	60
PETG	1.00	148	90
PS	0.50	152	75
PS	1.00	162	100
PVC	0.70	150	56
PC	0.75	215	142

A continuación, se describen los principales resultados observados:

- PETG 0.7 mm (Ilustración 108): El blíster obtenido presenta una muy buena fidelidad a la geometría del molde. Sin embargo, se siguen reproduciendo detalles como los agujeros de vacío o la textura de la superficie. Por otro lado, se observa una

zona ligeramente blanquecina en la esquina superior derecha debido a un sobrecalentamiento localizado. Esta sensibilidad térmica puede atribuirse al estrecho rango de temperatura de termoformado del PETG, lo que lo convierte en un material difícil de trabajar.

- PETG 1.0 mm (Ilustración 109): Se obtiene nuevamente un buen resultado geométrico y superficial. En este caso, se puede ver cómo las capas de impresión 3D del molde se transfieren visiblemente a la superficie del cilindro. Dado que el acabado es comparable al de la lámina de 0.7 mm, resulta más eficiente optar por esta última, al requerir menos material y ofrecer una respuesta similar.
- PS 0.5 mm (Ilustración 110): Ofrece buena fidelidad geométrica, aunque en las zonas profundas del molde, especialmente en las esquinas del cuerpo rectangular, se detecta una pérdida significativa de espesor. Esto se manifiesta con una mayor transparencia del material, lo que indica un estiramiento excesivo en esas áreas críticas.
- PS 1.0 mm (Ilustración 111): Mejora notablemente en términos de conservación del espesor en comparación con la versión de 0.7 mm. Sin embargo, también transfiere con claridad las imperfecciones superficiales del molde, lo que afecta la estética del blíster final.
- PVC 0.7 mm (Ilustración 112): El acabado superficial es aceptable, pero se detecta una menor fidelidad en los detalles. En la imagen se observa que la lámina no ha abrazado completamente las esquinas del molde, lo que sugiere una menor adaptabilidad del material a geometrías complejas.
- PC 0.75 mm (Ilustración 113): El resultado es correcto en términos de forma, pero presenta defectos en la superficie del blíster en forma de pequeñas burbujas o marcas de aire atrapado. Este comportamiento podría estar relacionado con la preparación de la lámina o una sensibilidad específica del material al calor residual y a la presión en el molde hembra.



Ilustración 108: Ensayo termoformado - molde hembra impreso en 3D - PETG 0.7 mm (Elaboración propia)



Ilustración 109: Ensayo termoformado - molde hembra impreso en 3D - PETG 1.00 mm (Elaboración propia)



Ilustración 110: Ensayo termoformado - molde hembra impreso en 3D - PS 0.7 mm (Elaboración propia)



Ilustración 111: Ensayo termoformado - molde hembra impreso en 3D - PS 1.0 mm (Elaboración propia)



Ilustración 112: Ensayo termoformado - molde hembra impreso en 3D 0.7 mm (Elaboración propia)



Ilustración 113: Ensayo termoformado - molde hembra impreso en 3D - PC 0.75 mm (Elaboración propia)

8.2.2 MOLDE FABRICADO MEDIANTE MECANIZADO

8.2.2.1 Molde macho mecanizado

Se realiza las mismas pruebas con el molde macho mecanizado en aluminio. La Tabla 27 recoge los parámetros de los ensayos de termoformado realizado.

Tabla 27: Parámetros de termoformado de los ensayos del modelo macho mecanizado (Elaboración propia)

Material	Espesor (mm)	Temperatura de calentamiento (°C)	Tiempo de calentamiento (s)
PETG	0.70	148	90
PETG	1.00	152	95
PS	0.50	153	46
PS	1.00	154	70
PVC	0.70	148	65
PC	0.75	210	150

De los ensayos de termoformado se destaca lo siguiente:

- PETG 0.7 mm (Ilustración 114): El blíster presenta una notable transferencia de las líneas de desbaste del mecanizado, especialmente en la zona plana de la base del molde. Como era previsible, aparece el pliegue recurrente en la esquina inferior del rectángulo grande, fenómeno común a todos los ensayos con este molde
- PETG 1 mm (Ilustración 115): Las marcas de desbaste son menos evidentes, sobre todo en la base plana del blíster, donde prácticamente desaparecen. El mayor espesor parece aportar mayor rigidez al resultado final, aunque el pliegue sigue presente.
- PS 0.5 mm (Ilustración 116): El comportamiento es similar al observado con el molde macho fabricado por impresión 3D. Las tensiones durante el desmoldeo se reflejan claramente en las esquinas del rectángulo. No obstante, el acabado superficial es bastante limpio y las líneas de desbaste apenas se notan. El material resulta frágil debido a su bajo espesor
- PS 1.0 mm (Ilustración 117): El blíster gana firmeza y mantiene mejor el espesor, aunque las marcas de las pasadas del mecanizado se hacen más visibles que en el ensayo con lámina de 0.5 mm.

- PVC 0.7 mm (Ilustración 118): El acabado superficial muestra defectos significativos: las líneas de mecanizado son especialmente visibles en el cilindro, y aparece una deformación extraña en uno de los lados del rectángulo que podría deberse a aire atrapado o problemas de calentamiento localizado.
- PC 0.75 mm (Ilustración 119): Se observan pequeñas burbujas atrapadas en la lámina, aunque menos pronunciadas que en el ensayo realizado con el molde hembra impreso en 3D. Además, el material no logra reproducir fielmente toda la geometría del molde, probablemente por una temperatura de conformado insuficiente. También es visible un pliegue en la parte superior del tapón cuadrado, lo cual refuerza la hipótesis de falta de calentamiento homogéneo. Las marcas del mecanizado también se aprecian con claridad.



Ilustración 114: Ensayo termoformado - molde macho mecanizado - PETG 0.70 mm (Elaboración propia)

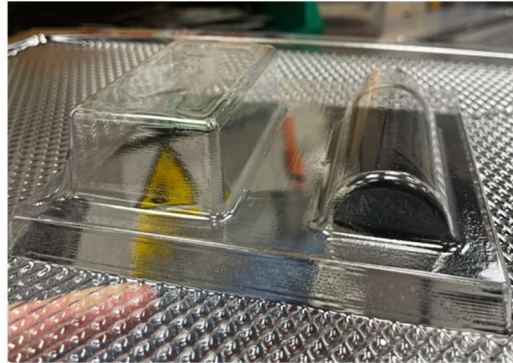


Ilustración 115: Ensayo termoformado - molde macho mecanizado - PETG 1.00 mm (Elaboración propia)



Ilustración 116: Ensayo termoformado - molde macho mecanizado - PS 0.50 mm (Elaboración propia)



Ilustración 117: Ensayo termoformado - molde macho mecanizado - PS 1.00 mm (Elaboración propia)



Ilustración 118: Ensayo termoformado - molde macho mecanizado - PVC 0.70 mm (Elaboración propia)

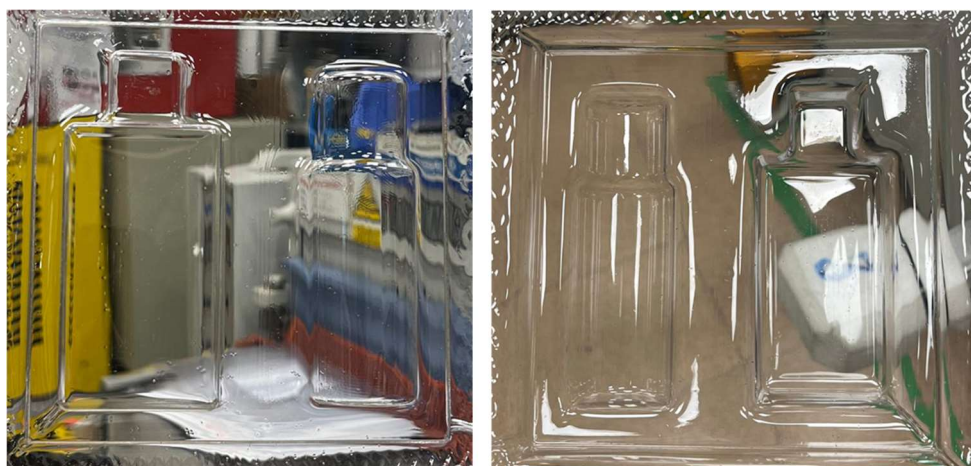


Ilustración 119: Ensayo termoformado - molde macho mecanizado - PC 0.75 mm (Elaboración propia)

8.2.3 ANÁLISIS DEL ESPESOR DE LAS LÁMINAS TRAS EL TERMOFORMADO

Adicionalmente, con el fin de evaluar el comportamiento de los distintos materiales termoformados, se ha realizado un análisis detallado del espesor final alcanzado tras el proceso de termoformado. Para ello, se seleccionaron ocho zonas representativas de la geometría de los moldes, que incluyen superficies planas, transiciones y esquinas, tal y como se indica en la Ilustración 120. Las zonas fueron numeradas del 1 al 8, y se midió el espesor medio en cada una, considerando varias piezas obtenidas a lo largo del proyecto y promediando diferentes puntos dentro de la misma zona para mayor fiabilidad.

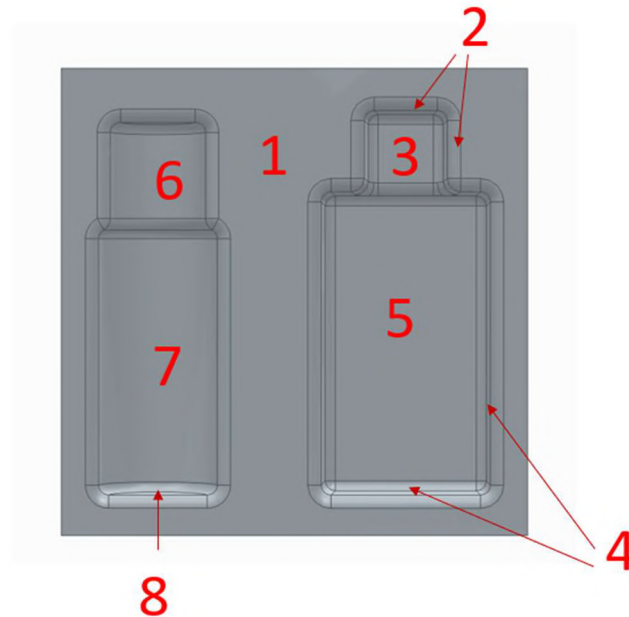


Ilustración 120: Identificación de las zonas de medición de espesor en el blister para el análisis de contracción del material tras termoformado (Elaboración propia)

Los resultados de estas mediciones se presentan en la Tabla 28, donde se recogen los espesores medios obtenidos para cada zona, junto con el valor medio general por pieza y el porcentaje de contracción respecto al espesor nominal de la lámina original. Este análisis se realizó tanto para moldes tipo macho como tipo hembra, y con una amplia variedad de materiales comerciales: PETG, PS, PVC y PC, en distintos grosores.

Tabla 28: Promedio de espesores medidos de las distintas zonas del blíster para distintos materiales de termoformado (mm) (Elaboración propia)

Molde	Material	Espesor (mm)	Medidas de Espesor (mm)								Promedio de material (mm)	Reducción promedia por material (%)
			1	2	3	4	5	6	7	8		
Macho	PETG	0.5	0.48	0.41	0.34	0.44	0.44	0.42	0.42	0.39	0.42	16.4%
	PETG	0.7	0.52	0.47	0.61	0.47	0.61	0.64	0.64	0.52	0.56	20.1%
	PETG	1	0.83	0.77	0.97	0.75	0.99	0.89	0.84	0.80	0.85	14.6%
	PS	0.5	0.30	0.27	0.36	0.31	0.39	0.39	0.38	0.27	0.33	33.6%
	PS	1	0.73	0.69	0.95	0.69	0.95	0.87	0.90	0.71	0.81	19.0%
	PVC	0.7	0.58	0.48	0.52	0.46	0.57	0.59	0.59	0.48	0.53	23.9%
	PC	0.75	0.62	0.51	0.54	0.54	0.67	0.59	0.60	0.52	0.57	23.6%
Reducción promedia por zona (%)			21%	31%	19%	29%	12%	15%	16%	29%		
Hembra	PETG	0.5	0.43	0.19	0.16	0.20	0.11	0.26	0.25	0.27	0.23	53.5%
	PETG	0.7	0.66	0.33	0.19	0.30	0.22	0.41	0.41	0.42	0.37	47.6%
	PETG	1	0.93	0.57	0.37	0.51	0.44	0.63	0.69	0.61	0.60	40.4%
	PS	0.5	0.40	0.23	0.12	0.22	0.11	0.18	0.18	0.28	0.21	57.2%
	PS	1	1.00	0.53	0.18	0.37	0.27	0.64	0.61	0.60	0.53	47.5%
	PVC	0.7	0.59	0.37	0.24	0.30	0.24	0.39	0.42	0.39	0.37	47.5%
	PC	0.75	0.61	0.31	0.19	0.28	0.23	0.39	0.40	0.36	0.35	53.6%
Reducción promedia por zona (%)			12%	52%	72%	58%	70%	46%	45%	44%		

Zonas críticas del termoformado:

El análisis por zonas revela diferencias claras en la contracción de espesor según la zona y geometría del molde:

- En moldes tipo macho, las zonas más críticas son las 2, 4 y 8, que corresponden a paredes verticales del rectángulo. Estas zonas sufren mayor estiramiento al quedar en la parte lateral y alargada de la geometría, forzando a la lámina a adaptarse mientras descende. La deformación en esas paredes es considerable, especialmente si el espesor de la lámina es bajo o el material poco elástico.
- Las zonas más estables en moldes macho son la zona 5, correspondiente a la parte superior plana del rectángulo (la que primero entra en contacto con la lámina), y las zonas 6 y 7, asociadas al cilindro, que presentan una transición más suave del material. Este contacto temprano favorece el enfriamiento de la lámina y reduce la deformación por estiramiento.
- En moldes tipo hembra, las zonas críticas son la zona 3 y la zona 5, correspondientes a las regiones planas y profundas del tapón y del cuerpo rectangular, respectivamente. En estas zonas, la lámina es forzada mediante vacío a adaptarse a cavidades profundas, lo que requiere una mayor deformación del material, incrementando la reducción de espesor.
- También se considera crítica la zona 4, que corresponde a las paredes verticales más profundas del molde. En estas superficies, el material se estira en dirección vertical a medida que el vacío lo succiona hacia el fondo de la cavidad, lo que genera un afinamiento considerable de la lámina.
- Por el contrario, la zona más estable en moldes hembra es la zona 1, que representa el área superior del molde que entra en contacto primero con la lámina. En general, las zonas del cilindro (zonas 6 y 7) también presentan mejor comportamiento, debido a su geometría convexa y menor profundidad, que favorece una deformación más controlada.

Moldes macho vs moldes hembra:

El análisis de resultados muestra una clara diferencia en el comportamiento del espesor de la lámina tras el termoformado según el tipo de molde empleado. Los moldes macho muestran un mejor desempeño en términos de conservación de espesor y homogeneidad que los moldes hembra.

- En general, los moldes tipo macho presentan una reducción de espesor media menor, con valores entre el 14,6 % y el 33,6 % dependiendo del material. En contraste, los moldes tipo hembra alcanzan contracciones significativamente superiores, en un rango de 40,4 % a 57,2 %.
- Esta diferencia se debe a la dinámica de deformación de cada configuración. En el caso del molde tipo macho, es el molde el que se empuja hacia la lámina caliente, logrando un contacto inmediato en las zonas superiores del volumen. Este contacto temprano favorece el enfriamiento de la lámina, reduce el tiempo de exposición de la lámina al vacío y limita el estiramiento excesivo del material.
- Por el contrario, en el molde tipo hembra la lámina debe ser succionada hacia cavidades profundas, lo que obliga a un mayor estiramiento del material. Al no existir un contacto inmediato con el molde, la deformación es más agresiva, lo que genera un mayor adelgazamiento del espesor.
- En términos funcionales, los moldes tipo macho pueden ser preferibles en aplicaciones que requieran garantizar espesores mínimos, por su mejor comportamiento estructural. En el caso de los moldes tipo hembra, se deberá realizar un diseño más cuidadoso y un mayor control del proceso para compensar la pérdida de espesor y evitar fallos por adelgazamiento excesivo.

Comportamiento de los materiales:

El comportamiento del espesor final del blíster tras el termoformado depende en gran medida del material utilizado y el espesor original de la lámina.

- PETG 1 mm es el material que presenta el mejor rendimiento global. En ambas configuraciones (molde macho y molde hembra), consigue mantener gran parte de su espesor original, con contracciones del 14,6 % en macho y 40,4 % en hembra. Además, su comportamiento es homogéneo entre zonas, lo que lo convierte en una opción robusta para aplicaciones donde se requiere estabilidad dimensional.
- PS 1 mm también ofrece buenos resultados, con contracciones de 19,0 % (macho) y 47,5 % (hembra). Aunque algo más frágil que el PETG, mantiene espesores aceptables en la mayoría de las zonas, especialmente cuando se utiliza con molde macho.
- PVC 0,7 mm y PC 0,75 mm tienen contracciones similares en ambas configuraciones: entre 23,6 % y 53,6 %. Aunque estos materiales son más rígidos, conservan un espesor final razonable en zonas no críticas, pero presentan una mayor variabilidad local que el PETG 1 mm.
- PETG 0,7 mm, con contracciones del 20,1 % (macho) y 47,6 % (hembra), muestra un rendimiento medio. Aunque mejora respecto al espesor de 0,5 mm, sigue mostrando afinamientos importantes en zonas exigentes.
- PETG 0,5 mm y PS 0,5 mm son los materiales con peor comportamiento tras el conformado, especialmente con moldes tipo hembra. Registran contracciones de hasta 57,2 %, y zonas con espesor residual inferior a 0,2 mm, lo que puede comprometer la funcionalidad del blíster y aumentar el riesgo de rotura.

En resumen, los materiales con espesor de 1 mm son los más adecuados para geometrías como la analizada, siendo el PETG 1 mm el más recomendable por su equilibrio entre elasticidad, resistencia y distribución del espesor tras el termoformado. Si lo que se busca es ahorrar en material, espesores de entorno al 0.7 mm son también aceptables. Espesores por debajo de 0,7 mm resultan poco fiables en moldes tipo hembra, salvo en geometrías poco profundas.

8.3 COMPARATIVA TÉCNICA Y ECONÓMICA: IMPRESIÓN 3D VS MECANIZADO

Tras los ensayos de termoformado realizados con los moldes finales fabricados mediante impresión 3D y mecanizado CNC, se procede a realizar una comparativa detallada entre ambas tecnologías. El objetivo es evaluar sus ventajas e inconvenientes desde un punto de vista técnico, económico y funcional, teniendo en cuenta tanto los resultados experimentales como los recursos empleados en cada caso.

8.3.1 COMPARACIÓN DE TIEMPOS DE FABRICACIÓN Y CONSUMO DE MATERIAL

Para evaluar la eficiencia de las distintas tecnologías en términos de tiempo de producción y consumo de material, se ha realizado una comparativa centrada en el molde tipo macho, dado que es el único que ha sido fabricado tanto mediante impresión 3D como mediante mecanizado CNC.

Además de los moldes físicamente fabricados, se han simulado los tiempos y consumos asociados a la producción del mismo diseño de molde en tecnologías que no se emplearon directamente en la fabricación final. En concreto:

- Para la tecnología FDM, se simuló la impresión del molde en el software Ultimaker Cura empleando los mismos parámetros que se usaron en la fabricación del molde de prueba en el apartado 4.2.2 (véase Ilustración 121).
- Para la tecnología MJF, se utilizó el software PreForm para estimar el tiempo y la cantidad de material requerido si se imprimiera el mismo molde en PA12 (véase Ilustración 122)

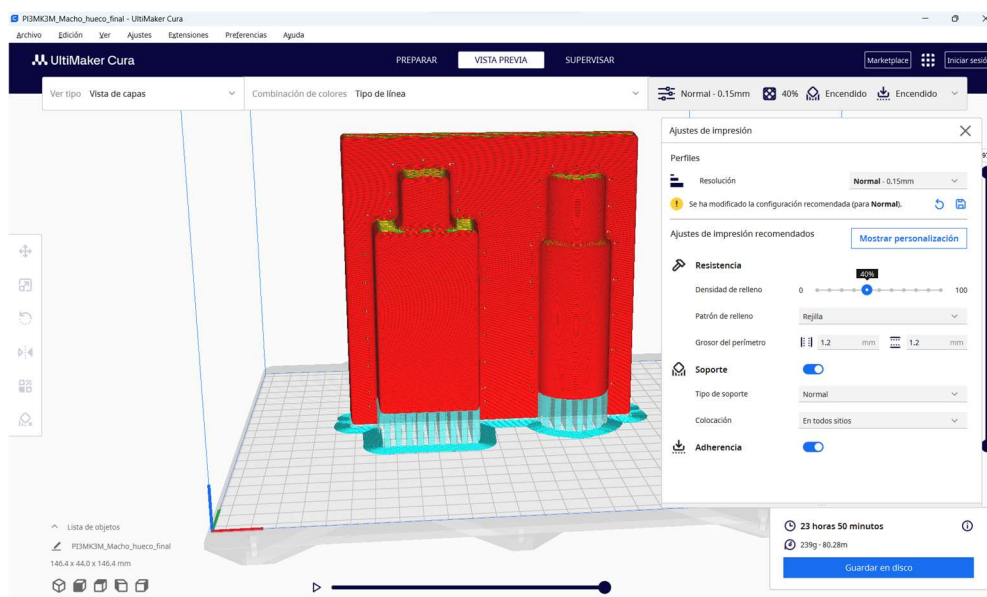


Ilustración 121: Simulación de fabricación del molde final macho con FDM (Elaboración propia)

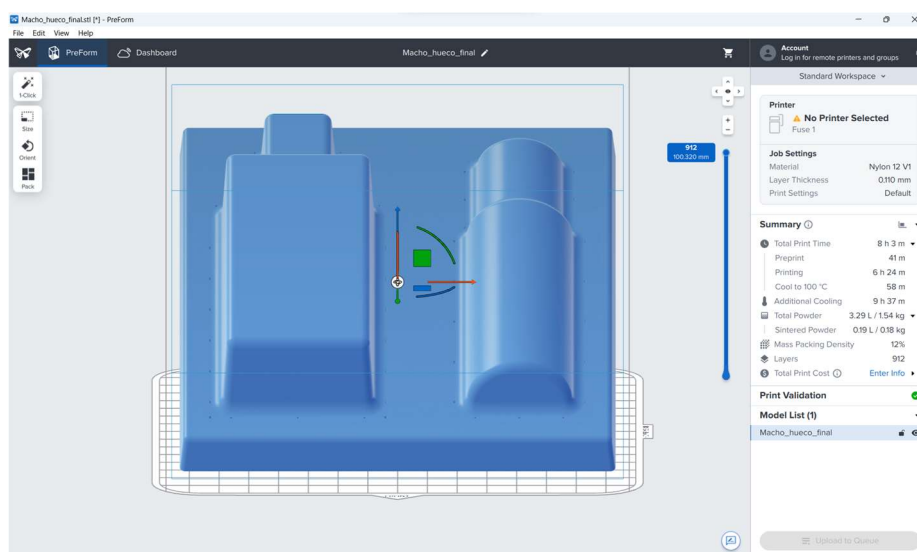


Ilustración 122: Simulación de fabricación del molde final macho con MJF (Elaboración propia)

Los resultados de los tiempos y consumición de materia, junto con los datos obtenidos de la fabricación real de los moldes se recogen en la Tabla 29. El tiempo total incluye no solo el tiempo de impresión o mecanizado, pero también el del preparación y post-procesado.

Tabla 29: Tiempos de fabricación del molde macho y consumo de materiales con distintas tecnologías de fabricación (Elaboración propia)

Técnica de fabricación	Material	Fabricación (h)	Pre y Post-procesado (h)	Tiempo total (h)	Material consumido
FDM	PLA	23.83	0.50	24.33	239 g
SLA	Clear V4	12.98	0.75	13.73	282.53 ml
MJF	PA12	8.05	0.50	8.55	180g (190 ml)
MCNC	Al 5075	3.22	3.00	6.22	3890 g

De los resultados se puede resaltar lo siguiente:

- La tecnología MCNC presenta el menor tiempo de fabricación directa en máquina (3.22 h), sin requerir post-procesado posterior. Sin embargo, para que este proceso pueda ejecutarse, es imprescindible una fase previa de generación del código CAM, que en este caso se estima en aproximadamente 3 horas adicionales. Este tiempo corresponde al trabajo de ingeniería dedicado a la selección de herramientas, generación de trayectorias de mecanizado, simulaciones y exportación del código de mecanizado. Por tanto, el tiempo total hasta disponer del molde funcional se eleva a unas 6.22 horas, lo que sigue siendo competitivo, pero reduce la ventaja inicial respecto a otras tecnologías. En cuanto al material, el MCNC implica el mayor consumo (3.89 kg de aluminio), derivado de la naturaleza sustractiva del proceso.
- La tecnología MJF ofrece un tiempo total también reducido (8.55 h), con solo media hora dedicada a preparación y post-procesado, principalmente enfriamiento y retirada de polvo. Este resultado la posiciona como una opción eficiente para entornos industriales. El material consumido (180 g de PA12, equivalentes a 190 ml de volumen empaquetado) es también bajo, aunque debe tenerse en cuenta que el proceso requiere gestionar un lecho de polvo más amplio del cual solo una parte es aprovechada.
- SLA alcanza un tiempo total de 13.73 h, de las cuales 45 minutos corresponden a post-procesado, incluyendo limpieza con alcohol isopropílico y curado UV. Aunque más lenta que MJF, sigue siendo una opción competitiva.

- Finalmente, la tecnología FDM es la que muestra el mayor tiempo total de producción (24.33 h, incluyendo media hora de preparación y retirada de soportes). Aunque se trata de una técnica asequible y ampliamente accesible, su baja velocidad de impresión limita su viabilidad para componentes de cierto volumen o cuando se prioriza la entrega rápida del molde. No obstante, su consumo de material es bajo (239 g), ya que permite configurar el modelo con estructuras internas no macizas (relleno) que reducen significativamente la cantidad de filamento necesario sin comprometer la rigidez estructural para aplicaciones como esta.

Al considerar el tiempo total hasta la disponibilidad funcional del molde, incluyendo preparación previa y post-procesado, se obtiene una visión más realista de la eficiencia de cada tecnología. El mecanizado CNC continúa siendo una solución competitiva, pero su ventaja en tiempo de máquina se ve reducida al incorporar la fase de programación CAM. Por su parte, MJF se consolida como la alternativa más ágil entre las tecnologías aditivas, combinando velocidad con buena repetibilidad. FDM, a pesar de ser la opción más lenta, destaca por su bajo consumo de material gracias al uso de estructuras de relleno, lo que refuerza su idoneidad en contextos de prototipado económico y accesible.

8.3.2 EVALUACIÓN DEL ACABADO SUPERFICIAL

El acabado superficial de un molde influye directamente en la calidad estética y funcional de las piezas termoformadas. En esta sección se analiza la textura obtenida con cada una de las tecnologías evaluadas (FDM, SLA, MJF y MCNC), considerando tanto las observaciones visuales en los moldes como el efecto resultante en el termoformado.

FDM: los moldes fabricados mediante FDM presentaron una rugosidad superficial notable, derivada del proceso de deposición por capas. Se observaron claramente las líneas de capa y el efecto escalera, especialmente en superficies verticales o inclinadas. Esto se trasladó directamente a las piezas termoformadas, limitando su calidad visual y dificultando su uso en aplicaciones que requieren un acabado cuidado. Aunque es posible realizar un post-procesado (lijado, barnizado), este requiere tiempo y puede afectar la geometría si no se ejecuta con precisión.

SLA: La tecnología SLA logró mejores resultados de acabado superficial que el FDM. Las superficies resultantes fueron mucho más lisas, con buen detalle. No obstante, se detectaron marcas puntuales en las zonas donde se retiraron los soportes, especialmente en cavidades, lo cual afecta localmente la textura del molde. Además, se experimentó un tratamiento de granallado superficial sobre una zona de los moldes hembras preliminares (apartado 4.3.4). En el caso de la Rigid 10K, este tratamiento aumenta la resistencia térmica del material, mientras que en la Clear V4 no se observaron mejoras funcionales significativas. En ambos casos, sin embargo, el acabado superficial resultante no fue satisfactorio desde el punto de vista estético, generando una textura granulosa que no resulta adecuada para aplicaciones donde se requiera una buena calidad visual.

MJF: El acabado superficial del molde fabricado con MJF fue uniforme pero rugoso, con una textura granulosa característica del polvo sinterizado, incluso tras el post-procesado con chorro abrasivo. Esta rugosidad fue transferida a las piezas termoformadas, lo que puede resultar aceptable en contextos funcionales, pero no en aplicaciones donde se busque transmitir una imagen de calidad.

MCNC: El mecanizado CNC puede alcanzar rugosidades mínimas si se emplean herramientas adecuadas y pasadas finas. Sin embargo, en este proyecto se priorizó la velocidad de fabricación, empleando estrategias de desbaste más agresivas. Como consecuencia, en el molde final se observaron marcas visibles de las trayectorias de herramienta, que se transfirieron parcialmente al blíster. Aun así, el acabado fue globalmente más uniforme que en las tecnologías aditivas, y podría mejorarse fácilmente en futuros proyectos aplicando estrategias de acabado fino.

La calidad del acabado superficial varía considerablemente entre tecnologías. El MCNC ofrece el acabado más fino potencialmente, aunque depende de los parámetros de mecanizado utilizados. SLA proporciona buenos resultados con una textura lisa y detallada. MJF, si bien robusta y precisa geométricamente, genera una textura rugosa que puede limitar su uso en productos visuales. FDM otra tecnología con menor calidad superficial, para

aumentar dicha calidad habría que emplear una altura de capa en la impresión muy pequeña que aumentaría significativamente los tiempos de impresión.

Como posible línea de desarrollo futuro, sería interesante realizar un estudio comparativo sobre técnicas de post-procesado aplicables a cada tecnología (lijado, granallado, barnizado, recubrimientos funcionales), con el fin de optimizar el acabado superficial de los moldes y ampliar su aplicabilidad a contextos donde se requiera una estética más cuidada o una mejor reproducción de textura en las piezas termoformadas.

8.3.3 EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD DEL MOLDE

Otro factor clave a tener en cuenta a la hora de seleccionar la tecnología de fabricación más adecuada para aplicaciones de termoformado es la durabilidad del molde. Esta durabilidad está influida por la resistencia térmica del material, la rigidez estructural, la cohesión interna y la capacidad del molde para soportar ciclos repetidos de calentamiento, vacío y desmoldeo sin deformarse o degradarse.

FDM (PLA): Es la tecnología que presentó peores resultados. Tras varios ciclos de termoformado, el molde mostró signos evidentes de degradación térmica, incluyendo brillo superficial, pérdida de rigidez y deformaciones localizadas. Esto se debe a la baja temperatura de transición vítrea del PLA, insuficiente para soportar el rango operativo de muchos termoplásticos. Esta degradación afecta directamente a la precisión geométrica y repetibilidad del molde. No obstante, esta limitación puede mitigarse utilizando materiales alternativos más resistentes térmicamente, como PETG, ABS o PC, siempre que se disponga de impresoras compatibles.

SLA (Clear V4 y Rigid 10K): Durante los ensayos con el molde final no se detectó degradación térmica apreciable. No obstante, al reducir el espesor de la base en la versión 2 del molde fabricado con Clear V4, se observaron signos de deformación térmica tras varios ciclos, lo que evidencia que su comportamiento puede verse comprometido en condiciones menos robustas. Sin embargo, se evidenció cierta fragilidad mecánica en el caso del Clear V4, ya que el molde sufrió una rotura tras una caída accidental, indicando una posible

vulnerabilidad al impacto (ver Ilustración 123). Esto sugiere que, aunque térmicamente estables, estas resinas pueden requerir un manejo cuidadoso en entornos de trabajo reales.

MJF (PA12): La poliamida 12 demostró un comportamiento robusto en los ensayos, sin signos visibles de degradación ni deformación tras los ciclos aplicados. Su buena resistencia térmica y rigidez la hacen adecuada para moldes de uso repetido, especialmente en entornos industriales donde se prioriza la fiabilidad y el rendimiento sostenido.

MCNC (AL 5075): La opción más duradera. El aluminio presenta una excelente resistencia térmica, estabilidad dimensional y buena resistencia al impacto, lo que lo convierte en el candidato ideal para producción en serie o contextos industriales exigentes. No se observaron daños ni alteraciones tras los ensayos, confirmando su idoneidad.



Ilustración 123: Fractura del molde macho Clear V4 (Elaboración propia)

La durabilidad del molde varía considerablemente según la tecnología y el material empleados. El mecanizado CNC ofrece con diferencia la mayor resistencia térmica y mecánica, posicionándose como la opción más robusta para aplicaciones repetitivas o industriales. MJF mostró un comportamiento estable y sin degradación tras los ensayos, lo

que confirma su idoneidad para series cortas o medias. Las resinas empleadas en SLA no presentaron desgaste térmico, pero su fragilidad ante impactos, como se observó con la rotura del molde de Clear V4, limita su uso en entornos exigentes sin protección adicional. Por su parte, FDM en PLA presentó signos claros de degradación térmica, lo que lo descarta para aplicaciones funcionales si no se recurre a materiales más avanzados. Para evaluaciones más rigurosas, se recomienda en futuros trabajos la realización de ensayos cíclicos controlados que permitan establecer la vida útil real de cada tipo de molde.

Para evaluaciones más rigurosas, como línea de trabajo futura, sería recomendable realizar ensayos cíclicos controlados para cada tecnología (por ejemplo, con 20, 50, 100 ciclos de termoformado), que permitan cuantificar de forma objetiva la degradación y establecer curvas de vida útil para cada combinación tecnología-material.

También se sugiere incorporar métodos de mejora como el uso de materiales técnicos en impresión 3D o el refuerzo estructural del diseño del molde, así como el estudio de tratamientos de post-procesado térmico o superficial que puedan mejorar la durabilidad, especialmente en el caso de materiales frágiles o sensibles como las resinas fotopoliméricas.

8.3.4 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS TECNOLOGÍAS

El coste de fabricación del molde es un factor fundamental a la hora de seleccionar la tecnología más adecuada, ya que influye directamente en la viabilidad económica del proceso de termoformado. En este apartado se estima el coste total de fabricar el molde macho con cada tecnología. La estimación incluye los siguientes componentes: amortización de la máquina, coste de materiales, horas de ingeniería (cuando aplican), mano de obra en post-procesado. El objetivo no es obtener un valor exacto, sino una comparación representativa entre tecnologías para orientar la toma de decisiones.

8.3.4.1 Coste de fabricación con tecnología FDM

Para la estimación del coste del molde macho final fabricado mediante impresión 3D FDM, se han considerado los siguientes factores:

- **Amortización de la máquina:** Se ha tomado como referencia una impresora Prusa valorada en 1.200 € [24], con un coste de mantenimiento anual del 10%, amortizada en 2 años de trabajo, al ser una impresora asequible y quedándose obsoleta pronto. Se ha supuesto un uso de 223 días al año y 12 horas diarias de funcionamiento.
- **Coste del material:** Se ha empleado PLA con un coste estimado de 18,20€/750g [25] . En este caso, se utilizó una cantidad de 239g para el molde. Además, se ha añadido un coste proporcional de bandeja, estimando que una bandeja permite imprimir unas 50 piezas antes de requerir reemplazo.
- **Coste de técnico analista:** Se ha considerado un coste de personal de 30 €/hora, aplicado al tiempo de preparación y post-procesado requerido para la pieza.
- **Beneficio comercial estimado:** Se ha incluido un 50 % de margen comercial, simulando el coste de venta en un entorno profesional. Es un margen alto para considerar otros costes como la energía que no se han tenido en cuenta en el cálculo desglosado.

El coste total unitario estimado es de 31.22€ (IVA incluido) por la fabricación del molde macho en FDM, tal como se resume en la Tabla 30 mostrada a continuación.

Tabla 30: Coste de fabricación del molde macho mediante tecnología FDM (Elaboración propia)

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	1,200	
Coste mantenimiento anual (€)	120	
Años de amortización	2	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	2676	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	0.27	
Precio Hora venta-público (€/h)	0.40	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo y soporte: filamento PLA (€/cc) (18.20€-750 g)	0.02	
Coste material bandeja (€/Ud.): (40€-50 uds.)	0.80	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	30	
Pieza - Molde Macho Final		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Malla	Costes parciales
Material modelo (incluido soportes) (g)	239.00	5.80 €/ud
Tiempo modelo (h)	23.83	9.62 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1.00	0.80 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0.50	15.00 €
Cantidad de piezas	1.00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	31.22 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	31.22 €	

8.3.4.2 Coste de fabricación con tecnología SLA

De la misma manera, la estimación del coste del molde macho final fabricado mediante impresión 3D SLA, se han considerado los siguientes factores:

- **Amortización de la máquina:** Se ha tomado como referencia una impresora Form 3 con un precio de en 3.200 € [26], con un coste de mantenimiento anual del 10%, amortizada en 3 años de trabajo. Se ha considerado una carga de trabajo de 223 días/año, a razón de 12 horas diarias, igual que en el caso anterior.
- **Coste del material:** en este caso, se utilizó resina Clear V4, cuyo precio se sitúa en 169,40 €/litro [27] . En los cálculos se ha aplicado el volumen específico necesario para la fabricación del molde.
- **Coste de post-procesado:** se ha considerado la amortización de la estación de curado Form Cure L, con un coste de 5.200 € [28], un mantenimiento anual del 5%, una vida útil de 5 años y mismo régimen de trabajo que la impresora.

- **Coste de técnico analista:** se mantiene el mismo criterio aplicado en otras tecnologías, con un coste de 30 €/hora.
- **Beneficio comercial estimado:** Se ha mantenido el mismo margen comercial que en el caso anterior, un 50%.

Con estos parámetros, se estima un coste unitario de 73.63€ (IVA incluido) para la fabricación del molde macho en resina Clear V4, como muestra la Tabla 31.

En caso de utilizar resina Rigid 10K, con mejor comportamiento térmico pero un coste de 361,79 €/litro [27] , el coste total estimado de fabricación se eleva a 128,38 € por unidad bajo las mismas condiciones operativas y correspondiente post-procesado

Tabla 31: Coste de fabricación del molde macho mediante tecnología SLA (Elaboración propia)

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -SLA		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina de impresión (€)		3,200
Coste mantenimiento anual (€)		320
Años de amortización		3
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día		2676
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		0.52
Precio Hora venta-público (€/h)		0.78
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: Clear V4 (€/L)		169.40
DATOS COSTE POST-PROCESADO		
Precio máquina curado(€)		5,200
Coste mantenimiento anual (€)		260
Años de amortización		5
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día		2676
Precio Hora máquina-amortización (€/h)		0.45
Precio Hora venta-público (€/h)		0.51
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)		30

Pieza - Molde Macho Final		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (L)	0.28	47.86 €/ud
Tiempo Impresión modelo (h)	12.98	10.09 €/ud
Tiempo Post-procesado modelo (h)	0.33	0.17 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1.00	0.51 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0.50	15.00 €
Cantidad de piezas	1.00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	73.63 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	73.63 €	

8.3.4.3 Coste de fabricación con tecnología MJF

Para la estimación del coste del molde macho mediante tecnología Multi Jet Fusion (MJF), se ha seguido una metodología específica que refleja el funcionamiento real de este sistema.

En este caso, el cálculo del coste de impresión no se basa en tiempo de máquina por horas, sino en coste por impresión completa. Para ello:

- Se asume un coste de adquisición de la máquina de 110.000€ [29], con un mantenimiento anual del 10% y una amortización distribuida en 5 años, considerando un uso anual de 100 días de impresión.
- Como en cada impresión se fabrican múltiples piezas, este coste de impresión se distribuye proporcionalmente entre ellas según su participación en el volumen de trabajo. Para calcularlo, se ha considerado el porcentaje de empaquetado efectivo de 60% (volumen útil ocupado en la impresión) y el volumen ocupado por la pieza respecto al volumen total.
- A esto se añade el coste del material (PA12) estimado en 100 €/kg [30], aplicando el volumen de material consumido por la pieza en la impresión.
- Se mantiene el coste del técnico analista en 30 €/h y un beneficio comercial del 50% como en las demás tecnologías.

Aplicando este modelo, el coste unitario final estimado para el molde macho fabricado por MJF es de 63.36 € (IVA incluido), con los costes parciales detallados en la Tabla 32.

Tabla 32: Coste de fabricación del molde macho mediante tecnología MJF (Elaboración propia)

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -HP 580	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	110,000
Coste mantenimiento anual (€)	11,000
Años de amortización	5
Días impresión/año	100
Impresiones/día	1
Precio impresión (€)	770.00
Precio Impresión venta-público (€)	1155.00
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material: (€/kg)	100.00
Coste material: (€/cc)	0.11
Volumen Total (cc)	15634.75
Densidad de Empaquetado	60.00%
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)	30

Pieza - Molde Macho Final		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	190.00	20.00 €/ud
Impresión	-	23.39 €/ud
Tiempo técnico-analista y limpieza (h)	0.67	20.00 €/ud
Cantidad de piezas	1.00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	63.39 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	63.39 €	

8.3.4.4 Coste de fabricación con tecnología MCNC

Finalmente, para estimar el coste de la fabricación del molde mediante mecanizado, se han considerado los siguientes factores:

- **Amortización de la máquina:** Se ha aproximado el coste de la máquina a 85.000€ [31], un mantenimiento anual del 10 %, y un coste adicional por herramientas del 10 % del valor de la máquina. La amortización se ha realizado en un plazo de 7 años, considerando una utilización de 223 días/año con 12 horas diarias de operación.
- **Coste del material:** Se ha utilizado aluminio, con un precio estimado de 1,50 €/kg, aplicando el peso real consumido por la pieza, que en este caso fue de 3,89kg.

- **Coste de técnico analista:** se mantiene el mismo criterio aplicado en otras tecnologías, con un coste de 30 €/hora.
- **Coste de ingeniería:** se estima que el coste de ingeniería para la generación del código de mecanizado de 70 €/hora.
- **Beneficio comercial estimado:** Se ha mantenido el mismo margen comercial que en los casos anteriores, un 50%.

El coste total estimado para la fabricación del molde mecanizado en aluminio es de 315,24€ (IVA incluido) por unidad, véase Tabla 33.

Tabla 33: Coste de fabricación del molde macho mediante tecnología MCNC (Elaboración propia)

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN CNC	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	85,000
Coste mantenimiento anual (€)	8,500
Coste de las herramientas (€)	8,500
Años de amortización	7
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	2676
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	8.17
Precio Hora venta-público (€/h)	12.25
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material modelo: Aluminio (1.5 €/kg)	1.50
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Costes de Ingeniería (€/h)	70
Costes de Preparación de la Máquina (€/h)	30

Molde Macho en Aluminio		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (kg)	3.89	5.83 €/ud
Tiempo modelo (h)	3.22	39.41 €/ud
Tiempo Ingeniería (h)	3.00	210.00 €/ud
Tiempo Preparación de la Máquina (h)	2.00	60.00
Cantidad de piezas (ud)	1.00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	315.24 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	315.24 €	

8.3.4.5 Comparativa de Costes

La Tabla 34 recoge el coste estimado por unidad para la fabricación del molde macho, según la tecnología.

Se observa que FDM con PLA es la opción más económica, con un coste unitario de 31.22 €, lo que la convierte en una alternativa muy accesible para validaciones tempranas o prototipos funcionales simples, aunque limitada en durabilidad y acabado.

Le sigue MJF con PA12 (63,39 €), que ofrece una buena combinación entre agilidad, resistencia mecánica y estabilidad dimensional, especialmente útil en entornos industriales que priorizan la repetibilidad y la robustez del molde.

Por otro lado, SLA con Clear V4 (73.63 €), que ofrece un buen equilibrio entre precisión superficial y coste, y SLA con Rigid 10K, que, aunque más costosa (128,01 €), proporciona mayor resistencia térmica. El coste de la tecnología SLA se ve fuertemente influenciado por el tipo de material empleado, afectando no solo al coste del material, pero al coste de post-procesado

Finalmente, el mecanizado CNC alcanza un coste de 315,24 €, lo que lo sitúa como la opción más cara, aunque justificable si se busca máxima durabilidad, precisión y resistencia térmica para series funcionales.

En resumen, la selección de la tecnología más adecuada debe considerar no solo el coste unitario, sino también su relación con la durabilidad, el acabado superficial y los requisitos funcionales del molde según el contexto de uso. En este sentido, una métrica más representativa en aplicaciones funcionales o industriales es el coste por ciclo de uso, ya que permite evaluar la verdadera rentabilidad del molde en función de su vida útil efectiva y no únicamente de su precio inicial. Esta perspectiva resulta especialmente relevante en tecnologías como el mecanizado CNC, donde la alta durabilidad compensa en parte el elevado coste unitario.

Tabla 34: Comparativa de costes de fabricación por tecnología (Elaboración propia)

Técnica de fabricación	Material	Coste (€/Ud)
FDM	PLA	31.22
SLA	Clear V4	73.63
SLA	Rigid 10K	128.38
MJF	PA12	63.39
MCNC	Al 5075	315.24

8.3.5 CONSIDERACIONES DE APLICABILIDAD INDUSTRIAL

Este apartado recoge de forma sintética los resultados obtenidos en los análisis técnicos y económicos previos, con el objetivo de valorar la aplicabilidad real de cada tecnología de fabricación aditiva y sustractiva en contextos industriales concretos. A partir de los cinco criterios evaluados (tiempo, consumo de material, calidad superficial, durabilidad y coste de fabricación), se realiza una comparativa funcional que permite identificar en qué escenarios resulta más adecuada cada tecnología.

8.3.5.1 Visión general de los resultados

Los resultados obtenidos en los apartados anteriores se resumen en la visualización tipo radar incluida en la Ilustración 124, en la que se representa la puntuación relativa (de 0 a 5, siendo 5 la puntuación más alta) alcanzada por cada tecnología según los cinco criterios analizados: tiempo de fabricación, consumo de material, acabado superficial, durabilidad y coste. Esta representación permite identificar de manera visual las fortalezas y debilidades de cada opción tecnológica en relación con las demás.

El análisis integrado de estos criterios muestra perfiles de comportamiento claramente diferenciados:

- FDM destaca por su bajo coste y consumo de material, lo que lo convierte en una solución accesible en fases de prototipado o desarrollo temprano. Sin embargo, sus puntuaciones son considerablemente más bajas en términos de durabilidad, acabado superficial y tiempo de fabricación, lo que limita su aplicabilidad directa a procesos de termoformado funcional.

- SLA ofrece un buen compromiso entre precisión, acabado superficial y tiempos razonables. Su mayor debilidad radica en su durabilidad, que reduce su fiabilidad para usos repetitivos o exigentes. La opción Rigid 10K mejora la resistencia térmica, pero a un coste económico significativamente más alto, lo que también afecta a su competitividad.
- MJF obtiene valoraciones equilibradas en tiempo, durabilidad y consumo de material, y es adecuada para ciclos repetitivos. Además, su coste unitario ha resultado más competitivo que otras opciones aditivas como SLA-Rigid o MCNC. No obstante, su acabado superficial rugoso puede limitar su uso en aplicaciones con altos requisitos estéticos.
- Finalmente, el mecanizado CNC presenta un perfil robusto en cuanto a durabilidad y calidad superficial potencial, especialmente cuando se emplean estrategias de acabado específicas. También ofrece un tiempo de fabricación en máquina muy reducido. Sin embargo, este valor esconde parte de la realidad: el proceso requiere una fase previa de programación CAM con coste e inversión de tiempo significativos, lo cual afecta negativamente al rendimiento global. Además, el consumo de material es elevado debido al carácter sustractivo del proceso, y su coste económico total es de los más altos.

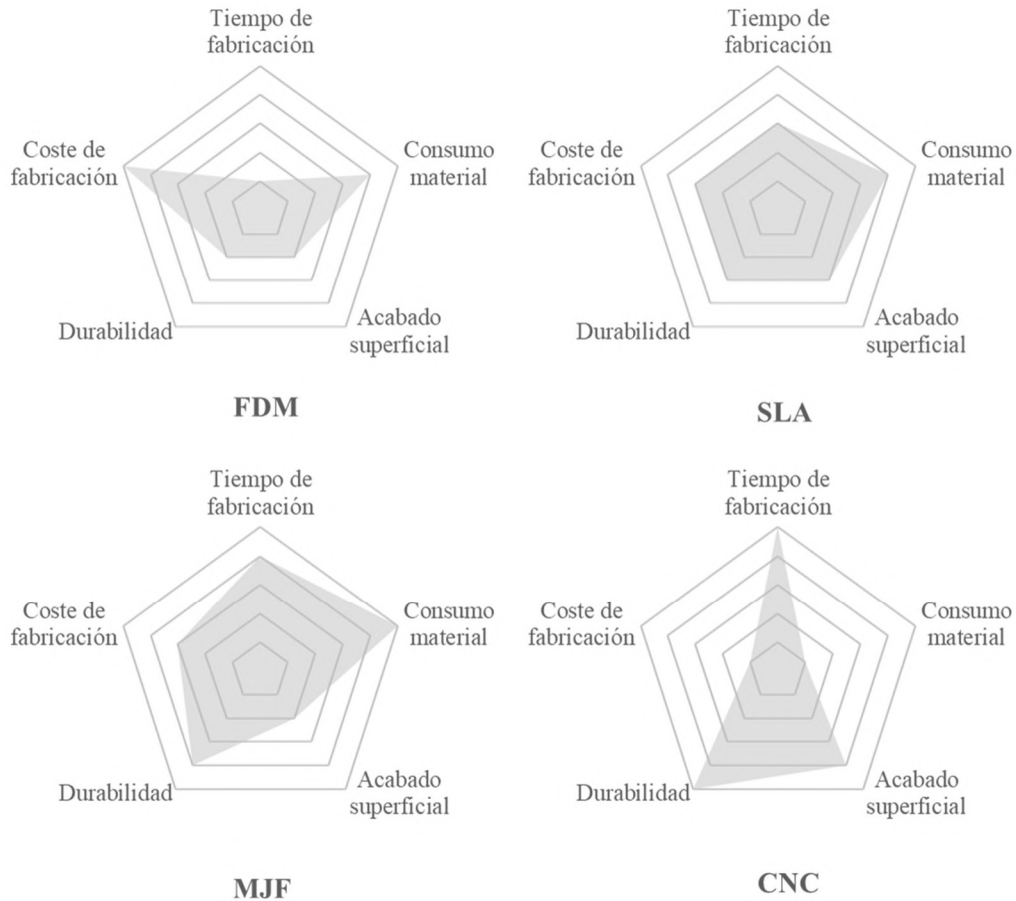


Ilustración 124: Evaluación comparativa de tecnologías de fabricación según criterios clave (Elaboración propia)

Otro factor clave es la precisión geométrica, como se comentó en el apartado 8.1, se realizaron mediciones dimensionales sobre los moldes obtenidos mediante MCNC y SLA. Los resultados mostraron que el mecanizado CNC ofrece una fidelidad dimensional muy alta respecto al diseño CAD, como era esperable dada la estabilidad del material y la naturaleza del proceso. En el caso de SLA, la precisión también fue muy adecuada para la aplicación planteada, aunque se observaron mayores desviaciones. Para las tecnologías MJF y FDM no se ha llevado a cabo una evaluación metrológica detallada, por lo que se plantea como línea de trabajo futuro la realización de un estudio comparativo de precisión

dimensional en todas las tecnologías, lo que permitiría complementar de forma más completa el análisis técnico de este proyecto.

8.3.5.2 Aplicabilidad según contexto industrial de uso

A partir de todo lo visto anteriormente, se identifican distintos contextos de aplicación en los que cada tecnología puede resultar más adecuada. A continuación, se agrupan las recomendaciones según el tipo de uso previsto del molde.

Prototipado y validación temprana:

En fases iniciales de desarrollo, donde se busca validar formas, dimensiones o configuraciones de vacío, las tecnologías FDM y SLA (Clear V4) son especialmente adecuadas. FDM destaca por su bajo coste y accesibilidad, siendo útil para pruebas preliminares donde la precisión o la durabilidad no son críticas. SLA, por su parte, ofrece mejor resolución y acabado superficial, lo que la convierte en una buena opción cuando se desea validar geometrías complejas o ajustar detalles visuales del molde. En ambos casos, su menor durabilidad no representa un problema si el número de ciclos de uso es limitado.

Moldes funcionales para series cortas:

Cuando el molde va a emplearse en varios ciclos de termoformado (típicamente entre 10 y 50 unidades) y se requiere cierta fiabilidad térmica y mecánica, SLA con Rigid 10K se presenta como una opción válida. Permite mantener un alto nivel de detalle y precisión dimensional, con una resistencia térmica mejorada respecto a otras resinas. En paralelo, MJF con PA12 ofrece una alternativa robusta para este tipo de aplicaciones, aportando durabilidad estructural, tiempos de fabricación competitivos y buena resistencia mecánica. Sin embargo, su acabado superficial limita su uso. En casos donde se necesite una mayor durabilidad o un excelente acabado superficial, el mecanizado CNC se convierte en la alternativa más adecuada, siempre que el mayor coste esté justificado por la criticidad del molde o su uso repetido.

Producción industrial o uso exigente:

Para contextos de alta exigencia, como producciones en serie, moldes sometidos a ciclos térmicos repetidos o aplicaciones con requerimientos dimensionales estrictos, el mecanizado CNC sigue siendo la tecnología de referencia. El aluminio proporciona una durabilidad superior, estabilidad térmica y un acabado superficial de alta calidad si se aplican condiciones óptimas de fresado. Aunque su coste unitario es el más elevado de todas las tecnologías analizadas, puede resultar rentable cuando el molde se amortiza a través de series largas o cuando la calidad del termoformado exige máxima fiabilidad y repetibilidad dimensional.

Con esta comparativa, se concluye el análisis técnico y económico de las distintas tecnologías de fabricación evaluadas. A partir de esta base, en el siguiente capítulo se presentan las conclusiones generales del trabajo y las posibles líneas de desarrollo futuro.

Capítulo 9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El presente trabajo se ha centrado en el diseño, fabricación y validación de un molde para termoformado, con el objetivo de comparar de forma rigurosa dos enfoques de fabricación: el mecanizado CNC sobre aluminio y la fabricación aditiva mediante impresión 3D con distintos materiales y tecnologías. A partir de una geometría diseñada específicamente para exponer distintas zonas críticas en el proceso de termoformado, se han generado moldes equivalentes utilizando las tecnologías FDM, SLA, MJF y MCNC.

El proyecto ha logrado cumplir de forma satisfactoria los objetivos definidos al inicio. Se ha diseñado en CAD una pieza tipo blíster con cavidades diferenciadas, lo que ha permitido evaluar zonas críticas del proceso de termoformado. A partir de esta geometría, se han fabricado moldes equivalentes empleando tanto mecanizado CNC en aluminio como diversas tecnologías de fabricación aditiva, concretamente FDM, SLA y MJF.

Se han llevado a cabo ensayos funcionales con láminas de termoformado de diferentes espesores y materiales, que han permitido validar el comportamiento de los moldes desde un punto de vista térmico, mecánico y geométrico. Además, se ha desarrollado un análisis comparativo completo que incluye aspectos técnicos (tiempos de fabricación, calidad superficial, durabilidad, precisión dimensional) y económicos (costes de fabricación y consumo de material).

A lo largo de este proyecto se han podido extraer las conclusiones explicadas a continuación.

9.1 CONCLUSIONES SOBRE EL PROCESO DE TERMOFORMADO

A lo largo del proyecto se ha podido constatar que el proceso de termoformado, pese a su aparente simplicidad técnica, presenta una fuerte componente práctica y empírica. Aunque existen rangos de temperatura, tiempos de calentamiento y presiones de vacío recomendadas para cada material, la experiencia ha demostrado que estos valores actúan más como referencias iniciales que como parámetros exactos y replicables.

Las condiciones y el resultado del termoformado están fuertemente influenciados por múltiples factores:

1. Espesor de la lámina:

El espesor de la lámina influye tanto en la resistencia del material durante el conformado como en la fidelidad del copiado del molde. En espesores más reducidos (por ejemplo, PS de 0.5 mm), se observó una mayor tendencia al colapso o la formación de arrugas severas, especialmente en zonas de geometría complicada. Un espesor de 0.7 mm ha demostrado ser versátil y robusto para la mayoría de las configuraciones empleadas.

2. Las propiedades térmicas y mecánicas del material:

En este proyecto, los materiales que han ofrecido mejor comportamiento global en términos de facilidad de termoformado han sido el HIPS y el PS. En particular, el HIPS ha mostrado un rendimiento muy satisfactorio, resultando fácil de trabajar y con buena resistencia mecánica tras el conformado. El PS, por su parte, también se ha termoformado con eficacia, aunque presenta cierta fragilidad durante el desmoldeo que puede limitar su uso.

El PETG, si bien permitió una buena reproducción de formas en determinados ensayos, resultó más sensible al rango de temperatura de termoformado, muy estrecho, lo que dificultó alcanzar una temperatura suficientemente alta para obtener el reblandecimiento adecuado sin que el material comenzase a blanquearse (fenómeno asociado a la cristalización superficial).

En cuanto a materiales más técnicos, como el PVC y, especialmente, el PC, se observó una mayor complejidad para obtener resultados satisfactorios. Ambos requieren temperaturas de conformado muy elevadas, y en el caso del PC, este umbral térmico es tan alto que resulta complicado alcanzar una deformación homogénea. El control de temperatura y tiempo es especialmente crítico con estos

materiales, lo que reduce su viabilidad en contextos sin un sistema de regulación térmica muy preciso.

3. El estado térmico acumulado de la máquina:

Cuando se han realizado varias piezas seguidas, los elementos radiantes y la cámara se encuentran más calientes, lo que reduce significativamente los tiempos de calentamiento requeridos en ciclos posteriores.

4. Factores externos:

Factores externos como la humedad ambiental, el color y transparencia de la lámina, o incluso variaciones entre lotes de un mismo proveedor, han influido perceptiblemente en el comportamiento de los materiales.

9.2 CONCLUSIONES SOBRE EL DISEÑO GEOMÉTRICO DEL MOLDE

El diseño geométrico del molde ha demostrado ser un factor determinante en el éxito del termoformado, influyendo directamente en la capacidad de adaptación de la lámina, la distribución del espesor final y la aparición de defectos. A partir de los ensayos realizados, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Geometrías curvas vs prismáticas: Las cavidades cilíndricas han mostrado un comportamiento más favorable frente a las prismáticas. Gracias a sus transiciones suaves, el cilindro favorece un estiramiento más controlado del material, con menor concentración de tensiones y mejor conservación del espesor. En contraste, la cavidad rectangular, especialmente en sus esquinas, ha sido propensa a generar pliegues y afinamientos excesivos, siendo una zona crítica tanto en moldes macho como hembra.

Separación entre cuerpos: La distancia entre los cuerpos principales también ha influido en la aparición de defectos en el caso del molde macho. En configuraciones donde los cuerpos se encontraban muy próximos, se han concentrado tensiones en las zonas intermedias, especialmente en la base del molde. Este fenómeno ha derivado en la aparición de arrugas (*webbing*) y zonas mal definidas. Una mayor separación o la inclusión de transiciones más suaves entre elementos podría ayudar a reducir estos efectos.

Influencia del diseño en el estiramiento: Las paredes verticales profundas (como las del prisma) han mostrado una mayor exigencia en cuanto a deformación del material. En moldes hembra, donde el vacío succiona la lámina hacia el fondo, estas zonas han sufrido una importante reducción de espesor. En moldes macho, estas paredes también han sido críticas, al requerir que la lámina se estire lateralmente mientras desciende.

Importancia del ángulo de desmoldeo y radios de redondeo: Las decisiones de diseño, como la incorporación de ángulos de desmoldeo y radios de redondeo, han sido fundamentales para facilitar la extracción de la pieza y reducir la formación de arrugas. Aun así, las esquinas del cuerpo rectangular siguen siendo un punto sensible que podría beneficiarse de transiciones más progresivas en futuras versiones.

Distribución del vacío: Se ha evidenciado que la disposición y tamaño de los agujeros de vacío tienen un impacto crítico en la definición geométrica de zonas profundas. Una distribución optimizada del vacío mejora significativamente la fidelidad de copia del molde, aunque puede comprometer el acabado superficial si no se diseña cuidadosamente.

En conjunto, el estudio demuestra que el diseño del molde debe abordarse como una optimización entre geometría funcional, facilidad de conformado y reducción de defectos, considerando siempre las limitaciones del material y la tecnología de fabricación disponible.

9.3 CONCLUSIONES SOBRE LAS TECNOLOGÍAS DEL MOLDE

El análisis comparativo de las distintas tecnologías de fabricación empleadas (MCNC, FDM, SLA y MJF) ha permitido establecer conclusiones en cuanto a su rendimiento técnico, económico y funcional para la fabricación de moldes de termoformado.

1. Mecanizado CNC

El mecanizado en aluminio ha demostrado ser la opción más robusta y fiable para aplicaciones exigentes. Su excelente comportamiento térmico y mecánico, junto con la alta estabilidad dimensional incluso tras múltiples ciclos, lo convierten en la solución idónea para

moldes sometidos a uso intensivo o series largas. Además, el acabado superficial potencialmente alcanzable es superior al de las tecnologías aditivas. No obstante, su coste unitario es elevado y requiere una fase previa de ingeniería (generación de código CAM), que penaliza el tiempo total de producción. Aun así, al considerar la durabilidad del molde, el coste por ciclo puede resultar competitivo en escenarios industriales exigentes.

2. MJF (Multi Jet Fusion)

La tecnología MJF se ha consolidado como la alternativa más competitiva dentro del grupo de tecnologías aditivas. Ofrece tiempos de fabricación reducidos, buena precisión dimensional y elevada resistencia térmica y mecánica, lo que la hace adecuada para series cortas o medias con requerimientos funcionales. Su principal debilidad radica en el acabado superficial, que presenta una textura rugosa inherente al proceso de sinterizado de polvo. Esta característica puede limitar su uso en aplicaciones donde la calidad visual del molde sea relevante.

3. SLA (Estereolitografía)

SLA ha demostrado un buen equilibrio entre detalle geométrico, acabado superficial y coste. Las resinas Clear V4 y Rigid 10K permitieron obtener moldes con elevada resolución y buena transferencia de detalle al blíster. Sin embargo, la durabilidad de estas piezas es limitada: la fragilidad del material y su sensibilidad a golpes o condiciones térmicas exigentes condicionan su uso a prototipos funcionales o moldes de uso limitado. En particular, la versión con base delgada mostró signos de deformación térmica, lo que resalta la necesidad de reforzar ciertas zonas según el uso previsto.

Cabe destacar que el rendimiento de esta tecnología depende en gran medida del tipo de resina empleada. Actualmente existe una amplia variedad de materiales con propiedades específicas (alta temperatura, flexibilidad, rigidez, resistencia química, etc.), y la tecnología está en constante evolución. Este dinamismo convierte a SLA en una tecnología con gran proyección de futuro, especialmente a medida que los materiales sigan mejorando en prestaciones y resistencia para aplicaciones funcionales más exigentes.

4. FDM (Fabricación por Deposición Fundida)

FDM ha sido la tecnología más accesible y económica, lo que la convierte en una herramienta útil en etapas tempranas de validación. Su consumo de material es bajo gracias a las configuraciones de relleno, y su facilidad de uso la hace ideal para entornos educativos o de prototipado rápido. No obstante, los tiempos de fabricación son elevados y la calidad superficial es deficiente, con marcada visibilidad de capas. Su durabilidad es también muy limitada, desaconsejando su uso en aplicaciones repetitivas o donde se requiera precisión y robustez térmica.

9.4 TRABAJOS FUTUROS

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se abren múltiples líneas de desarrollo futuro que podrían enriquecer y profundizar el análisis comparativo entre tecnologías de fabricación de moldes para termoformado:

1. Optimización geométrica del molde.

El presente trabajo ha demostrado que ciertas zonas geométricas, como los cuerpos prismáticos o las zonas de proximidad entre cavidades, son especialmente propensas a la aparición de pliegues (*webbing*) durante el termoformado. En trabajos futuros, sería interesante aplicar herramientas de simulación FEM o técnicas de optimización geométrica para rediseñar el molde con el objetivo de eliminar este defecto, favoreciendo una distribución más uniforme del material y reduciendo las tensiones internas que lo provocan.

2. Evaluación de post-procesados físicos y químicos.

La aplicación de tratamientos térmicos, infiltraciones con resinas epoxi, o recubrimientos superficiales podría mejorar significativamente la durabilidad y la calidad superficial de moldes fabricados mediante tecnologías aditivas, especialmente en entornos industriales.

3. Ensayos cíclicos controlados para evaluar la durabilidad real del molde.

Aunque en este proyecto se han observado signos cualitativos de degradación en algunos materiales (especialmente en FDM y SLA), sería deseable realizar ensayos sistemáticos con

un número elevado de ciclos (por ejemplo, 20, 50, 100...) para establecer curvas de vida útil y comparaciones cuantitativas entre tecnologías y materiales.

En conjunto, este trabajo no solo ha permitido validar distintas tecnologías para la fabricación de moldes de termoformado, sino que también ha evidenciado la importancia del diseño, la selección de materiales y el conocimiento empírico del proceso. Las líneas de mejora aquí identificadas sientan las bases para futuras investigaciones orientadas a optimizar el rendimiento técnico y económico del termoformado en contextos reales. De este modo, se contribuye a avanzar hacia soluciones más accesibles, sostenibles y adaptadas a los requerimientos específicos de cada aplicación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Allied Market Research, «Thermoformed Plastics Market by Product Type, Thermoforming Type and End-Use Industry: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2031,» [En línea]. Available: <https://www.alliedmarketresearch.com/thermoformed-plastics-market>.
- [2] U. Nations, «Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development,» 2015.
- [3] J. Throne, «Thermoforming,» de *Applied Plastics Engineering Handbook*, Elsevier, 2024, pp. 449--480.
- [4] S. A. Ashter, «Thermoforming of single and multilayer laminates: plastic films technologies, testing, and applications,» William Andrew, 2013.
- [5] M. Safwat, A. Desouky y M. Sharaf, 2020.
- [6] G. Aultman, «Vantage Plastics,» 2024. [En línea]. Available: <https://vantageplastics.com/vantage-news-updates/pressure-forming-vs.-vacuum-forming-whats-the-difference>. [Último acceso: 15 02 2025].
- [7] P. d. M. S.A, Manual Técnico TERMOFORMADO, Ciudad de México:, 2021.
- [8] Formlabs, «Guia de Termoformado,» [En línea]. Available: <https://formlabs.com/es/blog/termoformado/>. [Último acceso: 15 Marzo 2025].
- [9] Protolabs, «Diseño y moldeabilidad en procesos de termoformado,» 2017.

- [10] C. Toh, «Design, evaluation and optimisation of cutter path strategies when high speed machining hardened mould and die materials,» *Materials & design*, vol. 26, nº 6, pp. 517--533, 2005.
- [11] J. Tlusty, *Manufacturing Processes and Equipment*, Prentice Hall, 2000.
- [12] E. a. M. Budak y .: A. a. M. J. Atsushi and Donmez, «Mechanical interfaces in machine tools,» *CIRP Annals*, vol. 71, nº 2, pp. 647--670, 2022.
- [13] J. Zhang, «A comparative study of mold manufacturing by CNC and additive manufacturing,» *Procedia Manufacturing*, vol. 10, p. 264–276, 2017.
- [14] H. C. W, «Apparatus for production of three dimensional objects by stereolithography». Estados Unidos Patente US-6027324-A, 08 08 1984.
- [15] T. Wohlers, «Wohlers Report 2021: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry,» Wohlers Associates, 2021.
- [16] A. Gebhardt y J.-S. Hötter, *Additive Manufacturing 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*, 2016.
- [17] F. D. M. o. P. Composite, «Scholarly Community Encyclopedia,» 3 Enero 2023. [En línea]. Available: <https://encyclopedia.pub/entry/39650>. [Último acceso: 02 03 2025].
- [18] I. e. 3D, «Cómo Evitar la Delaminación en Impresiones 3D: Guía Definitiva,» *Imprime en 3D*, [En línea]. Available: <https://imprime3d.org/consejos/como-evitar-la-delaminacion-en-impresiones-3d/>. [Último acceso: 17 Abril 2025].
- [19] C. Agocs, M. M. Hanon y L. Zsidai, «A comprehensive review of Fused Deposition Modeling (FDM) method using PLA, ABS, and PET-G polymers,» *Gradus*, vol. 11, nº 1, 2024.

- [20] K. Castillo-Carangui, C. Cobos-Maldonado, S. Ferrándiz-Bou y L. López-López, «Diseño y fabricación de cavidades de moldeo obtenidas mediante,» de *XVI Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Chile, 2024.
- [21] O. Mohamed, «Analytical Modeling and Experimental Investigation of Product Quality and Mechanical Properties in FDM Additive Manufacturing,» 2019.
- [22] Formalabs, «Study on High Temp Resin for Thermoforming Applications,» 2018. [En línea]. Available: <https://formlabs.com/es/blog/high-temp-resin-alta-estabilidad-termica-impresion-3d/>. [Último acceso: 14 03 2025].
- [23] ASERM , «(Asociación Española de Rapid Manufacturing),» de *Guía de Tecnologías de Rapid Manufacturing*, vol. 316, 2006, p. 93.
- [24] P. a. P. K. Ž. a. A. S. a. R. S. a. S. R. a. B. M. Rider, «Additive Manufacturing for Guided Bone Regeneration: A Perspective for Alveolar Ridge Augmentation,» *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 19, pp. 1-35, 2018.
- [25] C. Yan, L. a. X. L. Hao y Y. Shi, «Preparation, characterisation and processing of carbon fibre/polyamide-12 composites for selective laser sintering,» *Composites Science and Technology*, vol. 71, nº 16, pp. 1834--1841, 2011.
- [26] S. L. S. o. P. M. w. C. A. N. Structure, « Zhanhua, Wang; Hesheng, Xia,» *Computers, Materials and Continua (Tech Science Press)*, vol. 32, nº 1, 2024.
- [27] HP, «Tecnología HP Multi Jet Fusion,» HP, [En línea]. Available: <https://www.hp.com/es-es/printers/3d-printers/products/multi-jet-technology.html>. [Último acceso: 14 Mayo 2025].

- [28] «Formlabs Customer Support,» Formlabs, [En línea]. Available: <https://support.formlabs.com/s/article/Introduction-to-Post-Curing-Prints?language=es>. [Último acceso: 3 Junio 2025].
- [29] OpenAI, «ChatGPT,» OpenAI, 2025. [En línea]. Available: <https://chat.openai.com>.
- [30] Amazon, «Amazon.es,» Prusa - Impresora 3D i3 MK3S. [En línea]. [Último acceso: 9 julio 2025].
- [31] filament2print.es, «filament2print.es,» PLA Extrafill, [En línea]. Available: https://filament2print.com/es/pla/2659-15723-pla-premium-extrafill.html#/217-diametro-175_mm/223-formato-bobina_750_g/2148-color-turquesa_verde_turquoise_green. [Último acceso: 9 Junio 2025].
- [32] Formlabs, «formlabs.com,» Form 3, [En línea]. Available: <https://formlabs.com/es/store/3d-printers/form-3-basic-package-without-service/#/>. [Último acceso: 9 julio 2025].
- [33] Formlabs, «formlabs.com,» Materials, [En línea]. Available: <https://formlabs.com/es/materials/>. [Último acceso: 9 julio 2025].
- [34] Formlabs, «formlabs.com,» FormCure L, [En línea]. Available: <https://formlabs.com/es/store/post-processing/form-cure-l/>. [Último acceso: 9 Julio 2025].
- [35] M. Blumreiter, «How much does the HP 3D printer cost?,» M5D, 12 Septiembre 2019. [En línea]. Available: https://blog.mastergraphics.com/expert_advice/how-much-does-the-hp-3d-printer-cost. [Último acceso: 9 Julio 2025].
- [36] Formlabs, «formlabs.com,» Fuse 1+ 30W de Formlabs vs. serie HP Jet Fusion 3D, [En línea]. Available: <https://formlabs.com/es/compare/hp-jet-fusion-3d-series-vs-formlabs-fuse->

1/?srsltid=AfmBOooGf6EFDHjCs5bLOdOK9L9b7VLdakHVv_zHMFdSGbKbO8GJ
PDAn. [Último acceso: 9 julio 2025].

- [37] Haas, «Lista de precios de Haas,» Haas, [En línea]. Available: <https://www.haascnc.com/es/shop/category/pricelist.html#gsc.tab=0>. [Último acceso: 9 Julio 2025].
- [38] S. Engelmann, de *Advanced Thermoforming: Methods, Machines and Materials, Applications, Automation, Sustainability, and the Circular Economy*, John Wiley & Sons, 2023.
- [39] Amazon, «Amazon.es,» Prusa - Impresora 3D i3 MK3S, [En línea]. Available: https://www.amazon.es/Prusa-3D-Drucker-i3-MK3S-Bausatz/dp/B07FTHMPSQ/ref=asc_df_B07FTHMPSQ?mcid=95dc74f544e830a2acb747f0968f0f8b&tag=googshopes-21&linkCode=df0&hvadid=699874938695&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=849669601562950097&hvpone=&hvptwo=&hvmqmt=&hvdev=c&hv. [Último acceso: 2025 07 09].

ANEXO I. MECANIZADO CNC

LISTADO DE HERRAMIENTAS MCNC

LISTADO DE HERRAMIENTAS MCNC DE FASE 1

herramientas fase1.html

8/7/25, 9:35

Page : 1 of 1

SIEMENS

Tool Sheet

Part name: macho-mec	Drawing name: --
Unit: MM	Part number: --
Description :	
	

Tool Number	Tool Name	Tool Description	Tool Diameter	Adjust Register	Cutcom Register	Flute Length	Tool Ext. Length	Holder Description	Tool Path Time in Minutes	Operation Name
1	PLAN10	Herramienta fresadora - 5 parámetros	10.0000	1	1	40.0000	50.0000		64.87	CAJAS PLANAR_PROFILING PERFMACHO
2	PLATO50	Herramienta fresadora - 5 parámetros	50.0000	2	2	50.0000	75.0000		1.07	PLAN-BASE
4	CENTERDRILL	22	6.0000	4	4	0.0000	50.0000		6.40	PUNTEADO-PLACA PUNTEADO08 PUNTEADO08_COPY

Date : Mon Jul 7 21:50:14 2025

Checker : stc

Author : stc

file:///C:/Users/fabricacionblister-Maria/modelos finales/instrucciones para taller/herramientas fase1.html

1/1

LISTADO DE HERRAMIENTAS MCNC DE FASE 2

1/2

herramientas fase2.html

8/7/25, 9:38

Page : 1 of 1

SIEMENS

Tool Sheet

Part name: macho-mec	Drawing name:
Unit: MM	Part number:
Pictures :	Description :
	

Tool Number	Tool Name	Tool Description	Tool Diameter	Adjust Register	Cutcom Register	Flute Length	Tool Ext. Length	Holder Description	Tool Path Time in Minutes	Operation Name
2	PLATO50	Herramienta fresadora - 5 parámetros	50.0000	2	2	50.0000	75.0000		24.01	CAVITY_MILL
1	PLANA10	Herramienta fresadora - 5 parámetros	10.0000	1	1	40.0000	50.0000		66.53	REST_MILLING AREA_MILL_1
3	BOLA10	Herramienta fresadora - Molino de bolas	10.0000	3	3	50.0000	75.0000		28.49	ZLEVEL_PROFILE STEEP AREA_MILL
5	TAL1	Taladro de punto	1.0000	5	5	0.0000	40.0000		1.63	DRILLING DRILLING_1

Date : Mon Jul 7 21:47:20 2025

Checker : stic

Author : stic

file:///C:/Users/fabricacion/Maria/modulos finales/instrucciones para taller/herramientas fase2.html

LISTADO DE OPERACIONES CNC

LISTADO DE OPERACIONES MCNC DE FASE 1

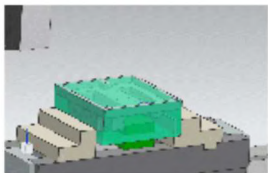
8/7/25, 9:34

operaciones fase1.html

Page: 1 of 2

SIEMENS

Program Sheet

Part name: macho-mec Unit: MM Pictures : 	Drawing name: -- Part number: -- Description :
---	--

Index	Operation Name	Type	Program	Machine Mode	Tool Name	Tool Path Time in Minutes	Path Image
1	CAJAS	Cavity Milling	NC_PROGRAM	MILL	PLANA10	61.48	
2	PLAN-BASE	Facing ZigZag	NC_PROGRAM	MILL	PLATO50	1.07	
3	PUNTEADO-PLACA	Drilling	NC_PROGRAM	MILL	CENTERDRILL	0.19	
4	PLANAR_PROFILING	Planar Milling	NC_PROGRAM	MILL	PLANA10	2.76	

Author : stic

Checker : stic

Date : Mon Jul 7 21:49:00 2025

Page: 2 of 2

SIEMENS

Program Sheet

Index	Operation Name	Type	Program	Machine Mode	Tool Name	Tool Path Time in Minutes	Path Image
5	PERFMACHO	Planar Milling	NC_PROGRAM	MILL	PLANA10	0.63	
6	PUNTEADO08	Drilling	NC_PROGRAM	MILL	CENTERDRILL	2.53	
7	PUNTEADO08_COPY	Drilling	NC_PROGRAM	MILL	CENTERDRILL	3.68	

Author : stic

Checker : stic

Date : Mon Jul 7 21:49:00 2025

LISTADO DE OPERACIONES CNC DE FASE 2

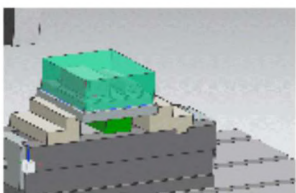
8/7/25, 9:34

operaciones fase2.html

Page: 1 of 2

SIEMENS

Program Sheet

Part name: macho-mec	Drawing name: --
Unit: MM	Part number: --
Pictures : 	Description :

Index	Operation Name	Type	Program	Machine Mode	Tool Name	Tool Path Time in Minutes	Path image
1	CAVITY_MILL	Cavity Milling	NC_PROGRAM	MILL	PLATO50	24.01	
2	REST_MILLING	Cavity Milling	NC_PROGRAM	MILL	PLANA10	64.47	
3	ZLEVEL_PROFILE_STEEP	Z-Level Milling	NC_PROGRAM	MILL	BOLA10	19.63	
4	AREA_MILL	Fixed-axis Surface Contouring	NC_PROGRAM	MILL	BOLA10	8.86	

Author : stc

Checker : stc

Date : Mon Jul 7 21:46:33 2025

Page: 2 of 2

SIEMENS

Program Sheet

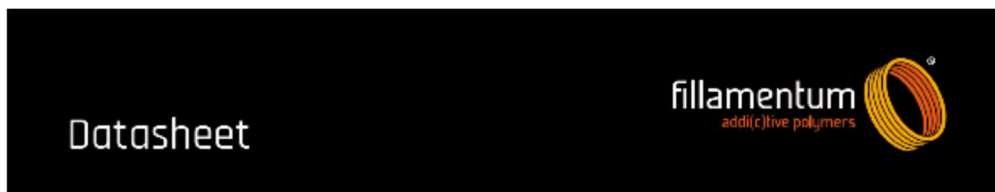
Index	Operation Name	Type	Program	Machine Mode	Tool Name	Tool Path Time in Minutes	Path image
5	AREA_MILL_1	Fixed-axis Surface Contouring	NC_PROGRAM	MILL	PLANA10	2.06	
6	DRILLING	Drilling	NC_PROGRAM	MILL	TAL1	1.61	
7	DRILLING_1	Drilling	NC_PROGRAM	MILL	TAL1	0.02	

Author : stc

Checker : stc

Date : Mon Jul 7 21:46:33 2025

ANEXO II. FICHAS TÉCNICAS



PLA Extrafill

Description:

Fillamentum PLA Extrafill is a material for the FFF (also known as FDM) 3D printing technology.

The advantage of this material is that it can be used in 3D printers easily, that it allows a high quality of printing even in tricky details and an excellent lamination of the printed object.

PLA filament is made of natural ingredients and is easily biodegradable by composting. It complies with the requirements for food contact.

The material may be used for production of electrical and electronic equipment. It doesn't contain the restricted substances.

Fillamentum guarantees high precision of filament dimensions within the tolerance of $\pm 0,05$ mm, which is strictly controlled throughout the production.

Printing filaments reported on the marked under the trademark Fillamentum are produced in a wide variety of colours in accordance with the colour charts RAL and Pantone, and also in own unique colour ranges.



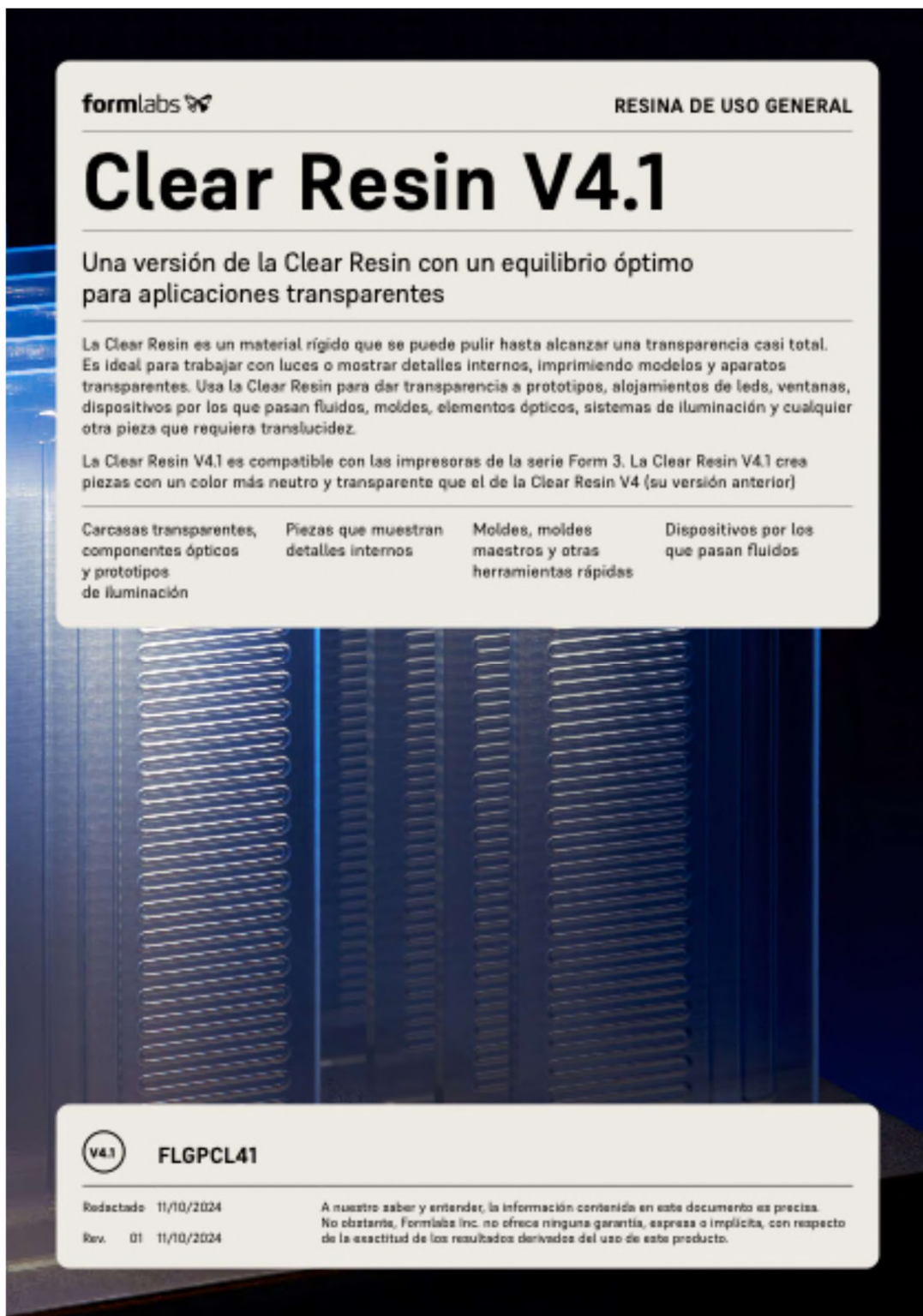
Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Material density	1,24 g/cm ³	ASTM D792	
Melt flow index	6 g/10 min	ASTM D1238	210 °C, 2,16 kg
Diameter tolerance	$\pm 0,05$ mm		
Weight	750 g of filament (± 250 g spool)		
Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	60 MPa	ASTM D882	at yield
	53 MPa	ASTM D882	at break
Elongation at break	6 %	ASTM D882	
Tensile modulus	2600 MPa	ASTM D882	
Flexural strength	83 MPa	ASTM D790	
Flexural modulus	2800 MPa	ASTM D790	
Izod impact strength	16 J/m	ASTM D256	23 °C, notched
Thermal properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Glass transition temperature	50-60 °C	ASTM D3418	
Heat distortion temperature	55 °C	ASTM E2012	0,45 MPa
Printing properties	Recommended	Notes	
Print temperature	190-210 °C	Recommended settings!	
Hot pad	50-60 °C	It may differ according to the printer and the object. Try your own settings before printing.	
Bed adhesive	MagiGo		

Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery.

The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

Fillamentum Manufacturing Czech s.r.o.
nam. Míru 1217, 758 24 Hulín
Czech Republic

(+420) 720 060 947
helpdesk@fillamentum.com
www.fillamentum.com



formlabs RESINA DE USO GENERAL

Clear Resin V4.1

Una versión de la Clear Resin con un equilibrio óptimo para aplicaciones transparentes

La Clear Resin es un material rígido que se puede pulir hasta alcanzar una transparencia casi total. Es ideal para trabajar con luces o mostrar detalles internos, imprimiendo modelos y aparatos transparentes. Usa la Clear Resin para dar transparencia a prototipos, alojamientos de leds, ventanas, dispositivos por los que pasan fluidos, moldes, elementos ópticos, sistemas de iluminación y cualquier otra pieza que requiera translucidez.

La Clear Resin V4.1 es compatible con las impresoras de la serie Form 3. La Clear Resin V4.1 crea piezas con un color más neutro y transparente que el de la Clear Resin V4 (su versión anterior)

Carcasas transparentes, componentes ópticos y prototipos de iluminación	Piezas que muestran detalles internos	Moldes, moldes maestros y otras herramientas rápidas	Dispositivos por los que pasan fluidos
---	---------------------------------------	--	--

V4.1 **FLGPCL41**

Redactado: 11/10/2024
Rev. 01: 11/10/2024

A nuestro saber y entender, la información contenida en este documento es precisa. No obstante, Formlabs Inc. no ofrece ninguna garantía, expresa o implícita, con respecto de la exactitud de los resultados derivados del uso de este producto.

Propiedades mecánicas	NO POSCURADA	POSCURADO DE 15 MIN A 60 °C	MÉTODO
Resistencia a la rotura por tracción	37 MPa	53 MPa	ASTM D638-14
Módulo de tracción	1697 MPa	2369 MPa	ASTM D638-14
Alargamiento de rotura (X/Y)	19 %	9 %	ASTM D638-14
Propiedades de flexión	MÉTODO		
Resistencia a la flexión	62 MPa	103 MPa	ASTM D790-15
Módulo de flexión	1520 MPa	2710 MPa	ASTM D790-15
Propiedades de impacto	MÉTODO		
Resiliencia Izod entallada	29 J/m	27 J/m	ASTM D256-10
Propiedades térmicas	MÉTODO		
Temperatura de flexión bajo carga a 1,8 MPa	56 °C	65 °C	ASTM D648-16
Temperatura de flexión bajo carga a 0,45 MPa	49 °C	55 °C	ASTM D648-16

Transmisión	POSCURADO DE 15 MIN A 60 °C	NORMA ASTM
Transmisión a 2 mm	85 %	ASTM D1003-21
a* a 2 mm	-4,31	ASTM E1348-15
b* a 2 mm	5,58	ASTM E1348-15
Transmisión	POSCURADO DE 15 MIN A 60 °C	NORMA ASTM
Transmisión a 10 mm	59 %	ASTM D1003-21
a* a 10 mm	-3,98	ASTM E1348-15
b* a 10 mm	5,94	ASTM E1348-15

"TRANSMISIÓN" SE REFIERE A LA CANTIDAD DE LUZ VISIBLE QUE ATRAVIESA LA PIEZA

a* y b* se suelen asociar con el espacio de color CIELAB, donde designan ejes para la medición del color:

Eje a*: Abarca del verde al rojo, con los valores negativos indicando el verde y los valores positivos indicando el rojo.

Eje b*: Abarca del azul al amarillo, con los valores negativos indicando el azul y los valores positivos indicando el amarillo.

COMPATIBILIDAD DE LOS DISOLVENTES

Incremento de peso porcentual a lo largo de 24 horas para un cubo impreso de 1 × 1 × 1 cm inmerso en el disolvente correspondiente:

Disolvente	Incremento de peso porcentual a lo largo de 24 horas (%)	Disolvente	Incremento de peso porcentual a lo largo de 24 horas (%)
Ácido acético 5 %	0,5	Aceite mineral, pesado	0,0
Acetona	3,1	Aceite mineral, ligero	0,0
Lejía ~5 % NaOCl	0,4	Agua salada (3,5 % NaCl)	0,4
Acetato de butilo	-0,1	Skydrol 5	0,2
Gasóleo	0,0	Solución de hidróxido de sodio (0,025 % pH 10)	0,4
Éter monometílico de dietilenglicol	0,5	Ácido fuerte (concentración de HCl)	0,2
Aceite hidráulico	0,5	Éter monometílico de tripropilenglicol	0,1
Peróxido de hidrógeno (3 %)	0,0	Agua	0,5
Isoctano	0,0	Xileno	0,0
Alcohol isopropílico	-0,1		

¹ Las propiedades del material pueden variar en función de la geometría de la pieza, la orientación y ajustes de impresión, la temperatura y los métodos de desinfección o esterilización utilizados.

² Datos obtenidos de piezas impresas con la Form 3, a 100 µm y con ajustes para la Clear Resin V4.1. Las piezas se han lavado en una Form Wash durante 5 minutos en alcohol isopropílico al >99 % y se han sometido a poscurado a 60 °C durante 15 minutos en una Form Cure.



RESINA PARA INGENIERÍA

Rigid 10K Resin

Una resina para prototipos industriales rígidos y resistentes

Esta resina muy reforzada con vidrio es el material más rígido de nuestra gama de materiales para ingeniería. Elige la Rigid 10K Resin para piezas industriales que necesiten soportar una carga significativa sin doblarse. La Rigid 10K Resin tiene un acabado liso mate y es muy resistente al calor y a los productos químicos.

Moldes de inyección e insertos para series cortas

Simula la rigidez de los termoplásticos reforzados con vidrio y fibra de carbono

Componentes, guías y fijaciones resistentes al calor y a la exposición a fluidos

Modelos de ensayo aerodinámicos



V1

FLRG1001

V1.1

FLRG1011

Redactado: 10/07/2020

Rev. 06 26/06/2024

A nuestro saber y entender, la información contenida en este documento es precisa. No obstante, Formlabs Inc. no ofrece ninguna garantía, expresa o implícita, con respecto de la exactitud de los resultados derivados del uso de este producto.

Propiedades del material					MÉTODO
	No poscurada	Poscurada durante 60 min a 70 °C ¹	Poscurada durante 60 min a 70 °C y 125 min a 90 °C ²	Poscurada durante 60 min a 70 °C y granallada	
Propiedades de tracción					MÉTODO
Resistencia a la rotura por tracción	55 MPa	65 MPa	53 MPa	88 MPa	ASTM D638-14
Módulo de tracción	7,5 GPa	10 GPa		11 GPa	ASTM D638-14
Alargamiento de rotura	2 %	1 %		1,7 %	ASTM D638-14
Propiedades de flexión					MÉTODO
Resistencia a la flexión	84 MPa	126 MPa	103 MPa	158 MPa	ASTM D790-15
Módulo de flexión	6 GPa	9 GPa	10 GPa	9,9 GPa	ASTM D790-15
Propiedades de impacto					MÉTODO
Resiliencia Izod entallada	16 J/m	16 J/m	18 J/m	20 J/m	ASTM D256-10
Resiliencia Izod no entallada	41 J/m	47 J/m	41 J/m	130 J/m	ASTM D4812-11
Propiedades térmicas					MÉTODO
Temperatura de flexión bajo carga a 0,45 MPa	65 °C	163 °C	218 °C	238 °C	ASTM D648-16
Temperatura de flexión bajo carga a 1,8 MPa	56 °C	82 °C	110 °C	92 °C	ASTM D648-16
Expansión térmica (0-150 °C)	48 µm/m/°C	47 µm/m/°C	46 µm/m/°C	41 µm/m/°C	ASTM E831-13

CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA

Propiedad	Frecuencia	Valor	Norma
Constante dieléctrica (D_r)	1 GHz	3,4	ASTM D150-22
Constante dieléctrica (D_r)	10 GHz	3,3	ASTM D2520-21
Tangente de pérdida (D_r)	1 GHz	0,036	ASTM D150-22
Tangente de pérdida (D_r)	10 GHz	0,0074	ASTM D2520-21
Resistividad de volumen	-	$1,1 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$	ASTM D257-14
Resistividad superficial	-	$6,9 \times 10^{13} \Omega$	ASTM D257-14
Rigidez dieléctrica	-	458 V/mil	ASTM D149-20

GENERACIÓN DE GAS TÓXICO

Norma de ensayo BSS 7239 (comparable a la prueba NFPA 258)	Concentración máxima permitida según la BSS 7239 (ppm)	Modo con llama (ppm)	Modo sin llama (ppm)
Cianuro de hidrógeno (HCN)	150	1	0,5
Monóxido de carbono (CO)	3500	50	10
Óxidos de nitrógeno (N_xO_y)	100	<2	
Dióxido de azufre (SO_2)	100	<1	
Fluoruro de hidrógeno (HF)	200	<1,5	
Cloruro de hidrógeno (HCl)	500	1	<1

DENSIDAD DE HUMO

ABSORBANCIA ESPECÍFICA

Norma de ensayo	A los 90 s	A los 4 min	Valor máximo
ASTM E662 (modo con llama)	2	95	132
ASTM E662 (modo sin llama)	0	1	63

INFLAMABILIDAD

Norma de ensayo	Calificación
Apartado 7 de la Norma UL 94 (3 mm)	HB

COMPATIBILIDAD DE LOS DISOLVENTES

Incremento de peso porcentual a lo largo de 24 horas de un cubo impreso de $1 \times 1 \times 1$ cm, poscurado y sumergido en el disolvente respectivo:

Disolvente	Incremento de peso en 24 h (%)	Disolvente	Incremento de peso en 24 h (%)
Ácido acético 5 %	<0,1	Isoctano (gasolina)	0
Acetona	<0,1	Aceite mineral ligero	0,2
Alcohol isopropílico	<0,1	Aceite mineral pesado	<0,1
Lejía ~5 % NaOCl	0,1	Agua salada (3,5 % NaCl)	0,1
Acetato de butilo	0,1	Solución de hidróxido de sodio (0,025 % pH 10)	0,1
Combustible diésel	0,1	Agua	<0,1
Éter monometílico de dietilenglicol	0,4	Xileno	<0,1
Aceite hidráulico	0,2	Ácido fuerte (HCl concentrado)	0,2
Skydrol 5	0,6	Éter monometílico de tripropilenglicol	0,4
Peróxido de hidrógeno (3 %)	<0,1		

Todas las muestras de ensayo se imprimieron con la Form 3.

¹ Datos obtenidos de piezas impresas con la Form 3, con alturas de capa de 100 µm. Las piezas se han sometido a un poscurado con una Form Cure a 70 °C durante 60 minutos.

² Datos obtenidos de piezas impresas con la Form 3, con alturas de capa de 100 µm. Las piezas se han sometido a un poscurado con una Form Cure a 70 °C durante 60 minutos y, posteriormente, a un curado térmico adicional a 90 °C durante 125 minutos.

HP 3D High Reusability PA 12, enabled by Evonik—ideal for producing strong, low-cost parts that reduce your carbon footprint¹⁸

Produce strong, functional, and detailed complex parts

- Robust thermoplastic produces high-density parts with balanced property profiles and strong structures
- Provides good chemical resistance to oils, greases, aliphatic hydrocarbons, and alkalies⁹
- Ideal for complex assemblies, housings, enclosures, and watertight applications
- Bio-compatibility—meets USP Class I-VI and US FDA guidance for Intact Skin Surface Devices¹⁰
- Meets strict automotive safety standards, including the Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS)¹¹

Quality at a low cost per part³

- Achieve a low cost per part³ and reduce your total cost of ownership¹⁰
- Minimize waste—reuse surplus powder batch after batch and get functional parts without throwing away the excess anymore²
- Get consistent performance while achieving up to 80% surplus powder reusability²⁰
- Optimize cost and part quality—cost-efficient material with industry-leading surplus powder reusability²

Engineered for HP Multi Jet Fusion technology and parts that reduce your carbon footprint¹⁸

- Uses renewable energy sources and biomethane for polymer production, which reduces the material's carbon footprint by 49%¹⁸
- Provides the best balance between performance and reusability²¹
- Achieves watertight properties without any additional post-processing
- Engineered to produce final parts and functional prototypes with fine detail and dimensional accuracy across a variety of industries

	Value	Method
Powder melting point (DSC)	187°C 369°F	ASTM D3418
Particle size	60 µm	ASTM D3451
Bulk density of powder	0.425 g/cm ³ 0.015 lb/in ³	ASTM D1895



Data courtesy of Invent Medical



Data courtesy of Skorpion Engineering Srl