



OPTIMIZACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD EN EL PROCESO DE MOLDEO POR INYECCIÓN DE PLÁSTICO A TRAVÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE REFRIGERACIÓN AVANZADA CONFORMAL

ABELARDO TORRES – ALBA², JORGE MANUEL MERCADO – COLMENERO¹⁻²,
JOSÉ ANTONIO AMATE – TEVA³, CRISTINA MARTÍN – DOÑATE¹⁻²

¹Universidad de Jaén

Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos
Campus Las Lagunillas s/n., Edificio A3-210, 23071 Jaén, España

²Universidad de Jaén

Grupo de Investigación INGDISIG Jaén
Campus Las Lagunillas s/n., Edificio A3-210, 23071 Jaén, España

³Fundación Andaltec I+D+I Centro Tecnológico

Pol. Ind. Cañada de la Fuente
C. Vilches, 34, 23600 Martos, Jaén, España

(Recibido 11 de septiembre de 2023, para publicación 12 de noviembre de 2023)

Resumen – En el proceso de manufactura de una pieza de plástico, mediante moldes de inyección, intervienen diferentes fases que determinan el ciclo de manufactura y, por ende, su tiempo de ciclo asociado. De todas ellas, la fase de refrigeración es actualmente la que presente mayor influencia en el gasto energético, gasto económico e impacto ambiental. Por ello, desde el punto de vista de la sostenibilidad y la eficiencia energética, es la fase con mayor repercusión e importancia. Actualmente, el diseño tradicional de los elementos y sistemas de refrigeración, que intervienen de manera directa en esta fase, están limitados en el intercambio térmico que se lleva a cabo entre el fluido refrigerante y la cavidad del molde de inyección. Esta limitación se encuentra directamente relacionada con el progresivo aumento, en los últimos años, de los requerimientos de diseño de las piezas de plástico que, con mayor frecuencia, incorporan geometrías complejas y núcleos profundos. De forma que, el rendimiento de los sistemas de refrigeración tradicionales disminuye por las propias limitaciones asociadas al proceso de mecanizado tradicional con los que se fabrican sus principales elementos. Como solución a dichas limitaciones y gracias al desarrollo de nuevas tecnologías de fabricación aditivas, se presentan los canales de refrigeración de tipo conformal. En esta línea los canales de refrigeración de tipo conformal aportan una mayor flexibilidad al diseño, consiguiendo una optimización del intercambio térmico y consiguiendo que éste sea más eficiente, homogéneo y uniforme entre el fluido refrigerante y la cavidad del molde de inyección. El presente trabajo de investigación describe la aplicación de un nuevo sistema de refrigeración de tipo conformal para el enfriamiento de una pieza plástica con geometrías complejas, grandes profundidades y altos requerimientos de diseño, donde el uso de la refrigeración tradicional es ineficiente. Los resultados del presente trabajo de investigación mejoran significativamente la uniformidad del mapa de temperaturas en la superficie de la pieza de plástico, reduciendo el tiempo ciclo en más del 36%, respecto al diseño tradicional. Estos resultados se alinean perfectamente con el objetivo de mejora de la sostenibilidad y eficiencia energética del proceso de manufactura.

Palabras clave – Refrigeración conformal, moldeo por inyección, sostenibilidad, diseño industrial.

1. INTRODUCCIÓN

El moldeo por inyección de plásticos es, en la actualidad, la tecnología más utilizada para la fabricación de componentes plásticos en una amplia gama de sectores industriales [1-2]. En esencia, este proceso cíclico se compone de cuatro etapas clave: plastificación, inyección, enfriamiento y expulsión [3-4]. El proceso de creación de un componente plástico mediante moldeo comienza con la introducción por gravedad de un material plástico sólido en un cilindro previamente calentado para su plastificación [5]. En

este ambiente, el polímero se derrite gradualmente antes de ser inyectado a alta presión en la cavidad del molde. Una vez dentro, la masa fundida se solidifica gracias al sistema de refrigeración o enfriamiento diseñado meticulosamente para garantizar la estabilidad dimensional y la uniformidad de temperaturas en la superficie de la pieza plástica [6]. Finalmente, una vez que la pieza ha adquirido la solidez suficiente es posible extraerla del molde, dando inicio a un nuevo ciclo [7].

La calidad de las piezas y su integridad dimensional son cruciales para la eficacia del proceso de moldeo por inyección. Dicha calidad está determinada por la interacción entre múltiples factores, como la precisión de la maquinaria de moldeo por inyección, la calidad y la tipología del material plástico utilizado, así como el diseño específico del molde [8-9]. Asegurar la uniformidad y calidad de las piezas producidas supone un reto continuo, ya que las variaciones en los parámetros de fabricación pueden dar lugar a defectos de calidad durante los ciclos de moldeo [10].

Dentro del proceso de moldeo, la etapa de enfriamiento es la más exigente en términos de consumo de energía y duración, llegando a absorber aproximadamente el 70% del tiempo total de manufactura [11,12].

La optimización del tiempo de ciclo de moldeo se convierte en un factor de gran relevancia para mejorar tanto la eficiencia energética como la sostenibilidad del proceso [13]. Desde una perspectiva centrada en aumentar la productividad, el diseño del sistema de enfriamiento se torna crítico, dado que esta fase constituye una parte considerable del ciclo de producción [14]. Además de su duración, el proceso de enfriamiento ejerce un impacto substancial en la calidad de la pieza moldeada, ya que un enfriamiento uniforme conlleva una deformación mínima, así como una reducción de la contracción y de la tensión térmica residual [15]. Los costos, el consumo de energía específico y el impacto ambiental asociados al proceso de moldeo por inyección no solo están ligados a los tipos de termoplásticos utilizados y al tipo de máquina de moldeo por inyección [16], sino que también dependen de los parámetros del proceso y del diseño del molde en sí [17]. Un molde de inyección que cuente con un sistema de enfriamiento avanzado ofrece un doble beneficio: mejora la calidad de los productos y acorta el tiempo del ciclo de producción [18]. De ahí que la disposición de los canales de enfriamiento sea un elemento fundamental en el diseño del molde de inyección. Históricamente, estos canales han adoptado una configuración recta para simplificar su fabricación e instalación. Sin embargo, es evidente que esta disposición resulta insuficiente para garantizar un enfriamiento uniforme y eficaz, particularmente cuando la forma de la pieza moldeada es compleja o irregular.

En los últimos tiempos, la tecnología de fabricación aditiva ha experimentado avances notables y se ha expandido en diversos campos industriales y arquitectónicos. Un desarrollo interesante es la creciente adopción de canales de enfriamiento conformal, fabricados mediante impresión 3D, en la industria del moldeo por inyección [19-23]. La fabricación aditiva se presenta como una tecnología de fabricación sostenible con múltiples ventajas, como la reducción del consumo de materiales y una mayor eficiencia en la producción [24]. La clave reside en la creación de geometrías de canales adaptables que mantenga una distancia constante entre la superficie de la pieza y los canales de enfriamiento, incluso en las zonas más complejas donde suele acumularse material. Este enfoque puede llevar a una drástica disminución del tiempo de enfriamiento y a una mayor uniformidad en las temperaturas de la superficie de la pieza moldeada [25]. Además, una distribución homogénea de las temperaturas en la superficie de la pieza no solo acelera el proceso de enfriamiento, sino que también contribuye a mejorar la calidad de la pieza en términos de precisión dimensional [26]. Es importante destacar que un desequilibrio en el mapa de temperaturas puede provocar deformaciones en la pieza de plástico, lo que, en última instancia, resultaría en el rechazo de las piezas fabricadas, contrariando los estándares actuales de sostenibilidad en la industria [27].

Los canales de enfriamiento conformal presentan una serie de beneficios destacados, entre los que se incluyen una notable reducción en el tiempo necesario para completar el ciclo de enfriamiento y una disminución significativa en la deformación de las piezas moldeadas [28].

Para ilustrar esto, Ahn *et al.* [29] llevaron a cabo un proyecto en el que emplearon una avanzada técnica de mecanizado rápido de metal asistido por láser para fabricar un molde de inyección destinado a la producción de un ventilador eléctrico. Los resultados de esta innovación fueron impresionantes, con una reducción del tiempo de enfriamiento de aproximadamente el 35%. Este logro no solo aumentó la productividad, sino que también redujo los costos de fabricación. Por su parte, Mercado *et al.* [30] obtuvieron una disminución del 13% en el tiempo total del ciclo en piezas ópticas de extrema complejidad y alto

espesor relativo. En otro contexto, el trabajo de Sayfullah y Masood [31] resultó en una disminución del 35% en la duración total del ciclo, acompañada de una reducción del 30% en la temperatura máxima. Este logro se tradujo en mejoras notables en la contracción diferencial y, por lo tanto, en la reducción del alabeo de las piezas. Mazur *et al.* [32] redujeron la temperatura máxima en 5°C, lo que tuvo un efecto positivo en la contracción de la pieza y en la minimización del alabeo. Brooks y Brigden [33] introdujeron el concepto de capas de enfriamiento conformal y propusieron una metodología para diseñar estas capas con estructuras soporte autónomas. Sus investigaciones demostraron que las capas conformal logran una reducción del tiempo de enfriamiento del 26.34% en comparación con los tradicionales canales de enfriamiento. Wang *et al.* [34] desarrollaron un molde con un sistema de enfriamiento conformal en forma de espiral esférica con el propósito de mitigar las tensiones en piezas de policarbonato moldeado por inyección. Lim *et al.* [35] propusieron un enfoque basado en un método triangular para el diseño de canales de enfriamiento, con el objetivo de mejorar la resistencia y uniformidad de componentes producidos mediante estampado en caliente. Este enfoque condujo a una reducción de aproximadamente 3 segundos en el tiempo de enfriamiento. Armillotta *et al.* [36] aplicaron tecnología de fabricación aditiva para la construcción de moldes de fundición a presión con enfriamiento conforme. Sus experimentos evidenciaron que el enfriamiento conforme mejora la calidad superficial de las piezas fundidas y conlleva beneficios adicionales, incluyendo la reducción del tiempo de ciclo y la minimización de la porosidad de retracción. Desafortunadamente la mayoría de las investigaciones presentan casos de estudio con geometrías simples o prototipos básicos no aplicándose sobre casos reales de estudio basados en piezas con geometría compleja de la industria. En esta línea y con el objetivo de evaluar el performance de las soluciones de refrigeración conformal frente al uso de diseños de refrigeración convencionales el presente trabajo de investigación muestra los resultados obtenidos de la aplicación de un nuevo diseño de canales de refrigeración de tipo conformal, así como su adaptación a una pieza de plástico industrial con superficies complejas y geometrías profundas, difíciles de enfriar adecuadamente por sistemas de refrigeración tradicionales, y altos requerimientos estéticos y dimensionales. Los resultados numéricos obtenidos muestran que la metodología propuesta para el diseño de los canales de refrigeración de tipo conformal optimiza notablemente el tiempo de ciclo, el intercambio térmico, la eficiencia energética y por tanto la sostenibilidad asociada al proceso de fabricación de la pieza de plástico objeto de estudio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción geométrica y requerimientos de diseño de la pieza de plástico objeto de estudio

En este apartado, se describen las características geométricas, funcionales y de manufactura asociadas a la pieza de plástico objeto de estudio. Tal y como se muestra en la Fig. 1, la pieza de plástico objeto de estudio forma parte del salpicadero de un vehículo automóvil. Al tratarse de una pieza de automoción que conforma la apariencia interior de un vehículo, ésta debe cumplir precisos requerimientos dimensionales

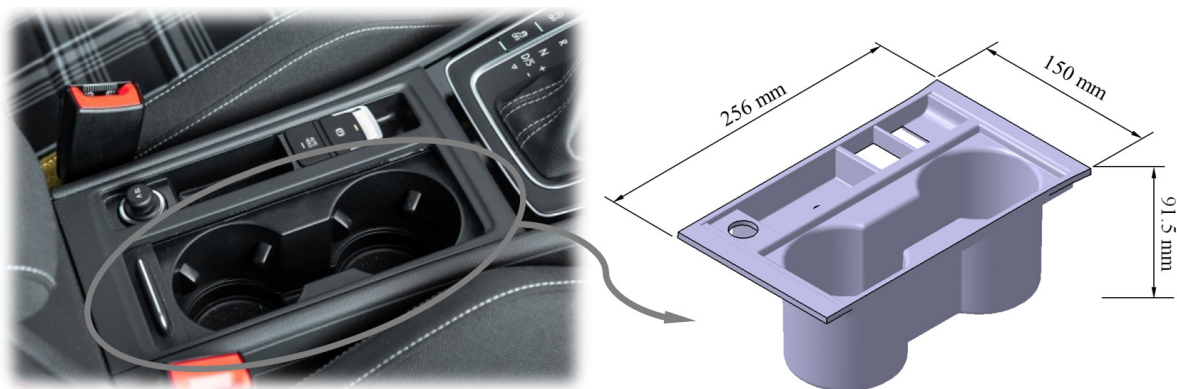


Fig. 1. Topología principal y dimensiones totales de la geometría de plástico objeto de estudio.

y estéticos. Entre ellos, destaca que los desplazamientos residuales obtenidos tras su manufactura no deben ser superior a 1.0 mm y que las diferencias de temperaturas en la superficie de la pieza de plástico, tras la fase de refrigeración, deben ser superiores a 10°C. En particular, estas restricciones se justifican debido a la doble finalidad de la pieza de plástico objeto de estudio. Pues, por un lado, se encuentra diseñada con finalidad estética, de acuerdo con el interior del habitáculo donde está situada, y, por otro lado, con una finalidad funcional, como apoyo próximo a la ubicación del conductor y acompañante.

Fig. 1 muestra la topología principal y las dimensiones totales de la pieza de plástico objeto de estudio, las cuales son 150.0 mm de ancho, 256.0 mm de largo y 91.5 mm de profundidad. Cabe destacar que, la dimensión de profundidad supera la magnitud estándar que, usualmente, presentan las piezas de plástico con características similares. El espesor de la pieza de plástico es variable entre el valor mínimo 3.0 mm y el valor máximo 5.0 mm. Su fijación a la estructura del vehículo se realiza mediante tornillería de rosca M8. Para ocultar la región superior de la unión atornillada, se ensambla una protección de un material elastómero en la base, la cual presenta una doble finalidad. Por lado, amortigua el movimiento de los elementos alojados en su interior y, por otro lado, mejorar la estética del conjunto final. En cuanto al comportamiento mecánico de la pieza de plástico objeto de estudio, el diseño de su geometría presenta cambios de planos radiados, lo que le aporta una mejora notable en su comportamiento estructural ante escenarios de carga longitudinal de tracción y compresión.

2.2. Diseño del sistema de expulsión del molde de inyección

El diseño de los sistemas principales que conforman un molde de inyección debe realizarse atendiendo a su conjunto y a las posibles interferencias que puedan surgir entre ellos. Por ello, para generar un diseño de los canales de refrigeración que optimice y mejore la fase de refrigeración, así como la sostenibilidad y gasto energético del proceso de manufactura, se propone evaluar la expulsión de la pieza de plástico del molde de inyección y definir los elementos de expulsión que eviten interferencias con el diseño posterior de los canales de refrigeración. Dadas las amplias dimensiones y gran profundidad de la geometría objeto de estudio, se diseñan un conjunto de 12 expulsores para el sistema de expulsión del molde de inyección. Tal y como se muestra en la Fig. 2, se emplean dos tipologías de expulsores: expulsores de tipo inserto o no cilíndricos y expulsores de tipo varilla o cilíndricos. El uso de expulsores no cilíndricos, así como la localización de cuatro de ellos en esquinas y aristas de la pieza de plástico se establece para evitar marcas o defectos en las superficies vistas de la misma y, así, alcanzar sus requerimientos estéticos. Mientras que los expulsores de varilla o cilíndricos se emplean para facilitar el proceso de expulsión de la pieza en las regiones de la misma con gran profundidad. El sistema de expulsión de la pieza de plástico se define,

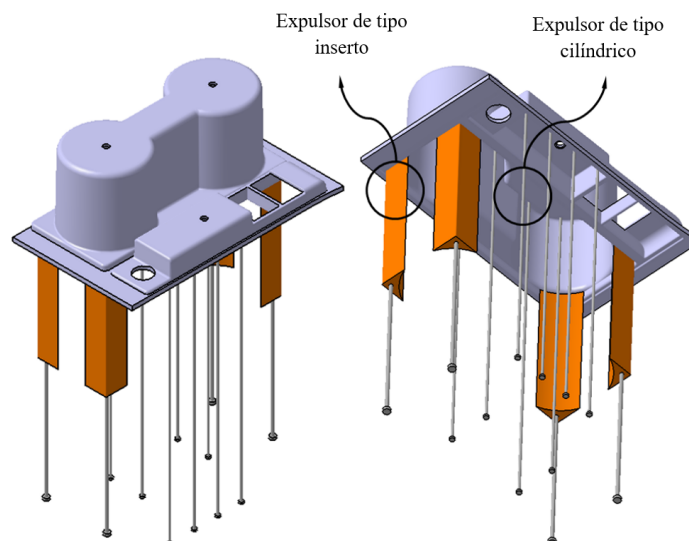


Fig. 2. Distribución de los elementos principales del sistema de expulsión del molde de inyección.

desde el punto de vista funcional del molde de inyección, para su aplicación con una doble finalidad [38-39]. En primer lugar, facilitar el movimiento natural de expulsión de la pieza de plástico, tras su proceso de inyección y apertura de la región de expulsión del molde de inyección. Y, en segundo lugar, el sistema de expulsión se debe evitar cualquier tipo de interferencia geométrica con el sistema de alimentación y refrigeración del molde de inyección. Es decir, los elementos del sistema de expulsión se deben posicionar en regiones de la superficie de la pieza de plástico que no interfieran con la posición del punto de inyección y los canales del sistema de refrigeración y, de esta forma, no comprometer la fase de llenado y refrigeración de la pieza de plástico.

2.3. Selección del material termoplástico de la pieza de plástico

En el presente apartado se describen las características y propiedades mecánicas, térmicas y reológicas del material termoplástico empleado. El material termoplástico seleccionado para la manufactura pieza de plástico objeto de estudio es ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) [40], del fabricante SABIC, con nombre comercial Cyclic FR23 [41]. Este material plástico se caracteriza por generar un excelente acabado superficial en la superficie de la pieza tanto para liso brillo, como para granitados. Además, tiene la singularidad de ser puente de unión entre los termoplásticos industriales de uso general y los termoplásticos de ingeniería con altas prestaciones. Las características y propiedades físicas, térmicas y mecánicas del material plástico seleccionado permiten alcanzar los requerimientos funcionales, dimensionales y

Tabla 1. Características mecánicas, térmicas y reológicas del material termoplástico definido.

Descripción	Unidades	Cyclic FR23 (ABS)
Modelo de viscosidad	-	Modelo Cross 2 Modificado
Modelo PVT	-	Modelo Tait 2 Modificado
Modelo Viscoelástico	-	White – Metzner
Temperatura del fundido	°C	221 – 199
Temperatura del molde	°C	71 – 49
Temperatura de expulsión	°C	85
Módulo elástico	MPa	$2.24 \cdot 10^3$
Coefficiente de Poisson	-	0.392
CLTE	1/K	$8.0 \cdot 10^{-5}$

estructura de la pieza de plástico objeto de estudio. La Tabla 1, muestra las propiedades mecánicas, térmicas y reológicas del material termoplástico Cyclic FR23 [41], así como las condiciones de contorno que recomienda su fabricante para su óptimo procesamiento. Cabe destacar que, es determinante disponer de las propiedades y procesamiento recomendado del material termoplástico empleado, pues a partir de ellas se puede diseñar la configuración y geometría de los canales del sistema de refrigeración que mejore la sostenibilidad y gasto energético del proceso de manufactura.

2.4. Diseño del sistema de refrigeración del molde de inyección

A continuación, y tras definir los requerimientos de diseño de la pieza de plástico objeto de estudio, el material termoplástico empleado y el sistema de expulsión del molde de inyección, se procede a establecer el diseño de los canales del sistema de refrigeración. Tal y como se ha descrito previamente, el diseño de los canales de refrigeración influye de manera directa sobre el rendimiento de la fase de refrigeración y, por ende, sobre el gasto energético del proceso de manufactura y su sostenibilidad.

Durante las últimas décadas, el diseño de los canales de refrigeración de un molde de inyección estaba condicionado por el proceso de mecanizado con el que iba a ser fabricado. De esta forma, el diseño de canales de refrigeración se ha estandarizado como canales rectos perforados, fabricados mediante métodos tradicionales de mecanizado, véase Fig. 3. Sin embargo, esta tipología de canal presenta limitaciones funcionales y térmicas que limitan el rendimiento de la fase de refrigeración y la sostenibilidad del proceso de manufactura.

A partir de estas limitaciones en el diseño del sistema de refrigeración, el presente trabajo de investigación propone el desarrollo de nuevos canales de refrigeración de tipo conformal que, gracias al desarrollo de las nuevas tecnologías de manufactura aditiva 3D, permitan adaptarse a la topología de la pieza de plástico, mejorando el rendimiento térmico de la fase de refrigeración y reduzcan el gasto energético asociado a la misma.

De esta forma, para el análisis de la fase de refrigeración de la pieza de plástico objeto de estudio se propone el diseño de dos sistemas de refrigeración diferentes. Por un lado, un diseño tradicional del sistema de refrigeración basado en dos rejillas de canales rectos perforados de diámetro 10 mm, distribuidas en las placas principales del molde de inyección respectivamente, véase Fig. 3. Y, por otro lado, el diseño de canales de refrigeración de tipo conformal que se adapten a las superficies y características geométricas de la pieza de plástico objeto de estudio, véase Fig. 4.

2.4.1. Diseño del sistema de refrigeración con canales rectos perforados

El diseño de los canales de refrigeración rectos perforados se define partiendo de dos premisas principales. Por un lado, evitar la interferencia entre los canales de refrigeración y cualquier otro elemento principal del molde de inyección, manteniendo constante su diámetro y su eje longitudinal. Y, por otro lado, respetar la distancia de seguridad estructural entre el canal de refrigeración y la superficie de la cavidad del molde de inyección.

La distancia de separación entre la pieza de plástico y los canales tradicionales de refrigeración, así como para el resto de los elementos del molde de inyección, es igual a 20 mm y está determinada por los criterios recomendados en el sector industrial de los moldes de inyección. Esta distancia de separación es igual a la distancia mínima de seguridad establecida para cumplir con los requerimientos estructurales del molde de inyección. De esta forma, el diseño del sistema de refrigeración tradicional garantiza la integridad estructural del molde de inyección. Asimismo, tal y como se muestra en la Fig. 3, los canales de refrigeración tradicionales se han adaptado a la geometría de la pieza de plástico objeto de estudio. Persiguiendo reproducir su topología y superficie, con las limitaciones propias de los sistemas de fabricación y mecanizado tradicionales.

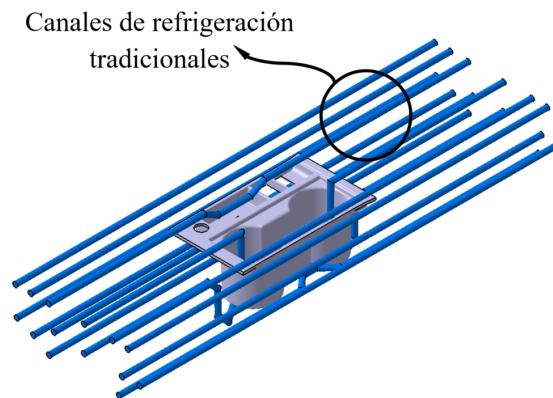


Fig. 3. Diseño del sistema de refrigeración tradicional.

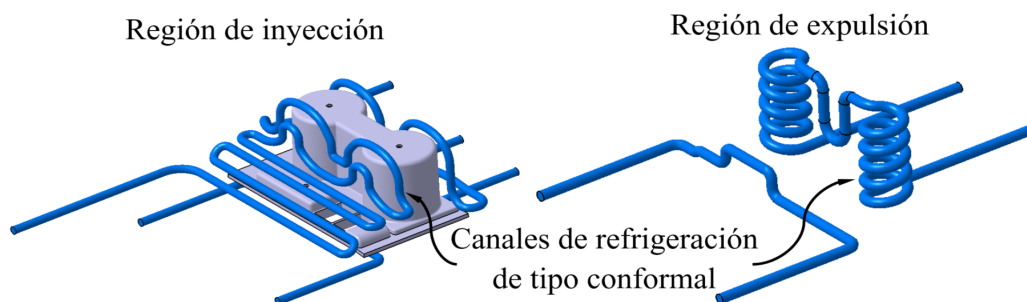


Fig. 4. Diseño del sistema de refrigeración de tipo conformal.

2.4.2. Diseño del sistema de refrigeración con canales de tipo conformal

El reciente desarrollo de las nuevas tecnologías de fabricación aditiva ha permitido, en el sector industrial de los moldes de inyección de plástico, mejorar y optimizar el diseño y configuración de los elementos principales del mismo [42-43]. Análogamente, este desarrollo tecnológico, junto a la creciente complejidad en las superficies y características geométricas de las piezas de plástico, ha repercutido en un aumento en los requerimientos de diseño, funcionales y dimensionales en el proceso de manufactura mediante moldes de inyección, en especial en el sector automovilístico. Un ejemplo de todo ello es la pieza de plástico objeto de estudio, pues presenta una geometría con superficies compleja y altos requerimientos estéticos y dimensionales. De esta forma, en el presente trabajo de investigación, se propone aprovechar las ventajas y versatilidad que ofrecen las nuevas tecnologías de fabricación aditiva para diseñar nuevos canales de refrigeración de tipo conformal que optimicen el proceso de manufactura del caso de estudio propuesto. De esta forma, tal y como se muestra en la Fig. 4, el diseño y recorrido de los nuevos canales tipo conformal se adapta y es accesible a todas las superficies principales de la pieza de plástico, optimizando, de esta forma, su proceso de manufactura. En particular, el diseño de nuevos canales de refrigeración de tipo conformal reduce la diferencia de temperaturas a lo largo de la superficie de la pieza de plástico, mejora el intercambio térmico y la eficiencia energética del proceso de refrigeración y reduce el tiempo y coste de manufactura total, con el correspondiente impacto positivo sobre la sostenibilidad final del proceso [44]. Tal y como se muestra en la Fig. 4, los canales de refrigeración de tipo conformal se distribuyen a lo largo de los espacios libres entre los múltiples sistemas del molde de inyección, sin

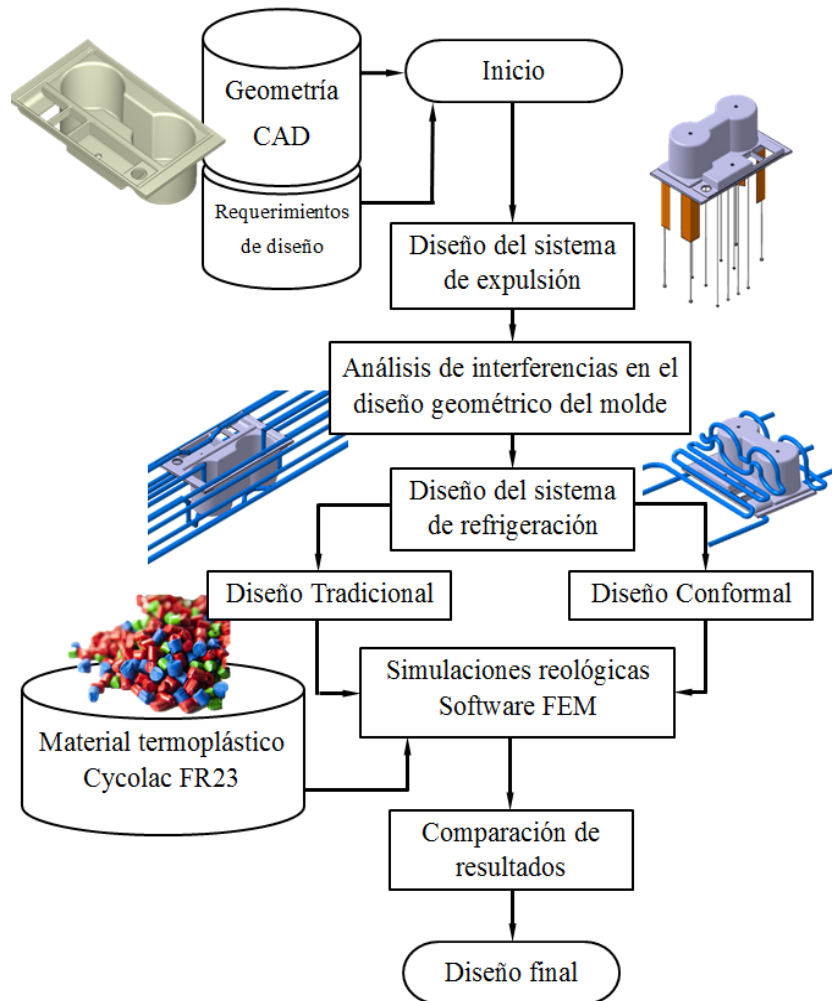


Fig. 5. Diagrama de flujo de la metodología desarrollada.

interferir con ninguno de ellos. El diámetro de los canales de refrigeración tipo conformal es de 10 mm y su diseño cumple con la distancia mínima de seguridad industrial entre elementos del molde de inyección de 10 mm.

Finalmente, para el completar la descripción de la metodología desarrollada en el presente trabajo de investigación, Fig. 5 muestra un diagrama de flujo que describe cada una de las etapas realizadas.

3. MODELADO NUMÉRICO DE LAS SIMULACIONES TERMODINÁMICAS

Para analizar el comportamiento térmico de los diferentes diseños de sistemas de refrigeración propuestos para el presente caso de estudio, se realizan un conjunto de análisis numéricos de tipo reológico y térmico [3, 6, 8] que simulan su proceso de manufactura. De esta forma, a partir de los resultados numéricos obtenidos, se puede evaluar el rendimiento térmico y la eficiencia energética resultante para los canales de refrigeración de tipo tradicional y de tipo conformal. Así como parámetros que determinan la calidad final de la pieza de plástico como son el campo de desplazamientos y tensiones residuales resultantes. El software comercial CAE, basado en el MEF (Método de Elementos Finitos), empleado para simular numéricamente el proceso de inyección de plástico fundido y posterior refrigeración de la pieza de plástico es Moldex3D (versión R21, CoreTech System Co., Ltd., Zhubei City, Taiwán) [45].

En primer lugar, tal y como se muestra en Fig. 6, se definen los diferentes dominios computacionales que intervienen en las simulaciones numéricas, así como el tipo de material que tienen estos asociados y sus propiedades físicas, mecánicas y térmicas. Cabe destacar que la definición de los dominios computacionales es análoga para las diferentes simulaciones numéricas realizadas, respetando la variación del modelado CAD 3D de la configuración de los canales de refrigeración tanto tradicionales, como de tipo conformal. De esta forma, el dominio computacional correspondiente al inserto del molde de inyección tiene asociado un material metálico correspondiente a una aleación de acero 1.2709. Cabe destacar que, la manufactura del inserto del molde de inyección se realiza mediante técnicas de fabricación aditiva 3D, en particular mediante la técnica SDML (sinterizado directo de metal por láser) [44]. El dominio computacional correspondiente a los canales de refrigeración tiene asociado agua pura como fluido del refrigerante y, por último, tanto la piza de plástico, como el canal de alimentación tienen asociado el material termoplástico ABS Cicolac FR23 [40-41]. Tabla 1 y Tabla 2, muestran la magnitud las propiedades físicas, mecánicas y térmicas definidas para los materiales empleados en el modelado de las simulaciones numéricas.

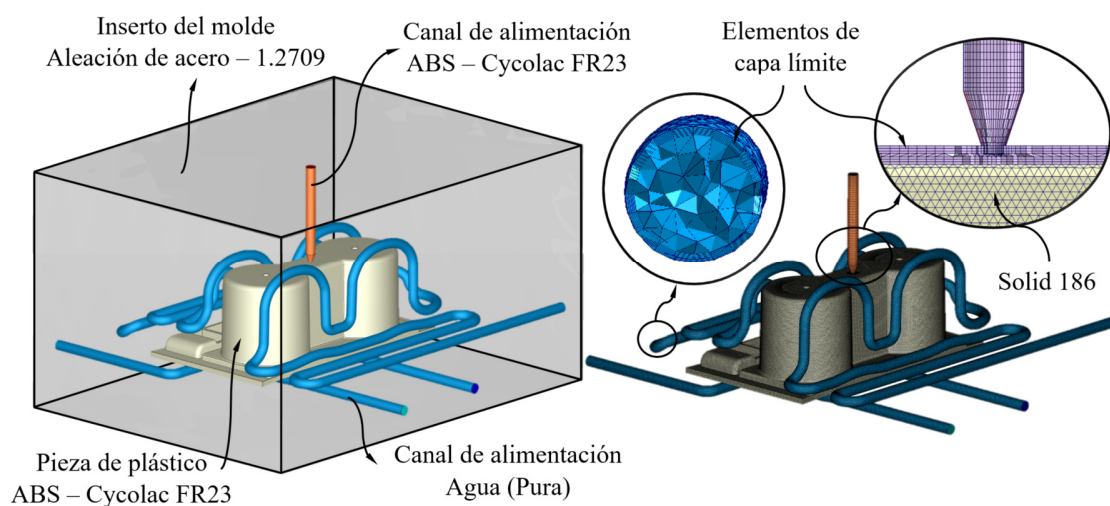


Fig. 6. Definición de los dominios computacionales y definición de su proceso de mallado.

A continuación, se procede a la discretización de la geometría de cada uno de los dominios computacionales definidos previamente. Tal y como se muestra en Fig. 5, el proceso de mallado se realiza mediante elementos finitos del tipo tetraédrico de segundo orden, solid – 186, con un tamaño de elemento igual a 1 mm. Asimismo, para mejorar la precisión de los resultados numéricos en las superficies en contacto entre dos dominios computacionales, se incluyen 3 filas consecutivas de elementos prismáticos triangulares de segundo orden del tipo capa límite, cuya relación de tamaño respecto a la medida del elemento nominal de la malla es igual a 0.5. Finalmente, para completar el modelado de las simulaciones reológicas y térmicas, se definen las condiciones de contorno que determinan la fase de inyección, compactación y refrigeración del ciclo de manufactura de la pieza de plástico objeto de estudio, así como el mapa de desplazamientos y tensiones residuales que intervienen la calidad final de la misma. Tabla 3 muestra la magnitud de los parámetros tecnológicos establecidos para las condiciones de contorno de las simulaciones numéricas realizadas.

Tabla 2. Propiedades físicas de los principales materiales empleados para las simulaciones numéricas.

Descripción	Unidades	Agua (Pura)	Cycolac FR23 (ABS)	Aleación 1.2709 (Acero)
Densidad	g/cm ³	988	1.17	8,000
Calor específico	J/kg°C	4,180	2.321	450
Conductividad térmica	W/m°C	0.643	0.22	20

Tabla 3. Condiciones de contorno de las simulaciones reológicas y térmicas realizadas.

Descripción	Unidades	Cycolac FR23 (ABS)
Tiempo de llenado	s	2.5
Tiempo de compactación	s	5
Tiempo de refrigeración	s	20.4
Temperatura del plástico inyectado	°C	270.0
Temperatura del inserto del molde	°C	60
Temperatura de expulsión de la pieza	°C	85
Temperatura del fluido refrigerante	°C	49
Caudal del fluido refrigerante	cm ³ /s	130
Presión máxima del plástico inyectado	MPa	43.5
Presión máxima de compactación	MPa	40.9

4. RESULTADOS

Finalmente, tras completar el modelado de las simulaciones térmicas y reológicas realizadas, se procede a presentar, evaluar y comparar el conjunto de resultados numéricos obtenidos para cada uno de los diseños de sistema de refrigeración propuestos en el presente trabajo de investigación. A partir de éstos, se puede determinar la configuración de sistema de refrigeración que optimiza la fase de refrigeración de la pieza de plástico objeto de estudio y cuál de ellos mejora el rendimiento térmico y la eficiencia térmica en el intercambio de calor entre la pieza de plástico y el fluido refrigerante.

En primer lugar, la Tabla 4 y la Fig. 7 muestran la magnitud y la distribución a lo largo de la superficie de la pieza de plástico del parámetro resultante “*Tiempo máximo de refrigeración*”, para cada diseño del sistema de refrigeración analizado en el presente trabajo de investigación.

Tabla 4. Máximo tiempo de refrigeración para cada diseño de sistema de refrigeración.

Diseño	Tiempo Max. de refrigeración [s]	Desviación [s]	Mejora [%]
Tradicional	66.433	–	–
Conformal	44.221	22.212	33.4

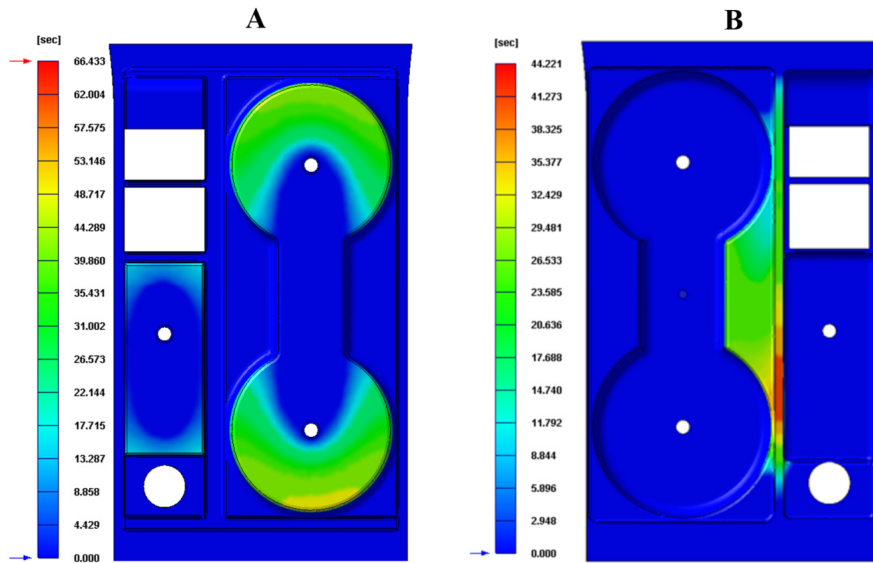


Fig. 7. Tiempo hasta alcanzar la temperatura de expulsión. A) Diseño tradicional. B) Diseño Conformal.

Tal como se puede comprobar, el diseño de canales de refrigeración de tipo conformal reduce el tiempo de la fase de refrigeración 22.212, respecto al diseño de los canales de refrigeración tradicionales. Es decir, el uso de canales de refrigeración de tipo conformal mejora un 33.4% el tiempo de la fase de refrigeración para la pieza de plástico objeto de estudio. Análogamente, esta mejora en el rendimiento térmico de la fase de refrigeración implica mejora en la sostenibilidad del proceso de manufactura. Pues a medida que se reduce el tiempo total del ciclo, se reduce el gasto energético y el coste asociado.

A continuación, la Tabla 5 y la Fig. 8 muestran el promedio de la diferencia de temperaturas en el inserto del molde y la distribución a lo largo de la superficie de la pieza de plástico del parámetro resultante “Gradiente de temperaturas”, para cada diseño del sistema de refrigeración analizado en el presente trabajo de investigación.

Tabla 5. Promedio de la diferencia de temperaturas en el inserto del molde cada diseño de sistema de refrigeración.

Diseño	Promedio de la diferencia de temperaturas en el inserto [°C]	Desviación [°C]	Mejora [%]
Tradicional	11.470	—	—
Conformal	7.340	4.130	36.0

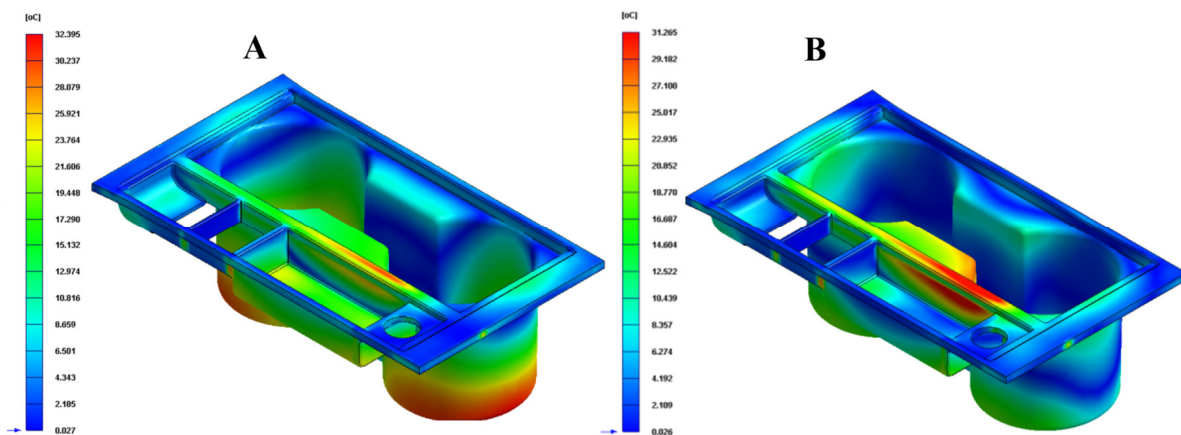


Fig. 8. Gradiente de temperatura en la superficie de la pieza de plástico. A) Diseño tradicional. B) Diseño Conformal.

La uniformidad y homogeneidad del mapa de temperaturas sobre la superficie de la pieza de plástico es un parámetro tecnológico que determina la calidad final, tanto estructural como estética, de la misma. Como se puede comprobar, el empleo de canales de refrigeración de tipo conformal mejora este parámetro, pues su versatilidad en el diseño permite una mejor adaptación a las superficies y características geométricas de la pieza de plástico objeto de estudio. Asimismo, uno de los requerimientos de diseño impuestos para este caso de estudio es que la magnitud del promedio de la diferencia de temperaturas debe ser inferior a 10°C. La Tabla 5 muestra que el diseño del sistema de refrigeración tradicional queda limitado y no alcanza este requerimiento de diseño, mientras que la magnitud alcanzada con el diseño del sistema de refrigeración de tipo conformal es inferior al valor límite de 10°C.

Finalmente, la Tabla 6, la Fig. 9 y la Fig. 10 muestran la magnitud máxima y la distribución sobre la pieza de plástico de los parámetros “Desplazamientos totales” y “Tensiones residuales de Von – Mises”, para cada diseño de sistema de refrigeración analizado en el presente trabajo de investigación.

Tabla 6. Desplazamientos totales y tensiones residuales de Von – Mises para cada diseño de sistema de refrigeración.

Diseño	Desplazamientos totales [s]	Desviación [s]	Mejora [%]
Tradicional	1.100	–	–
Conformal	0.974	0.126	11.5
Diseño	Tensiones residuales de Von – Mises [MPa]		
Tradicional	16.995	–	–
Conformal	12.849	4.146	24.4

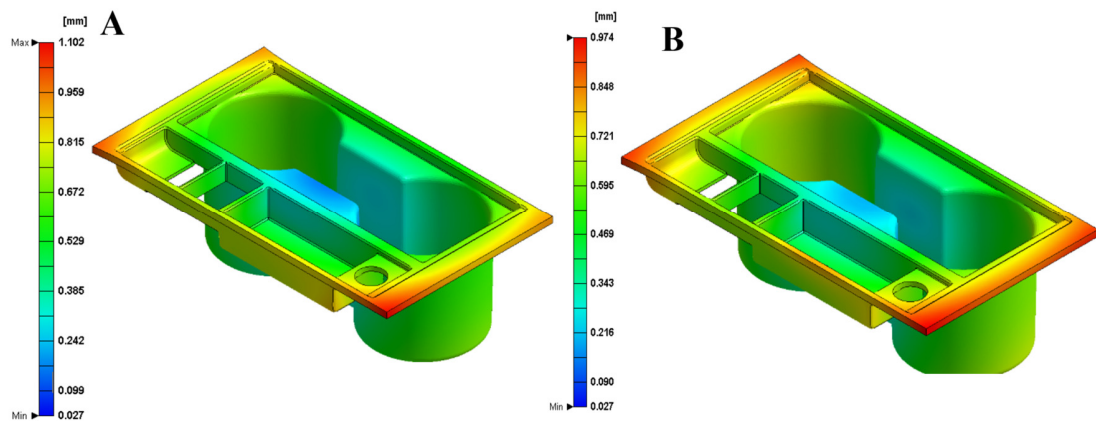


Fig. 9. Desplazamientos totales. A) Diseño tradicional. B) Diseño Conformal.

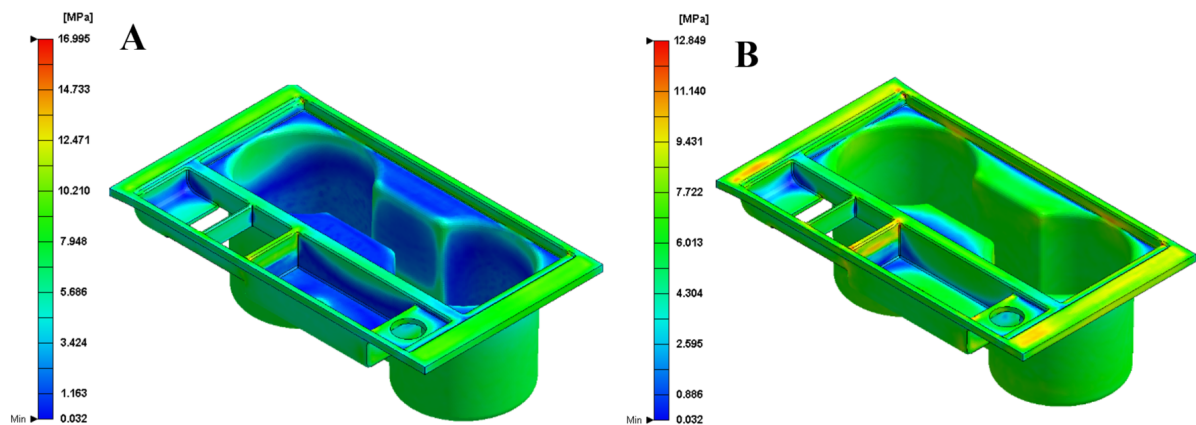


Fig. 10. Tensiones residuales de Von – Mises. A) Diseño tradicional. B) Diseño Conformal.

A partir de los resultados numéricos obtenidos se determina que la aplicación de canales de refrigeración de tipo conformal optimiza la fase de refrigeración de la pieza de plástico, reduce significativamente su tiempo de ciclo de manufactura, aumenta la uniformidad de su mapa de temperatura tras la fase de refrigeración y mejora su calidad superficial final. Estos resultados se sitúan en línea con los resultados obtenidos por los autores en trabajos anteriores sobre componentes diferentes con distintos requerimientos geométricos, funcionales y tecnológicos [11, 17, 24, 30, 46-48]. Asimismo, se comprueba que, dada la complejidad geométrica de la pieza objeto de estudio, el diseño del sistema de refrigeración tradicional no permite cumplir con los altos requerimientos funcionales y dimensionales establecidos por la industria. Los resultados numéricos obtenidos, para los canales de refrigeración tradicionales, superan, por un lado, el desplazamiento máximo permitido igual a 1 mm y, por otro lado, el valor máximo permitido en el promedio de la diferencia de temperaturas en el inserto del molde igual a 10°C. Sin embargo, el diseño de canales de refrigeración de tipo conformal permite optimizar dichos parámetros tecnológicos, mejorar la calidad final de la pieza de plástico y alcanzar los estrictos requerimientos funcionales y dimensionales establecidos por la industria.

5. CONCLUSIONES

El trabajo de investigación presenta la aplicación de un nuevo sistema de refrigeración de tipo conformal para el enfriamiento de una pieza plástica con geometría compleja, grandes profundidades y altos requerimientos de diseño, donde el uso de la refrigeración tradicional es ineficiente. El caso de estudio de geometría compleja presentando, sobre el que se aplica la nueva topología conformal necesita de un conjunto de 12 expulsores cilíndricos y 4 expulsores no cilíndricos específicamente diseñados, para poder expulsar la pieza del molde. Estos expulsores particulares se han localizado en las esquinas coincidiendo con aristas de la pieza para evitar marcas o defectos en zona vista alcanzando los altos requerimientos estéticos. El alto número de expulsores reduce enormemente la zona disponible para la refrigeración por lo que es necesario recurrir a una geometría de refrigeración muy particular como la diseñada en este trabajo para poder mejorar la eficiencia en la producción de la pieza compleja.

Los resultados de las simulaciones numéricas, térmicas y reológicas confirman que la metodología de diseño conformal para los canales de refrigeración, optimiza el proceso de fabricación de piezas plásticas complejas disminuyendo el tiempo ciclo de producción, haciendo el proceso de fabricación más sostenible. En el caso de la pieza objeto de estudio comparando los resultados obtenidos en una solución tradicional frente a una solución conformal se reduce el tiempo de refrigeración en 24.933 s. Los gradientes de temperatura analizados en todos los puntos de la cavidad indican una mayor homogeneidad de temperaturas en la superficie de la pieza durante la expulsión para el diseño conformal, mejorando un 36.0% frente al diseño tradicional. De esta forma, se mejora la calidad final de la pieza plástica al conseguir un mapa de temperatura, tras la fase de enfriamiento, más uniforme capaz de disminuir los defectos superficiales y mecánicos derivados de tensiones residuales y deformaciones. La deformación total se reduce a un valor de 0.02 mm junto a la tensión residual de Von Mises inducida térmicamente a 4.146 MPa. Esto supone una optimización del 3.5% y 24.4% respectivamente ambos parámetros. Los resultados del presente trabajo de investigación mejoran significativamente la uniformidad del mapa de temperaturas en la superficie de la pieza de plástico, reduciendo el tiempo ciclo en más del 36%, respecto al diseño tradicional. Estos resultados se sitúan dentro del objetivo de mejora de la sostenibilidad y eficiencia energética del proceso de manufactura alineándose con los resultados obtenidos por los autores en otros trabajos anteriores [11,12,17,24,46-47].

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte de CORETECH System Co y al comité científico del XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica por premiar el artículo de los autores de entre los presentados al congreso, para su publicación en la Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica.

7. REFERENCIAS

- [1] Kuo, C.C., Jiang, Z.F., Yang, M.X., You, B.J., Zhong, W.C., “Effects of cooling channel layout on the cooling performance of rapid injection mold.” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114, 2697-2710 (2021)
- [2] Martin-Doñate, C., Shaikheleid, S., Torres-Alba, A., Mercado-Colmenero, J.M., “A new smart web platform for plastic injection molds in industry 4.0 environments”. In *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing III*, 309-315 (2021)
- [3] Marin, F., de Souza, A. F., Ahrens, C.H., de Lacalle, L.N.L., “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 (2021)
- [4] Silva, H.M., Noversa, T., Rodrigues, H., Fernandes, L., Pontes, A., “Structural Analysis of Molds with Conformal Cooling Channels: A Numerical Study”. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1051523/v1> (2021)
- [5] Singh, D., Joshi, K., Patil, B., “Comparative Economic Analysis of Injection-Moulded Component with Conventional and Conformal Cooling Channels”. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 1-11. (2021)
- [6] Yun, S., Kwon, J., Cho, W., Lee, D., Kim, Y., “Performance improvement of hot stamping die for patchwork blank using mixed cooling channel designs with straight and conformal channels”. *Applied Thermal Engineering*, 165, 114562 (2020)
- [7] Kirchheim, A., Katrodiya, Y., Zumofen, L., Ehrig, F., Wick, C., “Dynamic conformal cooling improves injection molding”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **114**(1), 107-116 (2021)
- [8] Feng, S., Kamat, A.M., Pei, Y., “Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: Review and progress updates”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 171, 121082 (2021)
- [9] Arman, S., Lazoglu, I., “A comprehensive review of injection mold cooling by using conformal cooling channels and thermally enhanced molds”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-72 (2023)
- [10] Omid, N., Farhadipour, P., Baali, L., Bensalem, K., Barka, N., Jahazi, M., “A comprehensive review of additively manufactured H13 tool steel applicable in the injection mold industry: Applications, designs, microstructure, mechanical properties”. *JOM*, 1-13 (2023)
- [11] Torres-Alba, A., Mercado-Colmenero, J.M., Caballero-Garcia, J.D.D., Martin-Doñate, C., “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 (2021)
- [12] Mercado-Colmenero, J.M., Rubio-Paramio, M.A., Karlinger, P., Martin-Doñate, C., “A new procedure for calculating cycle time in injection molding based on plastic part geometry recognition”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98, 441-477 (2018)
- [13] Kuo, C.C., Tasi, Q.Z., Hunag, S.H., “Development of an epoxy-based rapid tool with low vulcanization energy consumption channels for liquid silicone rubber injection molding”. *Polymers*, **14**(21), 4534 (2022)
- [14] Çalışkan, C.İ., Koca, A., Özer, G., Akbal, Ö., Bakır, S., “Efficiency comparison of conformal cooling channels produced by additive and subtractive manufacturing in automotive industry plastic injection moulds: a hybrid application”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **126**(9), 4419-4437 (2023)
- [15] Park, H.S., Dang, X.P., Nguyen, D.S., Kumar, S., “Design of advanced injection mold to increase cooling efficiency”. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 7, 319-328 (2020)
- [16] Kuo, C.C., Nguyen, T.D., Zhu, Y.J., Lin, S.X., “Rapid development of an injection mold with high cooling performance using molding simulation and rapid tooling technology”. *Micromachines*, **12**(3), 311 (2021)
- [17] Torres-Alba, A., Mercado-Colmenero, J.M., Caballero-Garcia, J.D.D., Martin-Doñate, C., “Application of New Conformal Cooling Layouts to the Green Injection Molding of Complex Slender Polymeric Parts with High Dimensional Specifications”. *Polymers*, **15**(3), 558 (2023)
- [18] Yin, A.T.M., Rahim, S.Z.A., Al Bakri Abdullah, M.M., Nabialek, M., Abdellah, A.E.H., Rennie, A., ... Titu, A.M., “Potential of New Sustainable Green Geopolymer Metal Composite (GGMC) Material as Mould Insert for Rapid Tooling (RT) in Injection Moulding Process.” *Materials*, **16**(4), 1724 (2023)

- [19] Kurtulus, K., Bolatturk, A., Coskun, A., Gürel, B., “An experimental investigation of the cooling and heating performance of a gravity die casting mold with conformal cooling channels”. *Applied Thermal Engineering*, 194, 117105 (2021)
- [20] Tomasoni, D., Colosio, S., Giorleo, L., Ceretti, E., “Design for additive manufacturing: thermoforming mold optimization via conformal cooling channel technology”. *Procedia Manufacturing*, 47, 1117-1122 (2020)
- [21] Tan, C., Wang, D., Ma, W., Chen, Y., Chen, S., Yang, Y., Zhou, K., “Design and additive manufacturing of novel conformal cooling molds”. *Materials & Design*, 196, 109147 (2020)
- [22] Yin, A.T.M., Rahim, S.Z.A., Al Bakri Abdullah, M.M., Nabialek, M., Abdellah, A.E.H., Rennie, A., ... Titu, A.M., “Potential of New Sustainable Green Geopolymer Metal Composite (GGMC) Material as Mould Insert for Rapid Tooling (RT) in Injection Moulding Process”. *Materials*, **16**(4), 1724 (2023)
- [23] Chantzis, D., Liu, X., Politis, D.J., El Fakir, O., Chua, T.Y., Shi, Z., Wang, L., “Review on additive manufacturing of tooling for hot stamping”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109, 87-107 (2020)
- [24] Torres-Alba, A., Mercado-Colmenero, J.M., Garcia-Ruiz, N.M., Amate-Teva, J.A., Martin-Doñate, C., “Design of New Conformal Cooling Channels for Injection Molded Parts with Complex Undercuts and Internal Mold Lifters”. In *International conference on The Digital Transformation in the Graphic Engineering*, 365-381 (2022)
- [25] Wei, Z., Wu, J., Shi, N., Li, L., “Review of conformal cooling system design and additive manufacturing for injection molds”. *Mathematical Biosciences and Engineering*, **17**(5), 5414-5431 (2020)
- [26] Kaliamoorthy, P.S., Subbiah, R., Bensingh, J., Kader, A., Nayak, S., “Benchmarking the complex geometric profiles, dimensional accuracy and surface analysis of printed parts”. *Rapid Prototyping Journal* (2019)
- [27] Oh, S.H., Ha, J. W., Park, K., “Adaptive Conformal Cooling of Injection Molds Using Additively Manufactured TPMS Structures”. *Polymers*, **14**(1), 181 (2022)
- [28] Silva, H.M., Noversa, J.T., Fernandes, L., Rodrigues, H. L., Pontes, A.J., ”Design, simulation and optimization of conformal cooling channels in injection molds: a review”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **120**(7-8), 4291-4305 (2022)
- [29] Ahn, D.G. Park, S.H. Kim, H.S., “Manufacture of an injection mould with rapid and uniform cooling characteristics for the fan parts using a DMT process”. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Technol.*, 11, 915–924 (2021)
- [30] Mercado-Colmenero, J.M., Torres-Alba, A., Catalan-Requena, J., Martin-Doñate, C., “A new conformal cooling system for plastic collimators based on the use of complex geometries and optimization of temperature profiles”. *Polymers*, **13**(16), 2744 (2021)
- [31] Saifullah, A.B.M., Masood, S.H., Sbarski, I., “Thermal–structural analysis of bi-metallic conformal cooling for injection moulds”. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 62, 123–133 (2012)
- [32] Mazur, M., Brincat, P., Leary, M., Brandt, M., “Numerical and experimental evaluation of a conformally cooled H13 steel injection mould manufactured with selective laser melting”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93, 881-900 (2017)
- [33] Brooks, H., Brigden, K., “Design of conformal cooling layers with self-supporting lattices for additively manufactured tooling”. *Additive Manufacturing*, 11, 16-22 (2016)
- [34] Wang, X., Li, Z., Gu, J., Ruan, S., Shen, C., Wang, X., “Reducing service stress of the injection-molded polycarbonate window by optimizing mold construction and product structure”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86, 1691-1704 (2016)
- [35] Lim, W.S., Choi, H.S., Ahn, S.Y., Kim, B.M. “Cooling channel design of hot stamping tools for uniform high-strength components in hot stamping process”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70, 1189-1203 (2014)
- [36] Armillotta, A., Baraggi, R., Fasoli, S., “SLM tooling for die casting with conformal cooling channels”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71, 573-583 (2014)
- [37] <https://www.volkswagen.es/>
- [38] Mercado-Colmenero, J.M., Rubio-Paramio, M.A., Vizan-Idoipe, A., Martin-Doñate, C., “A new procedure for the automated design of ejection systems in injection molds”. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 46, 68-85 (2017)
- [39] Menges, G., Michaeli, W., Mohren, P., *How to Make Injection Molds*; Carl Hanser Verlag GmbH Co KG: Munich, Germany (2001)

- [40] <https://www.campusplastics.com>.
- [41] <https://www.sabic.com/en>
- [42] Gotlih, J., Karner, T., Belšak, R., Ficko, M., Berus, L., Brajljih, T., ... Brezočnik, M. "Check for updates Design and Manufacturing of Conformal Cooling Channels for Injection Molding: A Review". *New Technologies, Development and Application VI: Volume 1*, 687, 156 (2023)
- [43] Omid, N., Farhadipour, P., Baali, L., Bensalem, K., Barka, N., Jahazi, M., "A comprehensive review of additively manufactured H13 tool steel applicable in the injection mold industry: Applications, designs, microstructure, mechanical properties". *JOM*, 1-13 (2023)
- [44] Han, S., Zhang, Z., Ruan, P., Cheng, S., Xue, D., "Fabrication of circular cooling channels by cold metal transfer based wire and arc additive manufacturing". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **235**(11), 1715-1726 (2021)
- [45] <https://www.moldex3d.com/>.
- [46] Torres-Alba, A., Mercado-Colmenero, J.M., Caballero-Garcia, J.D.D., Martin-Doñate, C., "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 (2021)
- [47] Mercado-Colmenero, J.M., Martin-Doñate, C., Rodriguez-Santiago, M., Moral-Pulido, F., Rubio-Paramio, M.A., "A new conformal cooling lattice design procedure for injection molding applications based on expert algorithms". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, 1719-1746 (2019)
- [48] Torres-Alba, A., Diaz-Perete, D., Martin-Doñate, C., Mercado-Colmenero, J.M., "Conformal cooling systems design and dimensioning for injection molds". In *International conference on The Digital Transformation in the Graphic Engineering*, pp. 166-174. Cham: Springer International Publishing.(2019)

OPTIMIZATION OF SUSTAINABILITY IN THE PROCESS OF PLASTIC INJECTION MOLDING THROUGH THE IMPLEMENTATION OF ADVANCED CONFORMAL COOLING

Abstract – In the manufacturing process of a plastic part, using injection molds, different phases intervene that determine the manufacturing cycle and, therefore, its associated cycle time. Of all of them, the cooling phase is currently the one that has the greatest influence on energy expenditure, economic expenditure and environmental impact. Therefore, from the point of view of sustainability and energy efficiency, it is the phase with greater impact and importance. Currently, the traditional design of the cooling elements and systems, which are directly involved in this phase, is limited in the thermal exchange that takes place between the cooling fluid and the injection mold cavity. This limitation is directly related to the progressive increase, in recent years, in the design requirements of plastic parts that, more frequently, incorporate complex geometries and deep cores. In this line, the performance of traditional cooling systems decreases due to the limitations associated with the traditional machining process with which their main elements are manufactured. As a solution to these limitations and thanks to the development of new additive manufacturing technologies, conformal cooling channels are presented. In this line, the conformal cooling channels provide greater flexibility to the design, achieving optimization of the thermal exchange and making it more efficient, homogeneous and uniform between the cooling fluid and the cavity of the injection mold. The present research work describes the application of a new conformal type cooling system for the cooling of a plastic part with complex geometries, great depths and high requirements of design, where the use of traditional cooling is inefficient. The results of this research work significantly improve the uniformity of the temperature map on the surface of the plastic part, reducing the cycle time by more than 36%, compared to the traditional design. These results align perfectly to improve the sustainability and energy efficiency of the manufacturing process.

Keywords – Conformal cooling, injection molding, sustainability, industrial design.