

Aplicación de Tecnologías de Fabricación Aditiva con Materiales Plásticos Reforzados al Diseño y Optimización de Moldes de Inyección en la Fabricación de Series Cortas

Jorge Manuel Mercado-Colmenero^{1,2}, Javier Padilla-Castaño¹, Cristina Martin-Doñate^{1,2 *}

¹Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos, Universidad de Jaén. Email *: cdonate@ujaen.es

²Grupo de Investigación en Ingeniería Gráfica y Diseño Industrial INGDISIG Jaen

Resumen

La creciente demanda de componentes complejos de plástico en tiradas cortas ha redefinido los procesos de fabricación. La tecnología de fabricación aditiva facilita la creación de productos personalizados con geometrías complejas y ciclos de vida más cortos, aunque su anisotropía limita la producción de componentes plásticos funcionales. Las tecnologías de rapid tooling superan esta limitación, permitiendo la fabricación rápida y eficiente de componentes plásticos comparables a los producidos en serie. Este trabajo de investigación presenta los resultados del uso de material plástico PA reforzado con fibra de carbono en la fabricación de moldes para inyección, evaluando su comportamiento mecánico mediante simulaciones numéricas bajo condiciones operativas reales. Los resultados muestran una distribución uniforme de tensiones en la cavidad del molde, con valores de 25 MPa y 18 MPa, sin superar el límite elástico del material plástico. Los desplazamientos máximos obtenidos son de 0.095 mm y 0.041 mm, asegurando la integridad estructural de los insertos durante su condición de servicio. Los resultados subrayan el notable potencial de los materiales plásticos para la fabricación de moldes en tiradas cortas, ofreciendo una solución eficiente y rentable para la producción de componentes poliméricos complejos y personalizados, adaptados a las necesidades específicas del mercado.

Palabras clave: moldeo por inyección, fabricación aditiva, CAD, diseño industrial, impresión 3D

Abstract

The increasing demand for complex components for prototyping has redefined manufacturing processes. Additive manufacturing technology facilitates the creation of customized products with complex geometries and shorter life cycles, although its anisotropy limits the production of functional plastic components. Rapid tooling technologies overcome this limitation, enabling the quick and efficient fabrication of plastic components comparable to those produced in series. This research presents the results of using carbon fiber-reinforced PA plastic in mold injection manufacturing, evaluating its mechanical behavior through numerical simulations under real operating conditions. The results show a uniform stress distribution in the mold cavity, with values of 25 MPa and 18 MPa, without exceeding the material's yield strength. The maximum displacements obtained are 0.095 mm and 0.041 mm, ensuring the structural integrity of the inserts during service. The findings highlight the remarkable potential of plastic materials for short-run mold manufacturing, offering an efficient and cost-effective solution for producing complex and customized polymeric components, tailored to specific market needs.

Keywords: injection molding, additive manufacturing, CAD, industrial design

1. Introducción

El moldeo por inyección es un proceso de manufactura en el cual un polímero termoplástico fundido se inyecta a alta presión en la cavidad de un molde [1]. Una vez dentro del molde, el material se enfría y solidifica, tomando la forma deseada del producto final [2]. Este método es ampliamente valorado en la industria por su

capacidad para producir piezas con geometrías complejas y tolerancias dimensionales precisas, además de su alta eficiencia en términos de costo y tiempos de ciclo de producción [3]. La fabricación de moldes de acero requiere de múltiples operaciones de mecanizado, incluyendo taladrado y fresado, los cuales son procesos significativamente costosos y que demandan una considerable cantidad de tiempo [4]. En

consecuencia, su utilización se restringe predominantemente a aplicaciones que requieren la producción de grandes volúmenes de piezas. Sin embargo, con la transición de la industria desde la producción en masa hacia un enfoque de fabricación bajo demanda, y la necesidad imperante de desarrollar nuevos productos con mayor rapidez, los fabricantes de moldes de inyección (IM) se enfrentan a nuevos desafíos. La velocidad en el desarrollo de productos se ha convertido en un factor crítico para mantenerse competitivos. En este contexto, los fabricantes de moldes de inyección deben responder a la creciente demanda de soluciones de manufactura de utillaje rápido. Estas soluciones son esenciales para gestionar eficientemente lotes de bajo volumen y facilitar el prototipado rápido, permitiendo a las empresas iterar y lanzar productos al mercado en tiempos significativamente reducidos. En este contexto, la fabricación aditiva (AM) ha surgido como una tecnología prometedora que permite la producción de moldes basados en polímeros con geometrías complejas a un costo menor, al mismo tiempo que reduce el tiempo de fabricación.

A pesar de las ventajas asociadas al uso de moldes plásticos fabricados mediante manufactura aditiva (AM), sus propiedades termomecánicas son distintas a las de los moldes de acero. En este contexto, numerosos investigadores han centrado sus estudios en abordar estas diferencias. Krizma et al. [5] utilizaron la tecnología MEX para producir insertos de moldes de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Estos insertos, con distintos niveles de relleno (80 %, 50 % y 25 %), demostraron ser adecuados para el moldeo por inyección de bajo volumen. La fabricación aditiva con materiales compuestos se ha empleado para crear placas de moldes con fibra de carbono de larga longitud y material PEEK [6]. En este trabajo las placas fabricadas aditivamente se instalaron en una máquina de moldeo por inyección para producir piezas planas rectangulares de ABS Lustran 348. Las pruebas de tracción realizadas en estas piezas, comparadas con las producidas utilizando moldes tradicionales de acero P20, mostraron piezas con una resistencia a la tracción dentro del 5 % de las piezas tradicionales. Storti et al. [7] realizaron un estudio numérico sobre la mejora de la transferencia de calor dentro de un inserto impreso en 3D de material termoplástico con CCs (Canales de enfriamiento conformal). En esta investigación se realizó una caracterización térmica experimental en muestras compuestas impresas de policarbonato reforzado con fibras de carbono. La configuración optimizada de CCs mejoró la uniformidad de la temperatura de la superficie de las piezas en un 42 % reduciendo su delta de temperatura en más de 6 °C. Davoudinejad et al. [8] aplicaron un envejecimiento térmico acelerado a los insertos de moldes AM para simular condiciones continuas de producción y evaluar su durabilidad a largo plazo. Siguiendo este contexto,

Bagalkot et al. [9] investigaron el uso de insertos de moldes impresos en 3D (3DIM) desde el punto de vista de la rentabilidad para el moldeo por inyección de bajo volumen. Aunque se creía que los fallos en los 3DIM se debían a esfuerzos de flexión y cortante inducidos por presiones de inyección, un análisis teórico y experimental reveló que estas roturas no estaban causadas por dichas presiones.

En esta línea la investigación presentada en el paper expone los resultados del uso de un material plástico Poliamida 6 (PA6) reforzado con fibra de carbono para la fabricación de moldes de inyección de plástico. El estudio se centró en un caso industrial de moldes de inyección, sometidos a condiciones de carga real, evaluando su respuesta mecánica y estructural mediante análisis numérico. Las conclusiones destacan el potencial de los materiales plásticos en la fabricación de moldes para producciones de tiradas cortas, subrayando su eficiencia en la producción de componentes poliméricos bajo estas especificaciones. Este enfoque representa una vía prometedora para investigaciones futuras en la optimización y aplicación de materiales plásticos en la industria del moldeo por inyección.

2. Metodología

En esta sección se describen las características geométricas, funcionales y de manufactura del molde de inyección caso de estudio. Se proporciona información técnica sobre la selección del material plástico para el proceso de moldeo por inyección, así como las condiciones operativas específicas del proceso de manufactura.

2.1. Características Geométricas y Funcionales

La Figura 1, Figura 2 y Figura 3 ilustran las características geométricas de la pieza plástica objeto de estudio, junto con la geometría de las placas de cavidad y núcleo destinadas a su fabricación. La pieza que se desea fabricar está destinada a un uso como embellecedor de un dron. Esta pieza tiene como objetivo aumentar la rigidez del conjunto, además de proteger los componentes electrónicos y las baterías del dispositivo. Las dimensiones principales de la pieza son 201 mm de largo, 201 mm de ancho, 32 mm de alto y 3 mm de espesor. Se han considerado criterios de diseño que optimizan los espesores, evitando acumulaciones innecesarias de material, prestando especial atención a los redondeos, torretas y refuerzos, donde normalmente se concentran las tensiones.

El diseño del molde incorpora una parrilla de nervios cruzados en la parte interior de la pieza, junto con torretas que permiten una unión desmontable a la carcasa inferior del dron. La expulsión de la pieza se realiza mediante 15 expulsores cilíndricos. Además, se incluye un sistema de refrigeración por canales rectos

en las zonas de cavidad y núcleo, con un diámetro de 9 mm. Las dimensiones de las placas de cavidad y núcleo son 546 mm en el eje X, 546 mm en el eje Y, y una profundidad de 176 mm en el eje Z. El diseño de la pieza a moldear y del molde completo se ha realizado utilizando el software comercial de Dassault Systems Catia V5 [9].



Figura 1.- Geometría de la pieza de plástico objeto de estudio.
Fuente: elaboración propia

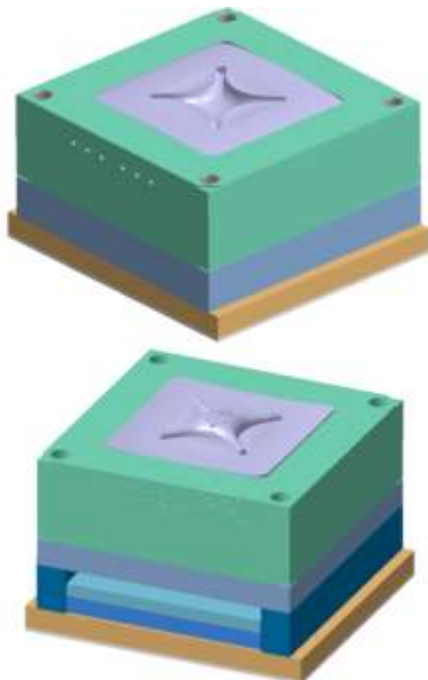


Figura 2.- Diseño de las placas principales del molde de inyección.
Fuente: elaboración propia

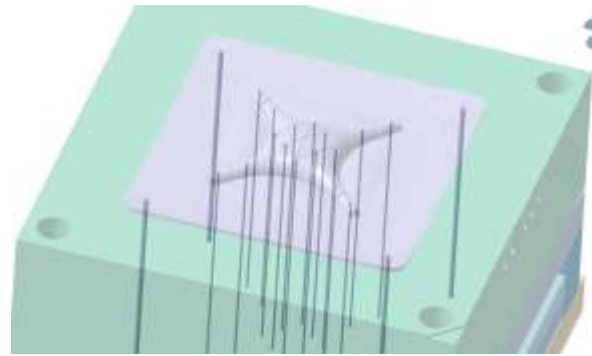


Figura 3.- Localización de los expulsores. Fuente: elaboración propia

2.2. Simulaciones numéricas mediante el MEF

Para verificar el comportamiento estructural del diseño de los insertos principales del molde de inyección, para el presente caso de estudio (véase Figura 2), se han modelado simulaciones numéricas de mediante el software comercial Ansys Mechanical [10] de tipo mecánicas – estáticas. Para ello, se establece el escenario de cargas más restrictivo al que están sometidas las geometrías objeto de estudio. Tal y como se muestra en Figura 4 durante la fase de inyección de la pieza de plástico, se alcanza la presión máxima en la cavidad del molde. De esta forma, los insertos del molde de inyección deben ser capaces de resistir esta condición de servicio sin superar el límite elástico de su material plástico y no superar un desplazamiento máximo de 0.1 mm, siendo éste uno de los requerimientos tecnológicos principales en el sector industrial de los moldes de inyección. Para evaluar la magnitud de este parámetro, se realiza una simulación reológica para modelar la fase de llenado de la cavidad del molde mediante el software comercial Autodesk Moldflow Adviser 2024 [11]. Tabla 1, muestra la configuración y magnitud de los parámetros establecidos para la simulación del proceso de llenado de la cavidad del molde, para el material plástico PP (Polipropileno).

Tabla 1. Configuración de la simulación reológica para el análisis de la fase de llenado de la pieza de plástico.

Parámetro	Unidad	Magnitud
Temperatura de inyección	°C	180
Temperatura del molde	°C	20
Presión máxima de la máquina inyectora	MPa	180
Tiempo de inyección de la máquina	s	0.765

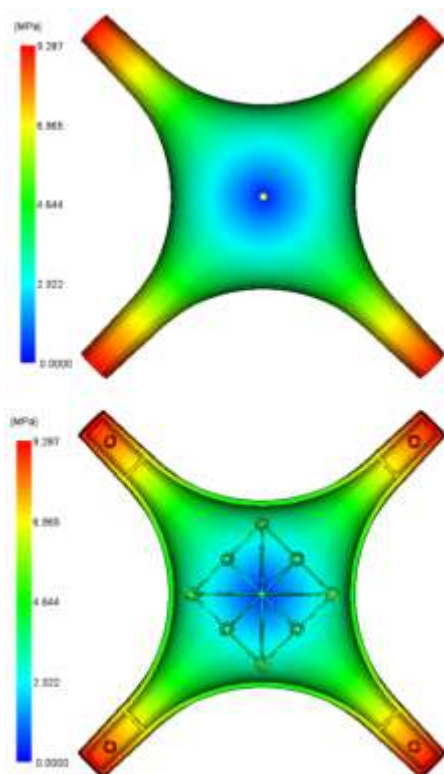


Figura 4.- Mapa de presiones de inyección de la pieza de plástico. Fuente: elaboración propia

El material plástico asignado para la fabricación de los insertos del molde de inyección es Therma-Tech™ TT6600-5008 X1 EC Anthracite. Este material plástico es fabricado y distribuido por la empresa Avient [12] y se trata de un derivado de PA (Poliamida), con nombre comercial Polyamide 66 (Nylon 66). Las propiedades mecánicas y térmicas de este material plástico se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades mecánicas y térmicas para el material plástico de los insertos del molde de inyección.

Parámetro	Unidad	Magnitud
Densidad	g/cm ³	1.58
Módulo elástico	MPa	12,500
Coeficiente de Poisson	—	0.3
Límite elástico	MPa	65
Coeficiente de dilatación térmica	1/°C	$7 \cdot 10^{-5}$
Temperatura del molde	°C	20

Para simplificar el proceso de modelado de la simulación mecánica y definir un escenario de cargas que garantice la integridad estructural de los elementos analizados, se establece, tal y como se muestra en Figura 5, una presión uniforme a lo largo de las superficies de la cavidad de los insertos, con una magnitud igual a la presión máxima obtenida durante la fase de inyección.

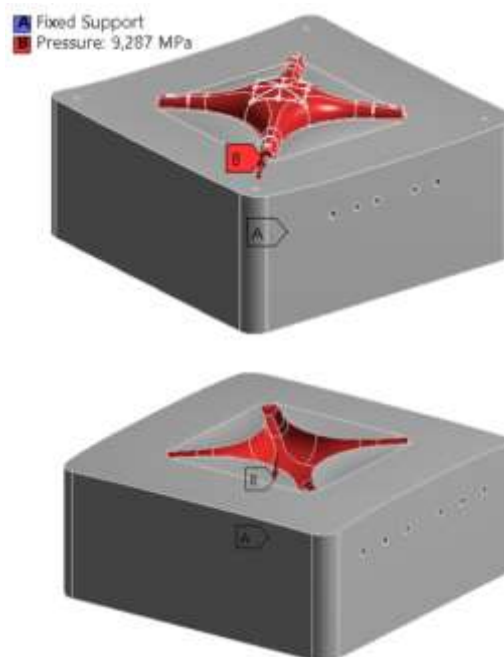


Figura 5.- Definición del escenario de cargas y condiciones de contorno de las simulaciones numéricas. Fuente: elaboración propia

Asimismo, para completar las condiciones de contorno, se aplica un soporte o apoyo fijo para todas las superficies de los insertos en contacto con las placas principales del molde de inyección y una condición térmica para garantizar que la geometría se encuentra a la temperatura de servicio del molde de inyección, es decir 20°C, véase Figura 5 y Tabla 1.

Para discretizar la geometría de los insertos y generar la malla para el modelado de la simulación numérica (véase Figura 6 y Figura 7), se han empleado elementos de tipo tetraédrico de segundo orden (Solid92, 10 nodos). Asimismo, el tamaño o dimensión de los elementos tetraédricos empleados es igual a 4 mm. La simulación numérica se ha realizado utilizando el software Ansys 16[13].

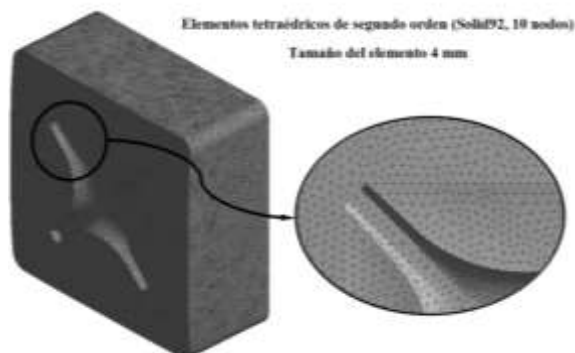


Figura 6.- Definición de la malla para el inserto de cavidad del molde de inyección. Fuente: elaboración propia

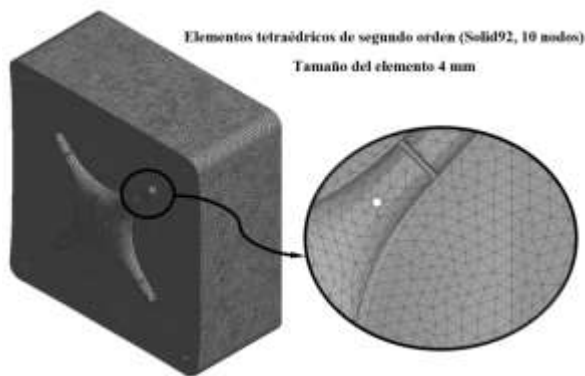


Figura 7.- Definición de la malla para el inserto de core del molde de inyección. Fuente: elaboración propia

3. Resultados

Figura 7 y Tabla 3 muestran la magnitud del mapa de tensiones de Von – Mises a lo largo de la superficie de la pieza de plástico. Como se puede comprobar, a pesar de tener unos valores de tensiones máximas iguales 18.549 MPa y 53.428 MPa, respectivamente, el mapa de tensiones se distribuye de manera uniforme a lo largo de la superficie de la cavidad del molde con una magnitud igual a 4.18 MPa y 15.93 MPa. Además, atendiendo a las propiedades mecánicas del material plástico descritas en Tabla 2, se comprueba que, durante el proceso de inyección, el material plástico de los insertos no supera su límite elástico y, por tanto, se mantiene su seguridad estructural de este material durante su condición de servicio.

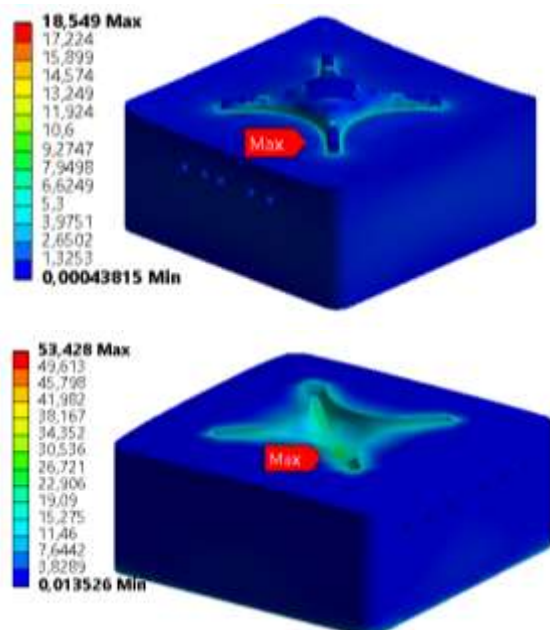


Figura 7.- Mapa de tensiones de Von – Mises [MPa] a lo largo de la superficie de los insertos del molde de inyección. Fuente: elaboración propia

Por otro lado, Figura 8 y Tabla 3 muestran el mapa de desplazamientos a lo largo de la superficie de la pieza de plástico. Los resultados muestran que el campo de desplazamientos en la superficie de los insertos está dominado por los efectos de la expansión térmica del material. Este comportamiento térmico del material presenta mayor influencia en el campo de desplazamientos que la propia deformación generada por el efecto de la presión de inyección. Es decir, los efectos térmicos de la expansión del material tienen prioridad sobre los efectos de la presión de inyección en la cavidad del molde. Asimismo, los desplazamientos máximos obtenidos son iguales a 0.056 mm y 0.067 mm, sentido positivo en la dirección del eje transversal de los insertos, no sobrepasando en ningún caso el valor de 0.1 mm.

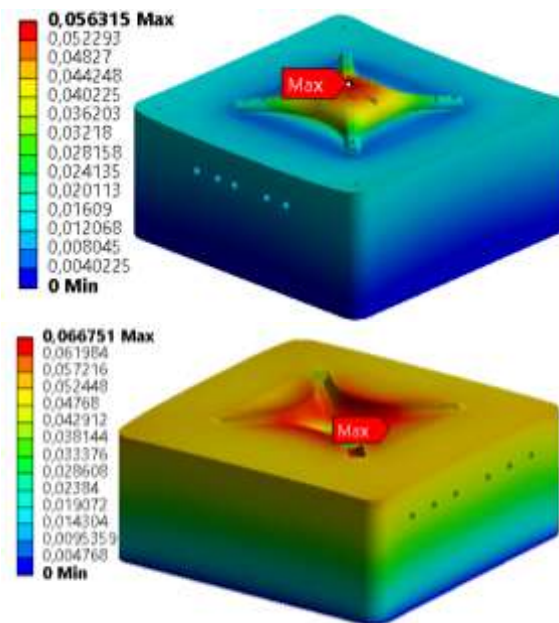


Figura 8.- Mapa de desplazamientos [mm] a lo largo de la superficie de los insertos del molde de inyección. Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Resultados obtenidos de las simulaciones numéricas realizadas.

Valores Máximos		PA reforzado	Acero P20
Tensión Von-Mises [MPa]	Cavidad	53.428	65.899
	Core	18.549	17.828
Desplazamientos [mm]	Cavidad	0.067	0.006
	Core	0.056	0.003

Asimismo, Tabla 3 compara los resultados máximos obtenidos en las simulaciones numéricas realizadas para el material plástico de los insertos del molde inyección con los resultados obtenidos con un material metálico, acero P – 20, bajo las mismas condiciones de

contorno y escenario de carga. Como se puede comprobar, los valores de tensiones máximas son análogos para ambos materiales, pues tanto la geometría como el escenario de cargas y las condiciones de contorno se mantienen constantes para las simulaciones realizadas. La reducida diferencia está derivada de las tensiones generadas por la condición térmica, impuesta en la geometría de estudio, para que los insertos se encuentren bajo la condición de servicio y temperatura del molde de inyección. Dado que el coeficiente de dilatación térmica de ambos materiales es diferente, las tensiones secundarias producidas del efecto de la temperatura también lo son. A pesar de que este efecto no represente una componente principal en el mapa de tensiones, justifica las diferencias obtenidas en los resultados numéricos de ambos materiales. Por otro lado, los valores máximos de desplazamientos obtenidos para ambos materiales difieren notablemente. Este resultado se debe, principalmente, a la diferencia en el parámetro de módulo elástico y coeficiente de dilatación térmica entre ambos materiales. No obstante, cabe destacar los resultados obtenidos, para ambos materiales, a pesar de diferir por sus propiedades elásticas y mecánicas, cumplen los requerimientos mecánicos y estructurales de diseño.

Finalmente, a partir del modelado numérico de las simulaciones mecánicas realizadas, se puede comprobar que el comportamiento estructural del material plástico, PA reforzado, para los insertos del molde de inyección es válido y cumple con los requerimientos establecidos en el sector industrial de los moldes de inyección, pues el campo de tensiones no supera el límite elástico del material y, como se muestra en Tabla 3, los desplazamientos máximos obtenidos son, para ambas geometrías de los insertos del molde, inferiores a 0.1mm.

4. Conclusiones

El presente trabajo de investigación evalúa el performance mecánico de moldes de inyección fabricados con material plástico PA reforzado. Mediante el uso de simulaciones numéricas bajo condiciones operativas reales, se ha podido analizar exhaustivamente el comportamiento mecánico de estos moldes. Los resultados obtenidos confirman que los moldes de plástico son capaces de cumplir con los exigentes requisitos estructurales necesarios para producciones en tiradas cortas. Estos resultados no solo subrayan la viabilidad técnica de los moldes de plástico en la industria del moldeo por inyección, sino que también abre nuevas perspectivas para futuras investigaciones y aplicaciones. La capacidad de estos moldes para fabricar componentes poliméricos complejos y personalizados es crucial, especialmente en un contexto donde la demanda de personalización y ciclos de desarrollo acelerados es cada vez más común.

Además, este trabajo sugiere una dirección prometedora para investigaciones futuras, especialmente en la mejora continua de los materiales plásticos utilizados en la fabricación de moldes y en la validación experimental de los resultados. La exploración de nuevos materiales y técnicas de fabricación aditiva podría llevar a mejoras significativas en la resistencia, durabilidad y rendimiento térmico de los moldes de plástico, allanando el camino para aplicaciones aún más amplias y sofisticadas en la industria del moldeo por inyección.

Funding

This research was funded by the University of Jaen grant number [ACCION 1 PAIUJA2023-24: TIC-159] through the Research Support Plan 2023-2024 INGISIG Research Group TIC- 159.

References

- [1] Mendible, G.A.; Rulander, J.A.; Johnston, S.P. Comparative study of rapid and conventional tooling for plastics injection molding. *Rapid Prototyp. J.* 2017, 23, 344–352.
- [2] Huzaim, N. H. M., Rahim, S. Z. A., Musa, L., Abdellah, A. E. H., Abdullah, M. M. A. B., Rennie, A., ... & Nabialek, M. (2022). Potential of rapid tooling in rapid heat cycle molding: a review. *Materials*, 15(10), 3725.
- [3] Junk, S., Schrock, S., & Schmieder, N. (2023, September). Review and development of design guidelines for additive tooling of injection molds using PolyJet modelling. In *International Conference on Additive Manufacturing in Products and Applications* (pp. 35-45). Cham: Springer International Publishing.
- [4] Huzaim, N. H. M., Rahim, S. Z. A., Musa, L., Abdellah, A. H., Abdullah, M. M. A. B., Rennie, A., ... & Nabialek, M. (2022). Potential of Rapid Tooling in Rapid Heat Cycle Molding: A Review. *Materials* 2022, 15, 3725. *Future Trends in Advanced Materials and Processes*, 301.
- [5] Krizma, S., & Suplicz, A. (2023). Analysis of the applicability and state monitoring of material extrusion–printed acrylonitrile butadiene styrene injection mould inserts with different infill levels. *Materials Today Communications*, 35, 106294.
- [6] Bivens, C., Wood, A., Ruble, D., Rangapuram, M., Dasari, S. K., Chandrashekhara, K., & DeGrange, J. (2023). Additively manufactured carbon fiber-reinforced thermoplastic composite mold plates for injection molding process. *Applied Composite Materials*, 30(5), 1569-1586.
- [7] Storti, B. A., & Sobotka, V. (2024). A numerical framework for three-dimensional optimization of cooling channels in thermoplastic printed molds. *Applied Thermal Engineering*, 238, 121988.

[8] Davoudinejad, A., Khosravani, M. R., Pedersen, D. B., & Tosello, G. (2020). Influence of thermal ageing on the fracture and lifetime of additively manufactured mold inserts. *Engineering Failure Analysis*, 115, 104694.

[9] Bagalkot, A., Pons, D., Symons, D., & Clucas, D. (2021). Analysis of raised feature failures on 3D printed injection moulds. *Polymers*, 13(10), 1541.

[10] Catia V5 <https://www.3ds.com/products/catia/catia-v5>

[11] <https://www.ansys.com>

[12] <https://www.autodesk.com/es/support/technical/product/moldflow-adviser>

[13] <https://www.avient.com/>