



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MOLDES MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN EN COMPONENTES DE MATERIALES COMPUESTOS

Autor: Jorge Formariz Torres

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Jorge García Llopis

Madrid

Julio de 2026

Declaración de originalidad

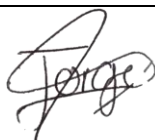
Declaro bajo mi responsabilidad que el Proyecto presentado con el título **“DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MOLDES MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN EN COMPONENTES DE MATERIALES COMPUESTOS”** en la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico **2025/2026** es de mi autoría 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.

Uso de Inteligencia Artificial¹

Declaro bajo mi responsabilidad que (indicar la opción correcta):

- ☐ No he utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento.
- ☒ He utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento y/o del Anexo B siempre en las condiciones permitidas por la Universidad Pontificia Comillas, es decir, aplicando el Nivel 2 de la [Escala de Evaluación de Perkins et al. \(2024\)](#): “La IA puede utilizarse para actividades previas a la tarea, como la lluvia de ideas, la descripción y la investigación inicial. Este nivel se centra en el uso de la IA para la planificación, las síntesis y la generación de ideas, pero las evaluaciones deben hacer hincapié en la capacidad de desarrollar y refinar estas ideas de forma independiente”. En concreto, las Inteligencia Artificial ha sido empleada para:

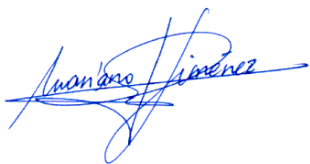
Se ha hecho uso de la inteligencia artificial para el contraste de información, la generación de imágenes y mejorar la redacción del trabajo



Firmado (alumno): Jorge Formariz Torres

Fecha: 14/07/2026

Autorización para la entrega del Proyecto

El Director del Proyecto	El co-Director del Proyecto
	
Fdo: Mariano Jiménez Calzado	Fdo: Jorge García Llopis
Fecha: 14/07/2026	Fecha: 14/07/2026

¹ Esta declaración se refiere al uso de la Inteligencia Artificial generativa para realizar los documentos del Proyecto (Anexo B y Memoria). No aplica a Proyectos donde, por su naturaleza, deban emplear inteligencia artificial como parte de los mismos (aplicación de técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, análisis de datos...)

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MOLDES MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN EN COMPONENTES DE MATERIALES COMPUESTOS”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2025/2026 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.: Jorge Formariz Torres

Fecha: 14/07/2026

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 14/07/2026

EL CO-DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Jorge García Llopis

Fecha: 14/07/2026



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MOLDES MEDIANTE IMPRESIÓN 3D
PARA APLICACIÓN EN COMPONENTES DE MATERIALES
COMPUESTOS

Autor: Jorge Formariz Torres

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Jorge García Llopis

Madrid

Julio de 2026

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han hecho posible la realización de este Trabajo de Fin de Grado.

En primer lugar, quiero agradecer de manera especial a mis tutores, Mariano Jiménez y Jorge García Llopis, por su dedicación, orientación y apoyo a lo largo de todas las fases del proyecto. Su experiencia, sus recomendaciones y su implicación han sido fundamentales para superar los retos que han surgido durante el desarrollo de esta investigación.

Asimismo, extendiendo mi gratitud a mi universidad, por facilitarme los recursos empleados, el entorno y las herramientas necesarias para llevar a cabo este trabajo.

También quisiera expresar mi agradecimiento a todos los que, de una u otra forma, han contribuido al desarrollo de este proyecto.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MOLDES MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN EN COMPONENTES DE MATERIALES COMPUESTOS

Autor: Formariz Torres, Jorge.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Co-Director: García Llopis, Jorge.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El presente Trabajo Fin de Grado analiza la viabilidad técnica y económica de fabricar moldes mediante tecnologías de impresión 3D para la posterior producción de componentes de fibra de carbono forjada por moldeo por compresión. Se han diseñado y ensayado moldes fabricados mediante FDM, SLA/LFS y MJF, evaluando su acabado superficial, resistencia, comportamiento durante el desmoldeo, capacidad de reutilización y coste de producción. Los resultados demuestran que las tres tecnologías permiten obtener piezas funcionales.

Palabras clave: fabricación aditiva, impresión 3D, moldes, fibra de carbono forjada, FDM, SLA/LFS, MJF, moldeo por compresión, viabilidad económica.

1. Introducción

La fabricación aditiva ha evolucionado hasta convertirse en una herramienta capaz de producir componentes funcionales y utillajes para procesos industriales directamente a partir de modelos digitales. En la fabricación de materiales compuestos, el molde desempeña una función fundamental, ya que su geometría, rigidez, precisión, resistencia térmica y acabado superficial condicionan la calidad de la pieza final. Tradicionalmente, estos moldes se obtienen mediante mecanizado CNC de metales o resinas de utillaje, soluciones duraderas pero costosas para prototipos y series cortas [1][4].

La impresión 3D constituye una alternativa más rápida y flexible, aunque los polímeros impresos presentan limitaciones relacionadas con la rugosidad, la porosidad, la anisotropía y la resistencia térmica. Este proyecto analiza la fabricación de moldes mediante FDM, SLA/LFS y MJF para producir una pieza de fibra de carbono forjada por moldeo por compresión. La fabricación aditiva se emplea únicamente para obtener el utillaje, mientras que la pieza final se fabrica posteriormente mediante fibra de carbono corta y resina epoxi [2][3][5].

2. Definición del proyecto

El objetivo principal del proyecto es evaluar la viabilidad técnica y económica de utilizar moldes impresos en 3D para fabricar componentes de fibra de carbono forjada mediante moldeo por compresión.

Para alcanzar este objetivo general, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar un molde cerrado de dos mitades, macho y hembra, adaptado al moldeo por compresión.
- Fabricar el molde mediante las tecnologías FDM, SLA/LFS y MJF.
- Comparar diferentes materiales de impresión: PLA, Clear Resin, Tough Resin y PA12.
- Comparar la prensa hidráulica y los gatos de apriete como sistemas de compactación.
- Fabricar piezas de fibra de carbono forjada con cada una de las alternativas.
- Estudiar el acabado superficial, el desmoldeo y el estado del molde después de cada ensayo.
- Calcular el coste de producción por pieza, el punto de equilibrio y el retorno sobre la inversión.
- Identificar las principales limitaciones del proceso y proponer posibles mejoras.

La geometría seleccionada corresponde a una leva de cambio para volante de automóvil. Se trata de un componente de tamaño reducido que combina superficies curvas y espesores variables, permitiendo analizar la capacidad de reproducción geométrica y el acabado proporcionado por cada tecnología.

El modelo se obtuvo a partir del escaneado de una pieza física de referencia. Mediante técnicas de ingeniería inversa se reconstruyó la geometría en un entorno CAD y se diseñó el molde de compresión. Aunque todas las versiones parten de la misma geometría, el diseño se adaptó a cada proceso de impresión. En FDM, la estructura interior se definió mediante los parámetros de relleno del laminador. En SLA/LFS y MJF, el molde se aligeró mediante un vaciado interior para reducir el consumo de material y el coste de fabricación.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

El desarrollo experimental puede dividirse en cuatro etapas principales: obtención de la geometría, diseño del molde, fabricación aditiva del utillaje y moldeo de la pieza compuesta.

La primera etapa consistió en el escaneado tridimensional de la leva original mediante un equipo HandyScan. La nube de puntos obtenida se procesó en VXelements y posteriormente se importó en Solid Edge para reconstruir la geometría y generar un modelo CAD adecuado para el diseño del molde.

A partir de este modelo se diseñaron las dos mitades del utillaje. La mitad hembra contiene la cavidad principal de la pieza, mientras que la mitad macho permite cerrar el conjunto y aplicar presión sobre el material. El diseño incluye superficies de cierre y zonas exteriores destinadas a facilitar la aplicación de la carga mediante prensa o gatos.

Los moldes FDM se fabricaron en PLA mediante impresoras Bambu Lab, analizando orientaciones horizontal y vertical. Los moldes SLA/LFS se imprimieron en Clear Resin y Tough Resin con una Formlabs Form 3L, mientras que el molde MJF se produjo en PA12 mediante una HP Jet Fusion 580C. En todos los casos se aplicaron operaciones de postprocesado y agentes desmoldeantes adaptados a cada material.



Figura 1. Impresoras 3D utilizadas.

Se utilizaron dos sistemas de compactación. En el primer ensayo se empleó una prensa hidráulica. En los ensayos posteriores se utilizaron gatos de apriete y placas de distribución de carga. Este segundo sistema permitió mantener una presión más estable durante el curado y mejoró la expulsión del exceso de resina.

El estudio se completó con un modelo económico que incluye la inversión inicial, la amortización de los equipos, los materiales de impresión, la energía, el trabajo técnico, el postprocesado y el material compuesto. A partir de estos valores se calculó el coste unitario, el

número mínimo de usos por molde, las unidades necesarias para recuperar la inversión y el ROI de cada tecnología.

4. Resultados

En FDM, la orientación horizontal transfirió de forma visible las líneas de capa a la pieza. Además, la prensa hidráulica no mantuvo una presión constante, dificultando la expulsión del exceso de resina. La orientación vertical, junto con los gatos de apriete y una preparación superficial adecuada, mejoró la compactación, el acabado y el desmoldeo, permitiendo conservar el molde.

SLA/LFS proporcionó el mejor acabado superficial. Sin embargo, el molde de Clear Resin sufrió un desmoldeo destructivo por adhesión con la resina epoxi. Tough Resin mostró una mayor tenacidad y permaneció reutilizable, aunque con un coste de fabricación superior.

El molde MJF en PA12 presentó una elevada resistencia y estabilidad durante la compactación. Su principal limitación fue la textura porosa de la superficie, que hizo necesario aplicar un tratamiento previo para reducir la transferencia de rugosidad.



Figura 2. Piezas finales obtenidas.

El estudio económico mostró diferencias importantes entre las tecnologías. Para FDM, considerando dos usos por molde, se obtuvo un coste aproximado de 12,94 € por pieza, muy inferior al precio de venta de referencia de 55 €. La reducida inversión inicial permite recuperar el equipo con una demanda limitada.

En SLA/LFS, el escenario inicial de dos usos no resulta rentable. Para obtener un coste unitario inferior al precio de venta, tanto Clear Resin como Tough Resin deben alcanzar al menos cinco usos totales. En dichas condiciones, el coste por pieza se sitúa en aproximadamente 46,92 € para Clear Resin y 52,60 € para Tough Resin.

En MJF se utilizaron dos metodologías. El método analítico, basado en la amortización, el material, la energía y el tiempo técnico, dio un coste de molde de aproximadamente 301,30 €. En este caso se requieren siete usos para reducir el coste unitario hasta 47,96 €. El segundo método, basado en el coste por volumen fabricado en una tanda con mayor ocupación de cámara, reduce el número mínimo hasta cuatro usos.

Los principales resultados del análisis de viabilidad se resumen en la siguiente tabla:

Tecnología	Ventas anuales consideradas	Piezas diarias de equilibrio	ROI acumulado
FDM	12	0,0266	104,65 % en 2 años
SLA/LFS – Clear Resin	350	0,99	58,00 % en 5 años
SLA/LFS – Tough Resin	350	1,44	8,39 % en 5 años
MJF – método analítico	650	2,73	6,68 % en 5 años
MJF – coste por volumen	650	2,02	44,14 % en 5 años

Tabla 1. Resumen análisis y punto de equilibrio.

Los escenarios de ventas se seleccionaron para permitir la recuperación de la inversión dentro del periodo de amortización considerado. Los resultados muestran que FDM presenta la menor barrera de entrada y una mayor resistencia frente a reducciones de la demanda o de la vida útil del molde.

5. Conclusiones

Los resultados confirman que la fabricación aditiva es una alternativa viable para producir moldes destinados a prototipos y series cortas de fibra de carbono forjada. FDM resultó la opción más accesible y rentable, con un coste de 12,94 € por pieza frente a un precio de venta de 55 €. SLA/LFS proporcionó el mejor acabado superficial, aunque requiere al menos cinco usos por molde para alcanzar la rentabilidad y una correcta selección del sistema desmoldeante. MJF mostró el comportamiento mecánico más robusto, pero su rentabilidad depende de la ocupación de la cámara y del volumen de producción.

El estudio también demuestra que la orientación de impresión, la estabilidad de la presión, el postprocesado y el agente desmoldeante tienen una influencia decisiva sobre el resultado final. En conjunto, FDM constituye la alternativa más realista para producciones pequeñas, mientras que SLA/LFS y MJF pueden justificarse cuando se prioricen el acabado superficial o la resistencia del utillaje.

6. Referencias

- [1] Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B., Khorasani, M. Additive Manufacturing Technologies. 3.^a ed. Springer, 2021.
- [2] Ngo, T.D. et al. «Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges». Composites Part B, vol. 143, pp. 172-196, 2018.
- [3] Valentine, M.D.A. et al. «Additively manufactured cure tools for composites manufacture». Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 127, pp. 4237-4251, 2023.
- [4] Rosochowski, A., Matuszak, A. «Rapid tooling: the state of the art». J. Mater. Process. Technol., vol. 106, pp. 191-198, 2000.
- [5] Andreozzi, M. et al. «Investigation on the mechanical and environmental behaviour of 3D-printed molds for manufacturing of CFRP components». Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 135, pp. 4785-4802, 2024.

DESIGN AND MANUFACTURING OF 3D PRINTED MOLDS FOR APPLICATION IN COMPOSITE MATERIAL COMPONENTS

Author: Formariz Torres, Jorge.

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Co-Supervisor: García Llopis, Jorge.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This Final Degree Project analyzes the technical and economic feasibility of manufacturing molds using 3D-printing technologies for the subsequent production of forged carbon-fiber components by compression molding. Molds manufactured using FDM, SLA/LFS, and MJF were designed and tested, and their surface finish, mechanical strength, demolding behavior, reusability, and production cost were evaluated. The results demonstrate that all three technologies can be used to obtain functional parts.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, molds, forged carbon fiber, FDM, SLA/LFS, MJF, compression molding, economic feasibility.

1. Introduction

Additive manufacturing has evolved into a technology capable of producing functional components and tooling for industrial processes directly from digital models. In composite-material manufacturing, the mold plays a fundamental role, since its geometry, stiffness, accuracy, thermal resistance, and surface finish determine the quality of the final part. Traditionally, these molds are manufactured by CNC machining of metals or tooling resins, which provide durable solutions but involve high costs for prototypes and short production runs [1][4].

3D printing provides a faster and more flexible alternative for manufacturing molds and tooling for composite materials. However, printed polymers present limitations related to surface roughness, porosity, anisotropy, and thermal resistance. This project analyzes the manufacture of molds using FDM, SLA/LFS, and MJF to produce a forged carbon-fiber component by compression molding. Additive manufacturing is used exclusively to produce the tooling, while the final component is subsequently manufactured from short carbon fibers and epoxy resin [2][3][5].

2. Project Definition

The main objective of the project is to evaluate the technical and economic feasibility of using 3D-printed molds to manufacture forged carbon-fiber components by compression molding.

To achieve this general objective, the following specific objectives were established:

- To design a closed two-part mold, consisting of male and female halves, adapted to compression molding.
- To manufacture the mold using FDM, SLA/LFS, and MJF technologies.
- To compare different printing materials: PLA, Clear Resin, Tough Resin, and PA12.
- To compare a hydraulic press and mechanical clamps as compaction systems.
- To manufacture forged carbon-fiber parts using each alternative.
- To evaluate the surface finish, demolding behavior, and mold condition after each test.
- To calculate the production cost per part, the break-even point, and the return on investment.
- To identify the main process limitations and propose possible improvements.

The selected geometry corresponds to an automotive steering-wheel paddle shifter. It is a small component that combines curved surfaces and variable thicknesses, allowing the geometric reproduction capability and surface finish provided by each technology to be analyzed.

The model was obtained by scanning a physical reference part. Reverse-engineering techniques were used to reconstruct the geometry in a CAD environment and design the compression mold. Although all versions were based on the same geometry, the design was adapted to each printing process. In FDM, the internal structure was defined using slicer infill parameters. In SLA/LFS and MJF, the mold was hollowed to reduce material consumption and manufacturing cost.

3. Description of the Model/System/Tools

The experimental development can be divided into four main stages: geometry acquisition, mold design, additive manufacturing of the tooling, and molding of the composite part.

The first stage consisted of three-dimensional scanning of the original paddle shifter using a HandyScan device. The resulting point cloud was processed in VXelements and subsequently imported into Solid Edge to reconstruct the geometry and generate a CAD model suitable for mold design.

The two halves of the tooling were designed from this model. The female half contains the main cavity of the part, while the male half closes the assembly and applies pressure to the material. The design includes closing surfaces and external areas intended to facilitate load application using either a press or mechanical clamps.

The FDM molds were manufactured in PLA using Bambu Lab printers, analyzing both horizontal and vertical orientations. The SLA/LFS molds were printed in Clear Resin and Tough Resin using a Formlabs Form 3L, while the MJF mold was manufactured in PA12 using an HP Jet Fusion 580C. In all cases, post-processing operations and release agents adapted to each material were applied.



Figure 1. 3D printers used.

Two compaction systems were used. A hydraulic press was employed in the first test. In subsequent tests, mechanical clamps and load-distribution plates were used. This second system made it possible to maintain more stable pressure during curing and improved the removal of excess resin.

The study was completed with an economic model that included the initial investment, equipment depreciation, printing materials, energy consumption, technical labor, post-processing, and composite-material costs. These values were used to calculate the unit cost,

the minimum number of mold uses, the number of units required to recover the investment, and the ROI of each technology.

4. Results

For FDM, the horizontal orientation visibly transferred the layer lines to the part. In addition, the hydraulic press did not maintain constant pressure, making it more difficult to remove the excess resin. The vertical orientation, together with mechanical clamps and suitable surface preparation, improved compaction, surface quality, and demolding, allowing the mold to be preserved.

SLA/LFS provided the best surface finish. However, the Clear Resin mold underwent destructive demolding because of adhesion to the epoxy resin. Tough Resin showed greater toughness and remained reusable, although its manufacturing cost was higher.

The PA12 MJF mold showed high strength and stability during compaction. Its main limitation was the porous surface texture, which made it necessary to apply a previous surface treatment to reduce roughness transfer.



Figure 2. Final parts obtained.

The economic study showed significant differences among the technologies. For FDM, assuming two uses per mold, an approximate cost of €12.94 per part was obtained, which is significantly lower than the reference selling price of €55. The low initial investment allows the equipment to be recovered with limited demand.

For SLA/LFS, the initial scenario of two uses was not economically viable. To obtain a unit cost below the selling price, both Clear Resin and Tough Resin must reach at least five total uses. Under these conditions, the cost per part is approximately €46.92 for Clear Resin and €52.60 for Tough Resin.

Two methodologies were used for MJF. The analytical method, based on depreciation, material, energy, and technical labor, resulted in a mold cost of approximately €301.30. In this case, seven uses are required to reduce the unit cost to €47.96. The second method, based on the cost per manufactured volume in a batch with higher chamber occupancy, reduces the minimum requirement to four uses.

The main results of the feasibility analysis are summarized in the following table:

Technology	Annual sales considered	Daily break-even production	Accumulated ROI
FDM	12	0.0266	104.65% over 2 years
SLA/LFS – Clear Resin	350	0.99	58.00% over 5 years
SLA/LFS – Tough Resin	350	1.44	8.39% over 5 years
MJF – analytical method	650	2.73	6.68% over 5 years
MJF – cost per volume	650	2.02	44.14% over 5 years

Table 1. ROI and Break-even point summary.

The sales scenarios were selected to allow the initial investment to be recovered within the corresponding depreciation period. The results show that FDM presents the lowest entry barrier and greater resilience against reductions in demand or mold service life.

5. Conclusions

The results confirm that additive manufacturing is a viable alternative for producing molds intended for prototypes and short production runs of forged carbon-fiber parts. FDM proved to be the most accessible and profitable option, with a cost of €12.94 per part compared with a selling price of €55. SLA/LFS provided the best surface finish, although it requires at least five uses per mold to become profitable, together with the correct selection of the release system. MJF showed the most robust mechanical behavior, but its profitability depends on chamber occupancy and production volume.

The study also demonstrates that printing orientation, pressure stability, post-processing, and release-agent selection have a decisive influence on the final result. Overall, FDM is the most realistic alternative for small-scale production, whereas SLA/LFS and MJF may be justified when surface finish or tooling strength are prioritized.

6. References

- [1] Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Khorasani, M. *Additive Manufacturing Technologies*. 3rd ed. Springer, 2021.
- [2] Ngo, T. D. et al. “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges.” *Composites Part B*, vol. 143, pp. 172–196, 2018.
- [3] Valentine, M. D. A. et al. “Additively manufactured cure tools for composites manufacture.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 127, pp. 4237–4251, 2023.
- [4] Rosochowski, A., Matuszak, A. “Rapid tooling: the state of the art.” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 106, pp. 191–198, 2000.
- [5] Andreozzi, M. et al. “Investigation on the mechanical and environmental behaviour of 3D-printed molds for manufacturing of CFRP components.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 135, pp. 4785–4802, 2024

Índice de la Memoria

Capítulo 1. Introducción y Planteamiento del Proyecto	8
1.1. Introducción al Proyecto.....	8
1.2. Motivación del Proyecto.....	8
1.3. Objetivos del Proyecto	9
1.4. Metodología y Planificación.....	10
1.5. Recursos Empleados.....	10
Capítulo 2. Estado del Arte.....	12
2.1. Introducción al estado del arte.....	12
2.1.1. Objetivo del estado del arte	12
2.1.2. Contexto industrial y tecnológico.....	12
2.1.3. Relación entre fabricación aditiva y materiales compuestos.....	13
2.2. Fabricación aditiva e impresión 3D.....	13
2.2.1. Definición de fabricación aditiva	13
2.2.1.1. Diferencias entre fabricación sustractiva, conformado y fabricación aditiva.....	14
2.2.1.2. Etapas generales del proceso de fabricación aditiva.....	15
2.2.2. Historia y evolución de la impresión 3D	15
2.3. Tecnologías de impresión 3D empleadas en moldes.....	15
2.3.1. Clasificación de tecnologías de fabricación aditiva	15
2.3.2. Tecnología FDM (Fused Deposition Modeling)	16
2.3.3. Fotopolimerización en cuba mediante SLA/LFS	20
2.3.4. Fusión de lecho de polvo y tecnología MJF	24
2.3.5. Comparativa entre tecnologías de impresión 3D.....	27
2.4. Evolución y fabricación de moldes	30
2.4.1. Definición y función de un molde	30
2.4.2. Fabricación tradicional de moldes.....	31
2.4.3. Evolución de los moldes hacia fabricación aditiva	32
2.4.4. Moldes impresos en 3D	33
2.5. Materiales compuestos	35
2.5.1. Definición de material compuesto.....	35
2.5.2. Historia y evolución de los materiales compuestos.....	36
2.5.3. Clasificación de materiales compuestos	37
2.6. Fibra de carbono y carbono forjado.....	38

2.6.1. Fibra de carbono	39
2.6.2. Carbono forjado (forged carbon fiber)	40
2.6.3. Procesos de fabricación de piezas compuestas.....	43
2.7. Integración de impresión 3D y materiales compuestos	45
2.7.1. Uso de moldes impresos para materiales compuestos.....	45
2.7.2. Compatibilidad térmica y mecánica	45
2.7.3. Problemas habituales	46
2.7.4. Estrategias de mejora.....	47
2.7.5. Casos de estudio y aplicaciones industriales	48
2.8. Síntesis del estado del arte y justificación del trabajo experimental	49
2.8.1. Síntesis de la revisión bibliográfica.....	49
2.8.2. Identificación del vacío de investigación	49
2.8.3. Justificación y objetivos del trabajo experimental	50
2.8.4. Implicaciones para el trabajo experimental	50
2.8.5. Enfoque técnico adoptado en el presente trabajo	51
Capítulo 3. Diseño y Materiales	52
3.1. Diseño CAD del Molde	52
3.2. Materiales de Impresión	54
3.2.1. Material FDM	54
3.2.2. Resina Fotopolimerizable	54
3.2.3. Material MJF: PA12	54
3.3. Material Compuesto: Fibra de Carbono Forjada	55
3.4. Productos de Postprocesado y Auxiliares.....	55
Capítulo 4. Desarrollo Experimental	59
4.1. Procedimiento General de Fabricación.....	59
4.1.1. Cálculo cantidades a utilizar.....	59
4.2. Ensayo 1: Molde FDM – Impresión Horizontal	61
4.2.1. Impresión del Molde.....	61
4.2.2. Tratamiento Superficial	62
4.2.3. Moldeo por Compresión: Prensa Hidráulica	62
4.2.4. Resultados y Análisis	63
4.2.5. Resumen técnico del ensayo.....	64
4.3. Ensayo 2: Molde FDM – Impresión Vertical	65
4.3.1. Impresión del Molde.....	65

4.3.2. Tratamiento Superficial	65
4.3.3. Moldeo por Compresión: Gatos de Apriete.....	65
4.3.4. Resultados y Análisis	66
4.3.5. Resumen técnico del ensayo.....	68
4.4. Ensayo 3: Molde de Resina (SLA/LFS).....	68
4.4.1. Impresión del Molde.....	68
4.4.2. Postprocesado	69
4.4.3. Moldeo por Compresión.....	70
4.4.4. Resultados y Análisis	71
4.4.5. Resumen técnico del ensayo.....	73
4.5. Ensayo 4: Molde FDM	73
4.5.1. Impresión del molde	73
4.5.2. Postprocesado y tratamiento superficial	73
4.5.3. Moldeo por compresión.....	74
4.5.4. Resultados y análisis.....	74
4.5.5. Resumen técnico del ensayo.....	75
4.6. Ensayo 5: Molde de Tough Resin	75
4.6.1. Impresión del molde	75
4.6.2. Postprocesado y tratamiento superficial	76
4.6.3. Moldeo por compresión.....	77
4.6.4. Resultados y análisis.....	77
4.6.5. Resumen técnico del ensayo.....	78
4.7. Ensayo 6: Molde MJF en PA12.....	78
4.7.1. Fabricación del molde	79
4.7.2. Postprocesado y acabado superficial	79
4.7.3. Moldeo por compresión.....	80
4.7.4. Resultados y análisis.....	80
4.7.5. Resumen técnico del ensayo.....	81
Capítulo 5. Resultados y Discusión.....	82
5.1. Análisis Comparativo	82
5.1.1. Calidad Superficial	82
5.1.2. Efecto del clear coat en el acabado final	83
5.1.3. Desmoldeo	84
5.1.4. Sistema de Presión.....	84

5.1.5. Orientación de Impresión FDM.....	86
5.2. Matriz comparativa de resultados.....	88
5.3. Discusión de fallos observados	88
5.4. Estudio de costes y viabilidad económica	89
5.4.1. Inversión inicial	90
5.4.1.1. FDM	91
5.4.1.2. SLA/LFS	91
5.4.1.3. MJF	92
5.4.2. Amortización de equipos y coste objetivo.....	92
5.4.2.1. FDM	92
5.4.2.2. SLA/LFS	93
5.4.2.3. MJF	94
5.4.3. Costes de electricidad	94
5.4.3.1. FDM	94
5.4.3.2. SLA/LFS	95
5.4.3.3. MJF	95
5.4.4. Costes de materiales y consumibles	95
5.4.4.1. FDM	97
5.4.4.2. SLA/LFS	98
5.4.4.3. MJF	99
5.4.5. Costes de producción por molde y por pieza.....	100
5.4.5.1. FDM	100
5.4.5.2. SLA/LFS	100
5.4.5.3. MJF	101
5.4.6. Análisis comparativo de costes por tecnología de molde.....	102
5.4.7. Análisis de viabilidad económica	104
5.4.7.1. FDM	105
5.4.7.2. SLA/LFS	107
5.4.7.3. MJF	111
5.4.7.4. Resumen viabilidad económica	115
Capítulo 6. Conclusiones y Líneas Futuras	121

6.1. Conclusiones técnicas.....	121
6.2. Conclusiones sobre los moldes.....	122
6.3. Conclusiones sobre el proceso de carbono forjado	123
6.4. Limitaciones del estudio.....	124
6.5. Líneas futuras	125
6.6. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible	126
Referencias	128
Anexo A. Planos moldes impresos	133
A.1. Plano Molde Macho.....	133
A.2. Plano Molde Hembra.....	133

Índice de Figuras

Figura 1. Planificación general del desarrollo del Trabajo Fin de Grado.	10
Figura 2. Esquema del proceso de impresión FDM (Fused Deposition Modeling).	17
Figura 3. Esquema del proceso de estereolitografía (SLA). Elaboración propia.	22
Figura 4. Esquema del proceso de fusión de lecho de polvo (SLS/MJF).	25
Figura 5. Comparativa radar de las tres tecnologías de impresión 3D evaluadas.	29
Figura 6. Diagrama del proceso de fabricación de carbono forjado. Elaboración propia. ..	41
Figura 7. Escaneo en VX Elements de la pieza escogida.	53
Figura 8. Kit de fibra de carbono forjada utilizado en los ensayos.	55°
Figura 9. Nivelador de capas aplicado sobre un molde FDM.	56
Figura 10. Spray desmoldeante Weicon utilizado para facilitar el desmoldeo.	57
Figura 11. Cera desmoldeante Mirror Glaze Maximum Mold Release Wax 8.0 utilizada en las últimas pruebas.	57
Figura 12. Clearcoat empleado en el postprocesado de la pieza.	58
Figura 13. Volumen de la pieza.	60
Figura 14. Pesaje de la fibra de carbono corta en báscula de precisión.	61
Figura 15. Moldes FDM impresos en horizontal: parte macho (arriba) y hembra (abajo). 62	
Figura 16. Molde en la prensa hidráulica con tacos de madera para distribución de presión.	63
Figura 17. Pieza del Ensayo 1, con exceso de resina curada.	64
Figura 18. Molde FDM vertical sujeto con gatos de apriete durante el curado.	66
Figura 19. Pieza del Ensayo 2, con defecto de resina curada.	67
Figura 20. Comparativa entre Ensayo 1 y Ensayo 2 con la capa de resina.	68
Figura 21. Molde de resina Clear Resin durante la impresión en la Form 3L.	69
Figura 22. Moldes de resina tras el postprocesado: superficie lisa y translúcida.	70
Figura 23. Molde de resina sujeto con gatos y tableros durante el curado.	70
Figura 24. Molde destruido debido a su adherencia con la pieza.	71
Figura 25. Comparativa entre los 3 primeros ensayos realizados.	72
Figura 26. Molde ensayo 4 con cera desmoldante aplicada.	74
Figura 27. Pieza desmoldada del Ensayo 4.	75
Figura 28. Molde de resina Tough 2000 V1.	76
Figura 29. Moldes Resina Tough en alcohol isopropílico.	77
Figura 30. Resultado ensayo 5.	78
Figura 31. Molde del ensayo sexto impreso en PA12.	79
Figura 32. Resultado ensayo 6.	81
Figura 33. Piezas con capa de clearcoat.	83
Figura 34. Prensa hidráulica empleada en el primer ensayo.	85
Figura 35. Gato de apriete empleado.	86
Figura 36. Influencia de la orientación de impresión FDM en la resistencia del desmoldeo.	87
Figura 37. Laminado de la bandeja de impresión.	97
Figura 38. Obtención volumen de impresión en Pre Forms.	99
Figura 39. Volumen de la pieza en Netfabb.	100
Figura 40. Costes impresión SD HP 580 C.	102

Índice de Tablas

Tabla 1. Comparativa de propiedades típicas de las principales tecnologías de impresión.	29
Tabla 2. Relación entre requisitos del molde impreso en 3D, riesgos técnicos y medidas de control para el trabajo experimental.	51
Tabla 3. Resumen técnico del Ensayo 1.	64
Tabla 4. Resumen técnico del Ensayo 2.	68
Tabla 5. Resumen técnico del Ensayo 3.	73
Tabla 6. Resumen técnico del Ensayo 4.	75
Tabla 7. Resumen técnico del Ensayo 5.	78
Tabla 8. Resumen técnico del Ensayo 6.	81
Tabla 9. Matriz comparativa de resultados de los ensayos.	88
Tabla 10. Inversión Inicial SLA	92
Tabla 11. Tabla resumen costes.	104
Tabla 12. Tabla resumen viabilidad económica.	115
Tabla 13. Tabla resumen riesgos.	120

Capítulo 1. Introducción y Planteamiento del Proyecto

1.1. Introducción al Proyecto

La fabricación de componentes de material compuesto requiere moldes capaces de mantener la geometría prevista, soportar las cargas aplicadas durante el proceso y proporcionar un acabado superficial adecuado. Los moldes metálicos o mecanizados ofrecen elevadas prestaciones y una larga vida útil, pero su coste y plazo de fabricación pueden resultar difíciles de justificar en prototipos y series cortas [6][8].

En este contexto, la fabricación aditiva permite producir moldes directamente a partir de modelos digitales, reducir los tiempos de desarrollo y facilitar la modificación de la geometría. No obstante, los moldes poliméricos impresos presentan limitaciones relacionadas con la rugosidad superficial, la porosidad, la anisotropía mecánica, la estabilidad dimensional y la compatibilidad con las resinas utilizadas durante el moldeo [6][9][10].

El presente Trabajo Fin de Grado estudia la fabricación de un molde cerrado de dos mitades mediante tres tecnologías de impresión 3D: extrusión de material mediante FDM, fotopolimerización en cuba mediante SLA/LFS y fusión de lecho de polvo mediante MJF. Los moldes obtenidos se emplean posteriormente para fabricar una pieza de fibra de carbono corta y matriz epoxi mediante moldeo por compresión. Por tanto, la fabricación aditiva se utiliza para producir el utillaje y no directamente el componente final.

1.2. Motivación del Proyecto

La motivación principal del proyecto surge de la necesidad de disponer de métodos de fabricación de moldes rápidos, flexibles y económicamente asumibles para prototipos y producciones de bajo volumen. Aunque el mecanizado CNC de metales y la fabricación de moldes de resina de utillaje permiten obtener una elevada precisión y durabilidad, estas alternativas requieren mayores tiempos de preparación e inversiones que pueden resultar desproporcionadas para series cortas [6][8].

El interés del trabajo no se limita a comprobar si es posible fabricar una pieza mediante un molde impreso, sino a determinar qué tecnología ofrece el mejor compromiso entre coste, acabado superficial, estabilidad durante la compactación, facilidad de desmoldeo y

posibilidad de reutilización. La comparación resulta relevante porque las propiedades generales de los materiales de impresión no permiten predecir por sí solas su comportamiento cuando se utilizan como moldes en contacto con una resina epoxi y sometidos a presión.

Por este motivo, se plantea una evaluación experimental de moldes fabricados mediante FDM, SLA/LFS y MJF, empleando una geometría común y unos criterios de análisis equivalentes. Los resultados pretenden servir como orientación para seleccionar la alternativa más adecuada en función de las necesidades técnicas y del volumen de producción.

1.3. Objetivos del Proyecto

El objetivo principal del proyecto es evaluar la viabilidad técnica y económica de fabricar moldes poliméricos mediante FDM, SLA/LFS y MJF para producir piezas de fibra de carbono corta y matriz epoxi mediante moldeo por compresión. Para alcanzar este objetivo general, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar un molde cerrado de dos mitades adaptado a la geometría y al proceso de moldeo por compresión seleccionados.
- Fabricar versiones del molde mediante FDM, SLA/LFS y MJF.
- Evaluar los tratamientos de postprocesado y los agentes desmoldeantes empleados.
- Fabricar piezas de fibra de carbono corta y matriz epoxi con las diferentes alternativas de molde. (Fibra de carbono forjada)
- Analizar el acabado superficial, el comportamiento durante el desmoldeo y el estado del molde después de cada ensayo.
- Determinar el coste de fabricación del molde y el coste por pieza en diferentes escenarios de reutilización.
- Calcular el punto de equilibrio y el retorno sobre la inversión de cada tecnología.

- Identificar las principales limitaciones del procedimiento y proponer posibles mejoras.

1.4. Metodología y Planificación

El desarrollo del proyecto se estructuró en varias etapas sucesivas, desde la revisión del estado del arte hasta el análisis económico final. En primer lugar, se elaboró el Anexo B y se realizó la reconstrucción de la geometría mediante técnicas de ingeniería inversa. A continuación, se diseñó el molde en CAD, se fabricó mediante las distintas tecnologías de impresión 3D seleccionadas y se empleó para obtener las piezas de material compuesto. Finalmente, se analizaron los resultados experimentales y los costes asociados a cada alternativa.

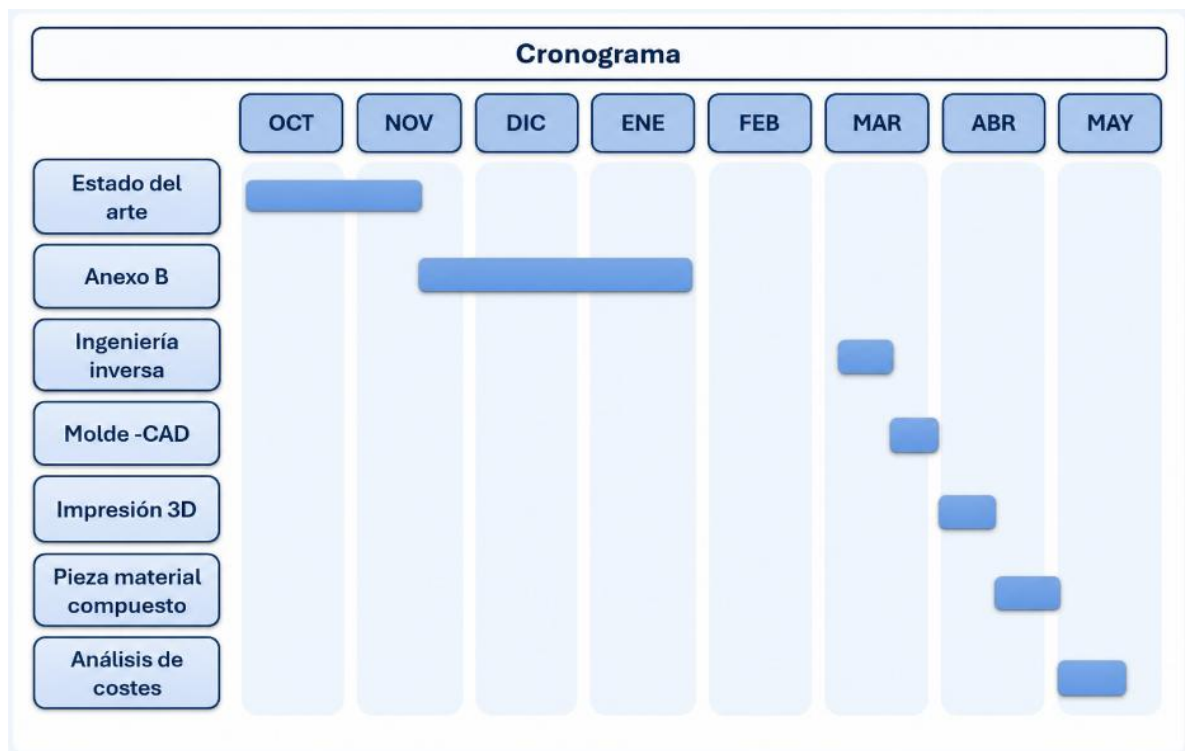


Figura 1. Planificación general del desarrollo del Trabajo Fin de Grado.

1.5. Recursos Empleados

Para la fabricación de los moldes se utilizaron las impresoras FDM Bambu Lab X1 Carbon y Bambu Lab P1S, una impresora de fotopolimerización Formlabs Form 3L y un sistema

de fusión de lecho de polvo HP Jet Fusion 580C. Los materiales empleados fueron PLA para FDM, Clear Resin y Tough Resin para SLA/LFS, y PA12 para MJF.

La preparación de las piezas compuestas se realizó con fibra de carbono corta y resina epoxi. Como equipos auxiliares se utilizaron una báscula de precisión, una prensa hidráulica, gatos de apriete y placas para la distribución de la carga. También se emplearon productos de postprocesado, entre ellos un recubrimiento nivelador, agentes desmoldeantes y cera desmoldeante.

Las características detalladas de los equipos, materiales y productos auxiliares se presentan en los capítulos 3 y 4.

Capítulo 2. Estado del Arte

2.1. Introducción al estado del arte

2.1.1. Objetivo del estado del arte

El objetivo de este capítulo es analizar la bibliografía científica y técnica relacionada con la fabricación aditiva de moldes para materiales compuestos. La revisión se centra en las tecnologías utilizadas en el trabajo (FDM, SLA/LFS y MJF) y en las propiedades que condicionan su aplicación como utillaje: precisión geométrica, acabado superficial, rigidez, estabilidad térmica, porosidad, comportamiento durante el desmoldeo y posibilidad de reutilización.

También se revisan las características de los compuestos de matriz epoxi reforzados con fibra de carbono corta y su fabricación mediante moldeo por compresión. A partir de esta revisión se pretende establecer los criterios técnicos utilizados posteriormente para diseñar los moldes, seleccionar los tratamientos superficiales y comparar experimentalmente las diferentes alternativas.

2.1.2. Contexto industrial y tecnológico

La fabricación aditiva ha evolucionado desde su uso inicial en prototipado rápido hasta su aplicación en componentes funcionales y utillajes industriales. Según el *Wohlers Report 2025*, la industria global de fabricación aditiva alcanzó aproximadamente 21.900 millones de dólares en 2024, con un crecimiento anual del 9,1 % [4]. Estos datos reflejan la consolidación de estas tecnologías, aunque su implantación continúa dependiendo del material, el volumen de producción y las prestaciones requeridas [4].

Paralelamente, los materiales compuestos de fibra de carbono han incrementado progresivamente su presencia en sectores como el aeroespacial, la automoción de altas prestaciones, la náutica y la ingeniería civil. Esta expansión ha favorecido la búsqueda de métodos de fabricación de utillajes más rápidos y flexibles que los moldes mecanizados o metálicos tradicionales [5][6][8].

La convergencia entre la fabricación aditiva y la producción de piezas de material compuesto representa una oportunidad de innovación significativa. La posibilidad de imprimir moldes mediante tecnologías 3D permite reducir los tiempos de desarrollo de producto, disminuir

los costes de utillaje, facilitar la iteración en diseño y facilitar el acceso de laboratorios, talleres y pequeñas empresas a la fabricación de piezas compuestas en series cortas [6][7].

2.1.3. Relación entre fabricación aditiva y materiales compuestos

Tradicionalmente, la producción de moldes para piezas compuestas ha requerido procesos costosos y prolongados, como el mecanizado CNC de bloques de aluminio, la fabricación de moldes de resina epoxi reforzada con fibra de vidrio, o el uso de moldes de madera tratada. Estos métodos, si bien ofrecen excelentes resultados en términos de precisión y durabilidad, presentan importantes limitaciones en cuanto a coste, tiempo de fabricación y flexibilidad de diseño [8].

La fabricación aditiva ofrece una alternativa prometedora para la producción de moldes destinados a la fabricación de piezas compuestas, especialmente en contextos de prototipado rápido, series cortas y geometrías complejas. En el escenario y las condiciones analizados por Andreozzi et al. (2024), los moldes impresos en 3D con poliamida reforzada presentaron un impacto ambiental aproximadamente un 18 % inferior al de la alternativa de aluminio [9]. Asimismo, Chen et al. (2020) lograron obtener desviaciones superficiales inferiores a 0,14 mm en moldes impresos por FDM con filamento de nailon reforzado con fibra de carbono corta, cumpliendo los requisitos de precisión para la fabricación de antenas parabólicas de material compuesto [10].

Sin embargo, la utilización de moldes impresos en 3D para la fabricación de piezas compuestas plantea diversos retos técnicos, como la limitada resistencia térmica de los polímeros de impresión, la rugosidad superficial inherente al proceso de fabricación capa a capa, la anisotropía mecánica de las piezas impresas y las dificultades de desmoldeo. Estos retos constituyen el núcleo de la investigación desarrollada en el presente trabajo, donde se evaluarán experimentalmente tres tecnologías de impresión 3D (FDM, resina y lecho de polvo) para la fabricación de moldes destinados a la producción de piezas de fibra de carbono forjada [11][12].

2.2. Fabricación aditiva e impresión 3D

2.2.1. Definición de fabricación aditiva

La fabricación aditiva (AM, por sus siglas en inglés, Additive Manufacturing) se define, según la norma ISO/ASTM 52900:2021, como el proceso de unión de materiales para crear objetos físicos tridimensionales a partir de datos de modelos 3D, normalmente mediante la adición sucesiva de material, en contraposición a las metodologías de fabricación sustractiva y de conformado [13]. Esta definición estandarizada proporciona el marco conceptual sobre el cual se clasifican y describen las distintas tecnologías que componen el ecosistema de la impresión 3D.

2.2.1.1. Diferencias entre fabricación sustractiva, conformado y fabricación aditiva

Para comprender adecuadamente la fabricación aditiva, resulta esencial establecer sus diferencias fundamentales respecto a los otros dos grandes paradigmas de fabricación: la fabricación sustractiva y el conformado.

La fabricación sustractiva engloba todos aquellos procesos en los que se parte de un bloque o pieza de material en bruto y se elimina material de forma controlada hasta obtener la geometría deseada. Los procesos más representativos de esta categoría incluyen el fresado, el torneado, la electroerosión y el rectificado. Estos procesos se caracterizan por su elevada precisión dimensional y excelente acabado superficial, pero presentan importantes limitaciones en la fabricación de geometrías internas complejas y generan una cantidad significativa de material de desecho [14].

El conformado, por su parte, agrupa los procesos en los que el material se deforma plásticamente para adoptar la forma deseada, sin añadir ni eliminar material de manera sustancial. Entre estos procesos se encuentran la forja, la estampación, la embutición, la extrusión y el moldeo por inyección. El conformado permite altas cadencias de producción, pero requiere utillajes específicos cuyo coste solo se justifica en grandes volúmenes de fabricación [14].

La fabricación aditiva, en contraste, construye las piezas añadiendo material de forma progresiva, generalmente capa sobre capa. Este enfoque ofrece ventajas únicas: la capacidad de fabricar geometrías complejas con menores restricciones de accesibilidad que numerosos procesos convencionales sin necesidad de utillaje específico, la posible reducción del desperdicio de material frente a determinados procesos sustractivos, la posibilidad de personalización masiva y una mayor libertad de diseño, aunque sujeta a restricciones de

orientación, soporte, espesor mínimo, evacuación de material y postprocesado. Sin embargo, la fabricación aditiva presenta actualmente limitaciones en cuanto a velocidad de producción, tamaño máximo de pieza, precisión dimensional y propiedades mecánicas en comparación con algunos procesos tradicionales [15][16].

2.2.1.2. Etapas generales del proceso de fabricación aditiva

Independientemente de la tecnología específica empleada, todos los procesos de fabricación aditiva comparten una secuencia operativa común que puede resumirse en las siguientes etapas: diseño digital del modelo tridimensional mediante software CAD; conversión del modelo a un formato de malla triangular (generalmente STL o 3MF); posicionamiento y orientación de la pieza en el volumen de construcción; generación de las trayectorias de fabricación mediante software de laminado (slicing); fabricación capa a capa de la pieza; y, finalmente, operaciones de postprocesado según la tecnología utilizada. Cada una de estas etapas influye de manera determinante en la calidad final de la pieza y debe ser cuidadosamente optimizada [17].

2.2.2. Historia y evolución de la impresión 3D

La fabricación aditiva surgió inicialmente ligada al prototipado rápido, con tecnologías como la estereolitografía, el sinterizado selectivo por láser y la extrusión de material. Aunque su origen histórico es relevante, en este trabajo se prioriza su evolución hacia aplicaciones de utillaje funcional y fabricación de moldes, donde la precisión, la resistencia térmica y el acabado superficial son más determinantes que la mera capacidad de generar geometrías complejas [18][22][24].

La democratización de los equipos FDM de escritorio y la consolidación de tecnologías industriales como SLA/LFS y MJF han permitido fabricar moldes funcionales en plazos reducidos. Esta transición desde el prototipado visual hacia el rapid tooling es la base tecnológica que justifica la comparación experimental de moldes FDM, resina y lecho de polvo desarrollada en este trabajo [6][9][51].

2.3. Tecnologías de impresión 3D empleadas en moldes

2.3.1. Clasificación de tecnologías de fabricación aditiva

La norma ISO/ASTM 52900:2021 clasifica los procesos de fabricación aditiva en siete categorías [13]:

- Extrusión de material (MEX): el material se dispensa selectivamente a través de una boquilla. Incluye FDM/FFF.
- Fotopolimerización en cuba (VPP): una resina fotosensible se polimeriza selectivamente mediante radiación. Incluye SLA, DLP y sistemas LCD.
- Fusión de lecho de polvo (PBF): regiones de un lecho de polvo se consolidan selectivamente mediante energía térmica. Incluye SLS y procesos metálicos de PBF.
- Proyección de aglutinante (BJT): un aglutinante líquido se deposita sobre un material en polvo.
- Proyección de material (MJT): gotas de material se depositan selectivamente para construir la pieza.
- Laminación de láminas (SHL): sucesivas láminas de material se unen y recortan.
- Deposición de energía dirigida (DED): el material se deposita y funde mediante una fuente de energía focalizada.

MJF procesa también un lecho de polvo polimérico, aunque utiliza agentes de fusión y detalle junto con una fuente térmica, en lugar de realizar la consolidación mediante el barrido directo de un láser.

De las siete categorías descritas, las tres primeras (extrusión de material, fotopolimerización en cuba y fusión de lecho de polvo) son las más relevantes para la fabricación de moldes poliméricos destinados a la producción de piezas de material compuesto, y constituyen el objeto de estudio detallado en las siguientes secciones [2][6].

2.3.2. Tecnología FDM (Fused Deposition Modeling)

2.3.2.1. Principio de funcionamiento

La fabricación mediante FDM/FFF pertenece a la categoría de extrusión de material. El proceso consiste en fundir un filamento termoplástico y depositarlo selectivamente mediante una boquilla, siguiendo las trayectorias generadas por el programa de laminado [22][30]. Una vez depositada una capa, la plataforma desciende (o el cabezal asciende) una distancia

equivalente a la altura de capa programada, y el proceso se repite hasta completar la pieza tridimensional [22][30].

Los parámetros críticos del proceso FDM incluyen: Los principales parámetros del proceso son [30][31]:

- temperatura de extrusión;
- temperatura de la plataforma;
- altura de capa;
- velocidad de impresión;
- anchura de línea;
- porcentaje y patrón de relleno;
- número de perímetros;
- orientación de fabricación;
- estrategia de soportes.

Esquema del Proceso FDM (Fused Deposition Modeling)

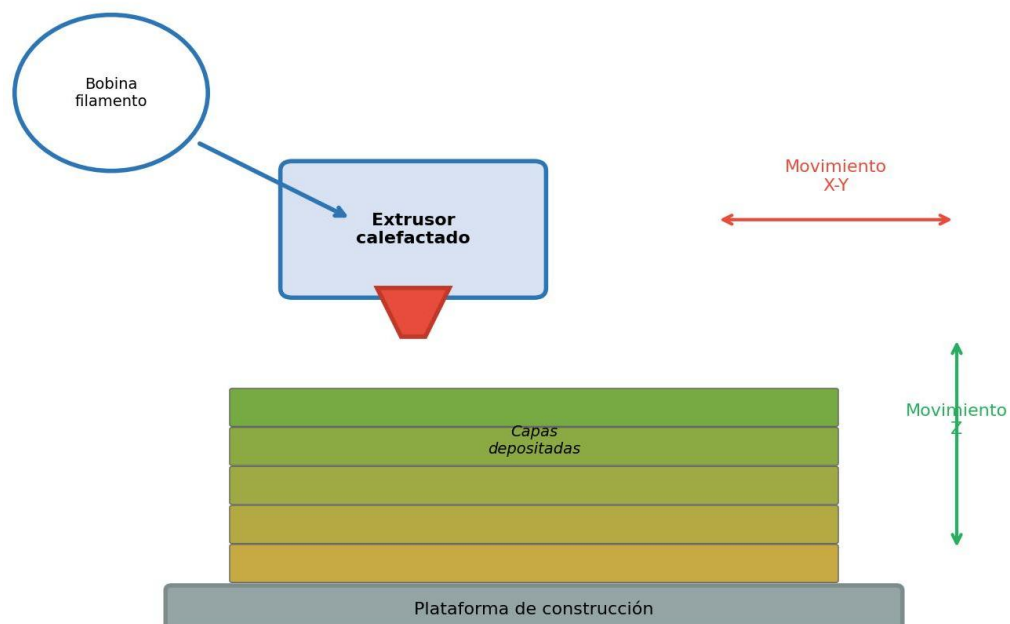


Figura 2. Esquema del proceso de impresión FDM (Fused Deposition Modeling).

2.3.2.2. Materiales utilizados

La gama de materiales disponibles para la tecnología FDM se ha ampliado considerablemente en los últimos años, abarcando desde termoplásticos de uso general hasta polímeros de ingeniería de alto rendimiento y compuestos reforzados con fibras.

El ácido poliláctico (PLA) es el material más utilizado en impresoras FDM de escritorio debido a su facilidad de impresión, bajo coste y origen biológico. Dependiendo del grado, las condiciones de ensayo y la orientación de impresión, el PLA suele presentar una temperatura de transición vítrea próxima a 55–65 °C y una resistencia a tracción del orden de 50–60 MPa. Estos valores deben considerarse orientativos, ya que las propiedades de una pieza impresa dependen de los parámetros de fabricación y de la unión entre capas. Sin embargo, su limitada resistencia térmica lo hace inadecuado para aplicaciones de moldeo que requieran temperaturas de curado elevadas [31].

El acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) ofrece una mayor resistencia térmica (una temperatura de deflexión bajo carga generalmente superior a la del PLA, cuyo valor concreto depende del grado del material y de las condiciones de ensayo) y mejor resistencia al impacto que el PLA, lo que lo convierte en una opción más adecuada para la fabricación de moldes. No obstante, el ABS presenta mayores problemas de warping (deformación por contracción térmica) y requiere una plataforma calefactada y, preferiblemente, una cámara de impresión cerrada [31][32].

El PETG (polietileno tereftalato glicol) combina la facilidad de impresión del PLA con una mayor resistencia térmica y química. Su temperatura de transición vítrea se sitúa en torno a los 80 °C, y presenta buena resistencia a la humedad y a numerosos agentes químicos [31].

El nailon (poliamida, PA) destaca por su excelente resistencia mecánica, tenacidad y resistencia al desgaste. Las poliamidas PA6 y PA12 son especialmente relevantes para la fabricación de moldes debido a sus temperaturas de deflexión por calor más elevadas (en torno a 180 °C para PA6 con refuerzo). Su principal inconveniente es la elevada higroscopicidad, que requiere un almacenamiento y secado adecuados del filamento [10][32].

Los materiales reforzados con fibras, como el nailon con fibra de carbono corta (Carbon PA), representan una de las opciones más prometedoras para la fabricación de moldes por

FDM. Estos compuestos ofrecen una combinación superior de rigidez, resistencia térmica y estabilidad dimensional, con coeficientes de expansión térmica significativamente reducidos respecto a los polímeros no reforzados. Andreozzi et al. (2024) emplearon PA6 reforzada con un 20 % en peso de fibra de carbono corta para fabricar moldes destinados a la producción de componentes CFRP para el sector de automoción, demostrando la viabilidad de esta solución [9][10].

En el presente trabajo se seleccionó PLA porque el curado del compuesto se realizó a temperatura ambiente y porque este material permite fabricar moldes con un coste reducido y sin necesidad de equipos calefactados. No obstante, su limitada resistencia térmica restringe su utilización en procesos de curado a temperaturas elevadas.

2.3.2.3. Ventajas

La tecnología FDM presenta un conjunto de ventajas que la convierten en una opción especialmente atractiva para la fabricación de moldes, particularmente en contextos de prototipado y producción de series cortas. En primer lugar, el bajo coste tanto de los equipos como de los materiales constituye una de sus principales fortalezas: las impresoras FDM de escritorio se encuentran disponibles desde unos pocos cientos de euros, y los filamentos termoplásticos estándar tienen precios que oscilan entre 20 y 50 euros por kilogramo. En segundo lugar, la facilidad de uso y la amplia base de conocimiento disponible hacen que la tecnología FDM sea accesible tanto para usuarios expertos como para principiantes. En tercer lugar, la capacidad de fabricar piezas de gran tamaño, especialmente con impresoras de formato medio y grande, permite la producción de moldes de dimensiones significativas. Finalmente, la amplia variedad de materiales disponibles ofrece flexibilidad para seleccionar el polímero más adecuado en función de los requisitos térmicos y mecánicos específicos de cada aplicación de moldeo [2][6][30].

2.3.2.4. Desventajas

Las principales limitaciones de la tecnología FDM en el contexto de la fabricación de moldes incluyen la rugosidad superficial inherente al proceso de deposición capa a capa, que genera un patrón escalonado en la superficie de la pieza cuya magnitud depende de la altura de capa y la orientación de construcción. Valores típicos de rugosidad R_a para piezas FDM se sitúan

entre 10 y 25 μm , significativamente superiores a los requeridos para moldes de alta calidad. La anisotropía mecánica constituye otra limitación relevante: las piezas FDM presentan propiedades mecánicas significativamente inferiores en la dirección perpendicular a las capas (dirección Z) debido a la debilidad de la unión intercapa. La precisión dimensional de las piezas FDM, típicamente en el rango de $\pm 0,2\text{-}0,5\text{ mm}$, es inferior a la ofrecida por tecnologías como SLA o SLS. Finalmente, la resistencia térmica de los materiales FDM convencionales limita su uso en procesos de moldeo que requieran temperaturas de curado superiores a 80-120 °C [2][10][31].

2.3.2.5. Aplicaciones en fabricación de moldes

A pesar de sus limitaciones, la tecnología FDM ha demostrado su utilidad en diversas aplicaciones de fabricación de moldes para materiales compuestos. Chen et al. (2020) emplearon filamento de nailon reforzado con fibra de carbono corta para imprimir moldes de antenas parabólicas, optimizando el modo de impresión (horizontal, vertical e inclinado) para obtener desviaciones superficiales inferiores a 0,14 mm [10]. Lušić et al. (2015) investigaron la fabricación de moldes FDM en ABS para la producción de piezas compuestas mediante laminado manual, demostrando que el postprocesado con recubrimientos de resina epoxi permitía obtener acabados superficiales adecuados para el moldeo [33]. Asimismo, diversos estudios han explorado el uso de moldes FDM en PLA para la fabricación de piezas compuestas por infusión de resina, destacando la necesidad de aplicar agentes desmoldeantes y sellantes superficiales para garantizar la integridad del molde durante el proceso [2][6].

2.3.3. Fotopolimerización en cuba mediante SLA/LFS

2.3.3.1. Principio de funcionamiento

La impresora Formlabs Form 3L utilizada en este trabajo emplea una implementación de la estereolitografía que el fabricante denomina *Low Force Stereolithography* (LFS). LFS no constituye una categoría independiente en la clasificación ISO/ASTM, sino una variante comercial del proceso de fotopolimerización en cuba.

Las tecnologías de impresión 3D basadas en resina se engloban dentro de la categoría de fotopolimerización en cuba (Vat Photopolymerization) según la clasificación ISO/ASTM 52900. El principio fundamental consiste en la polimerización selectiva de una resina líquida

fotosensible mediante una fuente de luz (ultravioleta o visible), que provoca el entrecruzamiento de las cadenas poliméricas y la solidificación del material en las zonas expuestas [13][34].

Existen tres variantes principales de esta tecnología. La estereolitografía (SLA) emplea un láser ultravioleta que traza selectivamente cada capa sobre la superficie de la resina líquida, punto a punto. El procesamiento digital de luz (DLP) utiliza un proyector digital para exponer simultáneamente toda la sección transversal de cada capa mediante una imagen proyectada. La estereolitografía enmascarada (MSLA o LCD) emplea una pantalla LCD como máscara de luz para exponer selectivamente la resina, combinando la alta resolución de SLA con la velocidad de DLP. En todas las variantes, la plataforma de construcción se desplaza verticalmente tras la polimerización de cada capa, permitiendo la exposición de una nueva capa de resina líquida [34][35].

Una variante reciente de la estereolitografía es la denominada LFS (Low Force Stereolithography), desarrollada por Formlabs para sus impresoras Form 3 y Form 3L. Esta tecnología emplea una unidad de procesamiento de luz que dirige el láser sobre un tanque de resina con fondo flexible, reduciendo las fuerzas de despegue entre la pieza y el tanque durante la impresión. La Form 3 ofrece un volumen de construcción de $14,5 \times 14,5 \times 18,5$ cm, mientras que la Form 3L amplía dicho volumen a $33,5 \times 20 \times 30$ cm; ambas permiten espesores de capa de 25 a 300 μm y un tamaño de punto láser de 85 μm . Estas características resultan relevantes para moldes de alta resolución y geometrías complejas, aunque el tamaño y el coste de las resinas siguen siendo condicionantes importantes [34][37][52].

Esquema del Proceso SLA (Estereolitografía)

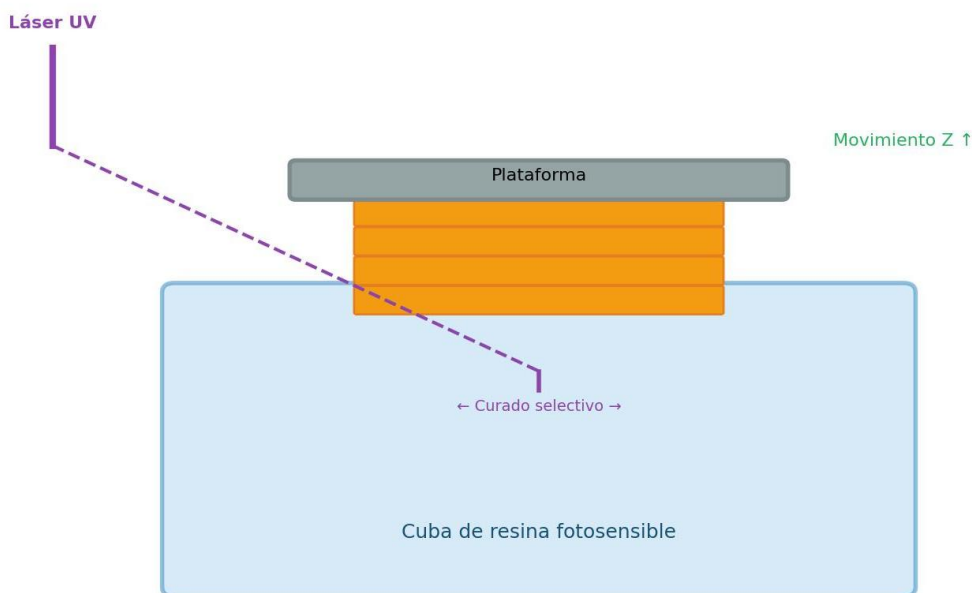


Figura 3. Esquema del proceso de estereolitografía (SLA). Elaboración propia.

2.3.3.2. Tipos de resinas

El mercado actual ofrece una amplia variedad de resinas fotopolimerizables diseñadas para diferentes aplicaciones. Las resinas estándar proporcionan un buen equilibrio entre coste, resolución y facilidad de uso, con resistencias a la tracción típicas de 40-65 MPa y módulos elásticos de 1.500-2.800 MPa. Las resinas de alta resistencia (tough resins) están formuladas para ofrecer mayor tenacidad y resistencia al impacto, emulando las propiedades del ABS. Las resinas térmicas (high-temperature resins) presentan temperaturas de deflexión por calor (HDT) que pueden superar los 200 °C, lo que las hace especialmente interesantes para aplicaciones de moldeo. Las resinas cerámicas y cargadas con minerales ofrecen mayor rigidez y estabilidad dimensional. Finalmente, las resinas flexibles y biocompatibles amplían el espectro de aplicaciones a campos como el médico y el dental [34][35][36].

2.3.3.3. Ventajas

La principal ventaja de las tecnologías de impresión por resina es la elevada precisión dimensional y el excelente acabado superficial que proporcionan. Las resoluciones de capa típicas oscilan entre 25 y 100 μm , con resoluciones XY que pueden alcanzar los 25-50 μm

en equipos de alta gama. Los valores de rugosidad superficial R_a obtenidos son significativamente inferiores a los de la tecnología FDM, generalmente en el rango de 1-5 μm , lo que resulta especialmente valioso para la fabricación de moldes donde el acabado superficial se transfiere directamente a la pieza moldeada. Adicionalmente, las piezas impresas por resina presentan un comportamiento mecánico más isotrópico que las fabricadas por FDM, ya que la polimerización genera una estructura más homogénea en las tres direcciones del espacio [2][35][36].

2.3.3.4. Desventajas

Las principales desventajas de la impresión por resina incluyen la fragilidad de muchas formulaciones estándar, que presentan elongaciones a rotura limitadas y susceptibilidad a la fractura frágil. El coste de las resinas fotopolimerizables es generalmente superior al de los filamentos termoplásticos (típicamente entre 50 y 200 euros por litro para resinas de ingeniería). El proceso de postprocesado es más complejo que en FDM, requiriendo lavado con alcohol isopropílico (IPA) o soluciones de lavado específicas para eliminar la resina no curada, seguido de un curado UV posterior para completar la polimerización. Las limitaciones de tamaño del volumen de construcción restringen la fabricación de moldes de grandes dimensiones, aunque los equipos de gran formato han ampliado significativamente estas capacidades en los últimos años. Además, la estabilidad dimensional a largo plazo puede verse comprometida por el curado residual no controlado (curado diferido) y la absorción de humedad [2][36].

2.3.3.5. Aplicaciones en moldes y utillajes

La impresión 3D por resina ha encontrado aplicaciones relevantes en la fabricación de moldes para materiales compuestos, especialmente en situaciones donde se requiere un acabado superficial de alta calidad. Formlabs, uno de los principales fabricantes de impresoras SLA/LCD, ha documentado múltiples casos de estudio en los que moldes impresos por resina se han empleado para la fabricación de piezas de fibra de carbono mediante laminado manual y preimpregnado (prepreg). La empresa DeltaWing Manufacturing y la Universidad Técnica de Berlín (TU Berlin) han utilizado moldes SLA para la producción de componentes compuestos, demostrando la viabilidad de esta aproximación para series cortas y prototipado [37]. Las resinas de alta temperatura resultan

particularmente adecuadas para procesos de curado en autoclave a temperaturas moderadas, ampliando el rango de aplicación de esta tecnología [36].

2.3.4. Fusión de lecho de polvo y tecnología MJF

2.3.4.1. Principio de funcionamiento

Las tecnologías de fusión de lecho de polvo (PBF) se basan en la fusión o sinterización selectiva de partículas de material en polvo mediante una fuente de energía térmica. El proceso comienza con la deposición de una capa uniforme de polvo sobre la plataforma de construcción mediante un rodillo o una cuchilla. A continuación, una fuente de energía (láser en SLS, lámparas infrarrojas con agentes de fusión en MJF) funde selectivamente las zonas correspondientes a la sección transversal de la pieza. La plataforma desciende, se deposita una nueva capa de polvo y el proceso se repite. El polvo no fundido actúa como soporte natural de la pieza durante la fabricación, lo que elimina la necesidad de estructuras de soporte dedicadas [13][38].

En el sinterizado selectivo por láser (SLS), un láser de CO₂ o de fibra funde selectivamente las partículas de polvo polimérico. El polvo circundante no sinterizado sirve como soporte, permitiendo la fabricación de geometrías complejas sin necesidad de soportes adicionales. La tecnología Multi Jet Fusion (MJF), desarrollada por HP, emplea agentes de fusión y detalle depositados mediante cabezales de inyección de tinta, seguidos de la exposición a radiación infrarroja para fundir selectivamente el polvo. Esta tecnología ofrece velocidades de fabricación superiores a SLS manteniendo una resolución comparable [38][39].

Esquema del Proceso de Fusión de Lecho de Polvo (SLS/MJF)

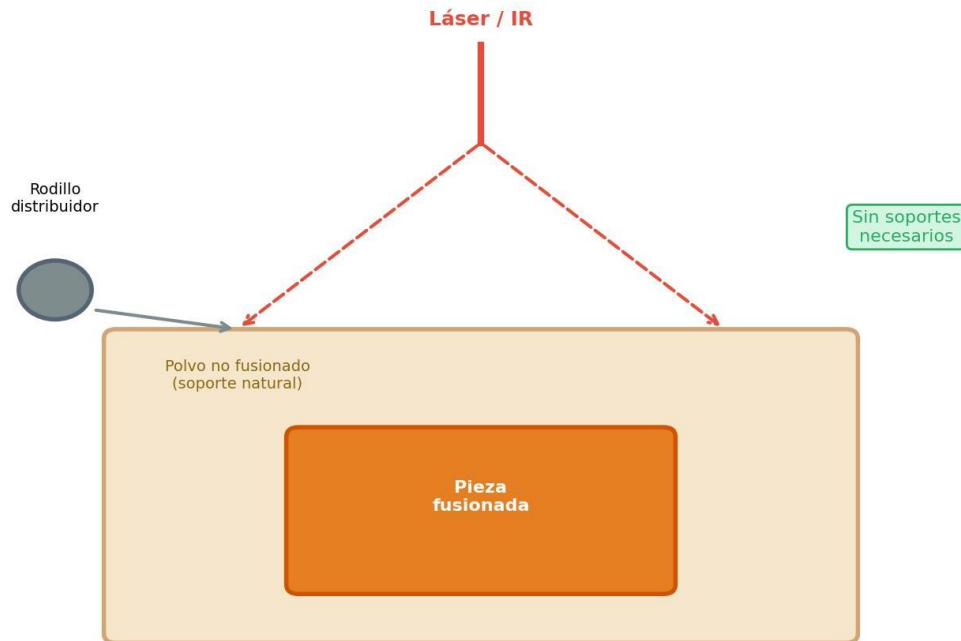


Figura 4. Esquema del proceso de fusión de lecho de polvo (SLS/MJF).

2.3.4.2. Materiales empleados

El material más utilizado en SLS y MJF es la poliamida 12 (PA12 o Nylon 12), que ofrece una excelente combinación de propiedades mecánicas, resistencia química y procesabilidad. La PA12 presenta una temperatura de deflexión por calor de aproximadamente 175 °C (a 0,45 MPa) según la ficha técnica del material en bruto (por ejemplo, EOS PA2200), una resistencia a la tracción de 48 MPa y una elongación a rotura del 18 %. No obstante, conviene señalar que las piezas fabricadas por SLS pueden presentar propiedades ligeramente inferiores a las del material bulk debido a la porosidad residual inherente al proceso de sinterización, con valores de HDT efectivos típicamente en el rango de 160-170 °C. Otros materiales disponibles incluyen la PA11 (con mayor ductilidad), poliamidas reforzadas con fibra de vidrio o carbono (PA12-GF, PA12-CF) que ofrecen mayor rigidez y estabilidad térmica, polipropileno (PP), elastómeros termoplásticos (TPU) y, para aplicaciones de muy alta temperatura, materiales como el PEEK (poliéter éter cetona) [38][39].

2.3.4.3. Ventajas

Las tecnologías de lecho de polvo ofrecen ventajas significativas para la fabricación de moldes. La isotropía mecánica de las piezas es notablemente superior a la de FDM, dado que el proceso de fusión del polvo genera una estructura más homogénea. La ausencia de necesidad de estructuras de soporte permite la fabricación de geometrías internas complejas, como canales de refrigeración conformados, que resultan de gran interés en aplicaciones de moldeo. Las propiedades mecánicas de las piezas SLS/MJF en PA12 son generalmente superiores a las de FDM, con resistencias a la tracción de 48 MPa y módulos elásticos de aproximadamente 1.700 MPa. Además, la capacidad de anidar múltiples piezas en el volumen de construcción permite una utilización eficiente del espacio disponible, reduciendo el coste por pieza en series medianas [38][39][40].

2.3.4.4. Desventajas

El principal inconveniente de las tecnologías de lecho de polvo es el elevado coste de los equipos, que típicamente superan los 100.000 euros para sistemas industriales SLS y los 200.000 euros para sistemas MJF. El coste del material en polvo también es significativamente superior al de los filamentos FDM o las resinas fotopolimerizables, con precios que oscilan entre 60 y 150 euros por kilogramo para PA12. La rugosidad superficial de las piezas SLS/MJF, típicamente en el rango de 6-15 μm Ra, es inferior a la de FDM pero superior a la de SLA/DLP. El postprocesado requiere la eliminación del polvo residual mediante chorro de aire comprimido o microesferas, y en algunos casos se aplican tratamientos de infiltración, tintado o pulido mecánico para mejorar el acabado superficial [38][39].

Cabe señalar que existen equipos MJF de gama media, como la HP Jet Fusion 580C, con volúmenes de construcción más reducidos ($332 \times 190 \times 248$ mm) y costes inferiores a los de los sistemas industriales de mayor formato. Estos equipos mantienen prestaciones fundamentales de la tecnología MJF, como la resolución de cabezal de 1200 ppp y espesores de capa del orden de 80 μm , en un formato compacto adaptado a entornos académicos y de prototipado, lo que los convierte en una opción viable para la fabricación de moldes de tamaño medio [39][53].

2.3.4.5. Aplicaciones en moldes

Las tecnologías de lecho de polvo se han empleado con éxito en la fabricación de moldes y utillajes para diversas aplicaciones de materiales compuestos. La combinación de buenas propiedades mecánicas, isotropía y resistencia térmica hacen que las piezas SLS en PA12 sean adecuadas para moldes de inyección de series cortas, moldes de termoconformado y utillajes de laminado de composites. Los moldes SLS/MJF reforzados con fibra de vidrio (PA12-GF) han demostrado su capacidad para soportar las presiones y temperaturas típicas del moldeo por compresión de materiales compuestos termoestables, incluyendo ciclos de curado en autoclave a temperaturas de hasta 120-130 °C [2][40].

2.3.5. Comparativa entre tecnologías de impresión 3D

La selección de la tecnología de impresión 3D más adecuada para la fabricación de un molde requiere la evaluación sistemática de múltiples criterios técnicos y económicos. A continuación, se presenta un análisis comparativo de las tres tecnologías estudiadas.

2.3.5.1. Precisión dimensional

La precisión dimensional varía significativamente entre las tres tecnologías. La impresión por resina (SLA/DLP) ofrece la mayor precisión, con tolerancias típicas de $\pm 0,05-0,15$ mm. Las tecnologías de lecho de polvo (SLS/MJF) proporcionan tolerancias de $\pm 0,1-0,3$ mm. La tecnología FDM presenta la menor precisión, con tolerancias típicas de $\pm 0,2-0,5$ mm, dependiendo del equipo y los parámetros de proceso [2][35].

2.3.5.2. Rugosidad superficial

El acabado superficial es un parámetro crítico en la fabricación de moldes, ya que la rugosidad del molde se transfiere directamente a la pieza moldeada. Los valores típicos de rugosidad R_a son: SLA/DLP entre 1 y 5 μm ; SLS/MJF entre 6 y 15 μm ; FDM entre 10 y 25 μm . Estos valores pueden mejorarse significativamente mediante operaciones de postprocesado como el lijado, la aplicación de recubrimientos o el pulido químico [2][10].

2.3.5.3. Coste de fabricación

El coste total de fabricación de un molde impreso en 3D depende del coste del equipo, el coste del material, el tiempo de fabricación y el coste del postprocesado. La tecnología FDM presenta el menor coste global, seguida de la impresión por resina y, finalmente, las

tecnologías de lecho de polvo. Sin embargo, esta clasificación puede variar en función del volumen de producción, el tamaño de la pieza y los requisitos específicos de la aplicación [2][6].

2.3.5.4. Tiempo de fabricación

El tiempo de fabricación depende del volumen de la pieza, la altura de capa y la tecnología empleada. Para piezas de tamaño medio (del orden de 200 cm³), los tiempos típicos son: FDM entre 8 y 20 horas; SLA/DLP entre 6 y 15 horas; SLS/MJF entre 4 y 12 horas de impresión propiamente dicha. No obstante, es necesario considerar adicionalmente el tiempo de enfriamiento controlado del lecho de polvo, que puede requerir entre 12 y 24 horas adicionales dependiendo del volumen de construcción y del material, lo que incrementa significativamente el tiempo total del ciclo. A pesar de ello, las tecnologías de lecho de polvo permiten la fabricación simultánea de múltiples piezas, lo que reduce el tiempo por pieza en series [30][38].

2.3.5.5. Resistencia mecánica y térmica

La resistencia mecánica y térmica de los moldes impresos depende fundamentalmente del material utilizado y, en menor medida, de la tecnología de fabricación. Las piezas SLS en PA12 y PA12 reforzado ofrecen una buena combinación de propiedades mecánicas y térmicas, seguidas de las piezas FDM en materiales de ingeniería (nailon reforzado, PC, PEEK) y las resinas de alta temperatura. Los valores incluidos en la tabla deben interpretarse como orientativos, ya que dependen del fabricante del material, la orientación de impresión, los parámetros de proceso, el poscurado y el postprocesado superficial [2][9][35].

3D para fabricación de moldes. Fuentes: [2][9][35][38].

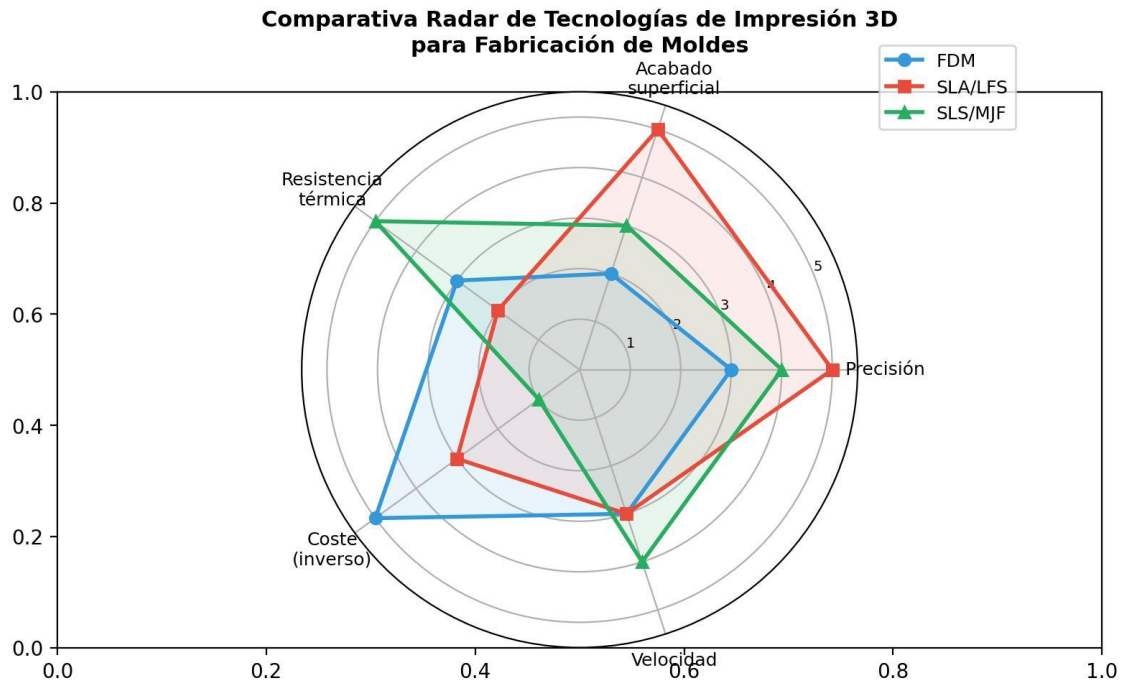


Figura 5. Comparativa radar de las tres tecnologías de impresión 3D evaluadas.

Tecnología	Precisión ($\pm$ mm)	Ra (μ m)	HDT ($^{\circ}$ C)	Coste relativo
FDM (PLA)	0,2 – 0,5	10 – 25	$\sim$ 60	Bajo
FDM (ABS)	0,2 – 0,5	10 – 25	$\sim$ 100	Bajo
FDM (Nylon CF)	0,2 – 0,4	8 – 20	$\sim$ 180	Medio
SLA/DLP estándar	0,05 – 0,15	1 – 5	$\sim$ 70	Medio
SLA high-temp	0,05 – 0,15	1 – 5	$>$ 200	Alto
SLS (PA12)	0,1 – 0,3	6 – 15	$\sim$ 175	Alto
MJF (PA12)	0,1 – 0,3	6 – 15	$\sim$ 175	Alto

Tabla 1. Comparativa de propiedades típicas de las principales tecnologías de impresión.

2.3.5.6. Adecuación para fabricación de moldes

La selección de la tecnología óptima para la fabricación de un molde impreso en 3D depende de un conjunto de factores interrelacionados que incluyen los requisitos de precisión y

acabado superficial de la pieza final, las condiciones térmicas y mecánicas del proceso de moldeo, el tamaño del molde, el volumen de producción previsto y el presupuesto disponible. Para aplicaciones de prototipado rápido con requisitos moderados, la tecnología FDM con materiales estándar (PLA, ABS) y postprocesado superficial puede constituir la solución más eficiente en términos de coste-beneficio. Para moldes que requieran alta precisión y excelente acabado superficial, la impresión por resina ofrece las mejores prestaciones. Para moldes sometidos a condiciones térmicas y mecánicas exigentes, las tecnologías de lecho de polvo con materiales de ingeniería representan la opción más robusta [2][6][9].

2.4. Evolución y fabricación de moldes

2.4.1. Definición y función de un molde

Un molde se define como un utillaje o herramienta que contiene una cavidad con la forma deseada de la pieza a fabricar, y que permite la conformación de un material (plástico, metal, compuesto, etc.) mediante la aplicación de presión, temperatura o una combinación de ambas. En el contexto de la fabricación de materiales compuestos, el molde constituye un elemento crítico que determina la geometría, la precisión dimensional, el acabado superficial y, en última instancia, la calidad de la pieza final [41].

2.4.1.1. Tipos de moldes

Los moldes pueden clasificarse atendiendo a diversos criterios. Según su geometría, se distinguen moldes abiertos (de una sola cara, como los empleados en laminado manual), moldes cerrados (de dos o más partes, utilizados en procesos de inyección y RTM), y moldes de geometría variable (reconfigurables). Según su material de construcción, se clasifican en metálicos (acero, aluminio), poliméricos (resina epoxi, poliuretano, materiales impresos en 3D), compuestos (fibra de vidrio con resina epoxi) y otros (madera, escayola, cerámica). Según su vida útil, se distinguen moldes de prototipado (para una o pocas piezas), moldes de producción corta (decenas a cientos de piezas) y moldes de producción industrial (miles a millones de ciclos) [41][42].

2.4.1.2. Requisitos funcionales de un molde

Los requisitos funcionales de un molde para la fabricación de piezas de material compuesto incluyen varios aspectos críticos. La precisión dimensional del molde debe ser igual o superior a la requerida para la pieza final, considerando las contracciones térmicas tanto del molde como del material compuesto. La resistencia térmica debe ser suficiente para soportar las temperaturas del ciclo de curado sin deformación permanente ni degradación; para resinas epoxi de curado a temperatura ambiente, temperaturas de hasta 60-80 °C pueden ser suficientes, mientras que los sistemas de curado en autoclave requieren resistencias de 120-180 °C. La rigidez del molde debe garantizar la estabilidad dimensional bajo las presiones de compactación y vacío aplicadas durante el proceso de moldeo. El acabado superficial del molde se transfiere directamente a la pieza, por lo que valores de rugosidad bajos son esenciales para piezas de acabado cosmético. Finalmente, la compatibilidad química con las resinas y los agentes desmoldeantes utilizados debe asegurarse para evitar la degradación del molde o la contaminación de la pieza [8][41][42].

2.4.2. Fabricación tradicional de moldes

2.4.2.1. Moldes mecanizados

El mecanizado CNC (Control Numérico Computarizado) constituye el método de referencia para la fabricación de moldes de alta precisión. Los bloques de material (aluminio, acero, resinas de utillaje o tableros de herramientas) se mecanizan mediante fresado de 3 a 5 ejes para obtener la cavidad del molde con tolerancias típicas de $\pm 0,01-0,05$ mm y acabados superficiales excelentes (R_a inferior a 1 μm con operaciones de acabado). El principal inconveniente del mecanizado CNC es el elevado coste, tanto del material en bruto como del tiempo de máquina, que puede superar fácilmente los varios miles de euros para moldes de complejidad media [8][42].

2.4.2.2. Moldes metálicos

Los moldes metálicos, fabricados típicamente en aluminio o acero, representan la solución más robusta y duradera para la fabricación de piezas compuestas en series medianas y largas. El aluminio se emplea frecuentemente por su buena conductividad térmica, su menor peso respecto al acero y su facilidad de mecanizado. El acero, por su parte, se reserva para aplicaciones de alta exigencia térmica y mecánica, como moldes de inyección a alta presión o moldes para curado en autoclave a temperaturas elevadas. Los moldes metálicos ofrecen

una vida útil prácticamente ilimitada, pero su coste de fabricación es significativamente superior al de las alternativas poliméricas [42].

2.4.2.3. Moldes de madera y composites

Los moldes de madera, generalmente fabricados a partir de tableros de MDF (tablero de fibra de densidad media) o contrachapado, representan una solución económica para prototipado y series muy cortas. La madera puede mecanizarse fácilmente con herramientas convencionales o CNC, pero presenta limitaciones significativas en términos de estabilidad dimensional (sensibilidad a la humedad), durabilidad y acabado superficial. Los moldes de material compuesto, típicamente fabricados mediante laminado de fibra de vidrio con resina epoxi sobre un modelo maestro, ofrecen un excelente compromiso entre coste, peso, resistencia térmica y acabado superficial, y constituyen una solución ampliamente utilizada en la industria náutica y aeronáutica [8][42].

2.4.2.4. Procesos tradicionales de fabricación

Los procesos tradicionales de fabricación de moldes incluyen el mecanizado CNC (fresado, torneado, electroerosión), la fundición de metales en arena o coquilla, el laminado manual de composites sobre un modelo maestro, y la colada de resinas de utillaje (tooling resins). Cada uno de estos procesos presenta un perfil de coste-tiempo-calidad específico que determina su idoneidad para cada aplicación. El mecanizado CNC de aluminio, por ejemplo, puede requerir entre 1 y 4 semanas desde la recepción del diseño CAD hasta la entrega del molde terminado, con costes que oscilan entre 2.000 y 50.000 euros dependiendo de la complejidad y el tamaño [8][42].

2.4.3. Evolución de los moldes hacia fabricación aditiva

2.4.3.1. Introducción de la impresión 3D en utillajes

La introducción de la fabricación aditiva en el campo de los utillajes y moldes se inició en la década de 1990, principalmente como método para fabricar modelos maestros y patrones sobre los cuales se construían los moldes convencionales mediante colada o laminado. Esta aproximación indirecta permitía aprovechar la libertad geométrica de la impresión 3D sin las limitaciones de los materiales de impresión de la época, que carecían de las propiedades térmicas y mecánicas necesarias para funcionar directamente como moldes [2][6].

2.4.3.2. Moldes híbridos

Los moldes híbridos combinan elementos fabricados mediante impresión 3D con componentes fabricados por métodos convencionales. Un enfoque típico consiste en imprimir en 3D los insertos o las zonas de geometría compleja del molde e integrarlos en una estructura base metálica o de composite fabricada convencionalmente. Esta estrategia permite aprovechar las ventajas de la fabricación aditiva (libertad de diseño, rapidez) en las zonas críticas del molde, manteniendo la robustez y estabilidad dimensional de los materiales convencionales en la estructura portante [2].

2.4.3.3. Moldes rápidos (rapid tooling)

El concepto de rapid tooling engloba el conjunto de técnicas que emplean la fabricación aditiva para acelerar la producción de moldes y utillajes. Se distinguen dos aproximaciones principales: el rapid tooling directo, en el que el molde se fabrica directamente mediante impresión 3D y se utiliza sin transformación adicional (o con un postprocesado mínimo); y el rapid tooling indirecto, en el que la impresión 3D se emplea para fabricar un patrón o modelo maestro a partir del cual se obtiene el molde final mediante colada de silicona, colada de resina de utillaje u otros procesos de reproducción. Ambas aproximaciones ofrecen reducciones significativas del tiempo de obtención del molde, típicamente del 50-80 % respecto a los métodos convencionales [2][6][37].

2.4.3.4. Tendencias actuales

Las tendencias actuales en la fabricación aditiva de moldes se orientan hacia el desarrollo de materiales de impresión específicamente diseñados para aplicaciones de utillaje, con propiedades térmicas y mecánicas mejoradas; la optimización topológica de la estructura interna de los moldes para reducir el peso y el tiempo de fabricación sin comprometer la rigidez; la integración de canales de refrigeración conformados (conformal cooling channels) que siguen la geometría de la cavidad del molde; y la fabricación de moldes de gran formato mediante sistemas de impresión de área amplia (BAAM, Big Area Additive Manufacturing) [2][9].

2.4.4. Moldes impresos en 3D

2.4.4.1. Características principales

Los moldes impresos en 3D se caracterizan por ser fabricados directamente a partir de datos CAD digitales sin necesidad de utillaje intermedio, lo que elimina las etapas de diseño y fabricación del modelo maestro. Este flujo de trabajo digital permite modificaciones rápidas del diseño, almacenamiento digital del molde (inventario virtual) y reproducción exacta en caso de necesidad. La estructura interna del molde puede optimizarse mediante patrones de relleno adaptados a los requisitos mecánicos y térmicos específicos de cada aplicación [2][6].

2.4.4.2. Ventajas frente a moldes tradicionales

Las ventajas de los moldes impresos en 3D frente a los moldes tradicionales son múltiples. En primer lugar, la reducción de costes es significativa, especialmente para series cortas y prototipos: frente a los miles de euros de un molde CNC de aluminio, un molde impreso en 3D puede fabricarse por unos pocos cientos de euros en material y energía. En segundo lugar, la rapidez de fabricación permite disponer de moldes funcionales en horas o días, frente a semanas o meses. En tercer lugar, la personalización y la iteración rápida de diseño son inmediatas, ya que las modificaciones se realizan directamente en el archivo CAD. Andreozzi et al. (2024) cuantificaron una reducción del impacto ambiental del 18 % en moldes impresos en 3D frente a moldes de aluminio equivalentes, lo que añade una dimensión de sostenibilidad a las ventajas económicas y temporales [6][9].

2.4.4.3. Limitaciones técnicas

Las principales limitaciones técnicas de los moldes impresos en 3D se derivan de las propiedades de los materiales poliméricos empleados. La resistencia térmica limitada restringe el rango de temperaturas de curado aplicables; la mayoría de los polímeros de impresión convencionales comienzan a reblandecerse o deformarse a temperaturas superiores a 60-120 °C, lo que excluye su uso en procesos de curado en autoclave a alta temperatura. La durabilidad de los moldes impresos es inferior a la de los moldes metálicos, limitándose generalmente a decenas o, como máximo, cientos de ciclos de moldeo. El acabado superficial, como se ha discutido anteriormente, requiere operaciones de postprocesado para alcanzar los estándares de calidad requeridos. Además, la porosidad inherente a algunos procesos de fabricación aditiva puede comprometer la estanqueidad del molde, especialmente en procesos de infusión o inyección de resina que requieren la aplicación de vacío [2][9][10].

2.4.4.4. Aplicaciones industriales

Los moldes impresos en 3D han encontrado aplicaciones industriales en diversos sectores. En el sector de automoción, Andreozzi et al. (2024) demostraron la viabilidad de moldes impresos en Carbon PA (PA6 reforzada con fibra de carbono) para la fabricación de componentes CFRP para el sector del automóvil, evaluando su comportamiento mecánico, ambiental y de deformación térmica [9]. En el sector aeroespacial, Duty et al. (2017) exploraron la fabricación de moldes de gran formato mediante BAAM para la producción de herramientas de laminado de composites para la industria aeronáutica [43]. En el prototipado, múltiples empresas y centros de investigación emplean moldes impresos en 3D como herramienta de desarrollo de producto, permitiendo la fabricación de piezas de material compuesto representativas en plazos significativamente reducidos [6][37]. En el sector náutico, los moldes impresos se emplean para la fabricación de componentes de embarcaciones de competición y recreo en series cortas [2].

2.5. Materiales compuestos

2.5.1. Definición de material compuesto

Un material compuesto se define como un material constituido por dos o más componentes (fases) con propiedades físicas y químicas significativamente diferentes, que al combinarse producen un material con características distintas a las de los componentes individuales. La combinación busca sinergias que permitan obtener un material con propiedades superiores a las de sus constituyentes por separado, generalmente en términos de relación resistencia-
peso, rigidez-peso, resistencia a la fatiga o resistencia a la corrosión [44][45].

2.5.1.1. Matriz y refuerzo

Los materiales compuestos constan fundamentalmente de dos fases: la matriz y el refuerzo. La matriz es la fase continua que envuelve y protege el refuerzo, transfiere las cargas mecánicas al refuerzo, proporciona la forma geométrica de la pieza y determina la resistencia ambiental del compuesto (resistencia química, térmica, etc.). El refuerzo es la fase discontinua que soporta las cargas mecánicas principales y confiere al compuesto las propiedades mecánicas deseadas (rigidez, resistencia). La interfaz entre la matriz y el

refuerzo juega un papel crítico en el comportamiento mecánico del compuesto, ya que de ella depende la eficiencia de la transferencia de cargas [44][45].

2.5.1.2. Propiedades generales

Los materiales compuestos de alto rendimiento, y en particular los compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras (FRP, Fiber Reinforced Polymers), ofrecen una combinación excepcional de propiedades mecánicas específicas (por unidad de peso). La resistencia específica (resistencia/densidad) de un compuesto de fibra de carbono con matriz epoxi puede ser hasta 5 veces superior a la del acero y 2,5 veces superior a la del aluminio. La rigidez específica (módulo/densidad) es igualmente superior. Además, los materiales compuestos ofrecen excelente resistencia a la fatiga, capacidad de diseño a medida (orientando las fibras en las direcciones de carga), resistencia a la corrosión y capacidad de integrar múltiples funciones en una única pieza [44][45][46].

2.5.2. Historia y evolución de los materiales compuestos

2.5.2.1. Primeros materiales compuestos

El uso de materiales compuestos se remonta a la antigüedad: el adobe (mezcla de barro y paja) utilizado en la construcción mesopotámica hace más de 5.000 años puede considerarse el primer material compuesto de la historia. Los arcos compuestos utilizados por civilizaciones nómadas, fabricados con madera, cuerno y tendón animal, representan otro ejemplo histórico de material compuesto diseñado para optimizar propiedades mecánicas. Sin embargo, el concepto moderno de material compuesto de ingeniería no surgió hasta el siglo XX [44].

2.5.2.2. Desarrollo industrial

El desarrollo industrial de los materiales compuestos modernos se inició en la década de 1930 con la comercialización de la fibra de vidrio por parte de Owens Corning y la aparición de las primeras resinas de poliéster y epoxi. Durante la Segunda Guerra Mundial, los compuestos de fibra de vidrio encontraron sus primeras aplicaciones estructurales en componentes aeronáuticos y navales, como cúpulas de radar (radomes) que requerían transparencia a las ondas electromagnéticas. En la posguerra, la fibra de vidrio se extendió

a aplicaciones civiles como embarcaciones, depósitos, tuberías y paneles de construcción [44][45].

2.5.2.3. Introducción de fibras avanzadas

La década de 1960 marcó un punto de inflexión con el desarrollo de las fibras de carbono y las fibras de aramida (Kevlar). La fibra de carbono de alta resistencia fue desarrollada inicialmente por la Royal Aircraft Establishment (RAE) en el Reino Unido y por la empresa Toray Industries en Japón. Estas fibras avanzadas ofrecen propiedades mecánicas específicas muy superiores a las de la fibra de vidrio, lo que abrió la puerta a su aplicación en estructuras primarias de aeronaves y vehículos de competición. La fibra de aramida, cuya invención se atribuye a Stephanie Kwolek (DuPont) en 1965, fue introducida comercialmente por DuPont bajo el nombre de Kevlar a partir de 1971, con su adopción a gran escala en aplicaciones de protección balística a partir de 1973, aportando una excepcional resistencia al impacto y empleándose también en componentes aeroespaciales [44][46].

2.5.2.4. Uso actual en ingeniería

En la actualidad, los materiales compuestos de alto rendimiento se utilizan ampliamente en múltiples sectores industriales. En el sector aeroespacial, los compuestos de fibra de carbono representan más del 50 % del peso estructural de aeronaves modernas como el Boeing 787 y el Airbus A350. En el sector de automoción, la fibra de carbono se emplea en vehículos deportivos y de competición (Fórmula 1, Le Mans) para la fabricación de chasis, carrocerías y componentes estructurales. En la energía eólica, las palas de los aerogeneradores se fabrican con composites de fibra de vidrio y, crecientemente, de fibra de carbono. Otros sectores de aplicación incluyen la náutica, el equipamiento deportivo, la ingeniería civil, la defensa y la industria biomédica [44][45][46].

2.5.3. Clasificación de materiales compuestos

2.5.3.1. Según la matriz

Los materiales compuestos se clasifican según el tipo de matriz en tres grandes categorías. Los compuestos de matriz polimérica (PMC) son los más utilizados e incluyen matrices termoestables (epoxi, poliéster, viniléster, fenólica, bismaleimida) y termoplásticas (PEEK,

PPS, PA, PEI). Las matrices termoestables ofrecen mayor rigidez y resistencia térmica, mientras que las termoplásticas permiten la conformación en caliente y el reciclaje. Los compuestos de matriz metálica (MMC) emplean matrices de aluminio, titanio o magnesio reforzadas con partículas cerámicas o fibras, y se utilizan en aplicaciones de alta temperatura y elevada resistencia al desgaste. Los compuestos de matriz cerámica (CMC) combinan matrices cerámicas con fibras cerámicas para aplicaciones de muy alta temperatura, como componentes de turbinas y escudos térmicos [44][45].

2.5.3.2. Según el refuerzo

Atendiendo al tipo de refuerzo, los materiales compuestos pueden clasificarse en compuestos reforzados con fibra de vidrio (GFRP), que ofrecen una buena relación coste-rendimiento y se emplean ampliamente en aplicaciones estructurales de coste moderado; compuestos reforzados con fibra de carbono (CFRP), que proporcionan las más altas propiedades mecánicas específicas y se utilizan en aplicaciones de alto rendimiento; y compuestos reforzados con fibras de aramida (AFRP), como el Kevlar, que destacan por su excepcional resistencia al impacto y se emplean en protección balística, cuerdas y aplicaciones de absorción de energía [44][45][46].

2.5.3.3. Según la geometría del refuerzo

La geometría del refuerzo determina en gran medida las propiedades mecánicas del compuesto y sus posibilidades de fabricación. Los refuerzos continuos (fibras largas, tejidos, unidireccionales) proporcionan las más altas propiedades mecánicas en las direcciones de orientación de las fibras y se emplean en aplicaciones estructurales críticas. Los refuerzos cortos (fibras cortadas, whiskers) ofrecen propiedades mecánicas inferiores pero un comportamiento más isotrópico y mayor facilidad de procesado; dentro de esta categoría, una variante de especial interés para este trabajo es el denominado carbono forjado (forged), en el que fibras cortas impregnadas de resina se distribuyen aleatoriamente y se consolidan mediante moldeo por compresión, y que se analiza en detalle en la sección siguiente. Los refuerzos tejidos (telas 2D, tejidos 3D, trenzados) proporcionan un equilibrio entre propiedades mecánicas y conformabilidad [44][45][47].

2.6. Fibra de carbono y carbono forjado

2.6.1. Fibra de carbono

2.6.1.1. Propiedades mecánicas

La fibra de carbono es un material filamentario compuesto predominantemente por átomos de carbono dispuestos en una estructura cristalina hexagonal (grafito) alineada en la dirección longitudinal de la fibra. Esta microestructura confiere a la fibra propiedades mecánicas excepcionales: resistencias a la tracción de 3.500-7.000 MPa para fibras de alta resistencia (HR) y de 2.100-2.400 MPa para fibras de alto módulo (HM); módulos elásticos de 230-240 GPa (estándar), 290-390 GPa (módulo intermedio) y 440-590 GPa (alto módulo); densidades de 1,75-1,95 g/cm³; y coeficientes de expansión térmica longitudinales negativos o prácticamente nulos [46][48].

Estas propiedades convierten a la fibra de carbono en el refuerzo de mayor rendimiento mecánico específico disponible comercialmente. La combinación de alta resistencia, elevado módulo y baja densidad resulta en propiedades específicas (por unidad de masa) significativamente superiores a las de cualquier aleación metálica. Además, la fibra de carbono presenta una excelente resistencia a la fatiga, buena conductividad eléctrica y térmica (dependiendo del tipo), inercia química en la mayoría de entornos y estabilidad dimensional hasta temperaturas superiores a 2.000 °C en atmósfera inerte [46][48].

2.6.1.2. Ventajas e inconvenientes

Las principales ventajas de la fibra de carbono incluyen su excepcional relación resistencia-peso (hasta 10 veces superior al acero), su elevada rigidez específica, su excelente resistencia a la fatiga, su estabilidad dimensional (bajo coeficiente de expansión térmica), su resistencia a la corrosión y su amortiguación de vibraciones. Entre los inconvenientes destacan su elevado coste (típicamente 15-30 €/kg para fibra estándar y hasta 200 €/kg para fibras especiales), su comportamiento frágil (elongación a rotura del 1-2 %), la complejidad de los procesos de fabricación, la dificultad de reciclaje de los compuestos termoestables de fibra de carbono, y la susceptibilidad al daño por impacto transversal de los laminados [46][48].

2.6.1.3. Aplicaciones industriales

Las aplicaciones industriales de la fibra de carbono abarcan un amplio espectro de sectores. En la industria aeroespacial, se utiliza en fuselajes, alas, superficies de control, estructuras

internas y componentes del motor de aeronaves comerciales y militares. En la automoción, se emplea en chasis monocasco de vehículos de competición, paneles de carrocería de superdeportivos, árboles de transmisión y componentes de suspensión. En el sector de la energía eólica, se incorpora en palas de aerogeneradores de gran longitud. En el equipamiento deportivo, se utiliza en cuadros de bicicleta, palos de golf, raquetas de tenis, cañas de pescar y esquíes. Otras aplicaciones incluyen la ingeniería civil (refuerzo de estructuras de hormigón), la industria médica (prótesis, instrumental quirúrgico) y la industria naval (cascos de embarcaciones de competición) [46][48].

2.6.2. Carbono forjado (forged carbon fiber)

2.6.2.1. Definición y composición

El carbono forjado (forged carbon fiber o forged composite) es un material compuesto de fibra de carbono discontinua obtenido habitualmente mediante moldeo por compresión, en el que fibras cortas impregnadas de resina se distribuyen de forma aleatoria en una preforma o carga (charge) que se consolida bajo presión y temperatura. Aunque el término «carbono forjado» está ampliamente extendido en la industria y en la divulgación técnica, desde un punto de vista más riguroso se trata de un compuesto de fibra de carbono corta o discontinua con matriz polimérica. El proceso es análogo al empleado en los compuestos tipo CF-SMC (Carbon Fiber Sheet Molding Compound), aunque el carbono forjado suele emplear preformas tipo tocho o pastilla en lugar de láminas continuas. A diferencia de los laminados tradicionales de fibra de carbono, en los que las fibras se disponen en capas orientadas, en el carbono forjado las fibras cortadas (habitualmente por debajo de 25 mm) se distribuyen aleatoriamente, generando un patrón estético marmolado o jaspeado característico [47][49][50].

Este material se desarrolló originalmente en el entorno del Advanced Composite Structures Laboratory (ACSL) de la Universidad de Washington, en colaboración con Automobili Lamborghini y Callaway Golf Company. El término comercial «Forged Composite®» está asociado a Lamborghini y Callaway, mientras que la denominación genérica «carbono forjado» se ha extendido para describir este tipo de compuesto de fibra de carbono corta o discontinua moldeado por compresión. En adelante, en el presente trabajo se empleará el

término «carbono forjado» con esta acepción técnica, evitando interpretarlo como un proceso de forja metálica convencional [47][50].

Proceso de Fabricación de Carbono Forjado (Forged Carbon Fiber)

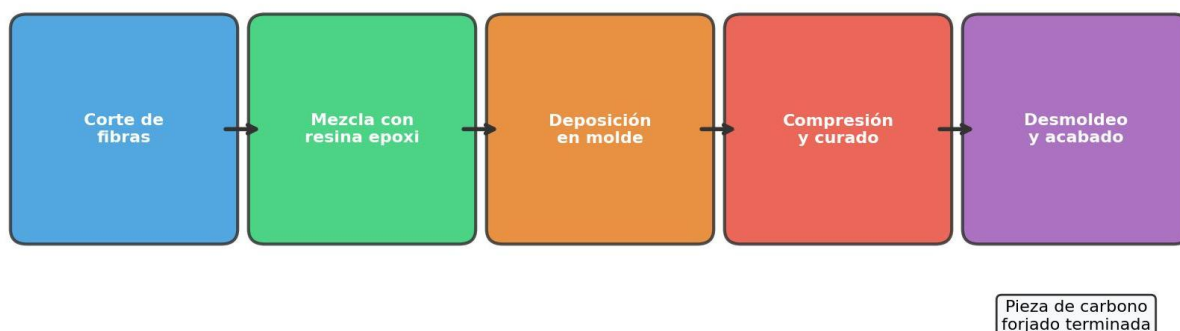


Figura 6. Diagrama del proceso de fabricación de carbono forjado. Elaboración propia.

2.6.2.2. Proceso de fabricación

El proceso de fabricación del carbono forjado comprende las siguientes etapas fundamentales. En primer lugar, se preparan las fibras de carbono cortadas: el hilo (tow) de fibra de carbono se corta en segmentos de longitud controlada, típicamente entre 6 y 25 mm, y se mezcla con la resina matriz (generalmente epoxi). Las fibras impregnadas se distribuyen aleatoriamente, formando una preforma o carga (charge) que se coloca en la cavidad del molde. A continuación, el molde se cierra y se aplica presión junto con temperatura, según el sistema de resina y el equipo disponible. En procesos industriales de moldeo por compresión pueden emplearse presiones elevadas, del orden de decenas o centenares de bar; sin embargo, en moldes impresos en 3D esta presión debe adaptarse a la resistencia mecánica y térmica del material del molde para evitar deformaciones o roturas. Tras el curado completo de la resina, la pieza se desmoldea y se somete a las operaciones de acabado necesarias (desbarbado, lijado, pulido, barnizado) [47][49][50].

2.6.2.3. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del carbono forjado se sitúan en un rango intermedio entre los compuestos de fibra corta convencionales y los laminados de fibra continua. La orientación

aleatoria de las fibras cortas confiere al material un comportamiento mecánico cuasi-isotrópico en el plano, con propiedades relativamente similares en distintas direcciones. No obstante, estas propiedades pueden modificarse mediante la incorporación de refuerzos orientados, como fibras longitudinales, tejidos o capas de fibra continua, dando lugar a configuraciones híbridas. En estos casos, la resistencia y la rigidez aumentan principalmente en la dirección del refuerzo, aunque el comportamiento del material se vuelve más anisótropo [44][47].

2.6.2.4. Ventajas frente a laminados tradicionales

El carbono forjado presenta varias ventajas significativas frente a los laminados tradicionales de fibra de carbono continua. En primer lugar, la capacidad de fabricar geometrías tridimensionales complejas mediante moldeo por compresión, incluyendo espesores variables, nervios de refuerzo, insertos roscados y superficies de doble curvatura, resulta notablemente superior a la ofrecida por los laminados convencionales. En segundo lugar, el proceso de fabricación es más rápido y requiere menor mano de obra cualificada que el laminado manual o la colocación automatizada de fibra. En tercer lugar, la utilización de fibras cortas puede aprovechar fibras recicladas o residuos de corte de fibra de carbono virgen, lo que contribuye a la sostenibilidad del proceso. Finalmente, el patrón estético marmolado único de cada pieza resulta muy atractivo en aplicaciones de lujo y alto rendimiento, como piezas de automoción de superdeportivos y equipamiento deportivo premium [47][49][50].

2.6.2.5. Limitaciones

Las principales limitaciones del carbono forjado incluyen una resistencia mecánica y una rigidez inferiores a las de los laminados de fibra continua orientada, especialmente cuando la pieza está sometida a cargas unidireccionales elevadas. Por ello, su uso en aplicaciones estructurales primarias puede resultar limitado frente a soluciones basadas en fibras continuas, tejidos o refuerzos unidireccionales. Cuando se busca aumentar la resistencia en una dirección concreta, puede recurrirse a configuraciones híbridas con fibras longitudinales o capas continuas, aunque se pierde parte del carácter cuasi-isotrópico propio de la fibra corta aleatoria [44][47].

Otra limitación relevante es la necesidad de emplear moldes de compresión capaces de soportar las presiones, temperaturas y tiempos de curado requeridos por la resina. En moldes impresos en 3D, estas condiciones deben adaptarse a la resistencia térmica, rigidez, acabado superficial y compatibilidad química del material del molde para evitar deformaciones, roturas, adhesión excesiva o problemas de desmoldeo [9][47].

2.6.3. Procesos de fabricación de piezas compuestas

2.6.3.1. Laminado manual

El laminado manual es el método más básico y ampliamente utilizado para la fabricación de piezas compuestas. Consiste en la aplicación sucesiva de capas de refuerzo (tejido o mat de fibra) sobre la superficie del molde, impregnando cada capa con resina líquida (típicamente poliéster o epoxi) mediante rodillo o brocha. El proceso se realiza a temperatura ambiente y presión atmosférica, aunque puede complementarse con la aplicación de vacío para mejorar la compactación y reducir el contenido de vacíos. Las principales ventajas del laminado manual son su bajo coste de utillaje, su versatilidad y su accesibilidad. Sus inconvenientes incluyen la elevada variabilidad del proceso (dependiente de la habilidad del operario), la dificultad de controlar la fracción volumétrica de fibra y la generación de emisiones de estireno (en el caso de resinas de poliéster) [44][45].

2.6.3.2. Infusión

La infusión de resina (VARTM/VARI, Vacuum Assisted Resin Transfer Molding / Vacuum Assisted Resin Infusion) es un proceso en el que las capas de refuerzo seco se colocan en el molde, se cubren con una bolsa de vacío y se impregnan con resina líquida mediante la aplicación de vacío. La diferencia de presión entre la atmósfera y el interior de la bolsa impulsa la resina a través de las capas de refuerzo. Este proceso permite obtener mayores fracciones volumétricas de fibra y menor porosidad que el laminado manual, con una mejor reproducibilidad y menores emisiones de compuestos orgánicos volátiles [44][45].

2.6.3.3. Compresión

El moldeo por compresión es el proceso de fabricación empleado para el carbono forjado. El material de carga (fibras cortadas impregnadas de resina) se coloca en la cavidad del molde inferior, se cierra el molde superior y se aplica presión y temperatura mediante una

prensa hidráulica. La presión obliga al material a fluir y rellenar la cavidad completa del molde. Este proceso es especialmente adecuado para piezas de geometría compleja y espesores variables, y permite altas cadencias de producción una vez que el molde está fabricado [44][47].

2.6.3.4. Curado

El curado es la etapa del proceso de fabricación en la que la resina termoestable experimenta una reacción de entrecruzamiento que la transforma de un estado líquido o viscoso a un sólido rígido. Las condiciones de curado, principalmente temperatura y tiempo, dependen del sistema de resina empleado y de las recomendaciones del fabricante. En el caso de muchas resinas epoxi de curado a temperatura ambiente, el curado inicial suele alcanzarse en un intervalo aproximado de 24 a 48 horas, aunque el desarrollo completo de las propiedades mecánicas puede requerir tiempos superiores o un postcurado a temperatura elevada. Este postcurado, habitualmente realizado en rangos del orden de 60-120 °C según la formulación, permite mejorar la estabilidad térmica y las propiedades finales del material compuesto. En aplicaciones industriales con materiales preimpregnados (prepregs), el curado puede realizarse en autoclave, con temperaturas típicas de 120-180 °C y presiones de varios bares, con el fin de mejorar la compactación y reducir la porosidad. El grado de curado alcanzado influye directamente en la resistencia mecánica, la estabilidad dimensional y el comportamiento térmico del compuesto [44][45].

2.6.3.5. Uso de moldes impresos en 3D

La utilización de moldes impresos en 3D en los procesos de fabricación de piezas compuestas descritos requiere la consideración de las limitaciones específicas de cada combinación tecnología de impresión-proceso de moldeo. Para el laminado manual con curado a temperatura ambiente, los moldes FDM en PLA o ABS pueden ser suficientes, siempre que se aplique un tratamiento superficial adecuado (sellante, agente desmoldeante). Para la infusión, la estanqueidad del molde es crítica, lo que puede requerir la aplicación de sellantes superficiales o recubrimientos de resina epoxi para eliminar la porosidad inherente de las piezas impresas. Para el moldeo por compresión del carbono forjado, se requieren moldes con resistencia térmica y mecánica significativamente superiores, lo que orienta la selección hacia materiales como el nailon reforzado con fibra de carbono (FDM), las resinas

de alta temperatura (SLA) o la PA12 (SLS/MJF). Cabe señalar que las presiones de compresión empleadas con moldes poliméricos impresos en 3D serán necesariamente inferiores a las utilizadas en procesos industriales con moldes metálicos (50-200 bar), por lo que las condiciones de procesamiento deben adaptarse a las capacidades mecánicas del material del molde [2][9][10].

2.7. Integración de impresión 3D y materiales compuestos

2.7.1. Uso de moldes impresos para materiales compuestos

La utilización de moldes fabricados mediante tecnologías de impresión 3D para la producción de piezas de material compuesto representa un campo de investigación en rápido crecimiento que combina las ventajas de la fabricación aditiva con las prestaciones de los materiales compuestos avanzados. La revisión de la literatura muestra que esta integración se ha aplicado con éxito a diversos procesos de fabricación de composites, incluyendo el laminado manual, la infusión de resina, el moldeo por compresión y el curado en autoclave a temperaturas moderadas [2][6][9].

El flujo de trabajo típico para la fabricación de piezas compuestas con moldes impresos en 3D comprende las siguientes etapas: diseño CAD del molde considerando los ángulos de desmoldeo, las contracciones térmicas y los espesores del laminado; impresión 3D del molde con la tecnología y el material seleccionados; postprocesado del molde (lijado, sellado, aplicación de recubrimientos); aplicación de agente desmoldeante; laminado, infusión o compresión del material compuesto; curado; y desmoldeo de la pieza final [37].

2.7.2. Compatibilidad térmica y mecánica

La compatibilidad térmica entre el molde impreso y el proceso de curado del material compuesto constituye uno de los factores críticos para el éxito de esta integración. La temperatura del ciclo de curado debe ser inferior a la temperatura de deflexión por calor (HDT) del material del molde para evitar deformaciones permanentes. Además, la diferencia entre los coeficientes de expansión térmica (CTE) del molde y de la pieza compuesta puede generar tensiones residuales y deformaciones dimensionales significativas. Chen et al. (2020) midieron los CTE de probetas impresas en FDM con nailon reforzado con fibra de carbono, encontrando valores significativamente diferentes en las direcciones X, Y y Z

debido a la orientación preferencial de las fibras durante la extrusión, y demostraron que la optimización del modo de impresión permite minimizar estas anisotropías térmicas [10].

Desde el punto de vista mecánico, el molde debe ser capaz de soportar sin deformación excesiva las presiones aplicadas durante el proceso de moldeo. Para el laminado manual con bolsa de vacío, las presiones son relativamente moderadas (aproximadamente 1 bar de presión diferencial). En cambio, el moldeo por compresión de carbono forjado puede exigir presiones superiores; por ello, cuando se emplean moldes impresos en 3D, la presión aplicada debe definirse en función del material, el espesor del molde, el porcentaje de relleno, la orientación de impresión y la presencia de refuerzos o apoyos externos. Este punto constituye uno de los aspectos críticos que deben validarse experimentalmente en el presente trabajo [2][9][12].

2.7.3. Problemas habituales

La literatura científica documenta diversos problemas habituales en la utilización de moldes impresos en 3D para la fabricación de piezas compuestas. La adhesión entre la pieza compuesta y el molde impreso puede ser excesiva si no se aplica un agente desmoldeante adecuado, lo que dificulta o imposibilita el desmoldeo y puede dañar tanto la pieza como el molde. Este problema se ve agravado por la porosidad superficial de los moldes impresos, que facilita la infiltración mecánica de la resina en la superficie del molde, creando un anclaje que dificulta la separación [2][10].

Las deformaciones térmicas del molde durante el curado pueden generar desviaciones dimensionales en la pieza final. Andreozzi et al. (2024) observaron que la mayor distorsión se producía en la superficie superior del molde, con menor deformación en el plano de laminado del composite, independientemente de la temperatura del ciclo térmico aplicado [9]. La contracción diferencial entre el molde y la pieza compuesta durante el enfriamiento posterior al curado puede generar tensiones residuales que dificulten el desmoldeo o provoquen deformaciones en la pieza [10].

El acabado superficial del molde se transfiere directamente a la pieza compuesta. La rugosidad inherente al proceso de fabricación capa a capa, y en particular el patrón escalonado de la tecnología FDM, puede generar defectos estéticos y concentradores de tensión en la superficie de la pieza moldeada si no se aplican tratamientos de postprocesado

adecuados. Este efecto es especialmente relevante en piezas de carbono forjado, donde la calidad superficial es un factor de valor percibido por el usuario final [2][33].

2.7.4. Estrategias de mejora

La investigación ha identificado diversas estrategias para superar las limitaciones de los moldes impresos en 3D destinados a la fabricación de piezas compuestas, que pueden agruparse en cuatro categorías principales: recubrimientos superficiales, postprocesado mecánico, refuerzos estructurales y tratamientos superficiales.

Los recubrimientos superficiales constituyen la estrategia más ampliamente documentada. La aplicación de resina epoxi, gelcoat, masilla de relleno o lacas de poliuretano sobre la superficie del molde impreso permite sellar la porosidad, reducir la rugosidad y crear una barrera entre el molde y la pieza compuesta. Chen et al. (2020) documentaron el uso de recubrimientos de resina epoxi sobre moldes FDM de ABS para mejorar la calidad superficial, aunque señalaron que estos postprocesos reducen las ventajas de rapidez de la impresión 3D [10]. Los recubrimientos cerámicos y de PVA (alcohol polivinílico) también se han explorado como agentes desmoldeantes y sellantes [2].

El postprocesado mecánico incluye operaciones de lijado (manual o con máquina), pulido y, en algunos casos, mecanizado CNC de las superficies críticas del molde impreso. Estas operaciones permiten alcanzar valores de rugosidad R_a inferiores a $1\ \mu\text{m}$ en las zonas tratadas, comparable al acabado de moldes convencionales. Sin embargo, el postprocesado mecánico incrementa el tiempo y coste total de fabricación del molde y requiere acceso a las superficies a tratar [2][33].

Los refuerzos estructurales buscan mejorar la rigidez y la resistencia del molde impreso mediante la incorporación de elementos de refuerzo. Estos pueden incluir insertos metálicos (atornillados o embebidos durante la impresión), nervios de refuerzo integrados en el diseño del molde, marcos o bastidores externos que proporcionan soporte adicional, y la optimización del patrón de relleno interno (densidad, geometría) para maximizar la rigidez en las direcciones de carga críticas [9].

Los tratamientos superficiales incluyen la aplicación de agentes desmoldeantes (ceras, PVA, silicona, Teflon), que resultan esenciales para garantizar la separación entre el molde y la pieza compuesta. La selección del agente desmoldeante adecuado depende de la

combinación de materiales del molde y de la pieza, así como de las condiciones de procesado (temperatura, presión). En algunos casos, la aplicación de múltiples capas de agente desmoldeante se ha mostrado necesaria para compensar la absorción parcial del agente por la superficie porosa del molde impreso [2][10].

2.7.5. Casos de estudio y aplicaciones industriales

La literatura recoge diversos casos de estudio que ilustran la aplicación práctica de moldes impresos en 3D para la fabricación de piezas compuestas. Andreozzi et al. (2024) realizaron una evaluación integral de moldes impresos en Carbon PA (PA6 con 20 % de fibra de carbono corta) para la producción de componentes CFRP para el sector de automoción. Su estudio incluyó la caracterización mecánica del material del molde, el análisis de deformaciones térmicas mediante mediciones experimentales y simulación FEM, y la evaluación del impacto ambiental mediante análisis de ciclo de vida (LCA). Los resultados demostraron que los moldes impresos en 3D constituyen una alternativa viable a los moldes de aluminio para producciones de bajo volumen, con una reducción del impacto ambiental del 18 % [9].

Chen et al. (2020) investigaron la fabricación de moldes mediante FDM con filamento de nailon reforzado con fibra de carbono para la producción de antenas parabólicas de composite CF/epoxi. Mediante la optimización del modo de impresión, lograron una desviación superficial de solo 0,14 mm, por debajo del requisito de 0,2 mm. Su estudio demostró la importancia de la orientación de impresión en la calidad dimensional del molde y la influencia de la anisotropía del CTE en las deformaciones durante el curado [10].

Formlabs documentó la colaboración con DeltaWing Manufacturing y la Universidad Técnica de Berlín para la fabricación de piezas de fibra de carbono utilizando moldes impresos por SLA. Los moldes se emplearon tanto como patrones para la fabricación de moldes de composite por laminado como directamente para el moldeo de piezas en series cortas mediante laminado manual y prepreg. Este caso de estudio ilustra tanto la aproximación directa como la indirecta al rapid tooling para composites [37].

En el ámbito de la fabricación de gran formato, investigadores del Oak Ridge National Laboratory (ORNL) han explorado la fabricación de moldes y utillajes de grandes dimensiones mediante Big Area Additive Manufacturing (BAAM), empleando pellets de

ABS y polímeros reforzados con fibra de carbono. Duty et al. (2017) demostraron la viabilidad de esta tecnología para la producción de herramientas de laminado de composites para aplicaciones aeronáuticas, con dimensiones superiores a 3 metros [43].

Estos casos de estudio confirman la creciente madurez de la tecnología de moldes impresos en 3D para la fabricación de piezas compuestas, al tiempo que identifican las áreas que requieren mayor investigación y desarrollo, como la mejora de la resistencia térmica de los materiales de impresión, la optimización de los tratamientos superficiales y la extensión de la vida útil de los moldes para producciones de mayor volumen [2][6][9][10].

2.8. Síntesis del estado del arte y justificación del trabajo experimental

2.8.1. Síntesis de la revisión bibliográfica

La revisión de la literatura realizada en los capítulos anteriores permite establecer las siguientes conclusiones. La fabricación aditiva ha alcanzado un grado de madurez suficiente para su aplicación en la producción de moldes y utillajes destinados a la fabricación de piezas de material compuesto, habiéndose demostrado su viabilidad técnica y económica en múltiples estudios y casos de aplicación industrial. Las tres tecnologías de impresión 3D analizadas (FDM, fotopolimerización en cuba y fusión de lecho de polvo) presentan perfiles de prestaciones complementarios: la tecnología FDM ofrece el menor coste y la mayor accesibilidad, aunque con limitaciones en acabado superficial y precisión; la impresión por resina (SLA/LFS) proporciona la mayor precisión dimensional y el mejor acabado superficial; y las tecnologías de lecho de polvo (SLS/MJF) ofrecen la mejor combinación de propiedades mecánicas e isotropía.

Por otro lado, el carbono forjado (forged carbon fiber) se ha identificado como un material compuesto de creciente interés industrial, especialmente en los sectores de automoción de alto rendimiento y productos de lujo, gracias a su capacidad de producir piezas de geometría compleja con un proceso de moldeo por compresión relativamente rápido y con un patrón estético distintivo.

2.8.2. Identificación del vacío de investigación

A pesar del creciente cuerpo de literatura sobre moldes impresos en 3D para materiales compuestos, se han identificado varios vacíos de investigación que justifican el presente

trabajo. En primer lugar, la mayoría de los estudios existentes se han centrado en procesos de laminado manual o infusión de resina con moldes abiertos, siendo escasa la investigación sobre la utilización de moldes impresos en 3D para el moldeo por compresión de fibra de carbono forjada. En segundo lugar, la comparación directa entre tecnologías de impresión (FDM, SLA/LFS y MJF) empleando una misma geometría de molde y un mismo material compuesto no ha sido abordada de forma sistemática en la literatura. En tercer lugar, las condiciones específicas de presión y temperatura requeridas para el moldeo por compresión del carbono forjado plantean exigencias particulares sobre los materiales del molde que no han sido suficientemente exploradas con moldes poliméricos impresos en 3D.

2.8.3. Justificación y objetivos del trabajo experimental

El presente Trabajo Fin de Grado pretende contribuir a cubrir los vacíos identificados mediante la fabricación y evaluación de moldes impresos con tres tecnologías de fabricación aditiva distintas: FDM con impresoras Bambu Lab X1 Carbon y P1S, SLA (tecnología LFS) con Formlabs Form 3L, y MJF con HP Jet Fusion 580C. Estos moldes se emplearán para la producción de piezas de fibra de carbono forjada mediante moldeo por compresión, analizando comparativamente la calidad superficial, la precisión dimensional, el comportamiento térmico y mecánico de los moldes, y la integridad de las piezas compuestas obtenidas. Los resultados de este trabajo proporcionarán criterios objetivos para la selección de la tecnología de impresión 3D más adecuada en función de los requisitos específicos de cada aplicación de moldeo por compresión de carbono forjado.

2.8.4. Implicaciones para el trabajo experimental

A partir de la revisión realizada, el trabajo experimental debe centrarse en comprobar si cada tecnología de impresión es capaz de producir un molde funcional para carbono forjado, no solo una geometría correcta. Por ello, la evaluación debería relacionar cada requisito del molde con un posible riesgo técnico y con una medida de control o mejora aplicable durante los ensayos.

Requisito del molde	Riesgo en impresión 3D	Medida experimental recomendada
Acabado superficial	El efecto escalera (staircase) de la impresión capa a capa genera rugosidad que se transfiere a la pieza	Lijado progresivo del molde, aplicación de nivelador de capas y/o recubrimiento epoxi
Estanqueidad	La porosidad del molde permite que la resina epoxi se infiltre, dificultando el desmoldeo	Sellado superficial previo y aplicación de múltiples capas de desmoldeante
Resistencia térmica	El calor generado durante el curado puede reblandecer o deformar el molde polimérico	Seleccionar materiales con HDT superior a la temperatura de curado (ambiente en este caso)
Resistencia mecánica	La presión de compresión puede provocar rotura o deformación del molde impreso	Usar gatos de apriete (presión controlada) y tableros de distribución como refuerzo externo
Desmoldeo	La resina epoxi puede adherirse químicamente al molde, impidiendo la separación	Aplicar agente desmoldeante (spray Weicon o cera) y diseñar ángulos de salida en el molde

Tabla 2. Relación entre requisitos del molde impreso en 3D, riesgos técnicos y medidas de control para el trabajo experimental.

2.8.5. Enfoque técnico adoptado en el presente trabajo

Con el fin de evitar que el estado del arte quede limitado a una revisión general de tecnologías, el trabajo experimental se orienta a los factores que realmente condicionan la fabricación de carbono forjado: presión mantenida durante el curado, calidad superficial del molde, compatibilidad con la resina epoxi, eficacia del desmoldeante y posibilidad de reutilización. Estos criterios se emplean posteriormente para estructurar los ensayos y la matriz comparativa de resultados.

Capítulo 3. Diseño y Materiales

3.1. Diseño CAD del Molde

La geometría seleccionada para el desarrollo de los moldes corresponde a unas levas de cambio (paddle shifters) para volante de automóvil, una pieza que combina superficies curvas, espesores variables y un tamaño compatible con los volúmenes de construcción de las tres tecnologías de impresión evaluadas.

El diseño del molde no se realizó partiendo de una geometría teórica desde cero, sino a partir del escaneado 3D de una pieza física de referencia, empleando posteriormente técnicas de ingeniería inversa para reconstruir su geometría en entorno CAD. A partir de dicho modelo digital se generó la geometría objetivo de la pieza y, sobre ella, se diseñó un molde dividido en dos mitades (macho y hembra), adaptado al proceso de moldeo por compresión.

El molde incorpora una cavidad para alojar la mezcla de fibra de carbono forjada, así como elementos auxiliares para facilitar el cierre, la compactación y el desmoldeo de la pieza final. Asimismo, se contemplaron agujeros de extracción y criterios geométricos orientados a favorecer la fabricación del molde y la posterior liberación de la pieza.

El escaneado de la pieza se realizó mediante un sistema HandyScan, mientras que la reconstrucción geométrica y el diseño final del molde se llevaron a cabo en Solid Edge.

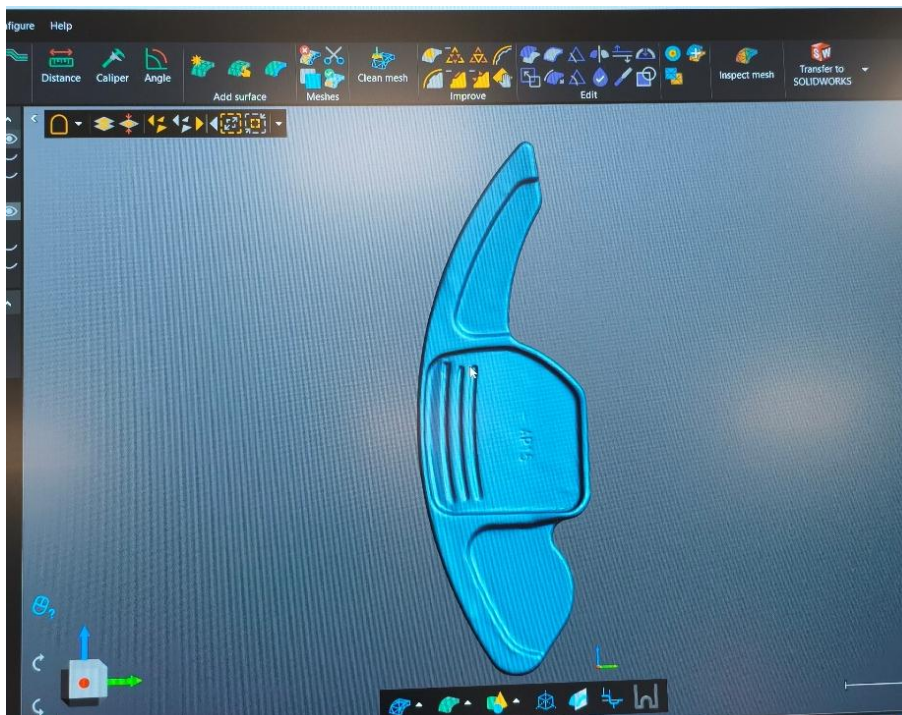


Figura 7. Escaneo en VX Elements de la pieza escogida.

Aunque todos los moldes parten de la misma geometría objetivo de la pieza, el diseño final del utillaje se adaptó a las particularidades de cada tecnología de fabricación aditiva. Inicialmente, el molde se diseñó para su fabricación mediante tecnología FDM, donde resulta habitual emplear estructuras internas con relleno parcial definido en el propio software de laminado. En este caso, el molde puede diseñarse como un sólido exteriormente completo, ya que el porcentaje de relleno, el patrón interno y el espesor de pared se controlan posteriormente durante la preparación de la impresión.

Sin embargo, para las tecnologías de impresión por resina y fusión de lecho de polvo, la fabricación de un molde completamente macizo resultaría menos eficiente desde el punto de vista económico y productivo, debido al mayor coste del material, al incremento del tiempo de fabricación y, en el caso de la resina, a la mayor dificultad de lavado y curado de grandes volúmenes sólidos. Por este motivo, el modelo CAD inicial se modificó posteriormente mediante Netfabb 2027, realizando un vaciado interno del molde y generando una geometría aligerada, manteniendo el espesor de pared necesario para conservar la rigidez suficiente durante el moldeo por compresión.

De este modo, se emplearon diseños de molde adaptados a cada tecnología: un diseño orientado a impresión FDM, optimizado mediante los parámetros de relleno del laminador, y versiones aligeradas para los moldes de resina y polvo, con el objetivo de reducir consumo de material, tiempo de fabricación y coste, sin comprometer la funcionalidad principal del utillaje.

3.2. Materiales de Impresión

3.2.1. Material FDM

Para los moldes FDM se utilizó un material termoplástico de impresión 3D fabricado en impresoras Bambu Lab con una altura de capa de 0,2 mm. Se evaluaron dos orientaciones de impresión: horizontal, con la superficie de moldeo paralela a la plataforma, y vertical, seleccionada para mejorar la resistencia a la tracción en el momento de desmoldeo.

3.2.2. Resina Fotopolimerizable

El primer ensayo con molde de resina (Ensayo 3) se fabricó con Clear Resin V4 de Formlabs en una Form 3L mediante tecnología LFS, con un grosor de capa de 0,100 mm. Esta resina permite obtener elevada resolución y buen acabado superficial, aunque su compatibilidad con la resina epoxi del composite debe validarse experimentalmente [52][54].

Para el segundo ensayo con molde de resina (Ensayo 5) se utilizó Tough 2000 Resin V1 de Formlabs, una formulación de ingeniería diseñada para ofrecer mayor tenacidad que las resinas estándar. Su uso permite analizar si una resina menos frágil mejora la integridad del molde durante el cierre, el curado y el desmoldeo [55].

3.2.3. Material MJF: PA12

El molde fabricado mediante tecnología Multi Jet Fusion (MJF) se plantea en PA12 (poliamida 12), un material termoplástico en polvo empleado habitualmente en procesos de fusión de lecho de polvo. La elección del PA12 responde a su equilibrio entre resistencia mecánica, estabilidad dimensional, resistencia térmica relativa y buena procesabilidad, lo que lo convierte en una opción adecuada para moldes de prototipado y series cortas. Además, en esta tecnología el polvo no fusionado rodea la pieza y actúa como soporte durante la fabricación, por lo que no es necesario añadir estructuras de soporte específicas. Tras la

impresión, el molde debe someterse a un proceso de enfriamiento, retirada del polvo residual y limpieza superficial antes de aplicar el agente desmoldeante [39][53].

3.3. Material Compuesto: Fibra de Carbono Forjada

La pieza de fibra de carbono forjada se preparó a partir de un kit comercial compuesto por fibra de carbono virgen y resina epoxi bicomponente. Las fibras se mezclaron con la resina de acuerdo con la proporción indicada por el fabricante, buscando una distribución homogénea antes de depositar la mezcla en la cavidad del molde.



Figura 8. Kit de fibra de carbono forjada utilizado en los ensayos.

3.4. Productos de Postprocesado y Auxiliares

Para el tratamiento superficial de los moldes se emplearon los siguientes productos:

Nivelador de capas: solución de alisado superficial para impresiones 3D (3D Print Surface Smoothing Solution), aplicada mediante spray sobre los moldes FDM para reducir el efecto escalera inherente al proceso FDM (Figura 9).



Figura 9. Nivelador de capas aplicado sobre un molde FDM.

Agente desmoldeante: Inicialmente, el agente desmoldeante empleado en los ensayos fue el spray desmoldeante Weicon (Figura 10), aplicado sobre la superficie del molde antes de colocar la mezcla de fibra de carbono y resina. Sin embargo, en las últimas pruebas experimentales se sustituyó este producto por una cera desmoldeante Mirror Glaze Maximum Mold Release Wax 8.0 (Figura 11), con el objetivo de mejorar la separación entre el molde y la pieza final. Esta modificación se introdujo tras observar dificultades de desmoldeo en algunos ensayos previos, especialmente en moldes de resina, donde la adhesión entre la resina epoxi y la superficie del molde resultó más problemática. La cera se aplicó manualmente sobre la superficie del molde para generar una película protectora más uniforme y reducir la adherencia de la pieza durante el curado.



Figura 10. Spray desmoldeante Weicon utilizado para facilitar el desmoldeo.



Figura 11. Cera desmoldeante Mirror Glaze Maximum Mold Release Wax 8.0 utilizada en las últimas pruebas.

Para el tratamiento superficial de las piezas se empleó el siguiente producto:

Clear Coat: para el acabado final de algunas piezas se empleó un barniz transparente en aerosol HB Body Pro Series C496 2K HS Clear, basado en un sistema acrílico 2K. Este producto se aplicó tras el desmoldeo y la limpieza de la pieza, con el objetivo de mejorar el aspecto superficial, aumentar el brillo y homogeneizar visualmente el acabado del carbono

forjado. Además, la capa transparente permitió realizar el patrón característico de la fibra de carbono corta y proporcionar una apariencia final más uniforme.



Figura 12. Clearcoat empleado en el postprocesado de la pieza.

Capítulo 4. Desarrollo Experimental

4.1. Procedimiento General de Fabricación

El procedimiento general seguido en todos los ensayos comprende una secuencia común de fabricación, adaptada posteriormente a las particularidades de cada tecnología de impresión y de cada material de molde. En primer lugar, se realiza la impresión 3D de las dos mitades del molde, macho y hembra, seguida de las operaciones de postprocesado necesarias, como la eliminación de soportes, el lijado manual y la aplicación de tratamientos superficiales para mejorar el acabado y reducir la rugosidad.

Una vez preparado el molde, se procede al pesaje de la fibra de carbono, la resina epoxi y el catalizador según las cantidades establecidas previamente. Se haría uso del desmoldante escogido y se depositarían las capas para evitar el pegado de la resina epoxy a las paredes del molde.

La deposición de la mezcla en la cavidad del molde hembra se lleva a cabo de manera gradual, introduciendo pequeñas cantidades de fibra impregnada y compactándolas manualmente para favorecer el llenado de la geometría. Este proceso por capas permite distribuir mejor el material, reducir la aparición de huecos y mejorar la adaptación de la mezcla a las zonas curvas o de menor espesor. Posteriormente, se coloca la parte macho del molde, se cierra el conjunto y se aplica presión mediante el sistema correspondiente en cada ensayo, apretándolo gradualmente cada 5 – 10 minutos, hasta cerrar el molde completamente. Finalmente, la pieza se deja curar a temperatura ambiente durante un tiempo mínimo de 24 horas antes de proceder al desmoldeo y a la evaluación del resultado obtenido.

4.1.1. Cálculo cantidades a utilizar

Las cantidades de material compuesto empleadas en los ensayos se calcularon a partir del volumen de la pieza obtenido en Solid Edge. A partir de dicho volumen, se estimó la masa total teórica de la pieza considerando una densidad media representativa de la mezcla formada por fibra de carbono y resina epoxi.

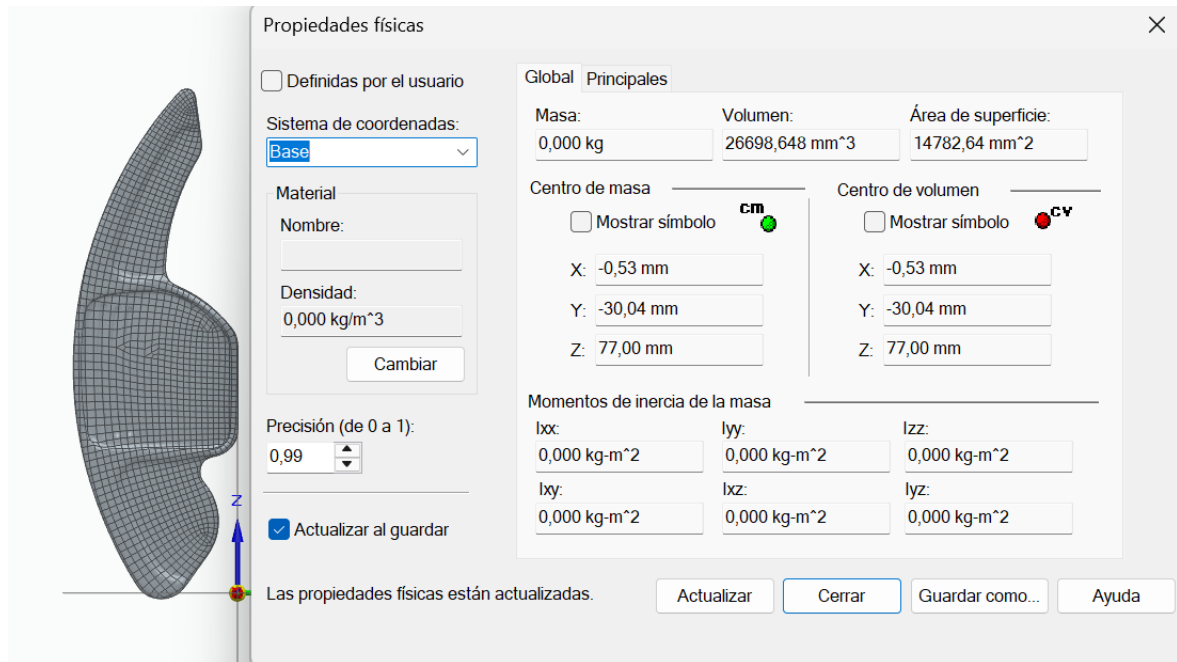


Figura 13. Volumen de la pieza.

Sobre esta masa total se estableció una proporción inicial entre fibra y sistema epoxi, tomando como referencia una formulación habitual para compuestos de fibra corta. No obstante, debido a que el proceso empleado es un moldeo por compresión, parte de la resina puede desplazarse y escapar por la línea de cierre del molde durante la compactación. Por este motivo, se decidió introducir un exceso controlado de sistema epoxi, con el objetivo de asegurar una correcta impregnación de la fibra y evitar zonas secas en la pieza final.

Finalmente, la cantidad total de sistema epoxi se dividió en resina base y catalizador siguiendo la relación de mezcla indicada por el fabricante. De este modo, se mantuvo constante el criterio de dosificación en todos los ensayos, garantizando que las diferencias observadas en los resultados estuvieran asociadas principalmente al tipo de molde, su orientación, el sistema de presión y el tratamiento superficial aplicado. A continuación, se detalla el cálculo:

$$\text{Peso total} = 26,698 \text{ cm}^3 \cdot 1,42 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \approx 38 \text{ g}$$

Asumiendo un 60% de fibra de carbono, obtenemos:

$$\text{Peso fibra de carbono} = 38 \text{ g} \cdot 0,6 = 22,8 \text{ g}$$

Para calcular el total de resina, teniendo en cuenta que debe haber exceso, se ha partido del peso inicial de la pieza y multiplicado dicho peso por un factor del 75%, y posteriormente dividido en su peso de catalizador y resina, tal y como establece el fabricante (por cada parte de resina media de catalizador):

$$\text{Peso total resina} + \text{catalizador} = 38 \text{ g} \cdot 0.75 = 28.5 \text{ g}$$

$$\text{Peso catalizador} = 28.5 \text{ g} \cdot \frac{1}{3} = 9.5 \text{ g}$$

$$\text{Peso resina} = 28.5 \text{ g} \cdot \frac{2}{3} = 19 \text{ g}$$

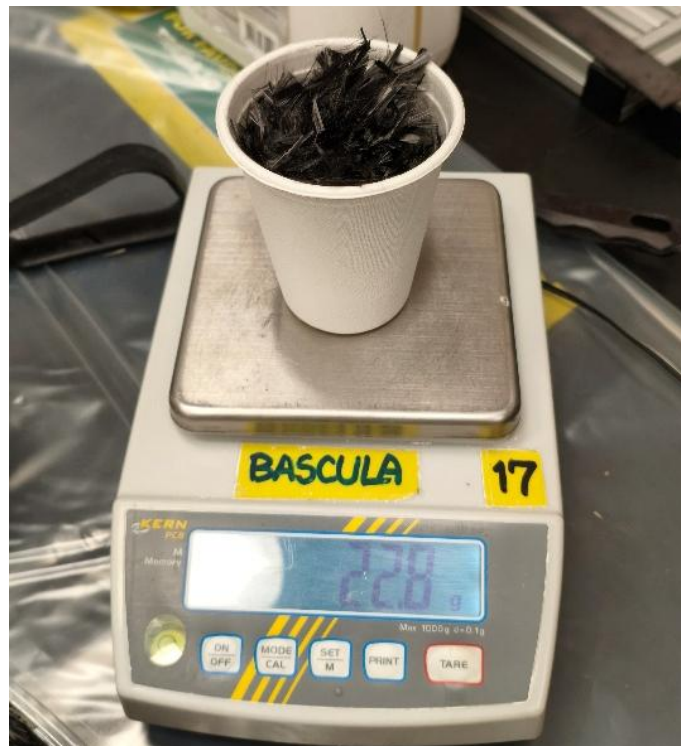


Figura 14. Pesaje de la fibra de carbono corta en báscula de precisión.

4.2. Ensayo 1: Molde FDM – Impresión Horizontal

4.2.1. Impresión del Molde

El primer ensayo se realizó con un molde FDM con altura de capa de 0,2 mm e impresión en horizontal (la superficie de moldeo del macho paralela a la plataforma). El material fue

PLA en color gris. Para este primer ensayo se fabricaron las dos mitades del molde para ambas levas (izquierda y derecha).



Figura 15. Moldes FDM impresos en horizontal: parte macho (arriba) y hembra (abajo).

4.2.2. Tratamiento Superficial

Puesto que se observó un marcado efecto escalera, consecuencia de la deposición capa a capa, se realizó lijado manual progresivo con lijas de diferentes granulometrías, seguido de la aplicación del nivelador de capas mediante spray y, tras el secado, varias capas de agente desmoldeante Weicon.

4.2.3. Moldeo por Compresión: Prensa Hidráulica

Se empleó una prensa hidráulica como sistema de presión. La mezcla de fibra de carbono forjada se depositó en la cavidad del molde hembra, se colocó el macho y se introdujo el

conjunto en la prensa, interponiendo tacos de madera para distribuir uniformemente la presión y evitar dañar el molde (Figura 16).



Figura 16. Molde en la prensa hidráulica con tacos de madera para distribución de presión.

Durante el curado (mínimo 24 horas a temperatura ambiente), se detectó un problema significativo, la prensa hidráulica perdió presión de forma progresiva, reduciendo la fuerza de compactación. Como consecuencia, la resina epoxi no fue expulsada adecuadamente, quedando un exceso de resina curada en el interior de la pieza, lo que comprometió el acabado superficial, e impidió el correcto desmoldeo de la pieza.

4.2.4. Resultados y Análisis

El desmoldeo resultó especialmente complejo, siendo necesario recurrir al uso de cincel y martillo para separar la pieza del molde. Esta operación provocó la rotura irreversible del molde, imposibilitando su reutilización en ensayos posteriores. La pieza obtenida presentó una compactación insuficiente de las fibras, acumulaciones de resina curada y un acabado

superficial irregular. Además, se observaron zonas con restos de material del molde adheridos a la superficie de la pieza, cuya eliminación requirió un esfuerzo mecánico elevado, como se aprecia en la Figura 17.



Figura 17. Pieza del Ensayo 1, con exceso de resina curada.

Posteriormente se retirará la capa gris observable en la Figura X, siendo esta el exceso del molde adherido a la pieza.

4.2.5. Resumen técnico del ensayo

Parámetro	Valor / observación
Tecnología del molde	FDM
Orientación	Horizontal
Postprocesado del molde	Lijado y nivelador de capas
Sistema de presión	Prensa hidráulica
Tiempo de curado	24 horas
Resultado principal	Exceso de resina y desmoldeo difícil
Estado del molde tras desmoldeo	Destruído

Tabla 3. Resumen técnico del Ensayo 1.

4.3. Ensayo 2: Molde FDM – Impresión Vertical

4.3.1. Impresión del Molde

A partir de las lecciones aprendidas, se evaluó la influencia de la orientación de impresión. El molde macho se imprimió en vertical, orientando las capas perpendicularmente a la superficie de moldeo, buscando una mejor resistencia a tracción para favorecer el desmoldeo

4.3.2. Tratamiento Superficial

Puesto que se observó un marcado efecto escalera, consecuencia de la deposición capa a capa, se realizó lijado manual progresivo con lijas de diferentes granulometrías, seguido de la aplicación del nivelador de capas mediante spray y, tras el secado, varias capas de agente desmoldeante Weicon en el molde hembra y desmoldeante Mirror Glaze en el macho.

4.3.3. Moldeo por Compresión: Gatos de Apriete

Tras los problemas observados con el sistema de compresión mediante prensa hidráulica, se sustituyó este método por el uso de gatos de apriete o sargentos de barra. Esta solución permitió mantener una presión más estable durante todo el proceso de curado, evitando la pérdida progresiva de carga detectada en el ensayo anterior. Para ello, se colocaron varios gatos distribuidos alrededor del perímetro del molde, con el objetivo de asegurar un cierre uniforme entre las dos mitades y mejorar la compactación del material compuesto en el interior de la cavidad (Figura 18).



Figura 18. Molde FDM vertical sujeto con gatos de apriete durante el curado.

4.3.4. Resultados y Análisis

El desmoldeo resultó significativamente más favorable que en el Ensayo 1. La pieza pudo separarse del molde con mayor facilidad y sin provocar la destrucción del utillaje, lo que evidencia una mejora tanto en el sistema de cierre como en las condiciones de desmoldeo. El acabado superficial obtenido fue más uniforme; no obstante, se observó una ligera falta de resina en la capa frontal de la pieza, visible en la Figura 19.



Figura 19. Pieza del Ensayo 2, con defecto de resina curada.

Debido a la ligera falta de resina observada en la superficie frontal de la pieza del Ensayo 2, se aplicó posteriormente una capa adicional de resina epoxi sobre la zona afectada. Esta operación tuvo como objetivo mejorar el acabado superficial, cubrir las fibras parcialmente expuestas y obtener una apariencia más homogénea. En la Figura 20 se muestra una comparativa entre la pieza obtenida en el Ensayo 1 y la pieza del Ensayo 2 tras la aplicación de esta capa superficial de resina.



Figura 20. Comparativa entre Ensayo 1 y Ensayo 2 con la capa de resina.

4.3.5. Resumen técnico del ensayo

Parámetro	Valor / observación
Tecnología del molde	FDM
Orientación	Vertical
Postprocesado del molde	Lijado y nivelador de capas
Sistema de presión	Gatos de apriete
Tiempo de curado	24 horas
Resultado principal	Mejor desmoldado que el Ensayo 1
Estado del molde tras desmoldeo	Reutilizable

Tabla 4. Resumen técnico del Ensayo 2.

4.4. Ensayo 3: Molde de Resina (SLA/LFS)

4.4.1. Impresión del Molde

El tercer ensayo se llevó a cabo con un molde fabricado mediante tecnología SLA/LFS en la impresora Formlabs Form 3L, empleando Clear Resin V4 como material de impresión. La preparación del archivo se realizó en PreForm, donde se generaron las estructuras de soporte necesarias para garantizar la correcta fabricación de ambas mitades del molde. El objetivo de este ensayo fue evaluar el comportamiento de un molde de resina fotopolimerizable, aprovechando la mayor resolución y el mejor acabado superficial de esta tecnología frente a

FDM, con el fin de mejorar la calidad superficial de la pieza de fibra de carbono forjada obtenida (Figura 21).

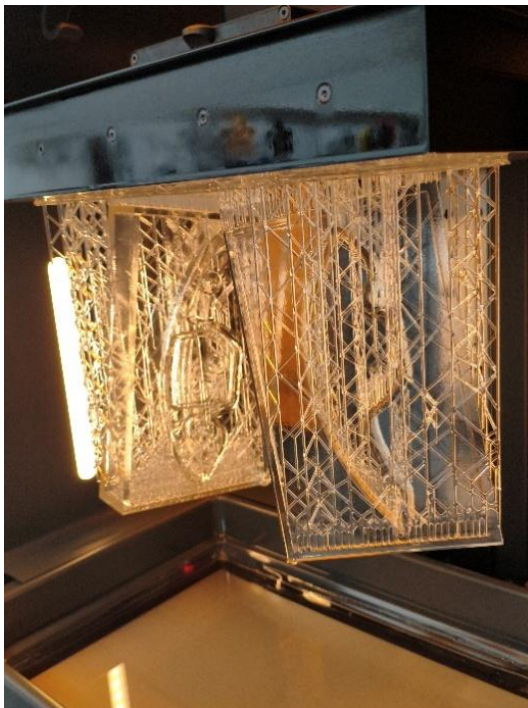


Figura 21. Molde de resina Clear Resin durante la impresión en la Form 3L.

4.4.2. Postprocesado

El postprocesado del molde de resina comprendió varias etapas sucesivas destinadas a completar la polimerización del material y acondicionar las superficies de moldeo. En primer lugar, se retiraron manualmente las estructuras de soporte generadas durante la impresión. A continuación, las piezas se lavaron de forma exhaustiva con alcohol isopropílico (IPA) para eliminar los restos de resina no curada presentes en la superficie.

Tras el lavado, los moldes se sometieron a un doble ciclo de curado en horno UV (2 x 30 min), con el objetivo de completar la polimerización de la resina y mejorar sus propiedades mecánicas y térmicas. Una vez finalizado el curado, se inspeccionaron las superficies de contacto y las zonas funcionales del molde. Posteriormente, se realizó un acabado mediante chorro de arena o abrasivo, eliminando marcas de soporte, restos superficiales y pequeños defectos locales generados durante la impresión y el postprocesado inicial.

Finalmente, las superficies de moldeo se revisaron manualmente antes de aplicar el agente desmoldeante. Tras este proceso, los moldes presentaban una superficie lisa, translúcida y

más homogénea, adecuada para evaluar la influencia de la tecnología SLA/LFS en el acabado superficial de la pieza de fibra de carbono forjada (Figura 22).



Figura 22. Moldes de resina tras el postprocesado: superficie lisa y translúcida.

4.4.3. Moldeo por Compresión

Se utilizó el sistema de gatos de apriete, interponiendo tableros de aglomerado para distribuir la presión. Curado a temperatura ambiente durante 96 horas (Figura 23).

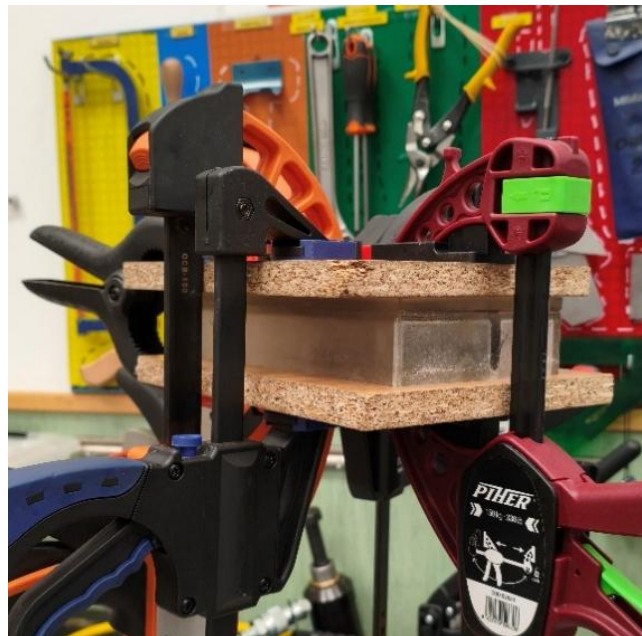


Figura 23. Molde de resina sujeto con gatos y tableros durante el curado.

4.4.4. Resultados y Análisis

Tras el curado, se observó una adhesión muy elevada entre el molde de resina y la pieza de carbono forjado, lo que impidió realizar un desmoldeo convencional. Para separar ambos elementos fue necesario recurrir a un desmoldeo destructivo, utilizando herramientas manuales como escoplo y martillo. Como consecuencia, el molde se fracturó en varios fragmentos y quedó inutilizado para ensayos posteriores, tal como se muestra en la Figura 24.



Figura 24. Molde destruido debido a su adherencia con la pieza.

La elevada adherencia observada puede atribuirse a una combinación de factores. Entre ellos se encuentran la posible afinidad química entre la resina fotopolimerizable del molde y la resina epoxi del material compuesto, una aplicación insuficiente del agente desmoldeante o la ausencia de un recubrimiento barrera entre el molde y la pieza. Aunque el molde presentaba inicialmente una superficie más lisa que los moldes FDM, esta mejora superficial no fue suficiente para garantizar una separación adecuada tras el curado.

Desde el punto de vista experimental, el resultado permite identificar una limitación crítica del uso de moldes SLA/LFS estándar en contacto directo con sistemas epoxi. En este tipo de aplicación, la calidad superficial del molde no es el único factor determinante, sino que también resulta esencial asegurar la compatibilidad química y el empleo de un sistema desmoldeante o barrera eficaz.

A pesar de la destrucción del molde durante el desmoldeo, la pieza obtenida mostró localmente un acabado superficial de mayor calidad que las piezas fabricadas con moldes FDM. Este resultado es coherente con la menor rugosidad inicial de los moldes impresos en resina. Sin embargo, la imposibilidad de desmoldear la pieza sin dañar el utillaje y la pieza limita de forma importante la viabilidad de esta solución si no se incorporan tratamientos superficiales adicionales, recubrimientos barrera o agentes desmoldeantes más eficaces.



Figura 25. Comparativa entre los 3 primeros ensayos realizados.

4.4.5. Resumen técnico del ensayo

Parámetro	Valor / observación
Tecnología del molde	SLA/LFS
Material	Clear Resin V4
Postprocesado	Retirada de soportes, lavado, curado UV lijado y desmoldeante
Sistema de presión	Gatos de apriete
Tiempo curado	96 horas
Resultado principal	Muy buen acabado inicial, pero adhesión molde-pieza
Estado del molde tras desmoldeo	Desmoldeo destructivo

Tabla 5. Resumen técnico del Ensayo 3.

4.5. Ensayo 4: Molde FDM

4.5.1. Impresión del molde

El cuarto ensayo se realizó nuevamente con un molde fabricado mediante tecnología FDM, impreso en orientación horizontal. Esta configuración se planteó como una evolución de los ensayos anteriores con el objetivo de comprobar si, tras la mejora del sistema de presión y del tratamiento desmoldeante, era posible obtener mejores resultados manteniendo una orientación de impresión horizontal.

4.5.2. Postprocesado y tratamiento superficial

Se realizó un lijado manual de las superficies funcionales con el objetivo de reducir parcialmente la rugosidad generada por la deposición capa a capa y mejorar el contacto entre el molde y el material compuesto.

A partir de este ensayo se sustituyó el spray desmoldeante Weicon empleado en las pruebas anteriores por una cera desmoldeante Mirror Glaze Maximum Mold Release Wax 8.0. Esta modificación se introdujo con el objetivo de mejorar la separación entre la pieza y el molde, especialmente tras las dificultades de desmoldeo observadas en los ensayos previos. La cera se aplicó manualmente sobre la cavidad y las superficies de contacto del molde, generando una película protectora más uniforme destinada a reducir la adhesión de la resina epoxi al material del molde.

Una vez aplicada la cera desmoldeante, el molde quedó preparado para la deposición progresiva de la fibra de carbono y la resina epoxi en la cavidad hembra, como se muestra en la Figura 26.



Figura 26. Molde ensayo 4 con cera desmoldante aplicada.

4.5.3. Moldeo por compresión

Una vez preparado el molde y aplicada la cera desmoldeante, se procedió a la fabricación de la pieza mediante moldeo por compresión. La mezcla de fibra de carbono corta y sistema epoxi se depositó progresivamente en la cavidad hembra, incorporando el material poco a poco para favorecer una distribución homogénea y evitar zonas con acumulación de resina o falta de impregnación. Durante esta etapa se compactó manualmente la mezcla en las zonas curvas y de menor espesor, con el objetivo de asegurar el correcto llenado de la geometría. Posteriormente, se colocó la mitad macho del molde y se cerró el conjunto mediante gatos de apriete distribuidos alrededor del perímetro. Este sistema permitió mantener una presión constante durante el curado y favorecer la expulsión del exceso de resina por la línea de cierre del molde. La pieza se dejó curar a temperatura ambiente durante 48 horas antes de proceder al desmoldeo y a la evaluación del resultado obtenido.

4.5.4. Resultados y análisis

La pieza obtenida en el Ensayo 4 reprodujo de forma satisfactoria la geometría general del componente y presentó un acabado superficial mejor que el observado en el primer ensayo realizado con un molde FDM horizontal. Esta mejora puede relacionarse con el uso de gatos de apriete, que permitieron mantener una presión más estable durante el curado, y con la aplicación de cera desmoldeante sobre la superficie del molde.

No obstante, el desmoldeo continuó presentando dificultades y el molde no pudo conservarse para una reutilización posterior. Este resultado indica que, aunque el tratamiento superficial y el sistema de presión mejoraron la calidad de la pieza, la orientación horizontal de las capas siguió favoreciendo la rotura del molde durante la extracción. Por tanto, el ensayo confirma que la orientación vertical resulta más adecuada para esta geometría cuando se busca aumentar la resistencia del utillaje frente a los esfuerzos de desmoldeo.



Figura 27. Pieza desmoldada del Ensayo 4.

4.5.5. Resumen técnico del ensayo

Parámetro	Valor / observación
Tecnología del molde	FDM
Orientación	Horizontal
Postprocesado del molde	Lijado y nivelador de capas
Sistema de presión	Gatos de apriete
Tiempo de curado	48 horas
Resultado principal	Buen acabado superficial
Estado del molde tras desmoldeo	Destruído

Tabla 6. Resumen técnico del Ensayo 4.

4.6. Ensayo 5: Molde de Tough Resin

4.6.1. Impresión del molde

El quinto ensayo se realizó con un molde fabricado mediante tecnología SLA/LFS, empleando Tough 2000 Resin como material de impresión. A diferencia del ensayo realizado con Clear Resin V4, en este caso se seleccionó una resina de ingeniería con mayor tenacidad y resistencia al impacto, con el objetivo de evaluar si estas propiedades permitían mejorar la integridad estructural del molde durante el cierre, el curado y el desmoldeo.

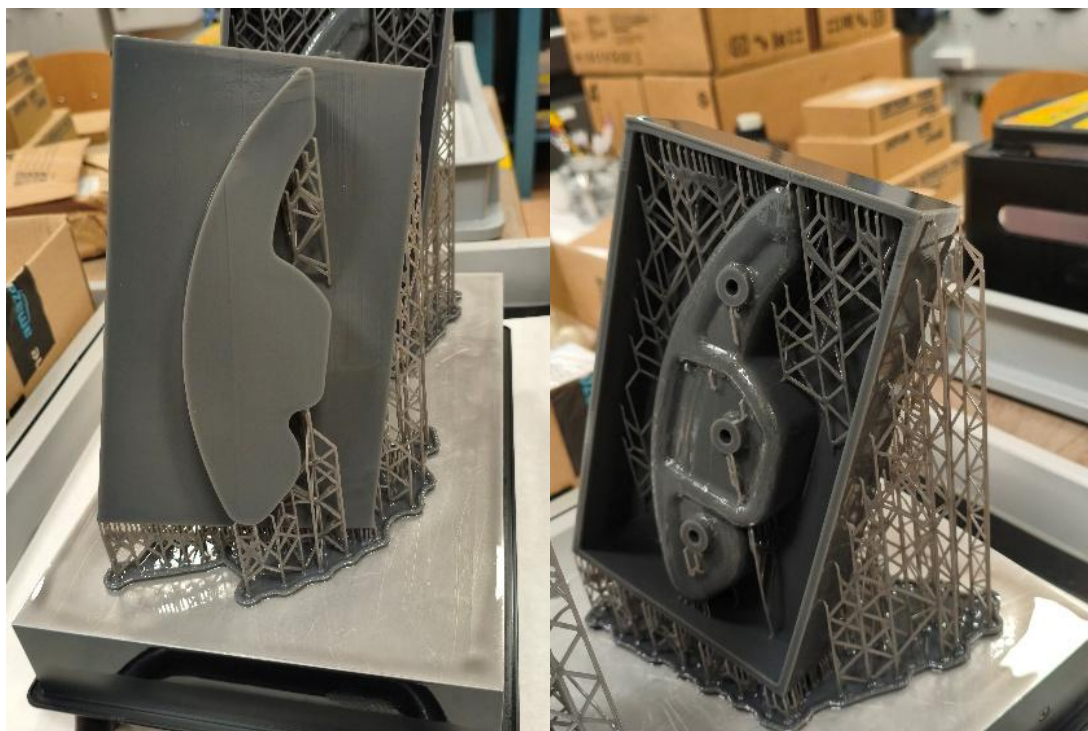


Figura 28. Molde de resina Tough 2000 V1.

4.6.2. Postprocesado y tratamiento superficial

El postprocesado del molde fabricado con Tough 2000 Resin siguió una secuencia similar a la empleada en el molde de Clear Resin. En primer lugar, se retiraron las estructuras de soporte generadas durante la impresión y se realizó un lavado con alcohol isopropílico para eliminar los restos de resina no curada. Posteriormente, el molde se sometió a curado UV propio de esta resina para completar la polimerización del material y mejorar sus propiedades mecánicas.

Una vez finalizado el curado, con el objetivo de reducir el riesgo de adhesión observado en el ensayo con Clear Resin, se aplicó un tratamiento desmoldeante más cuidadoso mediante cera desmoldeante. Esta capa actuó como barrera superficial entre la resina epoxi del

material compuesto y el molde, favoreciendo el posterior desmoldeo y reduciendo la probabilidad de rotura del utillaje.



Figura 29. Moldes Resina Tough en alcohol isopropílico.

4.6.3. Moldeo por compresión

Se utilizó el sistema de gatos de apriete, interponiendo tableros de aglomerado para distribuir la presión. Curado a temperatura ambiente durante 48 horas.

4.6.4. Resultados y análisis

El ensayo con Tough 2000 Resin mostró un mejor resultado respecto al molde fabricado con Clear Resin. La pieza obtenida presentó un acabado superficial muy bueno, con mayor uniformidad y mejor definición de la geometría, aprovechando la alta resolución propia de la tecnología SLA/LFS.

A diferencia del ensayo anterior con resina estándar, el desmoldeo se realizó con gran facilidad y sin provocar la destrucción del molde. La combinación de una resina de mayor tenacidad y la aplicación de cera desmoldeante permitió reducir la adhesión entre el molde y la pieza de carbono forjado, facilitando la extracción tras el curado.

Además, el molde se mantuvo íntegro tras el proceso, por lo que puede considerarse reutilizable para ensayos posteriores. Este aspecto mejora notablemente la eficiencia del proceso, ya que permite aprovechar las ventajas de la impresión por resina sin comprometer

la funcionalidad del utillaje durante el desmoldeo. En conjunto, el uso de Tough 2000 Resin se considera una alternativa más adecuada que Clear Resin para la fabricación de moldes SLA/LFS destinados al moldeo por compresión de carbono forjado.



Figura 30. Resultado ensayo 5.

4.6.5. Resumen técnico del ensayo

Parámetro	Valor / observación
Tecnología del molde	SLA/LFS
Material	Tough 2000 Resin V1
Postprocesado	Retirada de soportes, lavado, curado UV lijado y desmoldeante
Sistema de presión	Gatos de apriete
Tiempo curado	48 horas
Resultado principal	Muy buen acabado
Estado del molde tras desmoldeo	Reutilizable

Tabla 7. Resumen técnico del Ensayo 5.

4.7. Ensayo 6: Molde MJF en PA12

4.7.1. Fabricación del molde

El sexto ensayo se realizó con un molde fabricado mediante la tecnología Multi Jet Fusion (MJF) en PA12, con el objetivo de evaluar el comportamiento de una tecnología de fusión de lecho de polvo frente a los moldes previamente fabricados por FDM y SLA/LFS.

La elección del PA12 se debe a su buen equilibrio entre resistencia mecánica, estabilidad dimensional, resistencia térmica relativa y procesabilidad. Además, la tecnología MJF permite obtener piezas con un comportamiento más homogéneo que FDM, al no depender de una deposición de filamento capa a capa con uniones interlaminares tan marcadas. Otra ventaja relevante es que el polvo no fusionado actúa como soporte durante la fabricación, lo que permite producir geometrías complejas sin necesidad de estructuras de soporte adicionales.

En este ensayo se buscó comprobar si estas características permitían obtener un molde más robusto, estable y reutilizable durante el proceso de moldeo por compresión de la fibra de carbono forjada.

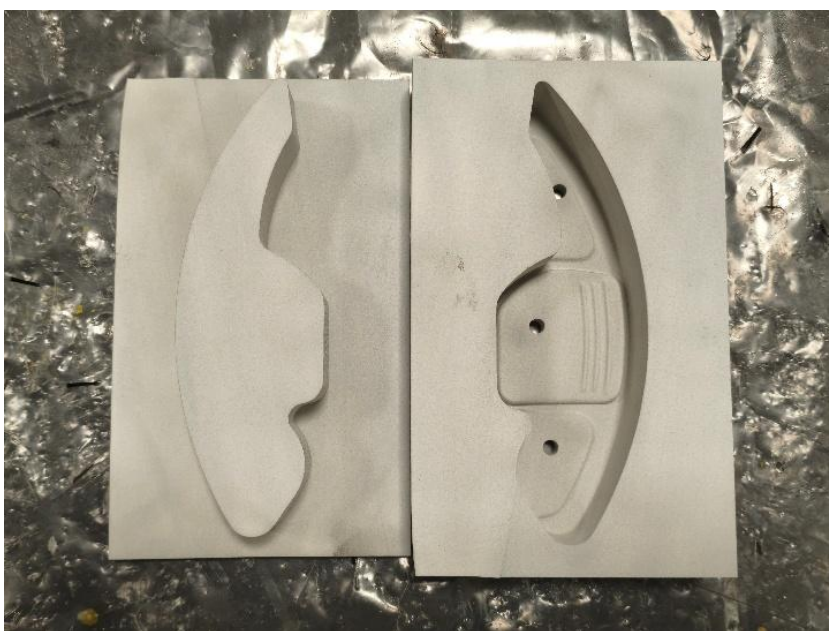


Figura 31. Molde del ensayo sexto impreso en PA12.

4.7.2. Postprocesado y acabado superficial

Tras la fabricación del molde mediante tecnología MJF en PA12, fue necesario realizar las operaciones habituales de postprocesado asociadas a los procesos de lecho de polvo. En primer lugar, el molde se dejó enfriar de forma controlada para evitar deformaciones

dimensionales. Posteriormente, se llevó a cabo el desempolvado, eliminando el material no fusionado retenido en la superficie, cavidades y zonas internas del molde.

Una vez retirado el polvo residual, se realizó una limpieza superficial para acondicionar las zonas de contacto con la pieza de fibra de carbono forjada. La rugosidad característica de los moldes fabricados por MJF puede influir tanto en el acabado final de la pieza como en la facilidad de desmoldeo, ya que una superficie más rugosa favorece el anclaje mecánico de la resina epoxi. Por este motivo, se consideró necesario aplicar un tratamiento superficial previo al moldeo, basado en limpieza y aplicación cuidadosa de la cera desmoldeante, con el objetivo de reducir la adhesión entre el molde y la pieza durante el curado.

4.7.3. Moldeo por compresión

El procedimiento de moldeo debe mantenerse equivalente al resto de ensayos, utilizando la misma geometría de cavidad y un sistema de presión mantenida mediante gatos de apriete.

4.7.4. Resultados y análisis

El ensayo con molde fabricado mediante MJF en PA12 ofreció resultados muy favorables en términos de desmoldeo, conservación del molde y calidad superficial de la pieza. La pieza pudo extraerse con facilidad tras el curado, sin necesidad de aplicar esfuerzos excesivos ni recurrir a un desmoldeo destructivo.

El acabado superficial obtenido fue muy bueno, con una geometría bien definida y una reproducción adecuada de la cavidad del molde. Aunque la tecnología MJF presenta una rugosidad inicial mayor que la impresión por resina, el comportamiento del molde durante el proceso fue especialmente eficiente gracias a su mayor robustez, estabilidad y facilidad de desmoldeo.

En conjunto, el molde MJF en PA12 se presenta como una alternativa muy equilibrada para este tipo de aplicación, ya que combina buena resistencia mecánica, reutilización del utillaje y resultados superficiales satisfactorios. Aunque su coste de fabricación puede ser superior al de FDM, su mayor durabilidad y la posibilidad de emplearlo en varios ciclos de moldeo pueden compensar esta diferencia en aplicaciones de prototipado funcional o series cortas.



Figura 32. Resultado ensayo 6.

4.7.5. Resumen técnico del ensayo

Parámetro	Valor / observación
Tecnología del molde	MJF
Material	PA12
Postprocesado	Desempolvado, limpieza y desmoldeante
Sistema de presión	Gatos de apriete
Tiempo curado	48 horas
Resultado principal	Muy buen acabado
Estado del molde tras desmoldeo	Reutilizable

Tabla 8. Resumen técnico del Ensayo 6.

Capítulo 5. Resultados y Discusión

5.1. Análisis Comparativo

5.1.1. Calidad Superficial

La calidad superficial de las piezas obtenidas estuvo directamente condicionada por la tecnología de fabricación del molde, la orientación de impresión, el tratamiento superficial aplicado y la eficacia del sistema de desmoldeo. En el Ensayo 1, correspondiente al molde FDM impreso en horizontal y comprimido mediante prensa hidráulica, se obtuvo el peor acabado superficial. La pieza presentó exceso de resina curada, marcas asociadas al efecto escalera propio del proceso FDM y una compactación irregular de las fibras, lo que dio lugar a una superficie poco homogénea.

En el Ensayo 2, realizado con molde FDM impreso en orientación vertical y cerrado mediante gatos de apriete, se observó una mejora notable respecto al ensayo anterior. La reducción del efecto escalera en las zonas curvas y la presión más estable durante el curado favorecieron una mejor definición de la geometría y un patrón de carbono forjado más visible. No obstante, se detectaron zonas con ligera falta de resina en la superficie frontal, que requirieron una aplicación posterior de resina para mejorar el acabado visual.

En el Ensayo 3, fabricado con molde de resina Clear Resin, la pieza presentó localmente el mejor acabado superficial inicial, coherente con la mayor resolución y menor rugosidad de la tecnología SLA/LFS frente a FDM. Sin embargo, la fuerte adhesión entre el molde y la pieza provocó un desmoldeo destructivo, generando daños y restos de molde adheridos que limitaron la aplicabilidad real de esta solución.

Los ensayos posteriores permitieron mejorar esta situación. En el Ensayo 4, con molde FDM horizontal y cera desmoldeante, se obtuvo una mejora respecto al primer molde FDM horizontal, evidenciando la importancia del tratamiento superficial y del agente desmoldeante. En el Ensayo 5, el uso de Tough 2000 Resin permitió mantener un acabado superficial muy bueno, similar al esperado en tecnologías SLA/LFS, pero con una mayor integridad del molde durante el desmoldeo. Finalmente, el Ensayo 6, fabricado mediante MJF en PA12, ofreció un resultado equilibrado, con buen acabado superficial, geometría bien definida y menor tendencia a la rotura del molde.

En conjunto, los mejores resultados superficiales se obtuvieron con los moldes de resina y MJF, mientras que los moldes FDM mostraron una mayor dependencia de la orientación de impresión, el lijado y el tratamiento desmoldeante aplicado. No obstante, la calidad superficial debe valorarse junto con la facilidad de desmoldeo y la reutilización del molde, ya que un acabado inicial muy bueno no garantiza por sí solo la viabilidad del proceso.

5.1.2. Efecto del clear coat en el acabado final

Una vez evaluada la calidad superficial de las piezas directamente tras el desmoldeo, se aplicó una capa transparente de acabado (clear coat) sobre ellas con el objetivo de mejorar su apariencia final. Este tratamiento permitió aumentar el brillo superficial, homogeneizar visualmente la superficie y realzar el patrón característico del carbono forjado, haciendo más visible la distribución aleatoria de las fibras cortas.

No obstante, este tratamiento debe considerarse únicamente como una operación de acabado superficial. El clear coat mejora la apariencia final de la pieza, pero no corrige defectos internos de compactación, falta de impregnación, porosidad o distribución irregular de la fibra. Por tanto, su efecto debe diferenciarse de la calidad superficial obtenida directamente del molde.



Figura 33. Piezas con capa de clearcoat.

Podemos observar entonces que, tras la aplicación del recubrimiento transparente, se observó una mejora estética notable, especialmente en términos de contraste, profundidad visual y uniformidad del acabado.

5.1.3. Desmoldeo

El desmoldeo fue uno de los factores más determinantes en la viabilidad de cada configuración de molde. En el Ensayo 1, realizado con molde FDM horizontal y prensa hidráulica, la extracción de la pieza resultó muy dificultosa, siendo necesario aplicar esfuerzos elevados que provocaron la destrucción del molde e imposibilitaron la obtención de una pieza limpia.

En el Ensayo 2, el cambio a un molde FDM impreso en orientación vertical y el empleo de gatos de apriete permitió mejorar significativamente el desmoldeo. La pieza pudo extraerse con mayor facilidad y sin la destrucción del utillaje, lo que evidencia la importancia tanto de la orientación de impresión como del sistema de presión empleado.

El Ensayo 3, realizado con molde de Clear Resin, presentó el peor comportamiento en este aspecto. A pesar del buen acabado superficial inicial del molde, se produjo una adhesión muy elevada entre la pieza de carbono forjado y la resina del molde, imposibilitando un correcto desmoldeo y dañando la pieza. Este resultado puede atribuirse a una combinación de factores, como la posible afinidad superficial entre ambas resinas, el anclaje mecánico en microdefectos, una protección desmoldeante insuficiente o la ausencia de una barrera superficial eficaz.

En los ensayos posteriores, la introducción de cera desmoldeante y el empleo de materiales de molde más adecuados, como Tough Resin y PA12 mediante MJF, permitieron mejorar notablemente la extracción de las piezas, permitiendo conservar los moldes para su posterior reutilización. Estos resultados indican la importancia de un buen agente desmoldante, así como de un buen material.

5.1.4. Sistema de Presión

El sistema de presión empleado durante el moldeo por compresión tuvo una influencia directa en la compactación del material compuesto y en la calidad final de las piezas. En el primer ensayo se utilizó una prensa hidráulica; sin embargo, se observó que este sistema no

resultaba óptimo para un proceso de curado prolongado a temperatura ambiente, ya que la presión aplicada podía disminuir progresivamente con el tiempo.



Figura 34. Prensa hidráulica empleada en el primer ensayo.

Esta pérdida de presión durante el curado afectó negativamente a la compactación de la mezcla de fibra de carbono y resina epoxi, favoreciendo la aparición de exceso de resina y el curado de la resina en el interior del molde, imposibilitando el desmoldeo. Por este motivo, en los ensayos posteriores se sustituyó la prensa hidráulica por gatos de apriete o sargentos de barra, distribuidos alrededor del perímetro del molde.

El uso de gatos permitió mantener una presión mecánica más constante durante todo el proceso de curado, garantizando un cierre más estable entre las dos mitades del molde y favoreciendo una mejor compactación del material compuesto. Aunque este sistema no permite conocer con precisión la presión aplicada, resultó más adecuado para el tipo de resina empleada y para los tiempos de curado utilizados en este trabajo.



Figura 35. Gato de apriete empleado.

5.1.5. Orientación de Impresión FDM

Como se observa en la Figura X, la orientación de impresión en los moldes FDM influye directamente en la forma en que el molde soporta los esfuerzos generados durante el desmoldeo. En el esquema de la izquierda, correspondiente a la impresión horizontal, las capas quedan dispuestas de manera menos favorable respecto a la dirección de extracción de la pieza. Esta configuración puede hacer que los esfuerzos de tracción actúen sobre las uniones entre capas, aumentando el riesgo de delaminación, separación local o fallo del molde.

Este comportamiento se relaciona con lo observado en el Ensayo 1, donde el molde FDM impreso en horizontal presentó mayores dificultades durante el desmoldeo. Aunque en ensayos posteriores se introdujeron mejoras como el uso de cera desmoldeante y un sistema de presión más estable, la orientación horizontal siguió presentando una mayor tendencia a la rotura.

Por el contrario, en el esquema de la derecha de la Figura X, correspondiente a la impresión vertical, las capas se orientan de forma más favorable frente a la dirección de desmoldeo. De esta manera, los esfuerzos de tracción se distribuyen mejor a través de la estructura del

molde, reduciendo el riesgo de separación entre capas. Esta explicación es coherente con los resultados del Ensayo 2, en el que el molde FDM impreso en vertical permitió un desmoldeo más sencillo, sin destrucción del utillaje y con una mejora visible del acabado superficial de la pieza.

En conjunto, la comparación entre ambos ensayos confirma que la orientación vertical resulta más adecuada para esta geometría, ya que combina una reducción del efecto escalera en las zonas curvas con una mayor resistencia frente a los esfuerzos de extracción.

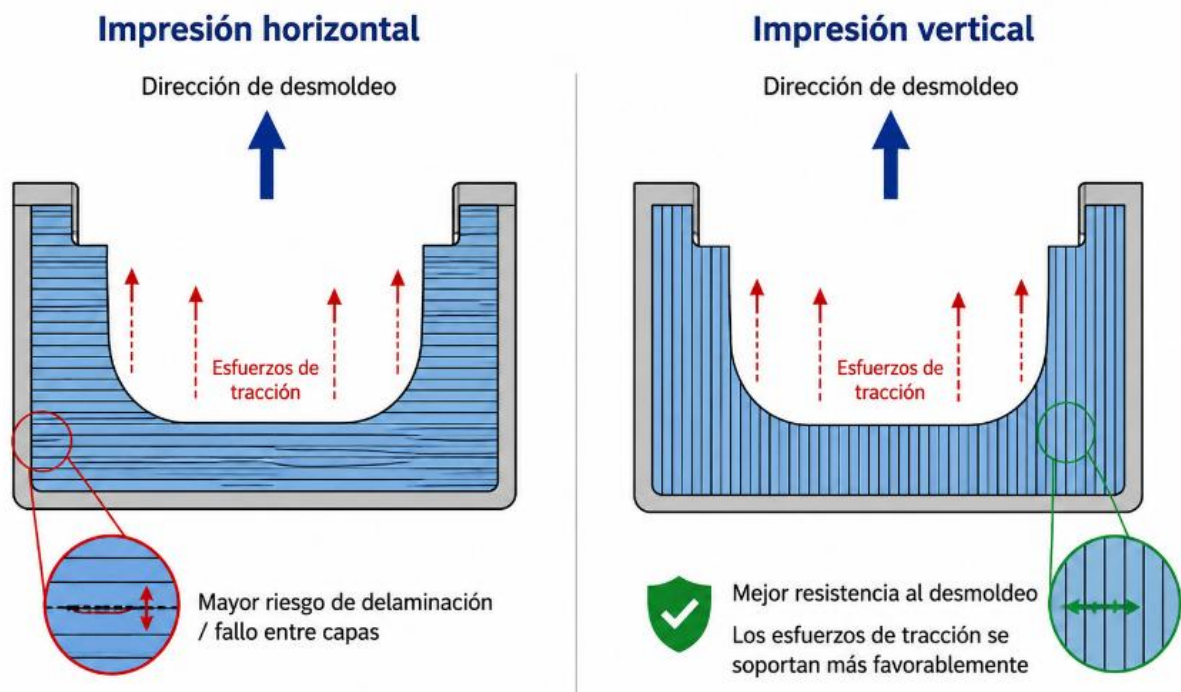


Figura 36. Influencia de la orientación de impresión FDM en la resistencia del desmoldeo.

5.2. Matriz comparativa de resultados

Ensayo	Tecnología / material	Presión	Acabado	Desmoldeo	Reutilización	Valoración global
1	FDM horizontal	Prensa hidráulica	Bajo	Muy difícil	Nula	No recomendable sin rediseño y presión mantenida
2	FDM vertical	Gatos	Bajo	Bueno	Alta	Mejor alternativa de bajo coste
3	SLA/LFS Clear Resin	Gatos	Bueno	Muy difícil	Nula	Buen acabado
4	FDM horizontal	Gatos	Bueno	Medio	Nula	No se recomienda impresión en horizontal
5	SLA/LFS Tough 2000	Gatos	Muy bueno	Fácil	Alta	Alternativa de resina más robusta, con mucha calidad superficial
6	MJF PA12	Gatos	Muy bueno	Fácil	Alta	Alternativa robusta y con muy buen acabado

Tabla 9. Matriz comparativa de resultados de los ensayos.

5.3. Discusión de fallos observados

En el caso de los moldes fabricados mediante FDM, los fallos observados estuvieron principalmente asociados a las limitaciones propias del proceso de deposición capa a capa. La orientación de impresión influyó directamente en el acabado superficial, la resistencia durante el desmoldeo y la presencia del efecto escalera en las zonas curvas. No obstante, este defecto superficial presenta una solución relativamente sencilla mediante operaciones de postprocesado, como el lijado y la aplicación de un nivelador de capas, que permite reducir la rugosidad, sellar parcialmente las marcas entre capas y mejorar la superficie de contacto con la pieza. Por tanto, aunque FDM presenta limitaciones frente a tecnologías de mayor resolución, su bajo coste y la posibilidad de mejorar el acabado mediante tratamientos superficiales lo convierten en una opción viable para moldes de prototipado, siempre que se controle adecuadamente la orientación de impresión, el desmoldeante y el sistema de presión.

En los últimos ensayos, tras la incorporación de mejoras en el tratamiento superficial, el uso de cera desmoldeante y la selección de materiales de molde más adecuados, no se detectaron problemas críticos durante el desmoldeo ni daños significativos en el utillaje. Las piezas pudieron extraerse con mayor facilidad y los moldes conservaron su funcionalidad tras el proceso, lo que evidencia una mejora clara en la estabilidad y repetibilidad del procedimiento experimental. Estos resultados indican que los fallos iniciales no estaban asociados únicamente a la geometría de la pieza, sino principalmente a la combinación de material del molde, agente desmoldeante y sistema de presión empleado.

El análisis conjunto de los ensayos permite interpretar los fallos observados no como incidencias aisladas, sino como indicadores de los límites de cada solución de molde. En este sentido, los errores detectados sirvieron para identificar qué variables del proceso tenían mayor influencia sobre la viabilidad del moldeo por compresión de carbono forjado.

En primer lugar, se comprobó que la calidad superficial inicial del molde no garantiza por sí sola un buen resultado final. El caso del molde de Clear Resin es especialmente representativo: aunque proporcionaba una cavidad lisa y precisa, la elevada adhesión con la resina epoxi anuló esta ventaja y provocó la destrucción del utillaje durante el desmoldeo. Esto demuestra que, para esta aplicación, la compatibilidad superficial y el sistema desmoldeante son tan importantes como la precisión dimensional.

En segundo lugar, molde puede ser válido para obtener una única pieza, pero resultar poco eficiente si queda dañado o inutilizado tras el primer ciclo. Por ello, soluciones como Tough Resin o MJF en PA12, aunque puedan implicar un mayor coste inicial, ofrecen una ventaja técnica si permiten repetir el proceso con menor riesgo de rotura y menor intervención manual.

Finalmente, los fallos observados muestran que la fabricación de moldes impresos en 3D para composites no debe optimizarse únicamente desde el punto de vista de la impresión, sino considerando todo el ciclo de fabricación: preparación del molde, aplicación del desmoldeante, compactación, curado, extracción y acabado final. La tecnología más adecuada será, por tanto, aquella que proporcione el mejor equilibrio entre precisión, acabado, resistencia del utillaje, facilidad de desmoldeo y repetibilidad del proceso.

5.4. Estudio de costes y viabilidad económica

El presente apartado tiene como objetivo estimar y comparar el coste asociado a la fabricación de los moldes impresos en 3D y a la obtención de las piezas de fibra de carbono forjada. Para ello, se consideran los principales factores que intervienen en el proceso: material de impresión consumido, tiempo de fabricación, coste de uso de máquina, operaciones de postprocesado, consumibles empleados, material compuesto utilizado y mano de obra necesaria.

Este análisis permite evaluar las tecnologías estudiadas no solo desde el punto de vista técnico, sino también desde una perspectiva económica. De este modo, se busca determinar qué solución ofrece el mejor equilibrio entre coste, calidad del molde, facilidad de fabricación, reutilización del utillaje y viabilidad para aplicaciones de prototipado funcional o producción en series cortas.

El estudio de costes se plantea a partir de una estructura común para todos los ensayos, con el fin de comparar las distintas tecnologías de fabricación de moldes bajo criterios equivalentes. Para ello, se consideran la inversión inicial asociada a los equipos, el coste del material de impresión, el tiempo de fabricación, el coste de uso de máquina, las operaciones de postprocesado, los consumibles auxiliares y la posible reutilización del molde en ciclos posteriores.

El coste correspondiente al material compuesto (fibra de carbono, resina epoxi y catalizador) se considera común para todos los ensayos, ya que la geometría de la pieza y el volumen de la cavidad del molde se mantienen constantes. Por tanto, las diferencias económicas entre ensayos se atribuyen principalmente al tipo de molde empleado, la tecnología de impresión utilizada, el material del utillaje, el postprocesado necesario y la durabilidad del molde tras el desmoldeo.

5.4.1. Inversión inicial

La fabricación de moldes mediante impresión 3D para su aplicación en piezas de fibra de carbono forjada requiere una inversión inicial asociada tanto a los equipos principales de fabricación como a los recursos auxiliares necesarios para el desarrollo completo del proceso. Esta inversión incluye las impresoras 3D empleadas para cada tecnología, los sistemas de postprocesado, los equipos de preparación y curado, las herramientas de moldeo y los medios de medición y control utilizados durante los ensayos.

En este trabajo se analizan tres tecnologías de fabricación aditiva: FDM, SLA/LFS y MJF, cada una de ellas con una estructura de costes diferente. La tecnología FDM presenta una inversión inicial más reducida y una mayor accesibilidad, mientras que SLA/LFS requiere equipos específicos de impresión, lavado y curado UV. Por su parte, la tecnología MJF implica una inversión inicial superior, al tratarse de un sistema de lecho de polvo de mayor complejidad, aunque ofrece ventajas en términos de robustez, repetibilidad y capacidad de fabricación.

5.4.1.1. FDM

Para el análisis económico se ha tomado como referencia una impresora Bambu Lab P1S, con un coste estimado de adquisición de 499 €. Asimismo, se ha considerado un coste anual de mantenimiento de 50 €, siguiendo la misma regla del 10% del coste de adquisición.

A diferencia de las tecnologías SLA/LFS y MJF, el proceso FDM no requiere equipos específicos de lavado, curado UV o gestión de polvo. No obstante, sí deben contemplarse operaciones de postprocesado como la retirada de soportes, el lijado y la aplicación de nivelador de capas o tratamientos superficiales, especialmente cuando se busca reducir el efecto escalera y mejorar el acabado de la cavidad del molde.

5.4.1.2. SLA/LFS

A diferencia de FDM, esta tecnología no requiere únicamente la impresión del molde, sino también operaciones posteriores de lavado, curado UV. Por ello, dentro del coste inicial deben contemplarse tanto el equipo principal como los medios necesarios para garantizar una polimerización adecuada y un acabado superficial correcto. Dichos elementos se detallan a continuación:

- Para el análisis económico se ha tomado como referencia una máquina de resina con un coste estimado de adquisición de 20.000 €, asumiremos también un coste anual de mantenimiento del 10% anual, lo equivalente a 2.000 €.
- Para el postprocesado de los moldes fabricados mediante SLA/LFS, es necesario considerar la adquisición de una estación de curado UV compatible con la impresora de resina empleada. Este equipo permite completar la polimerización del material

tras la impresión y mejorar las propiedades finales del molde. Para el análisis económico se ha estimado un coste de adquisición de 2.000 €. Además, el proceso requiere el uso de alcohol isopropílico (IPA) para la limpieza de las piezas tras la impresión, con el fin de eliminar los restos de resina no curada antes del curado UV. Para este consumible se ha considerado un coste aproximado de 20 €.

Concepto	Coste(€)
Coste adquisición	20.000 €
Curado UV	2.000 €
Alcohol isopropílico	20 €
Total	22.020 €

Tabla 10. Inversión Inicial SLA

5.4.1.3. MJF

A diferencia de las tecnologías FDM y SLA/LFS, la fabricación mediante Multi Jet Fusion (MJF) no requiere estructuras de soporte, ya que el propio lecho de polvo actúa como material de sustentación durante la impresión. No obstante, esta tecnología implica una inversión inicial considerablemente superior, tanto por el coste del equipo como por la infraestructura necesaria para el procesado y recuperación del polvo. Estos elementos se detallan a continuación:

- Para el análisis económico se ha tomado como referencia una impresora HP Jet Fusion 580, con un coste estimado de adquisición de 80.000 €. Asimismo, aplicando la misma regla se ha considerado un coste anual de mantenimiento de 8.000 €.

5.4.2. Amortización de equipos y coste objetivo

Para el cálculo de la amortización se ha considerado una base operativa anual de 1.784 horas, correspondiente a 223 días laborables con 8 horas de funcionamiento diario. Este valor representa una utilización regular de los equipos dentro de un entorno de laboratorio y permite distribuir el coste de adquisición y mantenimiento a lo largo de su vida útil estimada. El coste horario obtenido se empleará posteriormente para calcular el coste de fabricación de cada molde en función del tiempo real de impresión.

5.4.2.1. FDM

Para la impresora Bambu Lab P1S se adopta un horizonte de amortización de 2 años. Este periodo se considera conservador debido al reducido coste del equipo, a la elevada evolución tecnológica de las impresoras FDM de escritorio y a la posibilidad de que el equipo sea sustituido por modelos más eficientes antes de alcanzar el final de su vida mecánica.

Calculando el coste de amortización:

$$Coste_{Amortización} = \frac{Coste Inversión Inicial}{Tiempo amortización} = \frac{499}{5 \cdot 1.784} = 0,14 \text{ €/h}$$

Calculando el coste de mantenimiento:

$$Coste_{Mantenimiento} = \frac{Coste Mantenimiento}{Tiempo} = \frac{50}{1.784} = 0,028 \text{ €/h}$$

Para calcular el coste total añadimos también un margen de un 10% para añadir posibles costes indirectos no incluidos:

$$Coste_{objetivo} = (0,14 + 0,028) \cdot 1.1 = 0,185 \text{ €/h}$$

5.4.2.2. SLA/LFS

Para el equipo de impresión SLA/LFS se considera un periodo de amortización de 5 años, acorde con su mayor inversión inicial y su carácter profesional. Este horizonte permite distribuir el coste del equipo durante un periodo suficientemente representativo, teniendo en cuenta además que su mantenimiento y los sistemas auxiliares de lavado y curado contribuyen a prolongar su vida útil operativa.

Calculando el coste de amortización:

$$Coste_{Amortización} = \frac{Coste Inversión Inicial}{Tiempo amortización} = \frac{22.020}{5 \cdot 1.784} = 2,47 \text{ €/h}$$

Calculando el coste de mantenimiento:

$$Coste_{Mantenimiento} = \frac{Coste Mantenimiento}{Tiempo} = \frac{2.000}{1.784} = 1,12 \text{ €/h}$$

Para calcular el coste total añadimos también un margen de un 10% para añadir posibles costes indirectos no incluidos:

$$Coste_{objetivo} = (2,47 + 1,12) \cdot 1.1 = 3,95 \text{ €/h}$$

5.4.2.3. MJF

Para la impresora HP Jet Fusion 580 se adopta igualmente un horizonte de amortización de 5 años. Aunque se trata de un equipo industrial con una vida útil potencialmente superior, este periodo se considera adecuado debido a la rápida evolución de las tecnologías de fusión de lecho de polvo, los elevados costes de mantenimiento y la posible obsolescencia tecnológica del sistema.

Calculando el coste de amortización:

$$Coste_{Amortización} = \frac{Coste \text{ Inversión Inicial}}{Tiempo \text{ amortización}} = \frac{80.000}{5 \cdot 1.784} = 8,97 \text{ €/h}$$

Calculando el coste de mantenimiento:

$$Coste_{Mantenimiento} = \frac{Coste \text{ Mantenimiento}}{Tiempo} = \frac{8.000}{1.784} = 4,48 \text{ €/h}$$

Para calcular el coste total añadimos también un margen de un 10% para añadir posibles costes indirectos no incluidos:

$$Coste_{objetivo} = (8,97 + 4,48) \cdot 1,1 = 14,8 \text{ €/h}$$

5.4.3. Costes de electricidad

Para estimar el coste eléctrico de las tecnologías analizadas se ha considerado una tarifa de 0,25 €/kWh. El coste energético horario se obtiene multiplicando la potencia media de funcionamiento de cada equipo por el precio de la electricidad. Los valores calculados representan únicamente el consumo durante la operación de impresión y no incluyen otros equipos auxiliares de postprocesado.

5.4.3.1. FDM

En el caso de la impresora Bambu Lab P1S, aunque la potencia máxima puede alcanzar aproximadamente 1,1 kW durante determinados picos de calentamiento, el consumo medio real durante la impresión se sitúa entre 0,10 y 0,14 kW. Para el cálculo económico se adopta un valor medio de 0,12 kW, más representativo de un ciclo normal de fabricación.

$$\text{Coste energético}_{FDM} = 0,25 \cdot 0,12 = 0,03 \text{ €/h}$$

5.4.3.2. SLA/LFS

Para la tecnología SLA/LFS, se considera una potencia típica de funcionamiento de aproximadamente 0,65 kW para la impresora Formlabs Form 3L. Este consumo es superior al de la impresora FDM debido al sistema de iluminación, al movimiento de la plataforma y a los elementos de control térmico y mecánico del equipo.

$$\text{Coste energético}_{SLA} = 0,25 \cdot 0,65 = 0,162 \text{ €/h}$$

5.4.3.3. MJF

La impresora HP Jet Fusion 580 presenta el mayor consumo energético de las tecnologías estudiadas, con una potencia típica comprendida entre 4,5 y 6,3 kW, en función de la fase del ciclo de fabricación. El valor inferior se asocia a periodos de menor demanda, mientras que el superior puede alcanzarse durante las etapas de calentamiento y fusión del material. Para el cálculo económico se utiliza la potencia media del intervalo:

$$P_{media} = \frac{4,5 + 6,3}{2} = 5,4 \text{ kW}$$

$$\text{Coste energético}_{MJF} = 0,25 \cdot 5,4 = 1,35 \text{ €/h}$$

5.4.4. Costes de materiales y consumibles

En este apartado se estiman los costes asociados a los materiales utilizados en la fabricación de los moldes y el material compuesto empleado para obtener las piezas. Para cada tecnología se considera el consumo real de material de impresión, obtenido a partir del volumen o la masa indicados por el correspondiente software de preparación de la fabricación.

El coste de la fibra de carbono, la resina epoxi y el catalizador se considera común para todos los ensayos, ya que la geometría de la pieza y el volumen de la cavidad se mantuvieron constantes. Las cantidades empleadas se calcularon previamente a partir del volumen obtenido en Solid Edge, la densidad estimada del compuesto y la proporción establecida entre fibra y sistema epoxi. Asimismo, se incorporó un exceso controlado de resina para compensar las pérdidas producidas por la salida de material a través de la línea de cierre durante el moldeo por compresión.

Por tanto, las diferencias en el coste de materiales entre tecnologías proceden principalmente del material utilizado para fabricar el molde, de las estructuras de soporte necesarias y de los productos específicos de postprocesado. Los costes de la fibra de carbono y del sistema epoxi se añaden posteriormente como una partida constante al coste de cada pieza.

Por tanto, calculando el coste de fibra de carbono y de resina:

- La fibra de carbono corta utilizada se comercializa en envases de 150 g con un precio de 24,99 €, lo que equivale a un coste por gramo aproximado de:

$$Coste_{Fibra} = \frac{Coste}{Gramos\ envase} = \frac{24,99}{150} = 0,166 \text{ €/g}$$

- Por su parte, el sistema de resina epoxi bicomponente se comercializa en un conjunto de 500 g con un precio de 19,95 €, equivalente a:

$$Coste_{Resina} = \frac{Coste}{Gramos\ totales\ envase} = \frac{19,95}{500} = 0,04 \text{ €/g}$$

A partir de las cantidades calculadas en el apartado 4.1.1, se emplearon aproximadamente 22,8 g de fibra de carbono corta por ensayo. Por tanto, el coste correspondiente a la fibra es:

$$Coste\ pieza_{Fibra} = 22,8 \cdot 0,166 = 3,8 \text{ €}$$

Para el sistema epoxi se estimó una cantidad total de aproximadamente 28,5 g, incluyendo la resina base y el catalizador. De acuerdo con la proporción indicada por el fabricante, esta cantidad se distribuye en aproximadamente 19 g de resina y 9,5 g de catalizador. Al comercializarse ambos componentes conjuntamente, el coste se calcula sobre la masa total del sistema epoxi:

$$Coste\ pieza_{Resina} = 28 \cdot 0,04 = 1,12 \text{ €}$$

En consecuencia, el coste total de material compuesto empleado por ensayo es de:

$$Coste\ pieza_{total} = 3,8 + 1,12 = 4,92 \text{ €}$$

Este importe se considera común para todas las tecnologías analizadas, ya que se mantuvieron constantes la geometría de la pieza y el criterio de dosificación de fibra, resina y catalizador.

5.4.4.1. FDM

En los moldes fabricados mediante tecnología FDM, el coste del material se ha calculado a partir del precio de una bobina de PLA de 1 kg, con un precio de adquisición de 18,20 €. Considerando una densidad aproximada de 1,24 g/cm³, el volumen equivalente de material disponible en cada bobina es de 806,45 cm³.

$$Coste_{PLA} = \frac{Coste\ adquisición}{Volumen\ disponible} = \frac{18,20}{806,45} = 0,0226\ €$$

El coste de fabricación de cada molde se obtiene multiplicando este valor por el volumen de material indicado en Bambu Studio. Cuando la orientación de impresión requiere soportes, su volumen debe contabilizarse de forma independiente, aunque el coste unitario del material sea el mismo si también se utiliza PLA.

Para poder calcular el coste total de impresión debemos primero calcular el volumen de la pieza impresa:

$$Volumen_{pieza\ FDM} = \frac{Masa}{Densidad} = \frac{468,27}{1,24} = 377,64\ cm^3$$

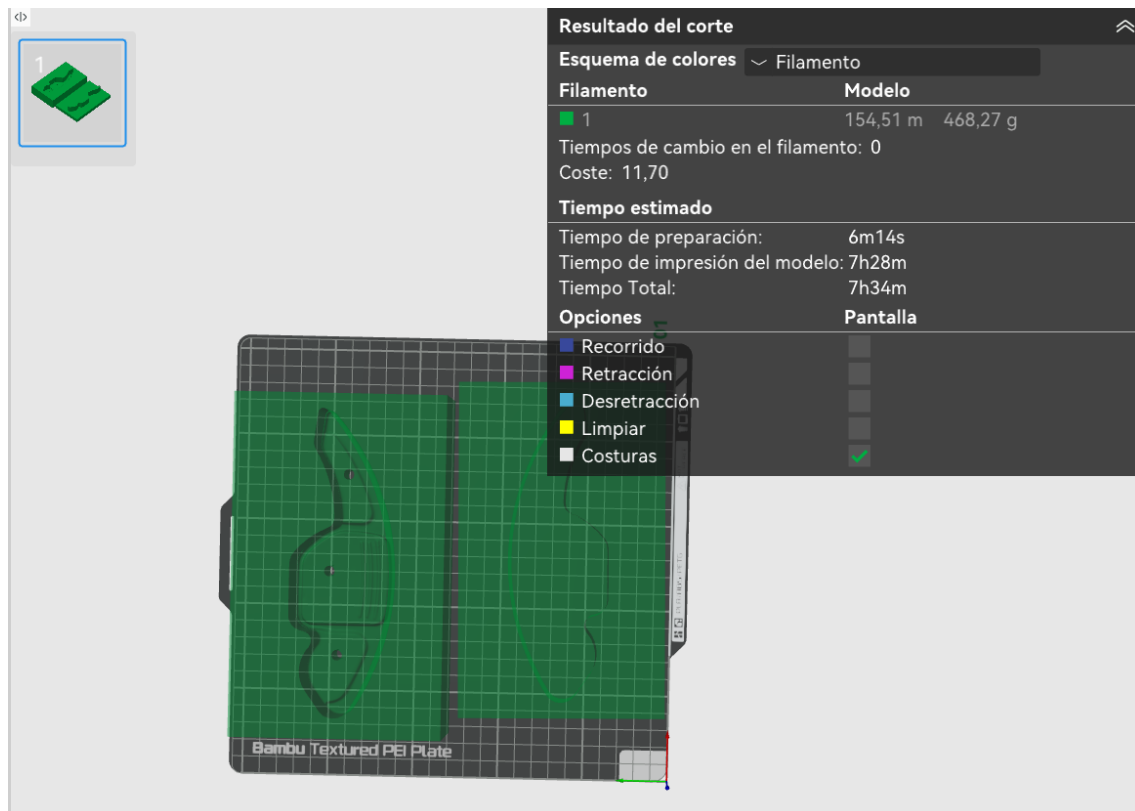


Figura 37. Laminado de la bandeja de impresión.

Para calcular el coste total de impresión multiplicamos el volumen de pieza obtenido, por

$$\text{Coste Mat}_{\text{pieza FDM}} = 377,64 \cdot 0,0226 = 8,53 \text{ €}$$

5.4.4.2. SLA/LFS

En los moldes fabricados mediante tecnología SLA/LFS, el consumo de material se obtuvo directamente del resumen generado por el software PreForm. Para la fabricación conjunta de las dos mitades del molde, el volumen total estimado fue de 516,77 cm³, de los cuales 388,65 cm³ correspondieron al modelo, 102,92 cm³ a las estructuras de soporte y 25,20 cm³ a las bases de impresión.

En el caso de Clear Resin V4, con un coste unitario de 0,19 €/cm³, calculado usando un precio de 190 € por 1000 cc.

Para el molde fabricado con Tough 2000 Resin se ha considerado el mismo volumen total de impresión, variando únicamente el precio del material. Con un coste de 0,24 €/cm³, calculado usando un precio de 244,85 € por 1000 cc.

La diferencia de coste entre ambas configuraciones se debe, por tanto, al mayor precio de la resina de ingeniería. No obstante, este incremento puede justificarse por la mejora observada en la tenacidad del molde, la facilidad de desmoldeo y la posibilidad de reutilización frente al molde fabricado con Clear Resin V4.

Calculando los costes de la resina Clear V4:

$$\text{Coste Mat}_{\text{pieza Clear}} = 0,19 \cdot 516,77 = 98,18 \text{ €}$$

Calculando los costes de la resina Tough 2000 V1:

$$\text{Coste Mat}_{\text{pieza Clear}} = 0,245 \cdot 516,77 = 126,6 \text{ €}$$

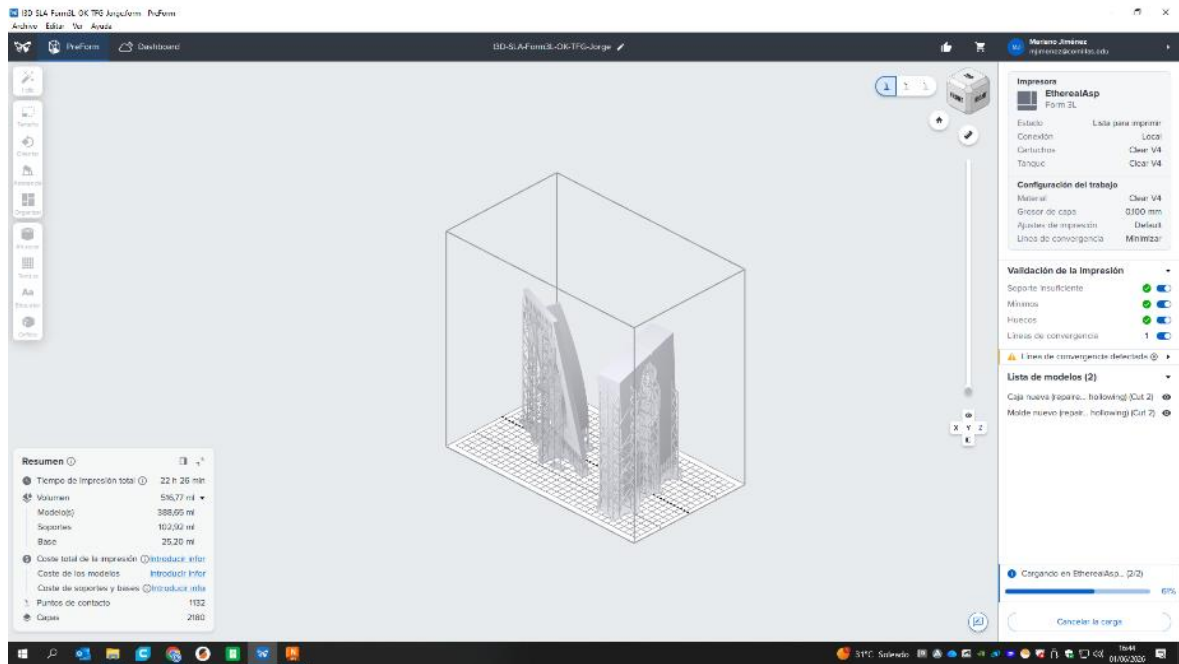


Figura 38. Obtención volumen de impresión en Pre Forms.

5.4.4.3. MJF

En el molde fabricado mediante tecnología MJF, el coste del material se calculó a partir del consumo de PA12 asignado a la pieza. Para este análisis se consideró un coste de 141 €/kg, que dividiéndolo entre 950 cc estimados obtenemos un coste de 0,148 €/cc.

A diferencia de FDM y SLA/LFS, la tecnología MJF no requiere estructuras de soporte independientes, ya que el polvo no fusionado rodea la pieza y actúa como soporte durante el proceso. Por tanto, el volumen impreso es el propio de la pieza:

$$Volumen_{Total} = Volumen_{macho} + Volumen_{Hembra} = 159,45 + 212,5 = 371,95 \text{ cm}^3$$

Por tanto, calculando el coste total, incluyendo el margen del 10%:

$$Coste \text{ Mat }_{pieza \text{ MJF}} = 0,148 \cdot 371,95 = 55,05 \text{ €}$$

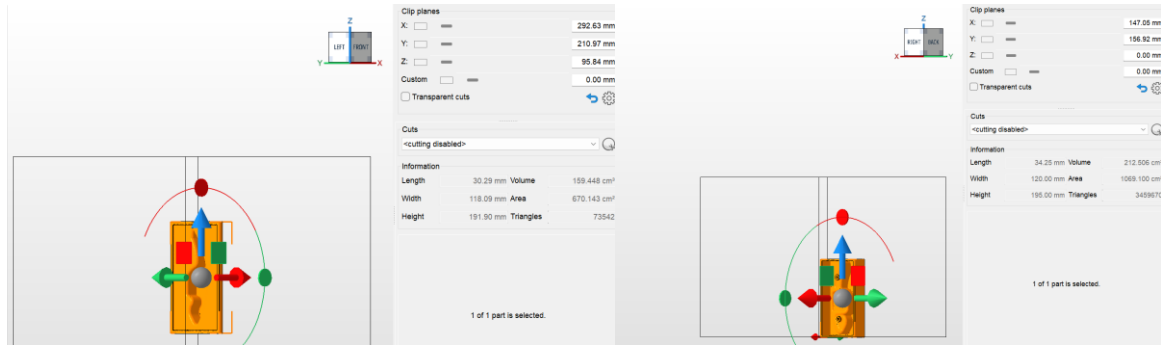


Figura 39. Volumen de la pieza en Netfabb.

5.4.5. Costes de producción por molde y por pieza

Además de los costes directos asociados a la impresión, el cálculo del coste real de producción debe incluir las tareas previas y posteriores necesarias para obtener un molde funcional. Estas actividades comprenden la preparación digital del modelo, la configuración del archivo de impresión, la retirada de soportes, la limpieza, el lijado, el curado o el despolvado, según la tecnología empleada.

El coste total de fabricación de cada molde se obtiene sumando el coste del material, el uso de máquina, la electricidad, la mano de obra técnica y los consumibles de postprocesado. A partir de este valor, el coste imputable a cada pieza de carbono forjado depende del número de veces que pueda reutilizarse el molde. Para el perfil técnico asumimos un coste de 20 €/h, siendo común para todas las tecnologías.

Por tanto, el coste unitario de la pieza puede expresarse como:

$Coste_{pieza}$

$$= \frac{C_{Obj} \cdot H_{impresión} + C_{Mat_{pieza}} + C_{energético} \cdot H_{impresión} + Perfil\ técnico \cdot Tiempo}{N_{Usos}}$$

+ $Coste_{pieza_{total}}$

5.4.5.1. FDM

Calculando el coste total, con un tiempo de impresión de la pieza de 7 horas, y dado que el molde es reutilizable, tirando por lo mínimo tendríamos como mínimo 2 usos de molde:

$$Coste_{Pieza\ FDM} = \frac{0,185 \cdot 7 + 8,53 + 0,03 \cdot 7 + 20 \cdot 0,3}{2} + 4,92 = 12,94\ €$$

5.4.5.2. SLA/LFS

Calculando el coste total, con un tiempo de impresión de la pieza de 22 horas y 20 minutos, y dado que el molde es reutilizable, tirando por lo mínimo tendríamos como mínimo 2 usos

de molde. Aunque en el ensayo realizado con Clear Resin el molde quedó inutilizado durante el desmoldeo, para el análisis económico se ha considerado una reutilización mínima de dos ciclos. Esta hipótesis se basa en que el fallo observado se atribuye principalmente a una aplicación insuficiente o un agente desmoldeante inadecuado, y no necesariamente a una limitación intrínseca del material del molde. Por tanto, se considera técnicamente razonable asumir que, mediante una preparación superficial más cuidadosa y la aplicación de una barrera desmoldeante eficaz, el molde podría reutilizarse al menos una vez adicional. Esta consideración permite estimar un escenario corregido y más representativo del potencial real de la tecnología SLA/LFS con Clear Resin.

Calculando el coste total:

$$Coste_{Pieza\ Clear} = \frac{3,95 \cdot 22,33 + 98,18 + 0,162 \cdot 22,33 + 20 \cdot 1}{2} + 4,92 = 109,92 \text{ €}$$

$$Coste_{Pieza\ Tough} = \frac{3,95 \cdot 22,33 + 126,6 + 0,162 \cdot 22,33 + 20 \cdot 1}{2} + 4,92 = 124,13 \text{ €}$$

5.4.5.3. MJF

Calculando el coste total, con un tiempo de impresión de la pieza de 15 horas, y dado que el molde es reutilizable, tirando por lo mínimo tendríamos como mínimo 2 usos de molde:

$$Coste_{Pieza\ MJF} = \frac{14,8 \cdot 15 + 55,05 + 1,35 \cdot 15 + 20 \cdot 0,2}{2} + 4,92 = 155,57 \text{ €}$$

Debido al elevado coste operativo de la tecnología MJF, la fabricación no suele realizarse con el volumen de construcción parcialmente vacío. Para mejorar la rentabilidad del proceso, los trabajos de impresión se agrupan y la máquina se pone en marcha únicamente cuando el volumen disponible está suficientemente aprovechado mediante el anidado de varias piezas. De este modo, el coste total del ciclo se reparte entre todas las piezas fabricadas simultáneamente. A partir de los trabajos reales analizados, con volúmenes de piezas de 1.507 cm³ y 1.279 cm³, importes facturados de 939,93 € y 702,43 €, y densidades de empaquetado próximas al 10 %, se obtiene un coste medio aproximado de 0,508 €/cm³. Este valor se utiliza como referencia para estimar el coste de fabricación del molde MJF, al

representar mejor las condiciones reales de utilización del equipo que un cálculo basado en una impresión individual con la cámara parcialmente vacía.

$$Coste_{Molde MJF-V2} = 0,508 \cdot 371,95 + 20 \cdot 0,2 = 192,95 \text{ €}$$

Como ese importe corresponde a la fabricación del molde completo y se consideran dos ciclos de uso:

$$Coste_{Pieza MJF-V2} = \frac{192,95}{2} + 4,92 = 101,40 \text{ €}$$

Los dos procedimientos de estimación empleados para MJF proporcionan resultados diferentes. El cálculo analítico, basado en la suma independiente del coste horario de máquina, el PA12 consumido, la electricidad y la intervención técnica, da lugar a un coste de 155,57 € por pieza. Por su parte, la estimación basada en facturas reales y en un coste medio de 0,508 €/cm³ proporciona un coste de 101,4 €, una vez distribuido el coste del molde entre dos usos y añadido el material compuesto correspondiente a cada ciclo.

La diferencia se debe principalmente a que el segundo método representa trabajos realizados con un aprovechamiento elevado del volumen de construcción, en los que los costes generales del proceso se reparten entre varias piezas fabricadas simultáneamente. En cambio, el primer método aplica de forma individual los costes horarios y operativos adoptados en el modelo económico, dando lugar a una estimación más conservadora. Por este motivo, el valor de 155,57 € puede considerarse un escenario desfavorable o de baja ocupación, mientras que el valor de 101,40 € representa mejor una situación de producción agrupada y utilización eficiente de la cámara MJF.

EJEMPLOS DE COSTES DE IMPRESIÓN 3D EN HP580C - FACTURA REAL SEGÚN CONDICIONES INDICADAS								
Completion Date / Time (PST)	Printer Model	Printer	Material Type	Parts Volume	Build Height	Reused Material	Packing Density	Billed Amount
2025-06-05 / 01:49 AM	HP Jet Fusion 580 Color 3D Printer	SG97MCA003	PA12Z	1,507 cm ³	90.95%	70%	10.6%	€939.93
2025-06-18 / 09:44 PM	HP Jet Fusion 580 Color 3D Printer	SG97MCA003	PA12Z	1,279 cm ³	81.17%	80%	10.08%	€702.43

Teniendo en cuenta las medias de los trabajos realizados en 1 año

Precio / volumen pieza		
0,508 €/cm ³		

Figura 40. Costes impresión SD HP 580 C.

5.4.6. Análisis comparativo de costes por tecnología de molde

La comparación económica entre las tecnologías analizadas debe realizarse considerando el coste unitario final de cada pieza, una vez distribuidos entre los usos previstos del molde todos los costes asociados a su fabricación y acondicionamiento. De este modo, el coste del material de impresión, el uso de máquina, el consumo eléctrico y el postprocesado inicial se reparten entre dos ciclos de moldeo, mientras que el material compuesto se contabiliza íntegramente en cada pieza fabricada.

La tecnología FDM presenta el menor coste unitario, con un valor estimado de 12,94 € por pieza. Este resultado se debe al reducido coste del equipo, del filamento PLA y del consumo energético. Aunque requiere operaciones de lijado y acondicionamiento superficial, su bajo coste de fabricación la convierte en la alternativa más adecuada para prototipos y series muy cortas.

En SLA/LFS, el coste aumenta considerablemente debido al precio de las resinas, al mayor tiempo de impresión y a las operaciones posteriores de lavado, curado UV y retirada de soportes. El molde fabricado con Clear Resin V4 da lugar a un coste estimado de 109,92 € por pieza, mientras que el empleo de Tough 2000 Resin eleva el valor hasta 124,13 € por pieza. No obstante, la Tough Resin ofrece una mayor tenacidad y una mejor capacidad de reutilización, por lo que su mayor coste puede compensarse cuando se priorizan la durabilidad del molde y la facilidad de desmoldeo.

La tecnología MJF presenta un coste estimado de 155,57 € por pieza mediante el modelo analítico conservador. Sin embargo, cuando se emplea una estimación basada en trabajos reales con un aprovechamiento elevado de la cámara de fabricación, el coste se reduce hasta aproximadamente 101,40 € por pieza. Esta diferencia pone de manifiesto la importancia de la ocupación del volumen de construcción y del anidado de varias piezas en una misma carga.

En conjunto, FDM es la opción más económica, mientras que SLA/LFS y MJF ofrecen mejores prestaciones en acabado superficial, robustez y reutilización. La elección de la tecnología más adecuada dependerá, por tanto, del equilibrio entre coste, calidad requerida, número previsto de piezas y capacidad de reutilización del molde.

Tecnología 3D	Coste total (€)
FDM	12,94 €
SLA Clear	109,92 €
SLA Tough	124,13 €
MJF	155,57 €
MJF V2	101,40 €

Tabla 11. Tabla resumen costes.

5.4.7. Análisis de viabilidad económica

El presente apartado tiene por objeto determinar en qué condiciones puede resultar económicamente viable la fabricación de piezas de fibra de carbono forjada mediante moldes obtenidos por FDM, SLA/LFS y MJF. Para ello, se adopta un precio de venta de referencia de 55 € por pieza y se analiza la capacidad de cada tecnología para generar un margen positivo y recuperar la inversión asociada al proceso.

Cálculo de los márgenes iniciales:

$$M_{FDM} = 55 - 12,94 = 42,06 \text{ €}$$

$$M_{SLA \text{ Clear}} = 55 - 109,92 = -54,92 \text{ €}$$

$$M_{SLA \text{ Tough}} = 55 - 124,13 = -69,13 \text{ €}$$

$$M_{MJF} = 55 - 155,57 = -100,57 \text{ €}$$

$$M_{MJF_V2} = 55 - 101,40 = -46,40 \text{ €}$$

La metodología varía en función de la estructura de costes de cada alternativa. En el caso de FDM, el coste unitario obtenido es claramente inferior al precio de venta considerado, por lo que la actividad presenta rentabilidad desde las primeras unidades fabricadas. En consecuencia, el análisis se centra en calcular el número de piezas que deben venderse para recuperar la inversión inicial correspondiente a la adquisición de la impresora.

Por el contrario, en las tecnologías SLA/LFS y MJF, el mayor coste de fabricación del molde hace que el escenario conservador de dos ciclos de uso no permita alcanzar inicialmente un margen positivo. Por ello, se determina primero el número mínimo de reutilizaciones necesario para distribuir el coste del utillaje y reducir el coste unitario por debajo del precio de venta. Una vez alcanzado dicho umbral, se evalúa el margen obtenido por pieza y la capacidad de la producción para recuperar la inversión correspondiente.

5.4.7.1. FDM

5.4.7.1.1. Estudio del punto de equilibrio

Para completar la evaluación económica de la tecnología FDM, se desarrolla un análisis del punto de equilibrio que permite determinar el número mínimo de piezas que deben fabricarse y venderse para recuperar la inversión inicial asociada a la adquisición de la impresora. Este cálculo relaciona la inversión realizada con el margen de contribución obtenido por cada unidad vendida y con el horizonte temporal adoptado para la amortización del equipo.

En este caso, se considera una inversión inicial de 499 €, correspondiente a la adquisición de la impresora Bambu Lab P1S, y un horizonte de amortización de 2 años, con 223 días operativos anuales. Por tanto, el periodo total considerado asciende a:

$$T_{\text{Amortización}} = 223 \cdot 2 = 446 \text{ días}$$

Para calcular el punto de equilibrio de la inversión no debe utilizarse directamente el margen unitario obtenido a partir del coste completo por pieza, ya que dicho coste incluye una parte correspondiente a la amortización de la impresora. Si esta amortización se mantuviera dentro del coste unitario y, al mismo tiempo, se introdujera la inversión inicial de 499 € en el numerador de la expresión del punto de equilibrio, el coste de adquisición del equipo se contabilizaría dos veces. Por este motivo, se excluye del coste por pieza únicamente la parte correspondiente a la adquisición de la impresora, manteniéndose incluidos el mantenimiento, el material, la energía, el postprocesado y el material compuesto.

La amortización horaria correspondiente exclusivamente a la adquisición de la impresora es:

$$C_{\text{Amortización}} = \frac{499}{2 \cdot 1784} = 0,140 \text{ €/h}$$

Considerando un tiempo de impresión de siete horas por molde y dos piezas obtenidas con cada molde:

$$C_{\text{Amortización impresión}} = \frac{0,140 \cdot 7}{2} = 0,49 \text{ €}$$

Por tanto, el coste operativo por pieza, excluyendo únicamente la amortización del equipo, es:

$$C_{\text{Operativo FDM}} = 12,94 - 0,49 = 12,45 \text{ €/Pieza}$$

El margen de contribución que se empleará en el análisis del punto de equilibrio y del ROI es:

$$M_{FDM}^* = 55 - 12,45 = 42,55 \text{ €/Pieza}$$

De este modo, las unidades diarias de equilibrio son:

$$\begin{aligned} \text{Uds diarias equilibrio} &= \frac{\text{Inversión Inicial}}{\text{Márgen unitario} \cdot T_{\text{Amortización}}} \\ \text{Uds diarias equilibrio} &= \frac{499}{42,55 \cdot 446} = 0,0263 \text{ Piezas/Día} \end{aligned}$$

Este resultado equivale aproximadamente a la venta de una pieza cada 38 días, o seis piezas al año, para recuperar la inversión dentro del periodo de amortización establecido. A partir de la duodécima unidad vendida, la inversión inicial quedaría cubierta y las unidades adicionales comenzarían a generar un beneficio neto positivo, siempre que se mantengan los costes operativos y el precio de venta adoptados.

5.4.7.1.2. Estudio del ROI

Una vez determinado el margen de contribución unitario y el número mínimo de piezas necesarias para recuperar la inversión, se procede a calcular el retorno sobre la inversión (ROI) de la tecnología FDM. Este indicador permite evaluar la rentabilidad obtenida respecto al desembolso inicial realizado para adquirir el equipo.

Para el análisis se adopta un escenario conservador de venta de 12 piezas al año, equivalente a una unidad mensual. Este volumen supera el punto de equilibrio calculado y permite valorar el comportamiento económico de la inversión durante un periodo anual.

El ROI no debe calcularse únicamente a partir de los ingresos por ventas, ya que también es necesario descontar los costes asociados a la fabricación de cada pieza. Por este motivo, se utiliza el margen de contribución unitario, definido como la diferencia entre el precio de venta y el coste operativo por pieza:

$$ROI(\%) = \frac{\text{Beneficio Neto}}{\text{Inversión Inicial}} \cdot 100$$

El margen total generado durante el primer año se obtiene multiplicando este valor por el número de unidades vendidas:

$$M_{Anual} = 12 \cdot 42,55 = 510,60 \text{ €}$$

Por tanto, calculando el ROI para el primer año de inversión:

$$ROI(\%) = \frac{510,60 - 499}{499} = 2,32\%$$

Si se mantiene el mismo ritmo de ventas durante los dos años considerados para la amortización, se fabricarían y venderían 24 piezas. En este caso:

$$M_{Anual} = 24 \cdot 42,55 = 1021,20 \text{ €}$$

Por tanto, calculando el ROI para el segundo año de inversión:

$$ROI(\%) = \frac{1021,20 - 499}{499} = 104,65\%$$

Por tanto, bajo los supuestos adoptados, la tecnología FDM alcanzaría un ROI acumulado de aproximadamente 104,65 % al finalizar el segundo año. Este resultado muestra que, incluso con un volumen de ventas moderado, la inversión en una impresora FDM puede resultar económicamente atractiva debido al reducido coste del equipo y al elevado margen de contribución por pieza.

5.4.7.2. SLA/LFS

A diferencia de FDM, el elevado coste de fabricación del molde provoca que el escenario inicial de dos usos presente un coste unitario superior al precio de venta adoptado. Por este motivo, antes de calcular la recuperación de la inversión es necesario determinar el número mínimo de ciclos que debe soportar cada molde.

$$Coste_{Pieza\ Clear} = \frac{210}{n} + 4,92 < 55$$

Resolviendo la inecuación obtenemos $n > 4,19$, y para que cumpla la condición, el número de veces que se ha de reutilizar el molde es de $n = 5$. Y por tanto recalculando el coste:

$$Coste_{Pieza\ Clear} = \frac{210}{5} + 4,92 = 46,92\ €$$

Haciendo lo mismo para la resina Tough:

$$Coste_{Pieza\ Tough} = \frac{238,42}{n} + 4,92 < 55$$

Resolviendo la inecuación obtenemos $n > 4,76$, y para que cumpla la condición, el número de veces que se ha de reutilizar el molde es de $n = 5$. Y por tanto recalculando el coste:

$$Coste_{Pieza\ Tough} = \frac{238,42}{5} + 4,92 = 52,60\ €$$

Aunque ambas resinas necesitan cinco usos para alcanzar un margen positivo, Tough Resin presenta un margen inferior debido al mayor coste del material. No obstante, durante el ensayo el molde de Tough Resin pudo conservarse en condiciones reutilizables, por lo que la hipótesis de varios ciclos de uso resulta más coherente con los resultados experimentales obtenidos.

5.4.7.2.1. Estudio del punto de equilibrio

Para completar la evaluación económica de la tecnología SLA/LFS, se desarrolla un análisis del punto de equilibrio que permite determinar el número mínimo de piezas que deben fabricarse y venderse para recuperar la inversión inicial asociada a la adquisición de la impresora y del equipo de postcurado. Este cálculo relaciona la inversión realizada con el margen de contribución obtenido por cada unidad vendida y con el horizonte temporal adoptado para la amortización de los equipos.

En este caso, se considera una inversión inicial de 22.020 €, correspondiente a la adquisición de la impresora SLA/LFS, de la estación de curado UV y del alcohol isopropílico, y un horizonte de amortización de 5 años, con 223 días operativos anuales. Por tanto, el periodo total considerado asciende a:

$$T_{Amortización} = 223 \cdot 5 = 1.115\ días$$

De misma forma que para FDM, calcularemos los nuevos márgenes a los que les quitaremos la parte correspondiente a la amortización:

$$C_{Amortización} = \frac{20.020}{5 \cdot 1784} = 2,24 \text{ €/h}$$

Considerando un tiempo de impresión de 22 horas y 20 minutos por molde y cinco piezas obtenidas con cada molde:

$$C_{Amortización \text{ impresión}} = \frac{2,24 \cdot 22,33}{5} = 10 \text{ €}$$

Por tanto, el coste operativo por pieza, excluyendo únicamente la amortización del equipo, es:

$$C_{Operativo \text{ SLA Clear}} = 46,92 - 10 = 36,92 \text{ €/Pieza}$$

$$C_{Operativo \text{ SLA Tough}} = 52,60 - 10 = 42,60 \text{ €/Pieza}$$

El margen de contribución que se empleará en el análisis del punto de equilibrio y del ROI es:

$$M_{SLA \text{ Clear}}^* = 55 - 36,92 = 18,08 \text{ €/Pieza}$$

$$M_{SLA \text{ Tough}}^* = 55 - 42,60 = 12,40 \text{ €/Pieza}$$

De este modo, las unidades diarias de equilibrio para los moldes fabricados con Clear Resin y Tough Resin son:

$$Uds \text{ diarias equilibrio} = \frac{Inversión \text{ Inicial}}{Márgen \text{ unitario} \cdot T_{Amortización}}$$

$$Uds \text{ diarias equilibrio}_{Clear} = \frac{20.020}{18,08 \cdot 1.115} = 0,99 \text{ Piezas/Día}$$

$$Uds \text{ diarias equilibrio}_{Tough} = \frac{20.020}{12,40 \cdot 1.115} = 1,44 \text{ Piezas/Día}$$

Los resultados obtenidos muestran que, para recuperar la inversión dentro del periodo de amortización de cinco años, sería necesario fabricar y vender aproximadamente 0,99 piezas diarias con Clear Resin y 1,44 piezas diarias con Tough Resin. La menor exigencia de producción asociada a Clear Resin se debe a su mayor margen unitario, mientras que Tough Resin requiere un volumen de ventas superior debido a su mayor coste de fabricación. En

términos aproximados, estos valores equivalen a una pieza por día operativo para Clear Resin y a entre una y dos piezas diarias para Tough Resin.

5.4.7.2.2. Estudio del ROI

Una vez determinado el punto de equilibrio de la tecnología SLA/LFS, se procede a evaluar el retorno sobre la inversión mediante el cálculo del ROI. Este indicador permite relacionar el beneficio neto generado durante un periodo determinado con la inversión inicial realizada en los equipos. Para ello, se plantea un escenario de ventas común para Clear Resin y Tough Resin, utilizando en cada caso el margen de contribución previamente calculado. De este modo, puede compararse la rentabilidad de ambas alternativas y analizarse su capacidad para recuperar y superar el capital inicialmente invertido.

Para el cálculo del ROI se adopta un escenario común de venta de 350 piezas anuales. Este volumen supera el mínimo requerido para recuperar la inversión tanto con Clear Resin como con Tough Resin y permite comparar ambas alternativas bajo unas mismas condiciones de producción. La demanda considerada equivale a aproximadamente 1,56 piezas por día operativo y a la fabricación de 70 moldes anuales, suponiendo cinco usos por molde. Durante el periodo de amortización de cinco años se alcanzarían un total de 1.750 piezas vendidas.

El ROI no debe calcularse únicamente a partir de los ingresos por ventas, ya que también es necesario descontar los costes asociados a la fabricación de cada pieza. Por este motivo, se utiliza el margen de contribución unitario, definido como la diferencia entre el precio de venta y el coste operativo por pieza:

$$ROI(\%) = \frac{\text{Beneficio Neto}}{\text{Inversión Inicial}} \cdot 100$$

El margen total generado durante los 5 años se obtiene multiplicando este valor por el número de unidades vendidas y por los años previstos de amortización:

$$M_{\text{Anual Clear}} = 350 \cdot 18,08 \cdot 5 = 31.640 \text{ €}$$

$$M_{\text{Anual Tough}} = 350 \cdot 12,40 \cdot 5 = 21.700 \text{ €}$$

Por tanto, calculando el ROI:

$$ROI(\%)_{clear} = \frac{31.640 - 20.020}{20.020} = 58\%$$

$$ROI(\%)_{Tough} = \frac{21.700 - 20.020}{20.020} = 8,39\%$$

Los resultados muestran que ambas alternativas permiten recuperar la inversión inicial dentro del periodo de cinco años considerado. Sin embargo, la rentabilidad obtenida difiere de forma significativa. Clear Resin alcanza un ROI acumulado del 58 %, debido a su mayor margen de contribución por pieza. Por su parte, Tough Resin presenta un ROI del 8,39 %, por lo que, aunque la inversión también se recupera, el beneficio adicional generado resulta considerablemente menor. En consecuencia, Clear Resin constituye la opción económicamente más favorable, siempre que pueda garantizarse la reutilización del molde prevista en el análisis.

5.4.7.3. MJF

A diferencia de FDM, el elevado coste de fabricación del molde mediante MJF provoca que el escenario inicial de dos usos no resulte rentable con el precio de venta establecido. Por ello, antes de calcular el punto de equilibrio, es necesario determinar el número mínimo de ciclos de moldeo que debe soportar cada molde para obtener un margen unitario positivo.

$$Coste_{Pieza MJF} = \frac{301,30}{n} + 4,92 < 55$$

Resolviendo la inecuación obtenemos $n > 6,02$, y para que cumpla la condición, el número de veces que se ha de reutilizar el molde es de $n = 7$. Y por tanto recalculando el coste:

$$Coste_{Pieza MJF} = \frac{301,30}{7} + 4,92 = 47,96 \text{ €}$$

Si utilizamos el otro método empleado para costes obtenemos:

$$Coste_{Pieza MJF V2} = \frac{192,95}{n} + 4,92 < 55$$

Resolviendo la inecuación obtenemos $n > 3,85$, y para que cumpla la condición, el número de veces que se ha de reutilizar el molde es de $n = 4$. Y por tanto recalculando el coste:

$$Coste_{pieza MJF} = \frac{192,95}{4} + 4,92 = 53,16 \text{ €}$$

La comparación entre ambos métodos pone de manifiesto la influencia que tiene el modelo de cálculo sobre la rentabilidad estimada de la tecnología MJF. El método analítico requiere que el molde alcance siete usos totales para reducir el coste unitario hasta 47,96 €, mientras que el cálculo basado en el coste real del servicio permite obtener un margen positivo a partir de cuatro usos, con un coste de 53,16 € por pieza.

5.4.7.3.1. Estudio del punto de equilibrio

Para completar la evaluación económica de la tecnología MJF, se desarrolla un análisis del punto de equilibrio que permite determinar el número mínimo de piezas que deben fabricarse y venderse para recuperar la inversión inicial asociada a la adquisición del equipo. Este cálculo relaciona la inversión realizada con el margen de contribución obtenido por cada unidad vendida y con el horizonte temporal adoptado para la amortización de la máquina.

Para calcular la recuperación de la inversión inicial debe excluirse del coste unitario la parte correspondiente a la adquisición del equipo, ya que dicha inversión se introduce posteriormente de manera explícita en el cálculo del punto de equilibrio.

En este caso, se considera una inversión inicial de 80.000 €, correspondiente a la adquisición de la impresora MJF, y un horizonte de amortización de 5 años, con 223 días operativos anuales. Por tanto, el periodo total considerado asciende a:

$$T_{Amortización} = 223 \cdot 5 = 1.115 \text{ días}$$

De misma forma que para FDM y SLA, calcularemos los nuevos márgenes a los que les quitaremos la parte correspondiente a la amortización:

$$C_{Amortización} = \frac{80.000}{5 \cdot 1784} = 8,97 \text{ €/h}$$

Considerando un tiempo de impresión de 15 horas por molde y siete piezas obtenidas con cada molde:

$$C_{\text{Amortización impresión}} = \frac{8,97 \cdot 15}{7} = 19,22 \text{ €}$$

Considerando un tiempo de impresión de 15 horas por molde y cuatro piezas obtenidas con cada molde:

$$C_{\text{Amortización impresión}} = \frac{8,97 \cdot 15}{4} = 33,64 \text{ €}$$

Por tanto, el coste operativo por pieza, excluyendo únicamente la amortización del equipo, es:

$$C_{\text{Operativo MJF}} = 47,96 - 19,22 = 28,74 \text{ €/Pieza}$$

$$C_{\text{Operativo MJF V2}} = 53,16 - 33,64 = 19,52 \text{ €/Pieza}$$

El margen de contribución que se empleará en el análisis del punto de equilibrio y del ROI es:

$$M_{SLA MJF}^* = 55 - 28,74 = 26,26 \text{ €/Pieza}$$

$$M_{SLA MJF V2}^* = 55 - 19,52 = 35,48 \text{ €/Pieza}$$

De este modo, las unidades diarias de equilibrio para los moldes fabricados con MJF son:

$$Uds \text{ diarias equilibrio} = \frac{\text{Inversión Inicial}}{\text{Márgen unitario} \cdot T_{\text{Amortización}}}$$

$$Uds \text{ diarias equilibrio}_{MJF} = \frac{80.000}{26,26 \cdot 1.115} = 2,73 \text{ Piezas/Día}$$

$$Uds \text{ diarias equilibrio}_{MJF V2} = \frac{80.000}{35,48 \cdot 1.115} = 2,02 \text{ Piezas/Día}$$

Los resultados muestran que el modelo basado en el coste por volumen fabricado reduce la producción mínima necesaria para recuperar la inversión. En el cálculo analítico se requieren aproximadamente 2,73 piezas por día operativo, mientras que, al emplear el coste por cm³ obtenido para tandas de impresión con una elevada ocupación de la cámara, esta exigencia desciende hasta 2,02 piezas diarias. Esta diferencia se debe a que el aprovechamiento conjunto del volumen de fabricación permite repartir los costes del proceso entre un mayor

número de piezas, aumentando el margen unitario y facilitando la recuperación de la inversión inicial.

5.4.7.3.2. Estudio del ROI

Una vez determinado el punto de equilibrio de la tecnología MJF, se procede a calcular el retorno sobre la inversión para los dos métodos de estimación de costes considerados. Para realizar una comparación homogénea, se adopta un escenario de venta de 650 piezas anuales, equivalente a aproximadamente 2,91 piezas por día operativo. Este volumen supera las unidades mínimas requeridas en ambos casos para recuperar la inversión dentro del periodo de amortización de cinco años.

El ROI no debe calcularse únicamente a partir de los ingresos por ventas, ya que también es necesario descontar los costes asociados a la fabricación de cada pieza. Por este motivo, se utiliza el margen de contribución unitario, definido como la diferencia entre el precio de venta y el coste operativo por pieza:

$$ROI(\%) = \frac{\text{Beneficio Neto}}{\text{Inversión Inicial}} \cdot 100$$

El margen total generado durante los 5 años se obtiene multiplicando el margen de contribución unitario por el número de unidades vendidas y por los años previstos de amortización:

$$M_{\text{Anual MJF}} = 650 \cdot 26,26 \cdot 5 = 85.345 \text{ €}$$

$$M_{\text{Anual MJF V2}} = 650 \cdot 35,48 \cdot 5 = 115.310 \text{ €}$$

Por tanto, calculando el ROI:

$$ROI(\%)_{\text{MJF}} = \frac{85.345 - 80.000}{80.000} = 6,68\%$$

$$ROI(\%)_{\text{MJF V2}} = \frac{115.310 - 80.000}{80.000} = 44,14\%$$

Los resultados muestran que ambos escenarios permiten recuperar la inversión inicial dentro del periodo de cinco años. No obstante, el método basado en el coste por volumen fabricado presenta una rentabilidad claramente superior, con un ROI acumulado del 44,14 %, frente al 6,68 % obtenido mediante el cálculo analítico. Esta diferencia se debe al mejor aprovechamiento de la cámara de impresión, que reduce el coste unitario y aumenta el margen generado por cada pieza.

5.4.7.4. Resumen viabilidad económica

Tecnología	Ventas consideradas (piezas/año)	Piezas diarias de equilibrio	Periodo de amortización	ROI al finalizar el periodo
FDM	12	0,0266	2 años	104,65 %
SLA – Clear Resin	350	0,99	5 años	58,00 %
SLA – Tough Resin	350	1,44	5 años	8,39 %
MJF	650	2,73	5 años	6,68 %
MJF V2	650	2,02	5 años	44,14 %

Tabla 12. Tabla resumen viabilidad económica.

Los volúmenes de venta utilizados en el cálculo del ROI se han seleccionado de forma que superen la producción mínima necesaria para recuperar la inversión dentro del periodo de amortización establecido para cada equipo. Por tanto, no representan una previsión exacta de la demanda, sino escenarios de producción que permiten evaluar la rentabilidad de cada tecnología una vez cubierta la inversión inicial.

Los resultados muestran diferencias significativas entre las alternativas analizadas. La tecnología FDM presenta el escenario más favorable, ya que requiere una demanda de solo 0,0266 piezas por día operativo, equivalente aproximadamente a una pieza cada 38 días, y alcanza un ROI acumulado del 104,65 % al finalizar los dos años considerados. Su reducida inversión inicial, el bajo coste del filamento y el elevado margen de contribución hacen que sea la opción más realista y rentable para una pequeña empresa dedicada a la fabricación de componentes personalizados o series cortas de fibra de carbono forjada.

En el caso de SLA/LFS, Clear Resin ofrece una rentabilidad teórica superior a Tough Resin, con un ROI del 58 % frente al 8,39 %. Sin embargo, esta ventaja económica está condicionada a que el molde de Clear Resin pueda alcanzar los cinco usos considerados,

circunstancia que no quedó demostrada en el ensayo debido al desmoldeo destructivo. Tough Resin proporciona una mayor confianza respecto a la reutilización, aunque su mayor coste reduce considerablemente el margen y el retorno obtenido.

Por su parte, MJF exige los mayores volúmenes de producción debido a la elevada inversión inicial del equipo. El método analítico presenta un ROI limitado del 6,68 %, mientras que la estimación basada en el coste por cm³ eleva el retorno hasta el 44,14 %. Esta mejora se debe al aprovechamiento de tandas de impresión con una elevada ocupación de la cámara, que permite repartir los costes del proceso entre un mayor número de componentes. Aun así, las aproximadamente dos o tres piezas diarias necesarias para alcanzar el equilibrio hacen que la adquisición de un equipo MJF resulte difícil de justificar para una actividad centrada exclusivamente en series cortas.

En conjunto, el análisis confirma que FDM constituye la alternativa económicamente más viable para el escenario estudiado. SLA/LFS y MJF pueden resultar justificables cuando se prioricen el acabado superficial, la robustez, la precisión o la reutilización del molde, pero requieren inversiones superiores, una demanda más elevada y un control más riguroso de la vida útil del utillaje.

5.4.8. Evaluación de riesgos económicos y sensibilidad del proceso

Aunque los resultados obtenidos en los apartados anteriores muestran que las tres tecnologías pueden alcanzar la rentabilidad bajo determinadas condiciones de producción, es necesario complementar el análisis con una evaluación de los principales riesgos económicos. Los cálculos realizados parten de hipótesis constantes relativas al precio de venta, los costes de materiales y energía, la vida útil de los equipos, el número de usos de cada molde y el volumen anual de ventas. En una aplicación real, la variación de cualquiera de estos parámetros puede modificar de forma significativa el margen unitario, el punto de equilibrio y el retorno sobre la inversión.

Uno de los riesgos más relevantes es la insuficiente reutilización de los moldes. La viabilidad de SLA/LFS y MJF depende directamente de que cada molde alcance un número mínimo de ciclos de moldeo. En el caso de Clear Resin y Tough Resin se han considerado cinco usos totales, mientras que para MJF se requieren siete usos mediante el método analítico y cuatro

mediante el método basado en el coste por volumen. Si los moldes se deteriorasen antes de alcanzar dichos valores, el coste unitario superaría el precio de venta de 55 €.

La sensibilidad frente a este parámetro puede observarse reduciendo en una unidad el número de usos previsto. Para Clear Resin, cuatro usos elevarían el coste unitario hasta:

$$Coste_{Pieza\ SLA\ Clear} = \frac{210}{4} + 4,92 = 57,42\ €$$

$$Coste_{Pieza\ SLA\ Tough} = \frac{238,42}{4} + 4,92 = 64,53\ €$$

$$Coste_{Pieza\ MJF} = \frac{301,30}{6} + 4,92 = 55,14\ €$$

$$Coste_{Pieza\ MJF\ V2} = \frac{192,95}{3} + 4,92 = 69,24\ €$$

Estos resultados muestran que SLA/LFS y MJF presentan una elevada sensibilidad a la durabilidad real del molde. Una reducción de un solo ciclo puede eliminar completamente el margen económico previsto. En cambio, FDM mantiene un coste inferior al precio de venta incluso si el molde solo permitiera fabricar una pieza:

$$Coste_{Pieza\ FDM} = \frac{16,04}{1} + 4,92 = 20,96\ €$$

Por tanto, FDM ofrece un margen de seguridad considerablemente mayor frente a fallos prematuros del utillaje.

Otro factor crítico es la demanda anual. Los escenarios de ventas utilizados en el cálculo del ROI se han seleccionado para superar las unidades mínimas necesarias para recuperar cada inversión dentro del periodo de amortización. Sin embargo, una demanda inferior a la prevista prolongaría el tiempo de recuperación y podría generar un ROI negativo. Este riesgo es especialmente relevante en SLA/LFS y MJF, debido a la elevada inversión inicial y al alto volumen de ventas necesario. Por el contrario, el reducido coste de adquisición del equipo FDM permite recuperar la inversión con una demanda mucho menor.

La tecnología MJF presenta una sensibilidad adicional relacionada con el grado de ocupación de la cámara de impresión. El método basado en el coste por volumen supone la agrupación de varias piezas en una misma tanda, lo que permite repartir los costes fijos del ciclo. Si la máquina se utilizara con una ocupación reducida, el coste unitario se aproximaría al obtenido mediante el método analítico y disminuirían tanto el margen como el ROI. Por ello, la rentabilidad de esta tecnología depende de disponer de una carga de trabajo suficiente o de combinar la fabricación de moldes con la producción de otros componentes.

También deben considerarse las variaciones en el precio de los materiales. Los filamentos, las resinas fotopolimerizables, la PA12, la fibra de carbono y la resina epoxi pueden experimentar incrementos de precio que afecten directamente al coste de producción. Esta sensibilidad es mayor en SLA/LFS, debido al elevado consumo y precio de las resinas. Tough Resin es especialmente vulnerable, ya que su margen unitario es reducido incluso en el escenario de cinco usos. Un incremento moderado del precio de la resina podría hacer que su coste unitario volviera a superar el precio de venta.

El coste de la energía eléctrica constituye otro factor de incertidumbre, aunque su influencia no es igual en todas las tecnologías. En FDM, el bajo consumo del equipo hace que una subida de la tarifa eléctrica tenga un efecto limitado sobre el coste final. En SLA/LFS el impacto es algo mayor debido al tiempo prolongado de impresión, mientras que MJF presenta la mayor sensibilidad por la elevada potencia requerida durante el ciclo. No obstante, en los tres casos el coste del material y la amortización del equipo tienen un peso superior al de la electricidad.

El análisis también depende del precio de venta de 55 € por pieza. Una reducción del precio motivada por la competencia o por una menor disposición a pagar disminuiría directamente el margen unitario. FDM podría absorber mejor esta reducción gracias a su bajo coste de producción, mientras que Tough Resin y el segundo método de MJF presentan un margen más ajustado y perderían rentabilidad con pequeñas variaciones del precio.

Finalmente, debe considerarse el riesgo de obsolescencia tecnológica y mantenimiento. Los equipos SLA/LFS y MJF requieren una inversión elevada y pueden necesitar reparaciones, sustitución de componentes o actualizaciones durante su vida útil. Una parada prolongada

reduciría la capacidad productiva prevista y retrasaría la recuperación de la inversión. En FDM, este riesgo económico es inferior, ya que el coste de sustitución del equipo es reducido y existen más alternativas disponibles en el mercado.

Riesgo	Descripción	Impacto	Medida de mitigación
Durabilidad insuficiente del molde	El molde no alcanza el número mínimo de usos previsto	Alto	Mejorar el desmoldeo, aplicar recubrimientos
Demanda inferior a la prevista	No se alcanzan las ventas anuales utilizadas en el ROI	Alto	Producción bajo pedido, diversificación de productos
Aumento del coste de materiales	Incremento del precio de materias primas	Medio-Alto	Varios proveedores, compras agrupadas
Baja ocupación en MJF	La cámara se utiliza con pocas piezas y aumenta el coste unitario	Medio-Alto	Agrupar pedidos, fabricar otros componentes o externalizar el servicio
Variación del precio de la energía	Aumento del coste eléctrico por hora de fabricación	Bajo en FDM y medio en MJF	Optimizar tandas, reducir tiempos improductivos y contratar tarifas adecuadas
Fallos de impresión o piezas rechazadas	Pérdida de material, energía y tiempo de máquina	Medio	Control de parámetros, mantenimiento preventivo e inspección del molde
Reducción del precio de venta	La competencia obliga a vender por debajo de 55 €	Alto	Diferenciación mediante personalización, acabado y calidad

Obsolescencia y mantenimiento	El equipo pierde competitividad o requiere reparaciones	Alto en SLA/MJF	Mantenimiento preventivo, externalización puntual
-------------------------------	---	-----------------	---

Tabla 13. Tabla resumen riesgos.

En conjunto, el análisis de sensibilidad pone de manifiesto que el parámetro más crítico es el número real de usos alcanzado por cada molde, seguido del volumen anual de ventas y del coste de los materiales. SLA/LFS y MJF pueden resultar económicamente viables, pero necesitan una demanda elevada estable y una durabilidad mínima del utillaje que permita distribuir su elevado coste de fabricación. Además, MJF requiere una ocupación suficiente de la cámara para aprovechar las economías asociadas a la producción conjunta.

La tecnología FDM presenta una menor exposición a estos riesgos debido a su reducida inversión inicial y a su amplio margen unitario. Incluso ante una disminución de la vida útil del molde, un incremento de los costes o una demanda inferior a la prevista, el proceso mantiene una mayor capacidad para generar beneficios. Por ello, FDM se considera la alternativa más robusta y realista para iniciar una actividad de fabricación de piezas personalizadas o series cortas de fibra de carbono forjada.

Capítulo 6. Conclusiones y Líneas Futuras

El presente Trabajo Fin de Grado ha evaluado la viabilidad técnica y económica de fabricar moldes mediante tecnologías de impresión 3D para la producción de componentes de fibra de carbono forjada por moldeo por compresión. Para ello, se han estudiado moldes fabricados mediante FDM, SLA/LFS y MJF, analizando su comportamiento durante la impresión, el postprocesado, el moldeo, el desmoldeo y la posible reutilización.

Los resultados obtenidos confirman que la fabricación aditiva constituye una alternativa viable para producir utillajes destinados al prototipado y a las series cortas de materiales compuestos. No obstante, como ya se ha mencionado previamente, la calidad del resultado no depende únicamente de la tecnología de impresión seleccionada, sino de la combinación entre el material del molde, su orientación de fabricación, el acabado superficial, el agente desmoldeante, el sistema de compactación y el control del proceso de curado.

6.1. Conclusiones técnicas

Se ha demostrado experimentalmente que es posible fabricar piezas de fibra de carbono forjada empleando moldes poliméricos producidos mediante las tres tecnologías estudiadas. Cada alternativa presenta ventajas y limitaciones propias, por lo que no existe una tecnología óptima para todas las aplicaciones.

Uno de los factores más relevantes ha sido el sistema empleado para aplicar presión durante el curado. En el primer ensayo, realizado mediante una prensa hidráulica, la pérdida progresiva de presión provocó una compactación insuficiente, una mayor presencia de resina en la pieza y un acabado menos uniforme. En los ensayos posteriores, el empleo de gatos de apriete permitió mantener una presión más estable durante todo el proceso, favoreciendo la expulsión del exceso de resina y obteniendo resultados más consistentes.

La orientación de impresión también ha mostrado una influencia significativa en los moldes FDM. La orientación vertical mejoró el comportamiento del molde durante el desmoldeo. Sin embargo, esta orientación puede aumentar el tiempo de impresión y modificar la

resistencia del molde en función de la dirección de las capas, por lo que debe seleccionarse considerando simultáneamente el acabado y las solicitaciones mecánicas.

El postprocesado se confirma como una fase esencial. El lijado, el nivelador de capas y los agentes desmoldeantes permiten reducir la rugosidad, sellar la porosidad del molde y facilitar la separación de la pieza. Una preparación superficial insuficiente puede provocar defectos estéticos, adhesión entre molde y pieza o incluso la destrucción del utillaje durante el desmoldeo.

Desde el punto de vista económico, la tecnología FDM ha resultado la alternativa más accesible y rentable para el escenario analizado. Su baja inversión inicial y su reducido coste de fabricación permiten recuperar el equipo con un volumen de ventas reducido. SLA/LFS y MJF pueden alcanzar la rentabilidad, pero requieren un número mínimo de usos por molde y un volumen de producción mucho mayor para amortizar la inversión inicial.

6.2. Conclusiones sobre los moldes

Los moldes FDM ofrecen la mejor relación entre coste, facilidad de fabricación y flexibilidad. Su principal limitación es la rugosidad asociada a la deposición por capas, que puede transferirse a la pieza final. No obstante, mediante una orientación adecuada y la aplicación de tratamientos superficiales es posible obtener moldes funcionales para prototipos y producciones de bajo volumen.

Además, FDM presenta el mayor margen de seguridad económico frente a una reducción de la vida útil del molde. Incluso si cada molde únicamente permitiera fabricar una pieza, el coste unitario continuaría siendo inferior al precio de venta considerado. Esta característica reduce considerablemente el riesgo económico asociado a fallos prematuros o daños durante el desmoldeo.

Los moldes SLA/LFS proporcionaron el mejor acabado superficial inicial y la mayor definición geométrica. Sin embargo, el ensayo realizado con Clear Resin puso de manifiesto que una superficie lisa no garantiza por sí sola un desmoldeo adecuado. La adhesión producida entre la pieza y el molde provocó un desmoldeo destructivo, impidiendo demostrar su reutilización.

El molde fabricado con Tough Resin presentó una mayor resistencia durante el desmoldeo y pudo conservarse en condiciones reutilizables. No obstante, el mayor coste del material reduce notablemente su margen económico. Tanto Clear Resin como Tough Resin necesitan

alcanzar al menos cinco usos totales para obtener un coste por pieza inferior al precio de venta adoptado. En consecuencia, la viabilidad de SLA/LFS depende de garantizar experimentalmente esa vida útil mediante un sistema de desmoldeo y una barrera superficial adecuados.

El molde MJF fabricado en PA12 presentó un comportamiento mecánico robusto y la ausencia de soportes durante la fabricación y la capacidad de agrupar múltiples componentes en una misma cámara constituyen ventajas importantes. Sin embargo, la rugosidad propia del proceso y el elevado coste del equipo limitan su aplicación a escenarios con una producción suficiente o con una elevada ocupación del volumen de impresión.

El análisis económico de MJF ha mostrado una fuerte dependencia del método utilizado para estimar el coste. Cuando se calcula de forma analítica, el molde necesita alcanzar siete usos para obtener un margen positivo. Cuando se considera el coste por volumen correspondiente a tandas de impresión con elevada ocupación, el mínimo disminuye a cuatro usos. Esto demuestra que la rentabilidad de MJF depende especialmente del aprovechamiento de la cámara y de la agrupación de pedidos.

En términos generales, FDM constituye la opción más adecuada para prototipado, piezas personalizadas y series cortas. SLA/LFS resulta interesante cuando se priorizan la precisión y el acabado superficial, siempre que se controle el desmoldeo. MJF se plantea como una opción robusta para volúmenes mayores o para instalaciones en las que la máquina pueda utilizarse de forma continua para diferentes aplicaciones.

6.3. Conclusiones sobre el proceso de carbono forjado

El proceso de fabricación mediante fibra de carbono forjada ha demostrado ser adecuado para reproducir geometrías complejas y obtener piezas con un acabado visual característico. La distribución aleatoria de las fibras cortas facilita el llenado de la cavidad y permite adaptarse a formas que serían más difíciles de fabricar mediante tejidos continuos.

La calidad final depende en gran medida de la proporción entre fibra y resina. Una cantidad excesiva de resina provoca zonas brillantes, acumulaciones superficiales y una menor visibilidad del patrón de carbono. Por el contrario, una cantidad insuficiente puede dificultar la impregnación de las fibras y generar porosidad o falta de cohesión.

La presión aplicada durante el curado debe ser suficiente y mantenerse de forma constante para compactar el material y expulsar el exceso de resina. Además de la magnitud de la

presión, resulta importante su distribución uniforme sobre la superficie del molde. El empleo de placas o elementos intermedios puede ayudar a evitar concentraciones locales de carga. La reproducibilidad del proceso también depende de la preparación manual de la mezcla y de la distribución de las fibras dentro del molde. Por ello, sería conveniente establecer un procedimiento más normalizado para pesar, mezclar y colocar el material. En aplicaciones que requieran propiedades mecánicas elevadas en una dirección determinada, podría combinarse la fibra corta con tejidos, fibras continuas o refuerzos longitudinales. Esta modificación mejoraría el comportamiento estructural, aunque reduciría la naturaleza cuasiisótropa asociada a la distribución aleatoria.

6.4. Limitaciones del estudio

La principal limitación del trabajo es la ausencia de una caracterización cuantitativa completa de los moldes y de las piezas fabricadas. La evaluación se ha basado principalmente en la observación visual del acabado, el comportamiento durante el desmoldeo y el estado final de los moldes. Para realizar una comparación más precisa sería necesario medir la rugosidad superficial, la desviación dimensional respecto al modelo CAD y la porosidad de las piezas.

Tampoco se ha medido directamente la fuerza de cierre aplicada por los gatos ni la evolución de la presión durante el curado. Esta circunstancia dificulta establecer una relación cuantitativa entre presión, contenido de resina y calidad final.

El número de ciclos realizado con cada molde ha sido reducido. Por ello, la vida útil empleada en el análisis económico constituye en algunos casos una hipótesis y no un valor completamente validado experimentalmente. Esta limitación resulta especialmente relevante en Clear Resin, cuya reutilización no pudo comprobarse debido al desmoldeo destructivo.

No se han realizado ensayos mecánicos sobre las piezas de carbono forjado. Por tanto, no ha sido posible comparar su resistencia a tracción, flexión o impacto ni analizar la influencia de cada molde sobre las propiedades estructurales del componente.

El estudio económico se ha realizado a partir de valores estimados de inversión, consumo, utilización anual y precio de venta. Los resultados dependen del número de usos del molde, del volumen de ventas y del grado de utilización de los equipos. En particular, el coste de MJF puede variar considerablemente en función de la ocupación de la cámara y del modelo de fabricación, interno o externalizado.

Finalmente, solo se ha estudiado una geometría concreta. Los resultados no pueden trasladarse directamente a moldes de mayor tamaño, paredes más delgadas, cavidades profundas o geometrías con requerimientos de presión diferentes.

6.5. Líneas futuras

Como continuación del trabajo, se propone realizar una campaña de reutilización de los moldes para determinar experimentalmente su vida útil. Esta evaluación debería registrar la aparición de grietas, deformaciones, pérdida de acabado, desgaste superficial y deterioro del sistema desmoldeante después de cada ciclo.

También sería conveniente caracterizar dimensionalmente los moldes y las piezas mediante escáner 3D, máquina de medición por coordenadas o sistemas de perfilometría. Estas técnicas permitirían cuantificar la precisión geométrica, la contracción del material compuesto y la transferencia de defectos desde el molde.

Otra línea de trabajo consiste en medir la rugosidad superficial antes y después de los tratamientos de acabado. De este modo, podría determinarse la eficacia del lijado, del nivelador de capas, de los recubrimientos y del clear coat, así como su influencia sobre el acabado de la pieza final.

En los moldes de resina resulta necesario estudiar nuevos sistemas de barrera y desmoldeo. Se propone evaluar ceras, alcohol polivinílico, recubrimientos epoxi, pinturas de poliuretano o desmoldeantes semipermanentes, así como resinas de alta temperatura y formulaciones específicas para utillaje.

Para FDM, sería de interés comparar el PLA con materiales de mayor resistencia térmica y mecánica, como PETG, ABS, policarbonato o poliamidas reforzadas con fibra de carbono. También podrían estudiarse diferentes porcentajes de relleno, espesores de pared y orientaciones de impresión con el objetivo de optimizar simultáneamente el coste, el acabado y la vida útil.

En MJF se propone analizar diferentes grados de ocupación de cámara y fabricar varios moldes simultáneamente. Esto permitiría validar la relación entre coste por volumen, aprovechamiento de la tanda y rentabilidad del proceso. También sería útil comparar la fabricación propia con la externalización mediante proveedores especializados.

Respecto al carbono forjado, deberían realizarse ensayos mecánicos de tracción, flexión e impacto y relacionar los resultados con la proporción fibra-resina, la presión de

compactación y el sistema de curado. Asimismo, podría estudiarse la introducción de refuerzos continuos en zonas sometidas a mayores esfuerzos.

Finalmente, se recomienda ampliar el estudio a geometrías de diferente tamaño y complejidad, así como desarrollar una metodología de selección que permita elegir la tecnología de molde más adecuada en función del número de piezas, el acabado requerido, la inversión disponible y las condiciones del proceso.

6.6. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

El proyecto se encuentra principalmente alineado con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 9: Industria, Innovación e Infraestructura, al estudiar la integración de la fabricación aditiva en la producción de moldes para materiales compuestos. El uso de tecnologías digitales permite reducir los tiempos de desarrollo, facilitar la personalización y fabricar utillajes sin necesidad de recurrir a procesos convencionales de elevada inversión.

También existe una relación directa con el ODS 12: Producción y Consumo Responsables. La fabricación aditiva deposita material únicamente donde es necesario y puede reducir el desperdicio asociado al mecanizado de moldes. Además, la reutilización de los moldes permite repartir el impacto de su fabricación entre varias piezas. Sin embargo, esta contribución depende de alcanzar una vida útil suficiente, ya que la sustitución frecuente de moldes poliméricos generaría residuos adicionales.

El empleo de moldes FDM presenta ventajas por su bajo consumo energético y su reducida cantidad de material, aunque la utilización de PLA no elimina la necesidad de gestionar correctamente los residuos. En SLA/LFS deben considerarse los residuos de resina y alcohol isopropílico, que requieren manipulación y tratamiento adecuados. En MJF, el impacto depende del consumo energético del equipo, de la reutilización del polvo y del grado de ocupación de la cámara.

De manera indirecta, el trabajo también contribuye al ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico, al facilitar el acceso de pequeñas empresas y talleres a la fabricación de componentes personalizados de material compuesto. Especialmente en el caso de FDM, la baja inversión inicial puede favorecer el desarrollo de modelos de producción flexible y de pequeña escala.

En conjunto, el proyecto demuestra que la fabricación aditiva puede contribuir a una producción más flexible y eficiente, aunque la sostenibilidad final depende de seleccionar

adecuadamente la tecnología, maximizar la reutilización de los moldes, reducir las piezas defectuosas y gestionar correctamente los materiales y residuos generados.

Referencias

- [1] Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B., Khorasani, M. Additive Manufacturing Technologies. 3.^a ed. Springer, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-56127-7
- [2] Parandoush, P., Lin, D. «A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites». Composite Structures, vol. 182, pp. 36-53, 2017. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.08.088
- [3] Ngo, T.D. et al. «Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges». Composites Part B, vol. 143, pp. 172-196, 2018. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012
- [4] ASTM International; Wohlers Associates. «Wohlers Report 2025 shows 9.1% AM industry growth». ASTM International, 31 de marzo de 2025. Disponible en: <https://www.astm.org/news/press-releases/wohlers-report-2025>
- [5] Grand View Research. Carbon Fiber Market Size, Share & Trends Analysis Report, 2022-2030. Grand View Research, 2022.
- [6] Valentine, M.D.A. et al. «Additively manufactured cure tools for composites manufacture». Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 127, pp. 4237-4251, 2023. DOI: 10.1007/s00170-023-11254-y
- [7] Thompson, M.K. et al. «Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints». CIRP Annals, vol. 65, n.º 2, pp. 737-760, 2016.
- [8] Rosochowski, A., Matuszak, A. «Rapid tooling: the state of the art». J. Mater. Process. Technol., vol. 106, pp. 191-198, 2000.
- [9] Andreozzi, M. et al. «Investigation on the mechanical and environmental behaviour of 3D-printed molds for manufacturing of CFRP components». Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 135, pp. 4785-4802, 2024.
- [10] Chen, Y. et al. «3D printing of CF/nylon composite mold for CF/epoxy parabolic antenna». J. Eng. Fibers Fabrics, vol. 15, 2020.
- [11] Stratasy. «3D Printed Composite Tooling». Stratasy Application Guide, 2022.

-
- [12] Pelin, G. et al. «The Use of Additive Manufacturing Techniques in the Development of Polymeric Molds: A Review». *Polymers*, vol. 16, n.º 8, 1055, 2024.
- [13] ISO/ASTM 52900:2021. Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary.
- [14] Kalpakjian, S., Schmid, S. *Manufacturing Engineering and Technology*. 7.^a ed. Pearson, 2014.
- [15] Attaran, M. «The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing». *Business Horizons*, vol. 60, n.º 5, pp. 677-688, 2017.
- [16] Ford, S., Despeisse, M. «Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study». *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 1573-1587, 2016.
- [17] Chua, C.K., Leong, K.F. *3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications*. 5.^a ed. World Scientific, 2017.
- [18] Wohlers, T., Gornet, T. «History of additive manufacturing». *Wohlers Report 2016*, pp. 1-38, 2016.
- [19] Hull, C.W. *Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography*. US Patent US4575330A, 1986.
- [20] 3D Systems. «Our Story: The First 3D Printer». 3D Systems Corporate History, 2023.
- [21] Beaman, J.J. et al. «Additive manufacturing review: early past to current practice». *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 142, n.º 11, 2020.
- [22] Crump, S.S. *Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects*. US Patent US5121329, 1992.
- [23] Stratasys. «Stratasys Company History». Stratasys Corporate, 2023.
- [24] Bourell, D.L. «Perspectives on Additive Manufacturing». *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 46, pp. 1-18, 2016.
- [25] Jones, R. et al. «RepRap – the replicating rapid prototyper». *Robotica*, vol. 29, n.º 1, pp. 177-191, 2011.
-

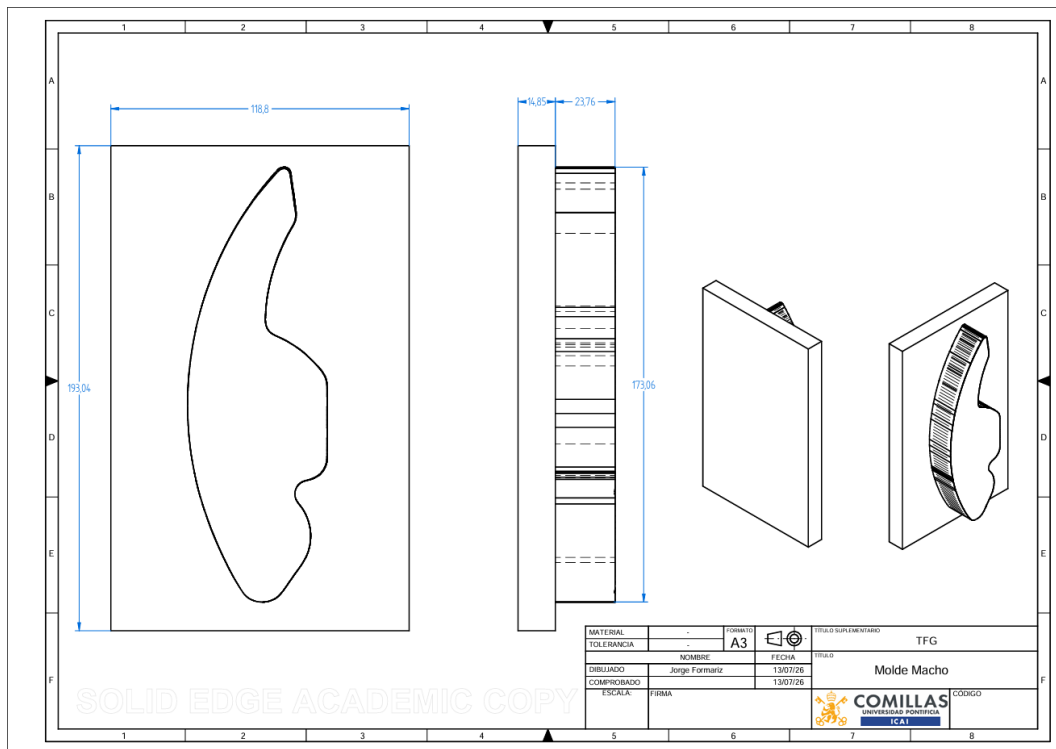
-
- [26] Bowyer, A. «3D Printing and Humanity's First Imperfect Replicator». 3D Print. Addit. Manuf., vol. 1, n.º 1, pp. 4-5, 2014.
- [27] Sells, E. et al. «RepRap: Maximizing Customizability by Breeding the Means of Production». Handbook of Research in Mass Customization, World Scientific, 2009.
- [28] Gao, W. et al. «The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering». Comput.-Aided Des., vol. 69, pp. 65-89, 2015.
- [29] Guo, N., Leu, M.C. «Additive manufacturing: technology, applications and research needs». Front. Mech. Eng., vol. 8, n.º 3, pp. 215-243, 2013.
- [30] Mohamed, O.A. et al. «Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review». Adv. Manuf., vol. 3, pp. 42-53, 2015.
- [31] Dey, A., Yodo, N. «A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization». J. Manuf. Mater. Process., vol. 3, n.º 3, 64, 2019.
- [32] Popescu, D. et al. «FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review». Polym. Test., vol. 69, pp. 157-166, 2018.
- [33] Lušić, M. et al. «A case study on the capability of rapid tooling thermoplastic laminating moulds for CFRP components in autoclaves». Procedia CIRP, vol. 33, pp. 358-363, 2015.
- [34] Pagac, M. et al. «A Review of Vat Photopolymerization Technology». Polymers, vol. 13, n.º 4, 598, 2021.
- [35] Formlabs. «Guide to 3D Printing Tolerances, Accuracy, and Precision». Formlabs White Paper, 2023.
- [36] Dizon, J.R.C. et al. «Mechanical characterization of 3D-printed polymers». Addit. Manuf., vol. 20, pp. 44-67, 2018.
- [37] Formlabs. «3D Printed Molds for Carbon Fiber and Composite Parts». Formlabs Application Guide, 2023.
- [38] Goodridge, R.D. et al. «Laser sintering of polyamides and other polymers». Prog. Mater. Sci., vol. 57, n.º 2, pp. 229-267, 2012.
- [39] HP Inc. «HP Multi Jet Fusion Technology: A manufacturing revolution». HP White Paper, 2022.
-

-
- [40] Dizon, J.R.C. et al. «Three-dimensional-printed molds and materials for injection molding and rapid tooling applications». *MRS Commun.*, vol. 9, pp. 1267-1283, 2019.
- [41] Rosato, D.V. *Plastics Engineered Product Design*. Elsevier, 2003.
- [42] Menges, G. et al. *How to Make Injection Molds*. 3.^a ed. Hanser, 2001.
- [43] Duty, C.E. et al. «Structure and mechanical behavior of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) materials». *Rapid Prototyp. J.*, vol. 23, n.º 1, pp. 181-189, 2017.
- [44] Mallick, P.K. *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. 3.^a ed. CRC Press, 2008.
- [45] Campbell, F.C. *Structural Composite Materials*. ASM International, 2010.
- [46] Morgan, P. *Carbon Fibers and Their Composites*. CRC Press, 2005.
- [47] Feraboli, P. et al. «Stochastic laminate analogy for simulating the variability in modulus of discontinuous composite materials». *Composites Part A*, vol. 41, n.º 4, pp. 557-570, 2010.
- [48] Toray Industries. «Technical Data Sheet: TORAYCA T300 / T700 / M40J Carbon Fiber». Toray Industries, 2023.
- [49] Fibre Glast. «Forged Carbon Fiber: What It Is and How It Compares». Fibre Glast Developments Corp., 2023.
- [50] Easy Composites. «What is Forged Carbon Fibre?». Easy Composites Ltd., 2023.
- [51] Bambu Lab. «Bambu Lab X1 Carbon Technical Specifications». Ficha técnica del fabricante. Disponible en: <https://bambulab.com>
- [52] Formlabs. «Form 3 and Form 3L Technical Specifications». Ficha técnica del fabricante. Disponible en: <https://formlabs.com>
- [53] HP Inc. «HP Jet Fusion 500/300 Series 3D Printers: Technical Specifications». Ficha técnica del fabricante. Disponible en: <https://www.hp.com>
- [54] Formlabs. «Clear Resin V4 – Technical Data Sheet». Formlabs, 2023. Disponible en: <https://formlabs.com/store/materials/clear-resin/>
-

[55] Formlabs. «Tough 2000 Resin V1 – Technical Data Sheet (FLTO2001)». Formlabs, 2020. Disponible en: <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/2001340-TDS-ENUS-0P.pdf>

Anexo A. Planos moldes impresos

A.1. Plano Molde Macho



A.2. Plano Molde Hembra

