

# Aplicación de nuevos sistemas de refrigeración conformal para moldes de inyección sostenibles

Abelardo Torres-Alba<sup>1-2</sup>, Jorge Manuel Mercado-Colmenero<sup>1-2</sup>, Jose Antonio Amate-Teva<sup>1-2</sup>, Cristina Martín-Doñate<sup>1-2\*</sup>

<sup>1\*</sup> Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos, Campus Las Lagunillas s/n., Universidad de Jaén, Edificio A3-210, 23071 Jaen, Spain . [cdonate@ujaen.es](mailto:cdonate@ujaen.es)

<sup>2\*</sup> Grupo de Investigación INGDISIG Jaén, Campus Las Lagunillas s/n., Universidad de Jaén, Edificio A3-210, 23071 Jaen, Spain . [cdonate@ujaen.es](mailto:cdonate@ujaen.es)

## Resumen

La fase de refrigeración en el tiempo ciclo del proceso de moldeo por inyección es actualmente la de mayor influencia en el gasto energético, y sostenibilidad. Los diseños tradicionales no son capaces de realizar un intercambio térmico adecuado entre el fluido refrigerante y la cavidad especialmente en piezas con geometrías complejas y núcleos profundos. En esta línea los canales de refrigeración conformal aportan una mayor flexibilidad al diseño consiguiendo un intercambio térmico entre las capas superficiales e internas de la pieza eficiente. La investigación presenta la aplicación de un nuevo sistema de refrigeración conformal para el enfriamiento de una pieza plástica compleja con gran profundidad donde el uso de la refrigeración tradicional es ineficiente. Los resultados de la investigación mejoran enormemente la uniformidad de temperaturas en la superficie de la pieza reduciendo el tiempo ciclo en más del 37%. Estos resultados se alinean perfectamente con el objetivo de mejora de la sostenibilidad y eficiencia del proceso.

**Palabras clave:** Conformal cooling; Injection molding; Sustainability; Industrial design.

## Abstract

The cooling phase in the cycle time of the injection molding process is currently the one with the greatest influence on energy expenditure and sustainability. Traditional designs are not able to carry out an adequate thermal exchange between the cooling fluid and the cavity, especially in parts with complex geometries and deep cores. In this line, the conformal cooling channels provide greater flexibility to the design, achieving efficient heat exchange between the surface and internal layers of the part. The research presents the application of a new conformal cooling system for the cooling of a complex plastic piece of great depth where the use of traditional cooling is inefficient. The results of the research greatly improve the uniformity of temperatures on the surface of the part, reducing the cycle time by more than 40%. These results are perfectly aligned with the objective of improving the sustainability and efficiency of the process.

**Keywords:** Conformal cooling; Injection molding; Sustainability; Industrial design

## 1. Introducción

El proceso de moldeo por inyección de plástico es actualmente uno de los procesos de transformación plástica más extendidos a nivel mundial debido a su alta productividad y a su capacidad de fabricar piezas complejas texturizadas, con colores diferentes etc [1-3]. El proceso de moldeo por inyección consiste básicamente en la inyección de un polímero plástico a alta temperatura y presión en el interior de la cavidad

del molde [5-8]. Una vez en su interior el plástico fundido se enfría hasta un rango de temperatura capaz de garantizar la expulsión de la pieza sin deformar [9-10]. Para conseguir tal fin en el menor tiempo posible, se hace pasar un fluido refrigerante a través de una red de canales ubicados en ambas cavidades del molde, con el objetivo de mejorar el proceso de transferencia de calor entre el plástico y el molde y acelerar la solidificación del polímero fundido [11-14]. Una vez que la pieza alcanza un estado de rigidez estructural suficiente, se

expulsa del molde usando medios mecánicos, especialmente diseñados para este propósito [15-16]. En este sentido dado que se trata de un proceso cíclico cualquier optimización supone un impacto importante en la productividad no solo desde una perspectiva económica, sino también medio-ambiental reduciendo el gasto energético a lo largo del ciclo de inyección [17-19].

Teniendo en cuenta, por tanto, el peso que supone la etapa de enfriamiento de la pieza de plástico dentro del ciclo de producción y asumiendo que cualquier reducción de este, reportará una mejora en la productividad del proceso, se asume que todas las optimizaciones posibles del sistema, irán encaminadas hacia la fase de enfriamiento con el fin de impactar de forma directa en el tiempo de ciclo [20-25].

El enfriamiento es un proceso esencial en el ciclo de moldeo por lo que requiere del diseño y análisis detallado de la ubicación de los canales encargados de llevar a cabo el proceso de intercambio de calor entre el plástico y las paredes de molde. El análisis del sistema de refrigeración ha de ser considerado desde la temprana fase de diseño de molde, teniendo en cuenta condicionantes como la baja difusividad térmica de los materiales plásticos empleados en la fabricación [26-28].

Durante el diseño de cualquier molde, es fundamental analizar la función térmica debido a la gran cantidad de calor recibida desde el material plástico. Este calor debe extraerse parcialmente y en un tiempo mínimo con el fin de reducir la temperatura de la pieza por debajo de la temperatura de expulsión [29-31].

Actualmente la mayoría de los diseños de molde incluyen sistemas de refrigeración concebidos con medios tradicionales, basados en el mecanizado CNC de los canales. Este hecho limita la forma de la sección del canal, y el trazado de esquinas no redondeadas en el layout de los circuitos [32-34]. Estas restricciones condicionan en gran medida el sistema de enfriamiento del molde repercutiendo directamente en el tiempo de enfriamiento y en la calidad del producto moldeado. Un enfriamiento no uniforme o asimétrico impacta directamente no solo en la rentabilidad del proceso sino también en la calidad de la pieza, ocasionando deformaciones debidas fundamentalmente a contracciones diferenciales, defectos en el acabado superficial, tensiones residuales etc [35].

Con el objeto de minimizar o evitar estos problemas, es posible utilizar tecnologías como la fabricación aditiva. Esta tecnología de fabricación aplicada al moldeo permite el diseño y fabricación de canales adaptados a la geometría de la pieza, manteniendo una distancia constante entre contorno de cavidad y canales. Este hecho influye en el diseño tanto de canales como de trazados obteniendo resultados óptimos tanto a nivel de proceso como a nivel de producto terminado. Finalmente, estos circuitos requieren del uso de tecnologías de fabricación aditiva como SLM o SLS, caracterizadas por su eficiencia y versatilidad siendo

mucho más respetuosas con el medio ambiente que las tecnologías tradicionales.

La geometría, el tamaño y la ubicación de los canales de enfriamiento conformal tiene una gran influencia en las variables del proceso, como por ejemplo el rendimiento del intercambio térmico del sistema y por ende, del tiempo total del ciclo empleado. La distribución de canales en espiral es una de las geometrías más utilizadas en el diseño de canales conformes junto con la distribución en zig-zag dependiendo de la idoneidad de cada uno de ellos con respecto a la figura de pieza planteada. La geometría en espiral en particular, presenta trazados sinuosos muy marcados, lo que provoca mayores caídas de presión, una marcada caída de caudal y una reducción de la eficiencia del sistema de refrigeración. Otras mallas o trazados en forma de celosía también son aplicables en el uso del enfriamiento de tipo conformado. Estos diseños con un marcado aumento de la complejidad presentan algunos inconvenientes en el día a día del sistema tales como aumento en la deposición de partículas lo que obliga a un mantenimiento minucioso y periódico. En estos casos es necesario tener en cuenta que por debajo de un diámetro mínimo no será posible dividir el sistema de refrigeración en subcanales.

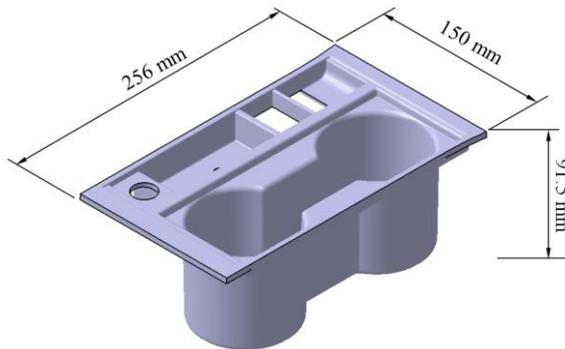
El artículo presenta los resultados de la aplicación de un nuevo diseño de canal conformal a una geometría grande y profunda difícil de refrigerar de modo adecuado usando métodos de enfriamiento tradicionales. Los resultados numéricos obtenidos tras el análisis térmico de la fase de enfriamiento y el análisis del mapa de tensiones residuales junto con el de deformaciones muestran que la metodología utilizada para el diseño conformado de los canales de enfriamiento optimiza enormemente el proceso de fabricación de la pieza en estudio.

## 2. Materiales y métodos

En esta sección se describen las características geométricas, funcionales y de fabricación asociadas a la pieza plástica objeto de estudio. También se especifican detalles tecnológicos sobre la selección del material plástico para el proceso de fabricación de moldeo por inyección y condiciones de contorno del propio proceso de manufactura. En la Figura 1 se muestran las características geométricas de la pieza plástica objeto de estudio. La pieza ha sido diseñada como elemento interior del vehículo “Volkswagen Golf MK7” con una doble finalidad, estética acorde al interior del habitáculo y funcional como alojamiento próximo a la ubicación del conductor y acompañante.

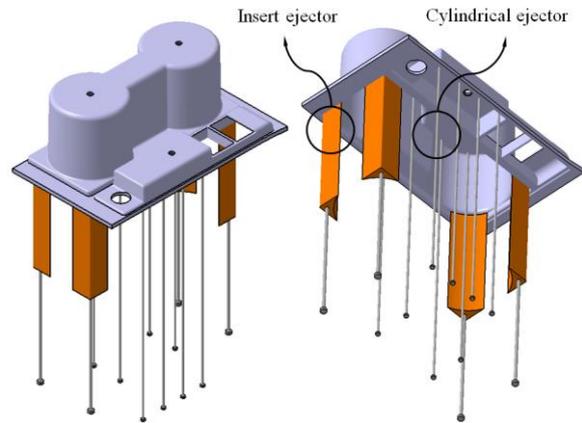
Las dimensiones de la pieza de estudio son 150 mm de ancho, 256 mm de largo, destacando su gran profundidad de 91.5 mm. El espesor es variable siendo este entre 3.0 y 5.0 mm. En cuanto a la fijación del elemento al automóvil se realiza mediante tornillería de M8. Para ocultar los tornillos, se contempla una

protección elastómera en la base, con la doble finalidad de amortiguar el movimiento de los elementos alojados en su interior y mejorar la estética del conjunto final. En cuanto al aspecto mecánico, la geometría plantea a lo largo de todo el diseño cambios de plano radiados cada uno de ellos, lo que le confiere una mejora notable en su comportamiento ante esfuerzos de tracción o compresión.



**Figura 1.-** Geometría de la pieza de plástico objeto de estudio

La geometría está diseñada para ser expulsada del molde sin la utilización de sistemas auxiliares de desmoldeo (correderas). Asimismo, dadas las grandes y profundas dimensiones de la pieza, han sido diseñados un conjunto de 12 expulsores para el molde (ver Figura 2). El uso de expulsores no cilíndricos se considera para evitar marcas o defectos en zonas vistas, haciendo coincidir cuatro de los mismos con esquinas y aristas de la pieza. El resto de marcas de los expulsores cilíndricos se ocultan gracias a las tapas de goma mencionadas anteriormente.



**Figura 2.-** Distribución de los elementos principales del sistema de expulsión del molde de inyección

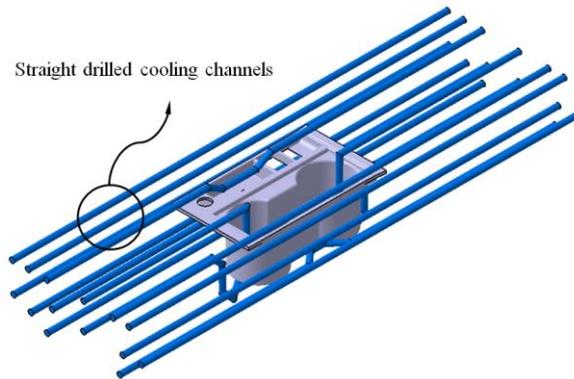
El sistema de expulsión se define desde la parte vista de la pieza, con una doble finalidad:

- La primera de ellas, facilitar el posicionamiento natural de la pieza en el lado expulsión del molde una vez inyectada y durante su apertura. Debido a la contracción que presenta la pieza en las zonas de mayor altura o contacto con los punzones figura se evita la necesidad de prever mecanismos de retención en la parte expulsión, destinados a eliminar durante la apertura del molde la tendencia a permanecer en zona inyección.
- La segunda de ellas, es la de posicionar la entrada en un lugar donde sea factible y sin limitar la refrigeración de la zona de inyección, al considerar el tipo de boquilla como entrada caliente y directa a pieza, es decir “valvulada”.

El material seleccionado para inyectar la pieza es ABS del fabricante SABIC con nombre comercial “*Cycolac FR23*” [36]. Este material se caracteriza por permitir un excelente acabado superficial en pieza tanto para liso brillo como granitados, además tiene la peculiaridad de ser puente entre los termoplásticos industriales de uso general y los termoplásticos de ingeniería de altas prestaciones.

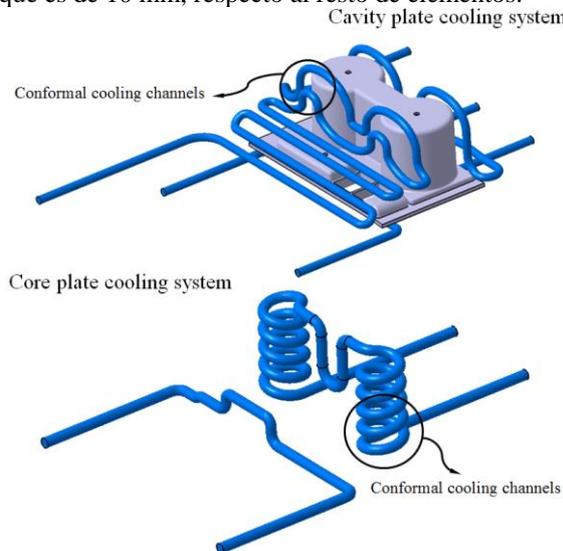
Para refrigerar la pieza de plástico utilizando medios tradicionales se ha dispuesto una rejilla de canales de 10 mm de diámetro en ambas zonas de las cavidades. La distancia de separación entre pieza y canales cumple con los requisitos de diseño tradicionales, así como con las distancias de seguridad estructural entre elementos del molde. La zona interior de la pieza, que puede ser moldeada por el núcleo, se refrigera mediante un sistema de circuitos próximos a la figura, intentando reproducir su forma. La ubicación de los canales cumple con la distancia de seguridad industrial, que es de 20 mm, respecto al resto de elementos del molde. Así, el diseño tradicional del sistema de refrigeración

garantiza la integridad estructural del molde (ver Figura 3).



**Figura 3.-** Diseño del sistema de refrigeración tradicional

Con el objetivo de mejorar el enfriamiento de la pieza plástica con una distribución lógica de canales de enfriamiento que rodean la pieza y que permitan realizar el proceso de intercambio de calor de manera uniforme y eficiente, se ha diseñado en la investigación una red de canales de refrigeración de tipo conformal de 10 mm de diámetro (ver Figura 4). Los canales se distribuyen a lo largo de los espacios libres entre los múltiples elementos del molde. La ubicación de los canales cumple con la distancia de seguridad industrial, que es de 10 mm, respecto al resto de elementos.



**Figura 4.-** Diseño del Sistema de refrigeración de tipo conformal

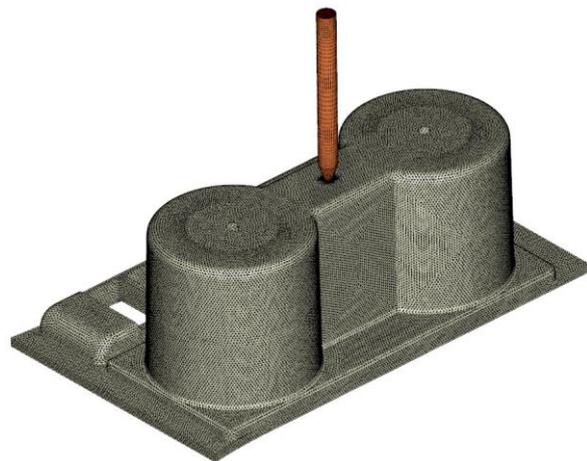
### 3. Modelado térmico y dinámico de las simulaciones numéricas

En este apartado se describen las diferentes simulaciones numéricas reológicas llevadas a cabo con el objetivo de evaluar con detalle el proceso de inyección de plástico fundido, contemplando las diferentes configuraciones de sistemas de refrigeración propuestas para esta pieza de plástico objeto de estudio.

Tras realizar el modelado CAD 3D de los diferentes sistemas de refrigeración propuestos, (*cooling tradicional vs cooling conformal*) y, en base a los resultados obtenidos, se analiza el comportamiento térmico y calidad final obtenida para el presente caso de estudio. En esta línea la fase de enfriamiento de la pieza de plástico analizada y, por consiguiente, el ciclo de inyección total ha sido analizado en función del rendimiento del proceso y calidad del producto final. El software comercial utilizado para realizar dichos análisis numéricos (CAE) es Moldex3D (versión R21, CoreTech System Co., Ltd., Zhubei City, Taiwán) [38].

A continuación, y siguiendo la metodología para definir las condiciones de contorno establecido por el software, el modelado térmico del sistema comienza con la discretización de la geometría mediante elementos finitos (*elementos tetraédricos*), tal y como se muestra en la Figura 5. Esta operación, se realiza con la herramienta integrada en el software, *Moldex Designer*, definida para tal fin.

En este módulo de mallado se pueden configurar y establecer los parámetros geométricos de las mallas como son el tamaño de malla, las capas internas dentro del volumen y tipo de elemento finito utilizado para realizar la discretización de las geometrías. En la investigación realizada se han utilizado elementos tetraédricos de segundo orden (sólido 186), junto a elementos prismáticos de segundo orden del tipo capa límite, en la superficie de las geometrías mejorando la interfaz entre dominios computacionales.



**Figura 5.-** Discretización mediante elementos finitos de la geometría de la pieza de plástico objeto de estudio

Cada volumen sólido 3D o dominio computacional definido en las simulaciones numéricas debe tener una definición de material asociada. De esta forma, para la pieza plástica objeto de estudio y el molde definido para su fabricación se han de seleccionar los materiales considerados durante el diseño. El material termoplástico considerado para la pieza ha sido Cyclocac FR23 [36] y el material de base para el molde de inyección un acero P-20 (Acero aleación 1.2709).

Tabla 1 y Tabla 2, muestran las características y parámetros principales empleados en el modelado de las simulaciones numéricas.

Con respecto al circuito de refrigeración, el líquido refrigerante considerado para realizar la simulación es agua. Por otro lado, los canales son asignados como el material acero, de la misma aleación que el molde de inyección. Tanto para el caso del sistema tradicional, como en el caso del sistema conformal. Cabe destacar que, la manufactura del sistema de refrigeración de tipo conformal se lleva a cabo mediante técnicas de fabricación aditiva 3D, en particular DMLS sinterizado directo de metal por láser [37].

**Tabla 1.-** Propiedades físicas de los principales materiales empleados para las simulaciones numéricas.

Description	Units	Water (Pure)	Cycolac FR23 (ABS)	Steel alloy 1.2709
Density	g/cm <sup>3</sup>	988	1.17	8,000
Specific heat	J/kg·°C	4,180	2.321	450
Thermal conductivity	W/m·°C	0.643	0.22	20

**Tabla 2.-** Características mecánicas, térmicas y reológicas del material plástico definido para el caso de estudio

Description	Units	Cycolac FR23 (ABS)
Material type	-	ABS
Fiber percent	%	-
Viscosity model	-	Modified Cross Model 2
PVT model	-	Modified Tait Model 2
Viscoelastic model	-	White – Metzner
Melt temperature	°C	221 – 199
Mold temperature	°C	71 – 49
Ejection temperature	°C	85
Freeze temperature	°C	115
Polymer Modulus E	MPa	2.24·e10
Polymer Poisson's ratio	-	0.392
Polymer CLTE	1/K	8.0·10-5

Finalmente, para completar la definición de condiciones de contorno requeridas para la simulación térmica y reológica se detalla el conjunto de parámetros tecnológicos de inyección utilizados durante el modelado del mismo. En la Tabla 3 se muestran las magnitudes de las variables reológicas, térmicas y tecnológicas definidas para configurar las simulaciones numéricas correspondientes a la fase de llenado, compactación, enfriamiento, deformaciones y tensiones residuales.

**Tabla 3.-** Technological variables of the numerical simulations set-up

Description	Units	Study Cases Cycolac FR23 (ABS)
Filling time	s	2.5
Packing time	s	5
Cooling time	s	20.4
Melt temperature	°C	270.0
Mold temperature	°C	60
Ejection temperature	°C	85
Coolant temperature	°C	49
Coolant flow rate	cm <sup>3</sup> /s	130
Maximum injection pressure	MPa	43.5
Maximum packing pressure	MPa	40.9

#### 4. Resultados

Tras resolver la simulación a través del módulo de solver del Moldex 3D se analizan los resultados con el objetivo de:

- Establecer las condiciones óptimas de inyección y compactación mediante el análisis del comportamiento del plástico durante el llenado de la cavidad. Con estos datos es posible establecer el número, el tipo y la localización de los puntos de inyección con el fin de solucionar problemas derivados de líneas de unión, atrapamientos de aire, temperaturas, etc.
- Analizar de forma detallada el comportamiento térmico del sistema a través de los resultados obtenidos durante el proceso de refrigeración. El modelado con elementos finitos de la pieza de plástico y canales de refrigeración permite la simulación del intercambio térmico entre la pieza y el molde de inyección. Factores como la temperatura del refrigerante, la caída de presión del circuito o temperatura de pieza y molde a lo largo del ciclo de enfriamiento, permiten la optimización de los parámetros dentro del proceso, así como determinar el circuito de refrigeración y el ciclo de inyección óptimo.
- Analizar las contracciones longitudinales de la pieza de plástico, detallando el comportamiento de esta en todas las direcciones y las causas que las producen, orientando de forma aproximada la corrección para la contracción que ha de aplicarse en el molde, para que la pieza final alcance las tolerancias buscadas.
- Analizar las deformaciones de la pieza de plástico, contemplando factores determinantes en estas como son las tensiones internas acumuladas durante la inyección. Las deformaciones obtenidas de simulación pueden cuantificarse según factores determinantes como son el diseño de la refrigeración, diseño de pieza y disposición de la fibra en caso de uso de material de inyección con carga. Este análisis permite predecir la deformación final de la pieza y la causa de esta deformación. Este es un proceso decisivo ya que en función de estos resultados hemos de variar factores

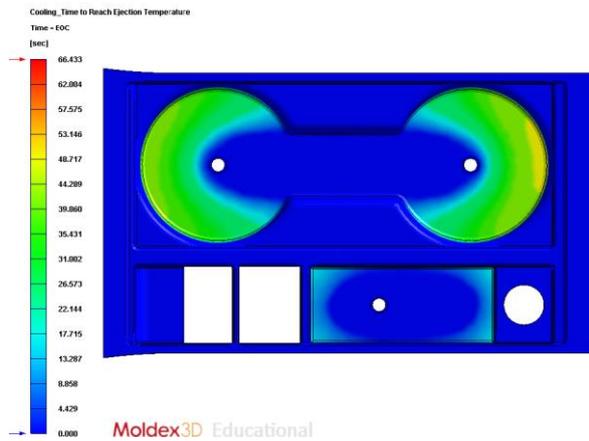
como la geometría de la pieza, el material, las condiciones de inyección, compactación o refrigeración, para conseguir minimizar estas deformaciones.

- Analizar de las tensiones residuales producidas por los gradientes de temperatura que se obtienen a lo largo de la superficie de la pieza de plástico objeto de estudio.

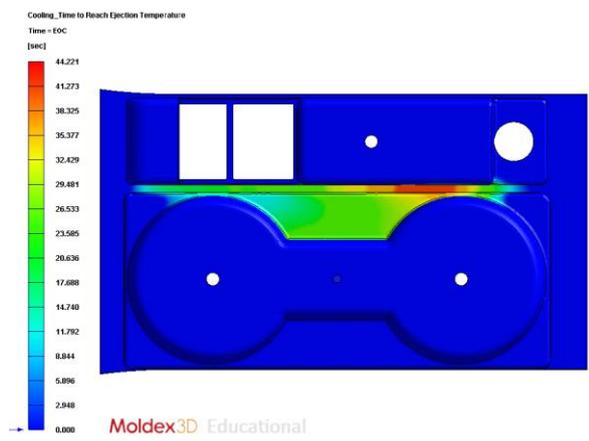
Así pues, en función de los resultados obtenidos el trabajo de investigación realizado compara y evalúa el rendimiento térmico del diseño utilizando medios tradicionales (ver Figura 3) frente a una nueva propuesta de sistema de enfriamiento de tipo conformal (ver Figura 4).

Se han analizado ambos diseños de refrigeración obteniendo las condiciones que determinan la calidad final de la pieza plástica objeto de estudio, así como el rendimiento del sistema.

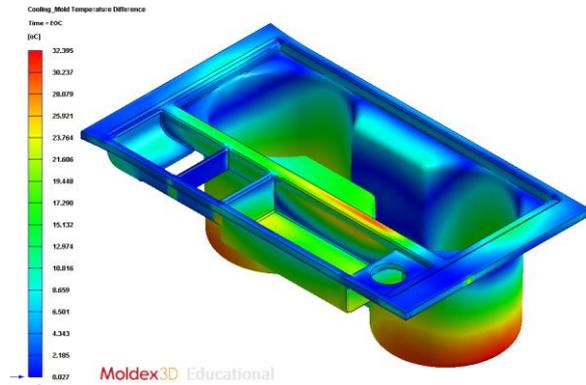
Tabla 4 muestra los resultados analíticos obtenidos para los parámetros tecnológicos: tiempo para alcanzar la temperatura de eyección, diferencia de temperatura del molde, alabeo total y tensión residual de Von Misses inducida térmicamente



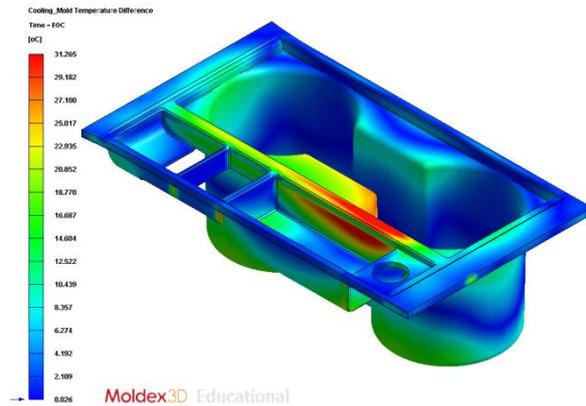
**Figura 6.-** Tiempo hasta alcanzar la temperatura de expulsión para el diseño de sistema de refrigeración tradicional



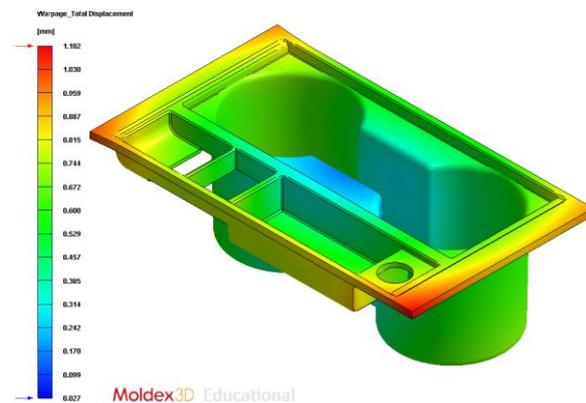
**Figura 7.-** Tiempo hasta alcanzar la temperatura de expulsión para el diseño de sistema de refrigeración de tipo conformal



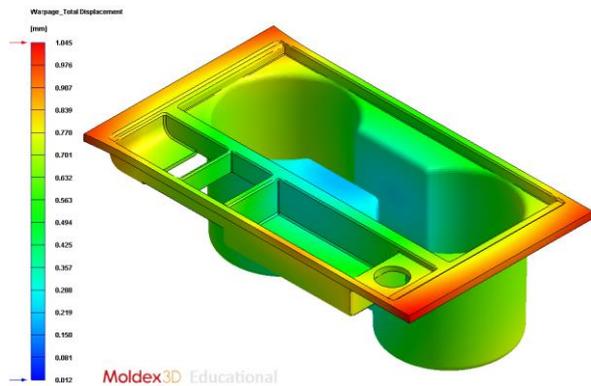
**Figura 8.-** Gradiente de temperaturas a lo largo de la superficie de la pieza de plástico para el diseño de sistema de refrigeración tradicional



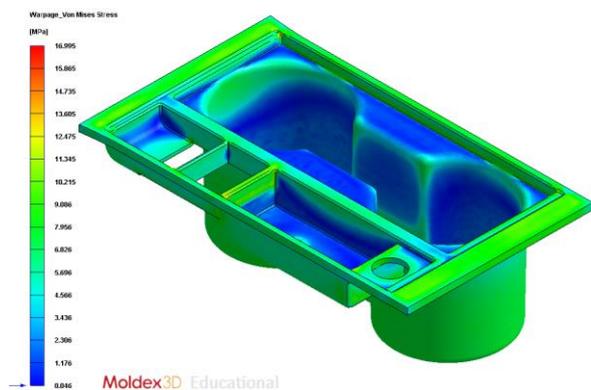
**Figura 9.-** Gradiente de temperaturas a lo largo de la superficie de la pieza de plástico para el diseño de sistema de refrigeración de tipo conformal



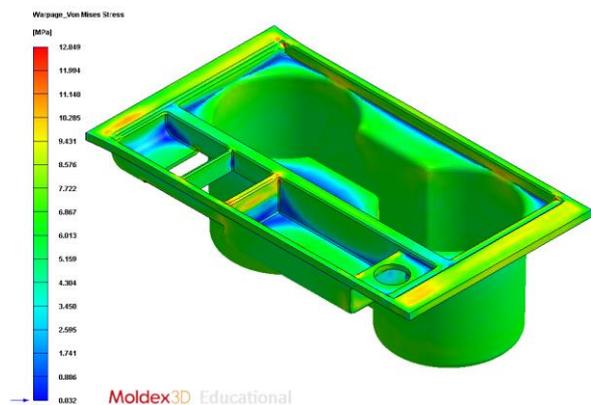
**Figura 10.-** Campo de desplazamientos a lo largo de la superficie de la pieza de plástico para el diseño de sistema de refrigeración tradicional



**Figura 11.-** Campo de desplazamientos a lo largo de la superficie de la pieza de plástico para el diseño de sistema de refrigeración de tipo conformal



**Figura 12.-** Tensiones residuales de Von – Mises asociadas al gradiente de temperaturas para el diseño de sistema de refrigeración de tipo conformal



**Figura 13.-** Tensiones residuales de Von – Mises asociadas al gradiente de temperaturas para el diseño de sistema de refrigeración de tipo conformal

**Table 2.-** Magnitude of the defined material properties for the numerical simulations

Description	Units	Standard cooling design	Conformal cooling design	Improvements
Time to reach the ejection temperature	s	66.433	41.500	37.5 %
Average mold temperature difference	°C	11.47	7.34	36.0 %
Total warpage	mm	1.064	1.10	3.5 %
Thermally induced Von Mises residual stress	MPa	16.995	12.849	24.4 %

Description	Units	Standard cooling design	Conformal cooling design	Improvements
Time to reach the ejection temperature	s	66.433	41.500	37.5 %
Average mold temperature difference	°C	11.47	7.34	36.0 %
Total warpage	mm	1.064	1.10	3.5 %
Thermally induced Von Mises residual stress	MPa	16.995	12.849	24.4 %

### 5. Conclusiones

A partir de los resultados numéricos obtenidos en las simulaciones térmicas y reológicas analizadas, se demuestra que la metodología de diseño conformal aplicada a los canales de refrigeración, optimiza el proceso de fabricación de la pieza objeto de estudio. De esto se deduce que al comparar este diseño con un diseño de sistema de refrigeración tradicional, el tiempo de la fase de enfriamiento se reduce en 24.933 s y de igual forma, los gradientes de temperatura analizados en todos los puntos de la cavidad, indican mayor homogeneidad alcanzada durante el tiempo de enfriamiento, con el diseño conformal justo en el momento de expulsar la pieza en 7.34 °C. Esto significa una optimización del 37.5% y 36.0% en ambos parámetros respectivamente. De esta forma, se mejora la calidad final de la pieza plástica objeto de estudio al conseguir un mapa de temperatura, tras la fase de enfriamiento, más uniforme a lo largo de toda la pieza y se reducen los defectos superficiales y mecánicos derivados de tensiones residuales y deformaciones.

En particular, la deformación total se reduce una magnitud de 0.02 mm. Mientras que, la tensión residual de Von Mises inducida térmicamente se reduce una magnitud de 4.146 MPa. Esto supone una optimización del 3.5% y 24.4% respectivamente ambos parámetros.

El desarrollo de la tecnología de fabricación aditiva en los últimos años ha permitido optimizar el proceso y mejorar sus requerimientos. Actualmente, los materiales metálicos presentan propiedades térmicas y estructurales similares a los materiales metálicos utilizados para la fabricación de moldes de inyección de plástico. Finalmente, se justifica que el uso de técnicas de fabricación aditiva 3D, aplicadas al proceso de fabricación mediante moldes de inyección, mejora la productividad y economía del proceso. Ya que reduce su tiempo de ciclo, optimiza la fase de enfriamiento de superficies complejas y mejora la calidad final de las piezas plásticas, permitiendo cumplir con los estrictos requisitos funcionales y

tolerancias geométricas y dimensionales establecidos para este sector industrial.

## 5.1. Agradecimientos

Authors acknowledge the support of CORETECH System Co.

## 5.2. Referencias

- [1] Kuo, C. C., & You, Z. Y. (2021). Enhancing the Structural Strength for Injection Molding Tooling With Conformal Cooling Channels Using ANSYS Software. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-399879/v1>
- [2] Kuo, C. C., Jiang, Z. F., Yang, M. X., You, B. J., & Zhong, W. C. (2021). Effects of cooling channel layout on the cooling performance of rapid injection mold. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(9), 2697-2710.
- [3] Marin, F., de Souza, A. F., Ahrens, C. H., & de Lacalle, L. N. L. (2021). A new hybrid process combining machining and selective laser melting to manufacture an advanced concept of conformal cooling channels for plastic injection molds. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113(5), 1561-1576.
- [4] Silva, H. M., Noversa, T., Rodrigues, H., Fernandes, L., & Pontes, A. (2021). Structural Analysis of Molds with Conformal Cooling Channels: A Numerical Study. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1051523/v1>
- [5] Singh, D., Joshi, K., & Patil, B. (2021). Comparative Economic Analysis of Injection-Moulded Component with Conventional and Conformal Cooling Channels. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 1-11.
- [6] Yun, S., Kwon, J., Cho, W., Lee, D., & Kim, Y. (2020). Performance improvement of hot stamping die for patchwork blank using mixed cooling channel designs with straight and conformal channels. *Applied Thermal Engineering*, 165, 114562.
- [7] Kirchheim, A., Katrodiya, Y., Zumofen, L., Ehrig, F., & Wick, C. (2021). Dynamic conformal cooling improves injection molding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(1), 107-116
- [8] Kuo, C. C., Tasi, Q. Z., Xie, B. X., Huang, J. M., & Qiu, S. X. (2022). Improving the quality of a circular cooling channel fabrication by fused filament fabrication using Taguchi methods. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-12.
- [9] Feng, S., Kamat, A. M., & Pei, Y. (2021). Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: Review and progress updates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 171, 121082.
- [10] Torres-Alba, A., Mercado-Colmenero, J. M., Caballero-García, J. D. D., & Martín-Doñate, C. (2021). Application of new triple hook-shaped conformal cooling channels for cores and sliders in injection molding to reduce residual stress and warping in complex plastic optical parts. *Polymers*, 13(17), 2944.
- [11] Mercado-Colmenero, J. M., Torres-Alba, A., Catalan-Requena, J., & Martín-Doñate, C. (2021). A New Conformal Cooling System for Plastic Collimators Based on the Use of Complex Geometries and Optimization of Temperature Profiles. *Polymers*, 13(16), 2744.
- [12] Kurtulus, K., Bolatturk, A., Coskun, A., & Gürel, B. (2021). An experimental investigation of the cooling and heating performance of a gravity die casting mold with conformal cooling channels. *Applied Thermal Engineering*, 194, 117105.
- [13] Wei, Z., Wu, J., Shi, N., & Li, L. (2020). Review of conformal cooling system design and additive manufacturing for injection molds. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 17(5), 5414-5431
- [14] Tomasoni, D., Colosio, S., Giorleo, L., & Ceretti, E. (2020). Design for additive manufacturing: thermoforming mold optimization via conformal cooling channel technology. *Procedia Manufacturing*, 47, 1117-1122.
- [15] Tan, C., Wang, D., Ma, W., Chen, Y., Chen, S., Yang, Y., & Zhou, K. (2020). Design and additive manufacturing of novel conformal cooling molds. *Materials & Design*, 196, 109147.
- [16] Kaliamoorthy, P. S., Subbiah, R., Bensingh, J., Kader, A., & Nayak, S. (2019). Benchmarking the complex geometric profiles, dimensional accuracy and surface analysis of printed parts. *Rapid Prototyping Journal*.
- [17] Research and innovation for the European Green Deal. [https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/strategy/strategy-2020-2024/environment-and-climate/european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/strategy/strategy-2020-2024/environment-and-climate/european-green-deal_en). Last access April 2022
- [18] Oh, S. H., Ha, J. W., & Park, K. (2022). Adaptive Conformal Cooling of Injection Molds Using Additively Manufactured TPMS Structures. *Polymers*, 14(1), 181.
- [19] Doñate, C. M., & Paramio, M. R. (2013). New methodology for demoldability analysis based on volume discretization algorithms. *Computer-Aided Design*, 45(2), 229-240.
- [20] Martín-Doñate, C., Shaikheleid, S., Torres-Alba, A., & Mercado-Colmenero, J. M. (2020, June). A New Smart Web Platform for Plastic Injection Molds in Industry 4.0 Environments. In *International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing* (pp. 309-315). Springer, Cham
- [21] Kuo, C. C., Xu, J. Y., Zhu, Y. J., & Lee, C. H. (2022). Effects of Different Mold Materials and Coolant Media on the Cooling Performance of Epoxy-Based Injection Molds. *Polymers*, 14(2), 280.
- [22] Mercado-Colmenero, J. M., Rubio-Paramio, M. A., Karlinger, P., & Martín-Doñate, C. (2018). A new procedure for calculating cycle time in injection molding based on plastic part geometry recognition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(1), 441-477.
- [23] Kanbur, B. B., Zhou, Y., Shen, S., Wong, K. H., Chen, C., Shocket, A., & Duan, F. (2022). Metal Additive Manufacturing of Plastic Injection Molds with Conformal Cooling Channels. *Polymers*, 14(3), 424.
- [24] Mercado-Colmenero, J. M., Muriana, J. A. M., Paramio, M. A. R., & Martín-Doñate, C. (2017). An automated manufacturing analysis of plastic parts using faceted surfaces. In *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing* (pp. 119-128). Springer, Cham.
- [25] Huang, W. T., Tasi, Z. Y., Ho, W. H., & Chou, J. H. (2022). Integrating Taguchi Method and Gray Relational Analysis for Auto Locks by Using Multiobjective Design in Computer-Aided Engineering. *Polymers*, 14(3), 644.
- [26] Mohd Hanid, M. H., Abd Rahim, S. Z., Gondro, J., Sharif, S., Al Bakri Abdullah, M. M., Zain, A. M., ... & Nabialek, M. (2021). Warpage Optimisation on the Moulded Part with Straight Drilled and Conformal Cooling Channels Using Response Surface Methodology (RSM), Glowworm Swarm Optimisation (GSO) and Genetic Algorithm (GA) Optimisation Approaches. *Materials*, 14(6), 1326.
- [27] You, J. H., Lee, J. W., Oh, S. H., & Park, K. (2021). Conformal mold heating and cooling using a carbon

nanotube film heater and additively manufactured cellular metamaterial. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1-14.

[28] Kuo, C. C., Nguyen, T. D., Zhu, Y. J., & Lin, S. X. (2021). Rapid development of an injection mold with high cooling performance using molding simulation and rapid tooling technology. *Micromachines*, 12(3), 311.

[29] Shen, S., Kanbur, B. B., Zhou, Y., & Duan, F. (2020). Thermal and mechanical assessments of the 3D-printed conformal cooling channels: computational analysis and multi-objective optimization. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(12), 8261-8270.

[30] Piekło, J., & Garbacz-Klempka, A. (2020). Use of maraging steel 1.2709 for implementing parts of pressure mold devices with conformal cooling system. *Materials*, 13(23), 5533.

[31] Minguella-Canela, J., Morales Planas, S., los Santos-López, D., & Antonia, M. (2020). SLM Manufacturing Redesign of Cooling Inserts for High Production Steel Moulds and Benchmarking with Other Industrial Additive Manufacturing Strategies. *Materials*, 13(21), 4843.

[32] Mercado-Colmenero, J. M., La Rubia, M. D., Mata-Garcia, E., Rodriguez-Santiago, M., & Martin-Doñate, C. (2020). Experimental and numerical analysis for the mechanical characterization of petg polymers manufactured with fdm technology under pure uniaxial compression stress states for architectural applications. *Polymers*, 12(10), 2202.

[33] Kuo, C. C., Chen, W. H., Lin, Y. X., Gao, Q., Gian, S. J., & Xiao, C. X. (2020). Effects of different fillers on the silicone rubber mold with conformal cooling channels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108(5), 1509-1525.

[34] Jiang, G., Gao, J., Shi, X., Li, F., & Xu, L. (2020). Flow and heat transfer characteristics of the mist/steam two-phase flow cooling the rectangular channel with column-row-ribs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 156, 119737.

[35] Torres-Alba, A., Mercado-Colmenero, J. M., Caballero-Garcia, J. D. D., & Martin-Doñate, C. (2021). A Hybrid Cooling Model Based on the Use of Newly Designed Fluted Conformal Cooling Channels and Fastcool Inserts for Green Molds. *Polymers*, 13(18), 3115.

[36] <https://www.campusplastics.com/campus/es/datasheet/Zytel%C2%AE+73G30HSL+NC010/DuPont+Engineering+Polymers/52/e0cde6c7>. Last access July 2022

[37] Mayer, S. (2005). Optimised mould temperature control procedure using DMLS. *EOS Whitepaper, EOS GmbH Ltd*, 1-10.

[38] <https://www.moldex3d.com/>. Last access July 2022