

UNIVERSIDAD DE JAÉN



Universidad de Jaén
Escuela de Doctorado

**Escuela Politécnica
Superior de Jaén**

**Departamento de Ingeniería
Gráfica, Diseño y Proyectos**

TESIS DOCTORAL

**Procedimiento para el diseño y fabricación de
soluciones avanzadas en tecnología aditiva para
sistemas de refrigeración en moldeo por
inyección sostenible**

PRESENTADA POR:

ABELARDO TORRES ALBA

DIRIGIDA POR:

CRISTINA MARTIN DOÑATE

UNIVERSIDAD DE JAÉN



TESIS DOCTORAL

Procedimiento para el diseño y fabricación de
soluciones avanzadas en tecnología aditiva para
sistemas de refrigeración en moldeo por inyección
sostenible

AUTOR

Abelardo Torres Alba

DIRECTORA

Dra. D^a. Cristina Martín Doñate

TUTOR

Dra. D^a. Cristina Martín Doñate

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GRÁFICA, DISEÑO Y PROYECTOS

JAÉN, Junio 2023

UNIVERSIDAD DE JAÉN



TESIS DOCTORAL

Procedimiento para el diseño y fabricación de
soluciones avanzadas en tecnología aditiva para
sistemas de refrigeración en moldeo por inyección
sostenible

TRIBUNAL EVALUADOR

Presidente:

Secretaria:

Vocal:

Suplente:

UNIVERSIDAD DE JAÉN

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GRÁFICA, DISEÑO Y PROYECTOS



TESIS DOCTORAL

La memoria titulada: "**Procedimiento para el diseño y fabricación de soluciones avanzadas en tecnología aditiva para sistemas de refrigeración en moldeo por inyección sostenible**" ha sido presentada por el aspirante a doctor por la universidad de Jaén D. Abelardo Torres Alba, bajo la dirección de la Dra. D^a. Cristina Martín Doñate y desarrollada dentro del Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos de la Universidad de Jaén y del grupo de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Gráfica, Diseño Industrial y SIG (TIC-159).

Jaén, Junio 2023

El doctorando.

Fdo. Abelardo Torres Alba

Directora de Tesis.

Fdo. Cristina Martín Doñate

AGRADECIMIENTOS

A través de estas líneas quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que con su apoyo técnico y humano han colaborado en la realización de este trabajo de investigación, muy especialmente a mi tutora y directora de tesis Cristina Martín Doñate, por la acertada orientación, soporte, confianza y tesón que me ha permitido un buen aprovechamiento en el trabajo realizado, haciendo posible que esta tesis llegara a buen término.

Los conceptos de base planteados en esta tesis, han recibido el sustento de trabajos realizados con anterioridad por parte de mi directora entre otras personas, por lo que me permito hacer una especial mención a el trabajo realizado durante años, por el departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos de esta universidad, en especial a su director Miguel Ángel Rubio Paramio y la directora del grupo de investigación “TIC159” Cristina Martín Doñate, por el conocimiento científico generado dentro del ámbito del diseño y fabricación del moldes para inyección de termoplástico.

Especial mención merecen las personas cuya colaboración ha sido decisiva en el desarrollo de este trabajo, a Jorge Manuel Mercado Colmenero, Daniel Díaz Perete, Javier Catalá Requena, Juan de Dios Caballero García y Jose A. Amate Teva por el apoyo y confianza brindados, así como por el interés y motivación demostrados hacia mí en la realización de cada uno de los estudios llevados a cabo dentro de esta investigación.

Hago extensibles mis agradecimientos al resto de colaboradores de este departamento por el rigor a la hora de facilitar mi labor investigadora en las circunstancias en las que las he desarrollado. En especial a Antonio Sierra Martín por su disposición y a quien considero una persona muy pendiente de los aspectos humanos y profesionales del departamento.

Finalmente, quiero agradecer a mis padres por hacer de mí la persona que soy y en especial a mi padre, por inculcarme el interés por mi trabajo y en el cual he desarrollado esta tesis. De manera muy especial a mi esposa Rocío quien ha estado a mi lado compartiendo mis alegrías y angustias, por el estímulo que supone para mí y el apoyo

incondicional que me brinda en el día a día y muy especialmente a mi hija Rocío, en ella encontré la fuerza y motivación necesaria para llegar hasta el final. Esta tesis va dedicada a ella.

RESUMEN

El proceso de moldeo por inyección de plástico es actualmente el proceso productivo más extendido a nivel mundial. Su fabricación y consumo se han visto incrementados de forma notable con respecto a otro sistema de fabricación marcado principalmente por dos factores de peso como son: la “alta productividad” al ser un proceso tecnológico rápido que aprovecha de forma eficiente la automatización existente en la industria manufacturera y su “alta variedad” en forma, textura, color.

Centrándonos en el proceso de producción, este consiste esencialmente en la inyección de un polímero a alta temperatura y presión en la cavidad del molde. Posteriormente este material debe ser enfriado hasta llegar a un rango de temperatura que garantice la expulsión de la pieza fuera del molde, de forma óptima sin defectos y dimensionalmente estable.

Si atendemos a la herramienta principal de este proceso, el molde de inyección de plástico básicamente es un conjunto mecánico formado por dos partes principales (parte fija y parte móvil), concebido para fabricar piezas de plástico que respondan a las expectativas planteadas por el cliente en cuanto a precisión dimensional, acabado superficial, comportamiento mecánico o térmico. De forma general, los moldes para inyección están contruidos con aceros endurecidos, aceros pre-endurecidos, aluminio y/o aleaciones de berilio-cobre. La elección de cada uno de estos materiales se realiza normalmente en función del tamaño de la pieza, el volumen de piezas a fabricar y la calidad deseada.

Con todo esto es lógico pensar que la oferta de fabricación mediante moldeo por inyección al ser muy variada, será competitiva como aspecto positivo, pero con márgenes económicos a la baja como aspecto negativo.

Por este motivo, conseguir fabricar piezas plásticas dentro de los parámetros de inyección exigidos, con el menor peso de piezas posible, menor consumo energético y en el menor tiempo de ciclo debe ser el objetivo marcado desde etapas iniciales; lo que hace de este parámetro “tiempo de ciclo” uno de los indicadores fundamentales de la eficiencia del proceso.

En este sentido cualquier optimización dentro del proceso supondrá un impacto importante para la productividad del proceso, no solo desde una perspectiva económica, sino también desde un aspecto medio-ambiental ya que a la posibilidad de reciclaje de los materiales empleados en la inyección, podemos sumar el carácter eficiente y respetuoso con el medio que supone la reducción de recursos energéticos a lo largo del ciclo de inyección.

Analizando el peso de la variable tiempo para 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, es lógico pensar que todas las optimizaciones posibles aplicadas al sistema han de ir encaminadas hacia la fase de enfriamiento para conseguir impactar de forma directa en el tiempo de ciclo.

El enfriamiento es un proceso esencial en el ciclo de moldeo por lo que precisa de un 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. Por este motivo el sistema ha de ser considerado desde la temprana fase de diseño del molde de inyección, teniendo en cuenta condicionantes de peso dentro del proceso como la baja difusividad térmica de los materiales plásticos empleados en la fabricación.

Actualmente, los sistemas “CAD/CAM/CAE” han encontrado un amplio rango de aplicaciones en la ingeniería; las herramientas comerciales desarrolladas hasta la fecha para la realización del estudio, diseño y ejecución del sistema de refrigeración óptimo aplicado a la fabricación de un molde, implican una importante interacción manual durante la fase de diseño, así como durante la fase de análisis térmico del molde, todo ello con personal altamente especializado.

Por otra parte los métodos de análisis a nivel de investigación desarrollados hasta el momento, presentan problemas en cuanto a un diseño de sistema de refrigeración sencillo adaptado a la geometría de la pieza, que minimice el tiempo de enfriamiento dentro del ciclo total de inyección y que permitan ser fabricados con herramientas actuales.

Para mejorar la problemática planteada, se presenta esta tesis doctoral centrada en conseguir fabricar piezas plásticas dentro de los parámetros de inyección exigidos, con el menor peso de piezas posible, menor consumo energético, menor tiempo de ciclo y con posibilidad de fabricarlo teniendo en cuenta las características y restricciones que

presenta hoy día el proceso de fabricación aditiva, independientemente del material empleado.

Es por tanto que el objetivo de esta tesis doctoral se basa en el desarrollo de nuevas metodologías enfocadas en el análisis y diseño avanzado del sistema de refrigeración que compone el molde, partiendo de los datos CAD de la geometría de pieza plástica a fabricar.

Esto supone un avance innovador dentro del campo del diseño y fabricación de un molde para inyección de plástico ya que la optimización de recursos en la fase inicial de diseño repercutirá de forma notable en el aspecto económico y conceptual de esta.

Para ello se ha desarrollado, en una primera parte de nuestra investigación, una serie de algoritmos de tipo geométrico y analítico que permiten la automatización del diseño del propio circuito de refrigeración, en el caso de geometrías de pieza estándar y sin restricciones en cuanto a diseño del molde; y en una segunda parte de la investigación, el desarrollo de una metodología y configuración de circuitos de refrigeración conformal, contemplando elementos o insertos de acero con un coeficiente de transferencia térmica mejorado, que aumenten o potencien la efectividad del circuito en zonas que por la propia configuración del molde o pieza, suponen una restricción frente al tiempo de enfriamiento general implicado en la fabricación de la pieza plástica.

En este contexto, la tesis doctoral tiene como finalidad superar el estado de la técnica, creando complejas configuraciones de sistemas de enfriamiento, encaminadas hacia la búsqueda de diseños automatizados o estandarizados de circuitos de refrigeración conformal en moldes de inyección de plástico, usando fabricación aditiva SLM. Dicho sistema tiene por tanto como objetivos a alcanzar dentro del sector productivo en el que nos encontramos, los indicados a continuación:

En primer lugar conseguir simplificar de manera sustancial las necesidades de medios y conocimiento asociados a la fase de diseño de un sistema de refrigeración para un molde de inyección.

En este sentido esta tesis será la primera aplicación de estas características que permita diseñar de forma automatizada el circuito de refrigeración conformal capaz de ser implementado en el entorno de la industria 4.0.

Las nuevas metodologías de geometría computacional desarrolladas en la tesis incorporarán todos los requerimientos tecnológicos y funcionales del proceso de moldeo lo que permitirá, junto con el uso de sistemas expertos, obtener un diseño automatizado de los canales de refrigeración en moldes aptos para un uso industrial.

En segundo lugar disminuir significativamente los costes de producción derivados tanto por los inputs empleados en el proceso de producción, como por la calidad repercutida en número de “scraps” y referida al producto fabricado.

Por tanto con estas nuevas configuraciones desarrolladas durante el avance de la tesis en sistemas de refrigeración, se mejorará considerablemente la calidad de las piezas moldeadas disminuyendo los defectos causados por el stress residual térmico e incrementando la eficiencia y productividad del proceso de moldeo a la vez que se reduce el tiempo de ciclo en un 30% respecto a los valores obtenidos mediante diseños de refrigeración tradicionales.

Esta reducción del tiempo de ciclo conlleva además una reducción del gasto energético en la producción haciendo la fabricación más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

ABSTRACT

The plastic injection molding process is currently the most widespread production process worldwide; its manufacture and consumption have increased significantly compared to another manufacturing system marked mainly by two important factors such as: "high productivity" as it is a fast technological process that efficiently takes advantage of the existing automation in the manufacturing industry and its "high variety" in shape, texture, colour.

Focusing on the production process, this essentially consists of injecting a polymer at high temperature and pressure into the mold cavity. Subsequently, this material must be cooled until it reaches a temperature range that guarantees the expulsion of the piece out of the mold, optimally without defects and dimensionally stable.

If we look at the main tool of this process, the plastic injection mold is basically a mechanical assembly formed by two main parts (fixed part and mobile part), designed to manufacture plastic parts that meet the expectations set by the client in terms of dimensional precision, surface finish, mechanical or thermal behaviour.

In general, injection molds are built with hardened steel, pre-hardened steel, aluminium and/or beryllium-copper alloys. The choice of each of these materials is normally made based on the size of the part, the volume of parts to be manufactured and the desired quality.

With all this, it is logical to think that the supply of manufacturing by means of injection molding, being very varied, will be competitive as a positive aspect, but with downward economic margins as a negative aspect.

For this reason, managing to manufacture plastic parts within the required injection parameters, with the lowest possible part weight, lower energy consumption and in the shortest cycle time should be the objective set from the initial stages; which makes this parameter "cycle time" one of the fundamental indicators of the efficiency of the process.

In this sense, any optimization within the process will have a important impact on the productivity of the process, not only from an economic perspective, also from an

environmental aspect, since in addition to the possibility of recycling the materials used in the injection, we can add the efficient and respectful character with the environment that involves the reduction of energy resources throughout the injection cycle.

Analyzing the weight of the time variable for the cooling stage of the plastic part within the production cycle and assuming that any reduction in this will result in an improvement in the productivity of the process, it is logical to think that all the possible optimizations applied to the system have to go towards the cooling phase to achieve a direct impact on the cycle time.

Cooling is an essential process in the molding cycle, which is why it requires a detailed design and analysis of the location of the channels responsible for carrying out the heat exchange process between the plastic and the mold walls. For this reason, the system must be considered from the early injection molding design phase, taking into account weight factors within the process such as the low thermal diffusivity of the plastic materials used in manufacturing.

Currently, “CAD/CAM/CAE” systems have found a wide range of applications in engineering; The commercial tools developed to date to carry out the study, design and execution of the optimal cooling system applied to the manufacture of a mold, imply significant manual interaction during the design phase, as well as during the thermal analysis phase of the mold, all with highly specialized personal.

On the other hand, the analysis methods at the research level developed up to now present problems in terms of a simple cooling system design adapted to the geometry of the part, which minimize the cooling time within the total injection cycle and which allow them to be manufactured with current tools.

In order to improve the problem raised, an investigation is presented based on being able to manufacture plastic parts within the required injection parameters, with the lowest possible weight of parts, less energy consumption, less cycle time and with the possibility of manufacturing it taking into account the characteristics and restrictions that the additive manufacturing process presents today, regardless of the material used.

It is therefore that the objective of this doctoral thesis is based on the development of a methodology for the analysis and advanced design of the cooling system that makes up the mold, based on the CAD data of the geometry of the plastic part to be manufactured.

For this, in the first part of our research, a series of geometric and analytical algorithms have been developed that allow the automation of the design of the refrigeration circuit itself, in the case of standard part geometries and without restrictions regarding the design of the coolant circuit in mold; the second part of the investigation, the development of a methodology and configuration of conformal coolant circuits considering steel elements or inserts with an improved thermal transfer coefficient, which increase or improve the effectiveness of the circuit in areas that due to the configuration of the mold or part, suppose a restriction regarding the general cooling time involved in the manufacture of the plastic part.

In this context, the doctoral thesis aims to overcome the state of the art, creating complex configurations of cooling systems, aimed at finding automated or standardized designs of conformal cooling circuits in plastic injection molds, using SLM additive manufacturing.

The purpose of the system is to achieve, within the productive sector in which we find ourselves, the following stated objectives:

In the first place, to substantially simplify the needs for means and knowledge associated with the design phase of a cooling system for an injection mould.

In this sense, this thesis will be the first application of these characteristics that allows the automated design of the conformal refrigeration circuit capable of being implemented in the industry 4.0 environment.

The new computational geometry methodologies developed in the thesis will incorporate all the technological and functional requirements of the molding process, which will allow, together with the use of expert systems, to obtain an automated design of the cooling channels in molds suitable for industrial use.

Secondly, significantly reduce the production costs derived both from the inputs used in the production process, and from the quality passed on in the number of "scraps" and referred to the manufactured product.

Therefore, with these new configurations developed during the progress of the thesis on refrigeration systems, the quality of the molded parts will be considerably improved, reducing the defects caused by residual thermal stress and increasing the efficiency and productivity of the molding process while at the same time The cycle time is reduced by 30% compared to the values obtained through traditional refrigeration designs.

This reduction in cycle time also entails a reduction in energy expenditure in production, making manufacturing more sustainable and respectful of the environment.

TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	IX
RESUMEN	XII
ABSTRACT.....	XVI
TABLA DE CONTENIDOS	XXI
ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	XXIII
CAPÍTULO I: MEMORIA.....	XXV
1.1. INTRODUCCIÓN.....	28
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	34
1.3. OBJETIVOS.....	43
1.4. PUBLICACIONES.....	46
1.5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	61
1.6. REFERENCIAS.....	65
CAPÍTULO II: COMPENDIO DE TRABAJOS PUBLICADOS.....	LXXIV
2.1. ARTICULOS PUBLICADOS EN REVISTAS JCR/SCOPUS.....	76
2.2. COMUNICACIONES A CONGRESOS INTERNACIONALES.....	246

ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria de esta tesis doctoral se fundamenta en dos partes bien diferenciadas pero complementarias.

En una primera parte, se definen los objetivos planteados durante el desarrollo de la tesis, mediante la justificación y el alcance marcado en la misma para un sector industrial estratégico en la provincia de Jaén, tal y como es considerada actualmente la industria del plástico; además de esto, se detalla todo el conocimiento alcanzado durante este trabajo en cada uno de los documentos resultantes de la investigación, donde se exponen los resultados obtenidos. Por último, se enumeran los resultados y conclusiones más relevantes alcanzadas, así como el enfoque de las futuras líneas de investigación derivadas de este trabajo.

La segunda parte de esta tesis se complementa con un compendio de cinco artículos, resultado de la investigación, los cuales se encuentran publicados actualmente en revistas de alto impacto y calidad reconocida a nivel científico, indexadas en las bases de datos bibliográficas y bibliométricas ISI-JCR (Journal Citation Reports), ISI WOS (Web of Science) e ISIS Scopus.

Las dos publicaciones restantes son del tipo “Conference Paper” y se encuentran indexadas en la base de datos bibliográfica y bibliométrica Scopus.

Una de estas publicaciones de tipo “Conference Paper” corresponde a un avance de la investigación presentado en el congreso internacional de Ingeniería Gráfica JCM 2019 celebrado en Logroño, obteniendo el premio a la mejor comunicación en el área de “Manufacturing and Industrial Process Design”.

Asimismo, se muestran tres aportaciones relevantes en congresos internacionales.

Todas estas aportaciones se han generado en el área del conocimiento donde se enmarca la presente tesis doctoral y conforme a la normativa de la Universidad de Jaén para la defensa de tesis doctorales (Extracto de los artículos del reglamento de estudio de doctorado de la Universidad de Jaén adaptada a las directrices del R.D. 99/2011 y aprobado en Consejo de Gobierno el 6 de febrero de 2012).

CAPÍTULO I: MEMORIA

El moldeo por inyección presenta múltiples ventajas desde el punto de vista de la fabricación, como lo son los excelentes acabados en piezas a costes muy competitivos, comparado con cualquier otro proceso de manufactura.

Centrándonos en este proceso productivo, a continuación se enumeran las fases principales que describen el ciclo de fabricación de una pieza plástica y dentro de este nos centraremos en el sistema de enfriamiento que acompaña a cualquier molde de inyección, así como el estado del arte actual dentro del diseño y fabricación de este.

Atendiendo a las diferentes fases que conforman el tiempo de ciclo del proceso de inyección de plásticos (véase Fig.1), cabe destacar que la fase de refrigeración es aquella que más se prolonga en el tiempo y por tanto, la que mayor influencia tiene sobre el tiempo total, necesario para fabricar una pieza mediante inyección de plástico.

La secuencia de fases dentro del proceso comienza con el llenado o inyección del polímero en el molde y una vez completada esta, comenzaría la fase de compactación del plástico fundido; esta segunda fase se solapará con la tercera y última fase que será la fase de enfriamiento, la cual será objeto de estudio en esta tesis [1].

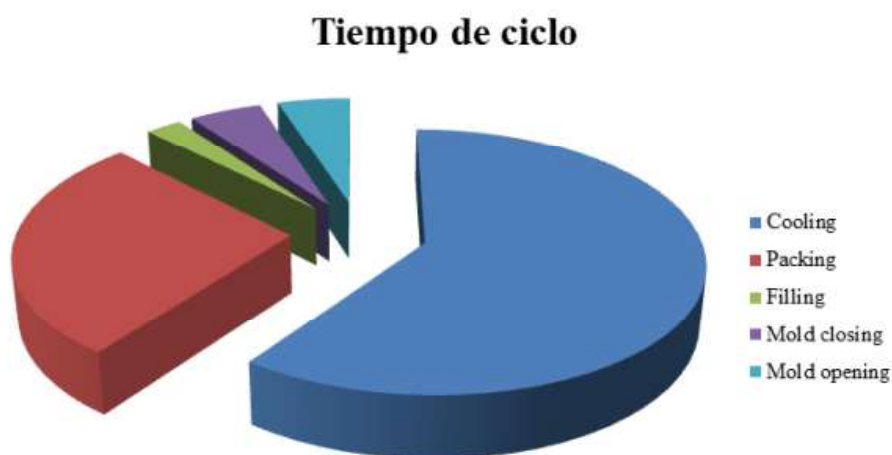


Fig.1.-Representación estimada de cada una de las fases implicadas en el ciclo de inyección.

La duración de la fase de enfriamiento en términos de tiempo, es la estrictamente necesaria para reducir el calor aportado por plástico fundido, canalizado a través del interior del molde de inyección. Es por esto que los moldes de inyección están

concebidos con una serie de canales de geometría uniforme, repartidos en ambas partes del molde, fija y móvil, donde un fluido con finalidad refrigerante circula en régimen turbulento permitiendo el intercambio térmico entre el material plástico y las paredes del molde.

Análogamente a esto, en este trabajo se detallan los principales inconvenientes que conllevan el desarrollo del diseño y fabricación de un sistema óptimo de refrigeración durante la fase de construcción del molde de inyección, así como el avance que supone la investigación para este sector industrial, resultando de esta una ventaja competitiva en términos económicos y medioambiental que implica la transformación del proceso de inyección hacia una posición bastante más sostenible y respetuosa con el medioambiente gracias en su mayor parte, a la reducción de recursos energéticos demandados en la fabricación.

En base a esto, la línea de trabajo planteada está basada en la generación de nuevas configuraciones y algoritmos de tipo geométrico /experto, cuya finalidad es la automatización y estandarización del proceso de configuración y diseño de los sistemas de refrigeración para moldes de inyección.

En este sentido, se establecen los criterios básicos en los que se fundamenta esta metodología planteada en la tesis, para la creación de avanzados algoritmos.

Partiendo del marco tecnológico en la que está situada esta tesis doctoral, dentro del programa de doctorado de Energías Renovables, en todos los supuestos planteados se ha considerado una fabricación sostenible no solo desde el punto de vista energético, sino también desde la materia prima utilizada en el proceso, como lo es la utilización de materiales plásticos reciclados de tipo químico en el proceso de fabricación [2].

Por tanto el concepto de producto “Eco-Sostenible” se impone como una necesidad dentro del ámbito de la fabricación, pues hemos de contemplar consideraciones en términos de diseño, sostenibilidad y ahorro energético que han de alinearse con los requerimientos exigidos, de tipo estético o funcional, para el producto fabricado.

Consecuentemente, se detallan los objetivos intermedios y finales definidos durante la planificación de esta tesis doctoral, exponiendo los resultados y conclusiones alcanzadas durante el manejo de las herramientas planteadas, así como el hecho de definir futuras vías de investigación que surgen a partir de esta.

1.1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la fabricación mediante moldeo por inyección es uno de los procesos de fabricación con más peso del sector productivo [3]. Un molde de inyección es un mecanismo de gran precisión, concebido para moldear geometrías de plástico de carácter complejo, con formas, colores y texturas variadas. Este proceso de fabricación se fundamenta en el cambio de fase y adaptación del plástico a la geometría de la pieza deseada, representada esta en el molde. Durante la fabricación, se deben cumplir criterios funcionales y geométricos previstos en la pieza (de tipo dimensional, mecánico, de aspecto o térmico); por otra parte todos los elementos que componen el molde de inyección deben estar diseñados para soportar numerosos ciclos de inyección, considerando como ciclo, el tiempo mínimo necesario para obtener la pieza planteada por cliente [4-5]. En este sentido, dichos requerimientos vienen implícitos en el diseño del molde de inyección, desde la temprana fase de diseño y configuración de molde, siendo esta fase determinante a la hora de obtener el producto final, sin olvidar la búsqueda de un proceso de inyección eficiente y óptimo.

Por tanto el diseño y concepción de un molde de inyección es determinante en gran medida, de las variables económicas implicadas en todo el proceso de fabricación. En este sentido, actualmente la fase de diseño requerida para la fabricación de un molde de inyección se realiza de manera casi artesanal, basada en la experiencia del personal que desarrolla su trabajo dentro de este campo [6]. Por otra parte, el diseño y dimensionamiento de los elementos que componen el molde de inyección, requiere de personal con competencias variadas en diseño, análisis reológico, mecánico y estructural de los materiales termoplásticos, así como el análisis térmico de los elementos del sistema refrigeración que componen el molde de inyección. En este sentido es condición indispensable, que los implicados en el desarrollo y fabricación de moldes posean competencias en software específicos de simulación numérica tipo CAE, además de las relacionadas con el diseño CAD [7].

De forma resumida, un molde de inyección lo componen dos regiones principales; parte fija (“Core”) y parte móvil (“Cavity”); (véase Fig.2).

Durante el diseño de ambas regiones se ha de contemplar un sistema de enfriamiento eficiente, que extraiga calor del molde a través del líquido refrigerante y por tanto, enfríe el polímero fundido que hay en su interior [8].

Es sabido que un enfriamiento no uniforme o asimétrico impacta directamente no solo en la rentabilidad del proceso sino también en la calidad de la pieza, traducido en deformaciones ocasionadas por contracciones diferenciales, defectos en el acabado superficial o tensiones residuales. Este enfriamiento será más o menos rápido en función de la temperatura del refrigerante y del régimen de circulación del mismo a través del molde.

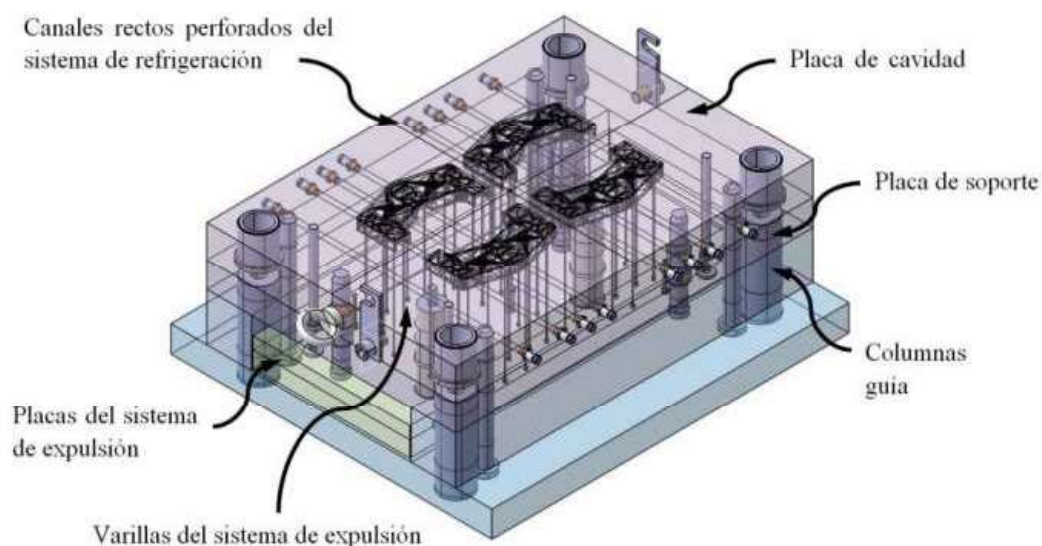


Fig.2.-Elementos que conforman el molde.

A modo de resumen y tomando algunas funciones que deben contemplarse durante el diseño de cualquier molde, la función térmica ha de ser analizada y resuelta de manera minuciosa al considerar el importante aporte de calor recibido desde el material introducido durante las fase de llenado y que ha de ser extraído parcialmente para reducir la temperatura de la pieza por debajo de la temperatura de expulsión, en un tiempo mínimo, contemplando los mecanismos de transferencia de calor de la Termodinámica Clásica (Conducción, Convección y Radiación).

Tres son las variables más relevantes que definen esta operación de enfriamiento dentro del molde: la temperatura, la presión y la capacidad frigorífica. A continuación, detallamos cada una de estas y su influencia en el ciclo de inyección.

-Temperatura de refrigerante.

Es lógico pensar que, a menor temperatura del agua de refrigeración, antes se producirá la solidificación del plástico dentro del molde, y consiguientemente, más rapidez habrá en el proceso. No obstante un rango de temperaturas bajo puede producir que la pieza fabricada tenga una menor calidad.

-Presión en circuito de refrigeración.

El líquido refrigerante se caracteriza por evaporar a bajas presiones (bajas temperaturas) y condensar a altas presiones (altas temperaturas).

-Capacidad frigorífica del sistema de refrigeración.

Indica la cantidad de calor que es capaz de absorber durante el ciclo de inyección.

Pues bien, teniendo en cuenta las variables intervinientes dentro del proceso de enfriamiento del molde y su repercusión final en el tiempo de ciclo de inyección, hemos de partir durante el diseño de este, con una serie de consideraciones que maximicen el rendimiento del proceso de enfriamiento, al menor coste energético posible [9].

Actualmente la mayoría de los diseños considerados durante la fase de construcción de un molde, consideran sistemas de refrigeración concebidos con medios tradicionales, basado en el mecanizado de los canales. Este hecho limita tanto en forma (circular), como en trazado a formas (rectas) y esquinas no redondeadas [10-11].

En las figuras 3 y 4 se muestran las características geométricas de la pieza plástica, formada por dos amplias cavidades enmarcadas dentro de un área rectangular.

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 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.

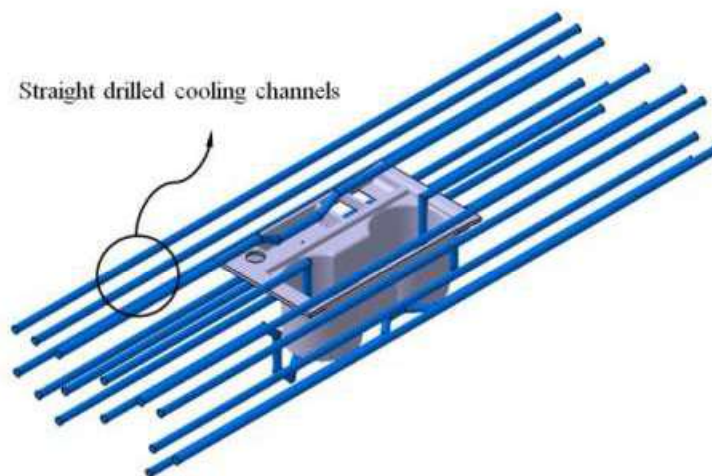


Fig.3.-Diseño del sistema de refrigeración tradicional.

Ambas limitaciones condicionan en gran medida el sistema de enfriamiento del molde con superficies curvas y/o detalles geométricos complejos, lo que repercute directamente en el tiempo de enfriamiento y en la calidad del producto inyectado debido a la imposibilidad de obtener un enfriamiento uniforme [12-16].

Un enfriamiento no uniforme o asimétrico impacta directamente no solo en la rentabilidad del proceso sino también, en la calidad de la pieza traducida en deformaciones ocasionadas por contracciones diferenciales, defectos en el acabado superficial o tensiones residuales.

Para evitar estos problemas, es posible utilizar tecnologías como fabricación aditiva. Esta nueva tecnología de fabricación permite diseñar y fabricar canales adaptados a la geometría de la pieza, que al estar conformados a la figura, mantienen una distancia constante entre la superficie aumentando la libertad de diseños tanto en canales como en trazados en ambas partes del molde, lo que confiere resultados óptimos tanto a nivel de proceso como a nivel de producto [17-19].

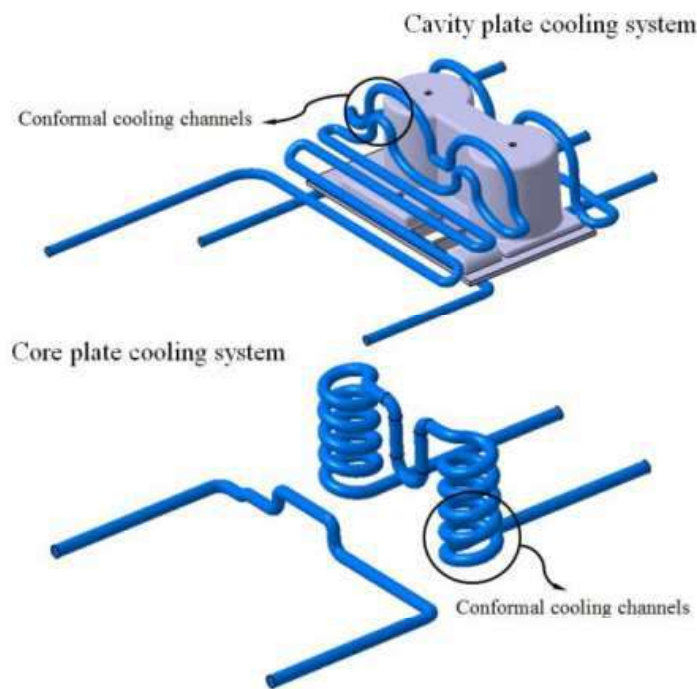


Fig.4.- Diseño del sistema de refrigeración conformal.

En la figura 5 se muestra la distribución de cada uno de los circuitos planteados (tradicional vs conformal) en ambas partes del molde y la disposición de estos con respecto a la figura de la pieza a fabricar por inyección.

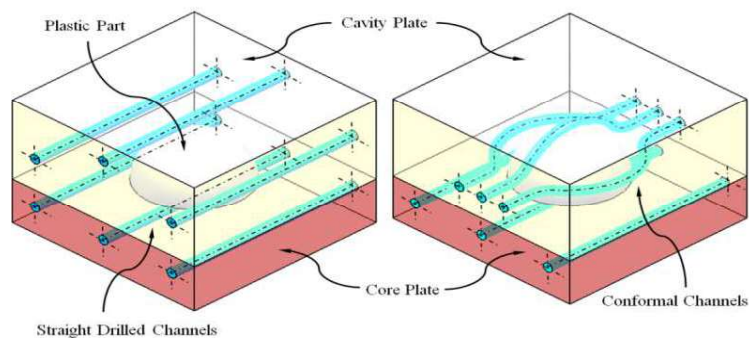


Fig.5.- Comparativa sistema de refrigeración tradicional vs conformal.

Asimismo, estos circuitos requieren del uso de tecnologías de fabricación aditiva como SLM o SLS, caracterizadas por su eficiencia, versatilidad y mucho más respetuosas con el medio ambiente que las tecnologías tradicionales[20].

La geometría, el tamaño y la ubicación de los canales de enfriamiento conformados tienen una gran influencia en variables del proceso, como el rendimiento en el intercambio térmico del sistema y por ende, en el tiempo total del ciclo empleado [21].

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 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 deposición de partículas en el sistema, obligando a mantenimientos mas minuciosos y periódicos; en estos casos es necesario partir como premisa durante la fase de diseño, que por debajo de un diámetro mínimo no sea posible dividir el sistema en sub-canales [22-23].

Como conclusión a todo lo expuesto, se llega a la confirmación de que el uso de técnicas de fabricación aditiva 3D y su aplicación en sistemas de refrigeración para moldes de inyección, mejora la productividad y economía del proceso de moldeo por inyección, ya que aporta una importante reducción en el tiempo de ciclo además de mejoras de peso relacionadas con la calidad dimensional y acabado, en zonas y superficies de piezas plásticas complejas.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El diseño, análisis y fabricación del sistema de refrigeración de un molde de inyección se considera parte importante en el diseño de la pieza de plástico por su influencia en la calidad, rendimiento del proceso de fabricación así como coste final del producto. En este sentido, y con el fin de lograr altos niveles de calidad, reduciendo los plazos de diseño y producción el ámbito académico e industrial, se buscan nuevas metodologías para abordar el reconocimiento de la geometría de la pieza de plástico en su aplicación al análisis térmico del proceso de fabricación de esta.

El diseño de los canales de enfriamiento conformados atrajo la atención de los diseñadores y fabricantes de moldes que centraron su investigación en el diseño y la disposición de estos canales. Un diseño avanzado de la estructura de enfriamiento para un molde de inyección puede mejorar la calidad de los productos y reducir el tiempo del ciclo.

Actualmente multitud de estudios ponen en relevancia el hecho de que un diseño de enfriamiento que utiliza canales de enfriamiento conformados presenta un mejor rendimiento que un diseño tradicional con canales rectos para enfriar superficies complejas [24].

Recientemente, Kirchheim, A. et al. [25] analiza la influencia del sistema de enfriamiento conformal en la inyección desde el punto de vista del proceso y sus resultados en el producto fabricado. En su investigación contrastó el resultado del sistema conformal versus una refrigeración convencional fabricada en acero. Los resultados muestran una disposición de temperatura más homogénea en el diseño conforme. Sin embargo, las características térmicas del material del molde varían utilizando acero convencional, siendo este un factor importante en el desempeño del sistema.

Continuando en esta línea, Oh, S.H. et al. [26] desarrolló un nuevo modelo para configurar un avanzado sistema de refrigeración. Por el cual se diseña un método de enfriamiento conformal adaptativo que admite un enfriamiento localizado pero uniforme para la región calentada mediante el empleo de estructuras de enfriamiento

microcelulares tipo (TPMS) “superficie mínima triplemente periódica” en lugar de los canales de enfriamiento típicos. El núcleo del molde con el mejor diseño de (TPMS) se fabricó utilizando un proceso de AM de metal tipo fusión de lecho de polvo (PBF), y los experimentos de moldeo por inyección se realizaron utilizando el núcleo del molde fabricado de forma aditiva. El molde desarrollado con enfriamiento TPMS logró un tiempo de enfriamiento de 15 s para satisfacer la tolerancia dimensional, lo que corresponde a una reducción del 40% en comparación con el enfriamiento convencional (25s).

Gotlih, J. et al. [27] Aplicaron un enfoque holístico al problema de controlar la temperatura de las áreas críticas de las herramientas mediante el enfriamiento conformado. Todo el proceso de moldeo por inyección se evalúa en la etapa de diseño de la herramienta utilizando cuatro criterios, uno de cada etapa del ciclo del proceso, para producir una herramienta con enfriamiento efectivo que permita tiempos de ciclo cortos y garantice una buena calidad del producto. La optimización multiobjetivo se basa en simulaciones numéricas. Los resultados de la simulación muestran que el enfriamiento conformado enfría efectivamente el área crítica de la herramienta y proporciona los tiempos de ciclo más cortos y la deformación más baja, pero esto conlleva una compensación en el índice de eficiencia de la herramienta.

Existen estudios que analizan experimentalmente el comportamiento, a nivel térmico, de un inserto de acero fabricado por deposición dentro de la matriz de un molde de inyección, fabricado este en acero; en esta línea cabe destacar el estudio desarrollado por Souza, A. et al. [28] destacando el enfoque de esta investigación centrado en la resistencia de contacto térmico entre un molde y su inserto, específicamente insertos hechos por fabricación aditiva (AM). Usando un sistema de estado estable térmico y presiones de contacto variables (0, 50, 75 y 100 bares). Para esta investigación se realizaron pruebas térmicas para configuraciones no adheridas y adheridas. En este sentido los resultados mostraron que el aumento de la presión de contacto permite alcanzar el equilibrio del sistema a temperaturas más bajas. Además, las pruebas térmicas mostraron que en la zona de transición de la configuración adherida no se forma una resistencia bien definida entre las dos muestras de acero como ocurre en la configuración no adherida. Para la configuración no adherida, los valores de resistencia de contacto térmico disminuyen al aumentar la presión de contacto aplicada, lo que mejora la transferencia de calor del sistema.

Marin, F. et al. [29] aplicaron un nuevo diseño de canal de enfriamiento conformal para moldes de inyección que contienen circuitos en serie y en paralelo. Continuando en esta línea, en segundo lugar también se evaluó un proceso de fabricación híbrido, que combina mecanizado y fabricación aditiva de polvos metálicos, para la fabricación de estos. Las muestras se fabricaron mediante fusión selectiva por láser (SLM) utilizando polvo de acero inoxidable (Corrax®), que se depositó sobre un sustrato de acero inoxidable PH13-8Mo premeconizado. Se evaluó la interfaz de la zona de fusión (MZI) entre los dos materiales. Los resultados mostraron que las superficies mecanizadas y fundidas con láser se fundieron y unieron con éxito. Adicionalmente a esto se constató que el molde con los canales de enfriamiento conformados redujo la deformación de las piezas de plástico inyectadas.

En resumen, todos los estudios anteriores demostraron que la mayoría de los investigadores solo se centraron en diseñar los canales de enfriamiento conformados para reducir la duración del tiempo del ciclo. Sin embargo, todavía se echa en falta el proceso de optimización de los parámetros de procesamiento, que mejoran la calidad de la pieza fabricada en moldes con canales de enfriamiento conformados.

Mohd Hanid et al. [30] describen un procedimiento partiendo de la base de que habiendo investigadores que han utilizado diferentes tipos de enfoques de optimización para obtener la mejor configuración de parámetros para controlar la calidad de la pieza moldeada, aún faltan enfoques de optimización para maximizar el rendimiento de los canales de enfriamiento para mejorar la productividad del proceso al disminuir el tiempo de ciclo del proceso. En este estudio, se emplearon enfoques de optimización como la Metodología de la Superficie de Respuesta (RSM), Algoritmo genético (GA) y Optimización del enjambre de gusanos luminosos (GSO) en la fabricación de una pieza determinada. Cada método de optimización se analizó para moldes de canales de enfriamiento conformados tanto de perforación recta como de forma cuadrada con ranura fresada (MGSS).

Investigadores como Rocha, S. et al. [31] ponen en análisis todos los artículos relevantes disponibles sobre este tema, destacando los modelos termomecánicos desarrollados por los diseñadores de TCS (sistema de control de temperatura) y las técnicas de optimización utilizadas.

En este sentido, la investigación llevada a cabo durante el desarrollo de esta tesis proporciona un conocimiento científico útil además de una solución alternativa para la industria del moldeo por inyección de plástico en la búsqueda de la mejora en la calidad de las piezas moldeadas, en términos de deformación, utilizando para ello los enfoques de optimización propuestos en el uso de moldes de canales de enfriamiento conformados.

Por tanto, esta tesis doctoral tiene como finalidad superar el estado de la técnica con el desarrollo de dos conceptos complementarios y bien diferenciados para el diseño del sistema de refrigeración.

El primero de ellos creando un nuevo sistema para el diseño automatizado de circuitos de refrigeración conformal en moldes de inyección de plástico usando fabricación aditiva SLM. Para ello, se ha desarrollado un algoritmo de diseño, programado en Matlab, utilizando algoritmos expertos de tipo genético.

Los algoritmos genéticos se definen como una herramienta basada en el proceso de selección natural para obtener soluciones a problemas de optimización y búsqueda. La idea principal de estos algoritmos es la imitar el proceso de selección natural.

Partiendo de la geometría de la pieza y discretizada está en elementos finitos tipo ($P' \in \square^3$) y las condiciones de contorno que definen el proceso de inyección (Temperatura de molde y masa, tiempo de inyección, perfil de compactación, tiempo de refrigeración, tamaño y tipo de entrada, material de inyección); la temperatura del flujo al final de la fase de llenado, se define mediante una simulación numérica de reología. Este análisis se lleva a cabo utilizando el software de simulación Moldex3D R16 para moldeo por inyección.

Este algoritmo o sistema experto utilizará como variables de entrada, el mapa discreto de temperaturas del flujo de plástico fundido al final de la fase de llenado, obtenido de la simulación numérica y un conjunto de parámetros geométricos extraídos de la malla discreta aplicada al modelo, que junto con tecnologías y requerimientos funcionales derivados de la fabricación de moldes de inyección, actúa según la siguiente secuencia:

En una primera fase, el algoritmo agrupa y clasifica la temperatura discreta de los nodos al final de la fase de llenado, en áreas geométricas llamados grupos de temperatura o Cluster. La información topológica y reológica de estos cluster junto con la información

geométrica de la malla superficial, queda almacenada en un modelo discreto multidimensional de la pieza plástica.

En una segunda fase, aprovechando el uso de algoritmos relacionados con la genética evolutiva y mediante la aplicación de un modelo físico vinculado a las especificaciones del cluster, el propuesto algoritmo diseña y dimensiona automáticamente todos los parámetros requeridos para el sistema de refrigeración conformal.

El método presentado, mejora cualquier modelo de diseño de sistema de refrigeración convencional ya que los tiempos de enfriamiento obtenidos son análogos a los tiempos de enfriamiento de los modelos analíticos, incluyendo condiciones de contorno y soluciones ideales que no superen el 5% de error relativo en los casos analizados. La calidad final de las piezas de plástico después de la fase de enfriamiento, cumplirá con los criterios mínimos y requisitos establecidos por la industria de moldeo por inyección.

Dicho sistema dará solución al complejo problema del diseño de la refrigeración del molde, proporcionando una solución factible que permita disminuir enormemente los costes de producción en el ámbito del plástico.

De este modo la tesis doctoral será la primera aplicación de estas características que permita diseñar de forma automatizada el circuito de refrigeración conformal de aplicación en el entorno de la industria 4.0. Las nuevas metodologías de geometría computacional desarrolladas en la tesis incorporarán todos los requerimientos tecnológicos y funcionales del proceso de moldeo, lo que permitirá junto con el uso de sistemas expertos, obtener un diseño automatizado de los canales de refrigeración en moldes aptos para un uso industrial.

Todo lo anteriormente descrito, se plantea considerando la ausencia de limitaciones puntuales de molde tales como sistemas auxiliares de desmoldeado, sistemas de expulsión complejos o mecanismos específicos en molde, dependientes del propio diseño de pieza o del proceso.

El segundo concepto desarrollado consiste en establecer una metodología de trabajo para casos en los que la propia configuración del molde limita tanto en forma como en trazado, el desarrollo de un sistema de refrigeración conformal acorde a las restricciones que acompañan a la fabricación aditiva.

Dicha metodología prevé un diseño que consiste en el desarrollo de un sistema híbrido formado por un inserto de acero, con coeficiente de transferencia térmica mejorado con respecto al acero utilizado para el resto del molde, combinado con un sistema de refrigeración conformal que debido a la configuración geométrica de la pieza, presentaría un trazado deficiente e irregular para conseguir un enfriamiento equilibrado.

Esta configuración híbrida sería considerada para diseños de geometrías complejas, con marcadas variaciones de espesor y cambios bruscos en profundidad respecto a la línea de partición del molde. Esta limitación, junto con el diseño del sistema expulsión y mecanismos auxiliares de desmoldeado, (correderas), hace imposible enfriarlo adecuadamente utilizando sistemas tradicionales o incluso diseños conformal en sistemas de enfriamiento.

El uso de un inserto de acero con coeficiente de transferencia térmica mejorada [32], permitirá una transferencia óptima del flujo de calor en las zonas más desfavorecidas o pobres en cuanto al trazado del sistema de enfriamiento, debido al aumento en el rendimiento de la transferencia térmica de la zona, aportado por la consideración de acero.

Para el buen funcionamiento de esta configuración, es necesario prever un sistema adicional de canal o canales de enfriamiento en las proximidades del inserto, no para el enfriamiento de la pieza de plástico sino para el enfriamiento del propio inserto, mejorando el intercambio térmico entre este y el flujo de refrigerante. De esta manera, es posible mantener un intercambio de calor constante durante todo el ciclo de fabricación de la pieza plástica.

Actualmente existen numerosos materiales y marcas comerciales que fabrican insertos térmicos, concebidos con materiales de alta conductividad térmica tales como cobre, berilio-cobre o cobre sinterizado de alta resistencia materiales de tungsteno. La alta conductividad térmica de estos materiales aumenta la dinámica térmica del molde limitando factores como la resistencia a la corrosión y oxidación, que es clave durante la vida útil del molde. Dentro del abanico de posibilidades existentes en el mercado para la elección del inserto térmico, en nuestro caso [33], la elección se debe a las propiedades que confiere al sistema ya que es un acero para herramientas de trabajo en caliente, templado y revenido, desarrollado recientemente con el objetivo de proporcionar un

acero con altas propiedades térmicas conductividad y alta resistencia al desgaste a un costo asumible dentro del presupuesto total de fabricación del molde de inyección.

Este material presenta un rango de dureza de trabajo después de la aplicación del tratamiento térmico pertinente, que suele oscilar entre 44 HRc y 53 HRc. mientras que su conductividad térmica puede alcanzar casi el doble que la del trabajo en caliente comparada con aceros convencionales, con el mismo nivel de dureza. Está especialmente indicado en aplicaciones sujetas a un alto nivel de desgaste y en configuraciones en las que la herramienta requiere alta conductividad térmica y dureza. Además, el material empleado en nuestra investigación, permite altos niveles de pulido (espejo y superiores), que se requieren en ciertos acabados de piezas fabricadas por inyección.

Este tipo de acero para herramientas de moldeo, permite aumentar considerablemente la productividad de la proceso de moldeo, así como minimizar problemas relacionados con la generación de puntos calientes/fríos y una mala distribución de la temperatura superficial, durante el proceso de fabricación por inyección.

A continuación se detallan algunas de las características más relevantes de este material.

Table 1. - Physical and Mechanical Properties.

<i>Properties</i>	<i>300K</i>	<i>Unit</i>
Density	7.81	g/cm ³
Mechanical resistance	1400	MPa
Yield Strength 0.2%	1070	MPa
Elongation	17	%
Reduction of Area	50	%
Elastic Modulus	210	GPa

Table 2. - Thermal Properties.

<i>Properties</i>	<i>300K</i>	<i>475K</i>	<i>Unit</i>
Linear Thermal Expansion Coefficient	-	11.7	*10 ⁻⁶ /k
Thermal Diffusivity	13.5	-	mm ² /s
Thermal Conductivity	50	-	W/m*K
Specific Heat Capacity	0.47	-	J/g*K

Los valores proporcionados en la tabla son valores típicos (ni valores máximos ni mínimos), para materiales tratados térmicamente adecuadamente a un nivel de dureza de 44 HRc. Los valores de conductividad térmica se calculan sobre la base de los valores de difusividad térmica medidos por el método de destello láser.

Por tanto la investigación desarrollada en la tesis mejorará notablemente la calidad de las piezas moldeadas, incrementando la eficiencia y productividad del proceso de moldeo.

En lo que se refiere a la fase de diseño, en esta se consigue simplificar de forma notable las necesidades de medios y conocimiento asociados a la fase de diseño de un sistema de refrigeración para un molde de inyección.

Esta tesis desarrolla la primera aplicación que permita diseñar de forma automatizada el circuito de refrigeración conformal para ser implementado en el entorno de la industria 4.0.

Centrándonos en la fase de producción, nuestro diseño consigue disminuir enormemente los costes de producción asociados a la fabricación por moldeo.

Con las configuraciones desarrolladas durante la realización de la tesis, se mejorará notablemente la calidad de las piezas moldeadas, disminuyendo sobre todo los defectos causados por el stress residual térmico, incrementando la eficiencia y productividad del proceso de moldeo, reduciendo el tiempo ciclo en un 30% respecto a los valores obtenidos mediante diseños de refrigeración tradicionales. Esta reducción del tiempo ciclo durante el proceso de fabricación, junto a la utilización de materiales plásticos reciclados de tipo químico, implica no solo una reducción del gasto energético sino

CAPÍTULO I: MEMORIA

también, la búsqueda de una fabricación más sostenible y respetuosa con el medio ambiente [34-35].

1.3. OBJETIVOS

En el moldeo de piezas de plástico, la etapa de refrigeración se considera la más importante en términos de productividad y calidad de pieza acabada. Sin embargo teniendo en cuenta condicionantes de peso dentro del proceso, como la baja difusividad térmica de los materiales plásticos empleados en la fabricación, la complejidad geométrica de la pieza de plástico, del molde que la fabricará y las limitaciones de los procesos tradicionales “C.N.C.” que con frecuencia impiden diseñar sistemas de refrigeración con un adecuado intercambio térmico de temperaturas entre la superficie del molde y de la pieza. En cambio actualmente, los nuevos procesos de fabricación aditiva con “laser-melting” permiten fabricar canales conformal adaptados a la geometría del molde, reduciendo la distancia del canal a la superficie del mismo.

El objetivo principal de esta tesis, es el desarrollo de una novedosa metodología para el diseño inteligente del sistema de refrigeración en el proceso de fabricación de moldeo por inyección. Esta metodología es capaz de superar el estado de la técnica actual, dado que no existe ninguna metodología hasta el momento capaz de cumplir con las especificaciones geométricas-tecnológicas y de sostenibilidad requeridas por el proceso de fabricación de moldeo por inyección. Asimismo y siguiendo esta línea de investigación la tesis tiene también como objetivo desarrollar nuevos diseños de refrigeración conformal no utilizados hasta el momento capaces de mejorar la sostenibilidad de los moldes actuales. Para ello estos diseños optimizarán los indicadores de medida de la eficiencia del molde disminuyendo el tiempo de ciclo, garantizando un enfriamiento equilibrado, incluso para piezas altamente complejas llegando a zonas restrictivas del molde que condicionan la fabricación de diseños de refrigeración conformal estándar.

De este modo la tesis permite llegar a un nuevo concepto de “Green-Mold”, no utilizado hasta el momento en el que el molde puede ser totalmente sostenible en cuanto al material inyectado, el proceso productivo de fabricación del molde y la eficiencia del propio proceso de fabricación del componente, disminuyendo costes mejorando la calidad y reduciendo las emisiones con independencia de la complejidad geométrica de la pieza.

Para alcanzar este objetivo se han definido los siguientes objetivos intermedios, que han permitido la consecución del mismo:

1.- Desarrollo de una metodología para el diseño automatizado del sistema de refrigeración de un molde de inyección, en función de la forma geométrica de la pieza de plástico, la cual queremos fabricar.

La metodología estará basada en el desarrollo de un conjunto de algoritmos que permitan el mejor diseño de sistema de refrigeración de un molde, en función de la geometría de la pieza y del mapa de temperaturas obtenido durante la inyección de esta, consiguiendo como resultado, minimizar el tiempo de ciclo de inyección de esta y un diseño apto para fabricación mediante tecnología de impresión 3D.

2.- Desarrollo de una metodología para el diseño de un sistema de refrigeración conformal, donde la existencia de restricciones o elementos auxiliares contemplados en molde para asegurar un proceso robusto de inyección, suponen una limitación importante en el diseño equilibrado del sistema de enfriamiento.

Esta nueva metodología, aporta al molde características destacables como son:

- Fabricación de circuitos específicos en zonas de pequeñas dimensiones tales como insertos de molde, con restricciones de diseño de circuitos de refrigeración mediante el método tradicional.
- Diseño de geometrías específicas para canales tipo cilíndricos variables o elípticos, que permitan optimizar el tiempo de enfriamiento así como la distribución y longitud de sectores dentro del molde.
- Sistemas de refrigeración mucho más eficientes desde el punto de vista medioambiental gracias al carácter eficiente y respetuoso con el medio que supone la reducción de recursos energéticos a lo largo del ciclo de inyección.
- Diseño de circuitos conformal en un molde, que permita la aplicación de metodologías de inyección actuales, dentro de un sector marcado principalmente por varios factores de peso como lo son su “alta productividad” al ser un proceso tecnológico rápido que aprovecha de forma eficiente la automatización existente en la industria manufacturera; y su “alta competitividad” dentro del contexto en el que se

CAPÍTULO I: MEMORIA

desarrolla y la demanda a nivel global de un proceso de fabricación más limpio y respetuoso con el entorno en el que opera.

1.4. PUBLICACIONES

A continuación se detallan las publicaciones y artículos relevantes en revistas de alto impacto, como resultado del trabajo de investigación realizado para cumplir con los objetivos marcados en la presente tesis doctoral.

Como inicio de la investigación y centrados en la optimización del proceso de inyección, considerando como objetivo principal marcado, el diseño y fabricación del molde de inyección, se parte de la búsqueda de herramientas que faciliten el proceso para el desarrollo de la herramienta, en este caso el molde de inyección.

En este sentido el primer objetivo planteado en esta tesis consiste en el diseño de sistemas de refrigeración conformal de forma automatizada que implica una notable reducción en la toma de decisiones durante la fase de diseño, por parte del diseñador.

Por tanto la primera parte de nuestro trabajo está centrada en el desarrollo de nuevas herramientas encaminadas hacia el diseño automatizado e inteligente del sistema de refrigeración de un molde de inyección, utilizando nuevas herramientas de fabricación sostenibles, descrita con la siguiente publicación:

1. **Torres-Alba, Abelardo**, Jorge Manuel Mercado-Colmenero, Daniel Díaz-Perete y Cristina Martín-Doñate. **“A New Conformal Cooling Design Procedure for Injection Molding Based on Temperature Clusters and Multidimensional Discrete Models”**.

Con este artículo se presenta un nuevo método para la automatización en el diseño del sistema de refrigeración de un molde de inyección para la fabricación de piezas plásticas. El algoritmo desarrollado en esta publicación, parte de la geometría de la pieza de plástico discretizada en elementos finitos de tipo tetraedros.

Partiendo del modelo de malla virtual de pieza plástica $P^* \in \square^3$, el material termoplástico que lo compone y la temperatura del flujo durante la fase de llenado definida mediante simulación numérica para el proceso de inyección.

Para este análisis numérico se ha utilizado un software de reología como Moldex 3D R16.

Este algoritmo se ha desarrollado considerando como variables de entrada el mapa discreto de temperaturas del frente de flujo, justo antes del inicio de la fase de compactación, un conjunto de parámetros geométricos correspondientes a la pieza y requerimientos tecnológicos y funcionales para canales de refrigeración en fabricación aditiva; pues bien, agrupando todas estas variables en formato discreto, aquellas áreas geométricas de la pieza plástica con temperatura homogénea y resultante de la temperatura de la pieza, al final de la fase de llenado resultante de la simulación, se agrupará en grupos o cluster.

Por tanto, la temperatura de cada cluster coincidirá con la temperatura promedio de los nodos pertenecientes a este, lo que minimiza la desviación estándar con respecto al resto de temperaturas marginales de todo el sistema.

Los parámetros tecnológicos y geométricos obtenidos tras la generación de los cluster se almacenan en un modelo discreto multidimensional de la pieza de plástico; finalmente con esta información y un algoritmo experto de tipo genético diseñado para tal fin, es posible dimensionar de forma automática todos los parámetros necesarios para el diseño de un sistema de refrigeración conformado a la geometría de la pieza como lo son el diámetro de los canales, la distancia y posicionamiento de cada canal con respecto a la superficie de la cavidad del molde, sectorizando estos en ambas partes del molde; de tal manera que este diseño confiere y garantiza un sistema de enfriamiento equilibrado a la geometría de partida, evitando desviaciones o diferencias en el tiempo de refrigeración de la pieza, durante el proceso de fabricación de esta.

Este diseño impactará directamente en el tiempo de ciclo total empleado en el proceso de inyección y por tanto supone una solución a la búsqueda de la mejora y optimización de este proceso de fabricación, que se mantiene en la búsqueda constante de la competitividad y respeto al entorno en el que se desarrolla dicha actividad.

Continuando en esta línea de investigación y centrados en la optimización del tiempo de ciclo total, con la reducción del tiempo de enfriamiento, se continúa con la búsqueda de nuevos desarrollos geométricos para sistemas de refrigeración en piezas de gran complejidad.

Esta nueva fase en la investigación dio lugar al desarrollo de un sistema de refrigeración conformal para piezas con función óptica, en las cuales destacan variaciones de espesor importantes y por tanto, deformaciones por contracción que han de ser controladas en detalle para evitar pequeñas desviaciones de forma en superficies ópticas.

Este trabajo ha sido desarrollado y adecuadamente descrito con la siguiente publicación.

2. Jorge Manuel Mercado-Colmenero, **Torres-Alba, Abelardo**, Javier Catalán-Requena y Cristina Martín-Doñate. **“A New Conformal Cooling System for Plastic Collimators Based on the Use of Complex Geometries and Optimization of the temperature Profiles”**.

El artículo muestra un nuevo diseño de canales de enfriamiento conformados, para su aplicación en la fabricación de piezas plásticas con variaciones importantes de espesor, cuyas tolerancias de forma hacen de este tipo de pieza, un reto en su fabricación y funcionalidad, en este caso óptica.

Los canales conformes que se presentan superan el desempeño térmico y dinámico de los canales conformes tradicionales y estándar, ya que implementan nuevos tramos de topología compleja, capaces de cumplir con las altas especificaciones geométricas y funcionales de la parte óptica, así como con los requerimientos tecnológicos de la fabricación aditiva de las cavidades del molde.

Para evaluar la mejora y eficiencia térmica de la solución mostrada, se realiza un análisis numérico transitorio de la fase de enfriamiento, comparando el enfriamiento tradicional, con la nueva geometría que se propone. La evolución del perfil de temperatura frente al espesor de la pieza en el núcleo colimador con mayor espesor y temperatura, ha sido evaluada en modo transitorio. En este sentido el análisis de los perfiles térmicos, la evolución de la temperatura media de la pieza y el uso de la fórmula de Fourier, muestran una importante reducción en el tiempo de ciclo en comparación con el enfriamiento tradicional.

Como punto a destacar, el uso del nuevo sistema de enfriamiento reduce la cantidad de espesor en el núcleo del colimador que está por encima de la temperatura de eyección del material plástico, lo que impacta de forma directa en el tiempo de ciclo de inyección. En este sentido este diseño en el sistema de enfriamiento incide en la mejora

de la uniformidad del mapa de temperatura de la superficie óptica colimadora, el campo de desplazamiento y las tensiones asociadas a él gradiente de temperatura existente en la óptica.

Una vez alcanzado este nivel de optimización en la búsqueda de un sistema de refrigeración conformal, se alcanzan los condicionantes de uniformidad en el mapa térmico de la pieza, reducción del tiempo de ciclo total de inyección y como consecuencia, mejora notable en la calidad final de la pieza fabricada;

Siguiendo esta línea de trabajo en la búsqueda de configuraciones de circuitos conformal, que optimicen el proceso de inyección y los resultados del producto fabricado, se adjuntan dos trabajos publicados del tipo “Conference Paper”, indexados en la base de datos bibliográfica y bibliométrica Scopus.

La primera de estas publicaciones corresponde a un avance de la investigación presentado en el congreso internacional de Ingeniería Gráfica JCM 2019 celebrado en Logroño, con el que se obtiene el premio a la mejor comunicación en el área de “Manufacturing and Industrial Process Design”. En esta el objetivo planteado es la búsqueda de diseños con circuitos de refrigeración conformal, que optimizaran el rendimiento térmico del circuito durante la fase de enfriamiento, dentro del ciclo de inyección.

Para evaluar dicho rendimiento, se han generado tres configuraciones diferentes de sistemas de refrigeración, considerando una misma pieza patrón objeto de estudio y quedando desarrollado en la siguiente publicación.

3. **Torres-Alba, Abelardo, Diaz-Perete, D. Martin-Doñate, C., & Mercado-Colmenero, J. M.** “*Conformal Cooling Systems Design and Dimensioning for Injection Molds*”.

Los procesos de mecanizado convencionales actuales solo permiten la fabricación de sistemas de refrigeración simples basados en canales perforados rectos, que tienen un rendimiento de refrigeración bajo en zonas de la pieza de difícil acceso. Sin embargo, con el desarrollo de las tecnologías de fabricación aditiva 3D, los canales de refrigeración pueden adaptarse con mayor versatilidad a la topología de la pieza plástica

para conseguir los altos requisitos geométricos y funcionales que demanda el sector industrial.

Para evaluar el rendimiento de los sistemas de refrigeración de tipo conformado, se han generado tres configuraciones diferentes. En la pieza de estudio utilizada como patrón, se han definido las trayectorias en zig-zag, espiral e isocontorno para modelar los canales de enfriamiento conforme que se adaptan a su geometría.

Mediante simulación numérica se han comparado los resultados del tiempo de refrigeración y de temperatura de la pieza inyectada, una vez finalizada la fase de enfriamiento en cada una de estas configuraciones.

La metodología desarrollada realiza un dimensionamiento óptimo de las principales variables tecnológicas y geométricas de los canales de refrigeración, mejorando el intercambio térmico en aquellas regiones de la pieza plástica donde los elementos convencionales del sistema de refrigeración pierden eficiencia. Las simulaciones numéricas incluidas en el presente manuscrito se llevaron a cabo utilizando la simulación de moldeo por inyección Moldex 3D R16.

Con esta configuración, los resultados obtenidos muestran que el trazado en zig-zag, dentro de un diseño de enfriamiento conformal, es el que mejor se adapta a la topología de la pieza plástica en estudio, ya que presenta un menor tiempo medio de enfriamiento y menores desviaciones estándar de temperatura en el molde.

Esto supone una mejora en la calidad final de la pieza, ya que el mapa de temperatura tras la fase de enfriamiento es uniforme reduciendo los defectos derivados de las tensiones residuales provocadas por los gradientes de temperatura. Asimismo, se comprueba que el uso de técnicas de fabricación aditiva 3D mejora la productividad y economía del proceso de moldeo por inyección, al reducir su tiempo de ciclo y optimizar la calidad final de la pieza fabricada.

La segunda de estas publicaciones presentada en el congreso internacional de Ingeniería Gráfica JCM 2020, del tipo “Conference Paper” e indexada en la base de datos bibliográfica y bibliométrica Scopus, plantea una plataforma web inteligente para uso en entornos de industrias 4.0, destinadas a la fabricación de moldes de inyección donde apoyados en algoritmos como el descrito en la primera publicación y en línea con los objetivos planteados en la tesis, sea posible definir un diseño, con circuitos de

refrigeración conformados a pieza y diseñados de forma automatizada, reduciendo de forma considerable la interacción de personal cualificado en la fase de diseño y fabricación de un molde de inyección.

4. Cristina Martín-Doñate, Shaikheleid, S. **Torres-Alba, Abelardo** y Jorge Manuel Mercado-Colmenero. **“A New Smart Web Platform for Plastic Injection Molds in Industry 4.0 Environments”**.

En este sentido los trabajos iniciales están basados en el desarrollo de una plataforma web inteligente para su uso en entornos de industrias 4.0, destinadas a la fabricación mediante moldeo por inyección. La nueva plataforma requiere como único input el modelo CAD de la pieza plástica en formato discreto, la precisión del análisis, el material termoplástico del que se fabricará la pieza y el número de piezas a fabricar por año.

De esta manera, es posible diseñar un molde con sistemas de refrigeración que facilitan un enfriamiento uniforme, expulsión balanceada y garantizando mediante la posición de la entrada de un llenado uniforme de la cavidad.

La plataforma se estructura mediante la implementación de cuatro algoritmos geométrico-expertos encargados de analizar la desmoldeabilidad geométrica de la pieza plástica de forma automatizada, así como dimensionar y posicionar el conjunto de elementos que constituyen el sistema de alimentación, el sistema de enfriamiento y el sistema de eyección del molde. La arquitectura de estos algoritmos está estructurada en dos etapas bien diferenciadas: La primera etapa de ámbito geométrico, se encarga de reconocer de forma automatizada la topología de la pieza plástica, obteniendo información de los parámetros geométricos necesarios para el óptimo dimensionado del molde.

En una segunda etapa, se optimizan los diferentes elementos que constituyen los tres sistemas principales del molde (enfriamiento, expulsión y alimentación), utilizando algoritmos de optimización genética.

Finalmente, la plataforma conecta las variables expertas resultantes con el algoritmo encargado de dimensionar de forma óptima, los elementos estructurales y mecánicos que constituyen el molde. Esto significa que el molde obtenido permite una

transferencia de calor uniforme entre la pieza de plástico y el fluido refrigerante, una expulsión equilibrada de la pieza de plástico del molde y una fase de llenado equilibrada de las cavidades del molde de inyección.

Esta herramienta constituye un apoyo notable al proceso de diseño y desarrollo de un molde de inyección eficiente sin la intervención de personal cualificado en estos trabajos, ni la utilización de herramientas de simulación para el desarrollo de este.

Finalmente y dentro de los objetivos marcados en esta investigación con la búsqueda de metodologías que asistan al diseño y planificación de un sistema de refrigeración conformal, óptimo y accesible desde la tecnología actual de fabricación aditiva, se trabaja en el caso planteado en fabricación, en el cual un sistema de refrigeración conformal por sí solo, quedaría incompleto en el cumplimiento de los principios marcados para este tipos de sistema de enfriamiento en moldes de inyección, bien por la geometría de la pieza o la configuración de molde, al hacer imposible establecer un sistema que permita un enfriamiento rápido y equilibrado, en todas las áreas de la pieza inyectada.

Por tanto, en esta búsqueda y desarrollo de un procedimiento para el diseño de un sistema de refrigeración conformal en un molde de inyección, en situaciones dependientes de una geometría compleja de la pieza a fabricar, se conciben las tres últimas publicaciones.

5. **Torres-Alba, Abelardo**, Jorge Manuel Mercado-Colmenero, Juan de Dios Caballero-García y Cristina Martín-Doñate. “**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**”.

Este presenta un nuevo diseño de canales de enfriamiento conformados en forma de triple gancho, para su aplicación en piezas ópticas de gran espesor, con núcleos profundos para las que se exige unos valores dimensionales y ópticos muy ajustados.

Con este tipo de geometrías con pequeñas dimensiones del núcleo y los altos valores exigidos en tolerancias de forma, (alabeos y tensiones residuales), no es posible el uso

de canales de enfriamiento estándar o conformados concebidos de una forma tradicional.

En este trabajo se combina el uso de un nuevo sistema de enfriamiento conformal triple, en forma de gancho, con el uso de tres subsistemas de enfriamiento conformal independientes, adaptado a las complejas condiciones geométricas debido a las correderas que rodean completamente las áreas ópticas de la pieza.

Adicionalmente, este nuevo diseño de refrigeración conformal se complementa con un pequeño inserto fabricado con un acero optimizado, ubicado en la zona interna de la parte óptica junto a las facetas ópticas, con el fin de mejorar la transferencia térmica del sistema.

Durante este trabajo se detalla el proceso de preparación y modelado para el análisis, mediante simulaciones numéricas, a partir del cual se evalúa el comportamiento térmico de los canales de enfriamiento conformados así como los parámetros reológicos asociados al proceso de fabricación de la pieza plástica objeto de estudio. En este sentido, los resultados obtenidos bajo este diseño muestran una mejora en la eficiencia térmica importante, comparándolos con la solución tradicional.

El aumento de uniformidad en el mapa de temperaturas de la superficie de la pieza plástica provoca una mejora en el campo de desplazamiento y en el mapa de tensiones residuales en comparación con los resultados obtenidos para el sistema de refrigeración tradicional, impactando directamente en la calidad de la pieza fabricada.

Por otra parte, el nuevo diseño de enfriamiento planteado reduce el tiempo de ciclo de la pieza en comparación con la geometría de enfriamiento tradicional, lo que impacta de forma directa en la mejora y eficiencia del proceso. Este hecho genera una importante reducción en los recursos energéticos implicados en este sistema productivo, en línea con la búsqueda y sostenibilidad de un proceso de transformación comprometido y verde.

En el sexto artículo, se describe un diseño de sistema de enfriamiento alternativo que garantiza los principios marcados para el proceso de fabricación por inyección, donde la existencia de restricciones planteadas en el molde por la propia geometría de la pieza, dificulta la posibilidad de encontrar un diseño conformal que garantice un proceso de

enfriamiento equilibrado y óptimo, ofreciendo así la funcionalidad y el aspecto planteados durante su diseño.

6. **Torres-Alba, Abelardo,** Jorge Manuel Mercado-Colmenero, Juan de Dios Caballero-García y Cristina Martín-Doñate. **“A Hybrid Cooling Model Based on the Use of Newly Designed Fluted Conformal Cooling Channels and Fastcool Inserts for Green Molds”**.

Este artículo presenta un nuevo método para el diseño automatizado del sistema de refrigeración de un molde de inyección, donde la existencia de restricciones planteadas en el molde dificultan la posibilidad de encontrar un diseño de canales, que garantice un proceso de enfriamiento equilibrado y óptimo, con cualquiera de las consideraciones vistas anteriormente para la búsqueda y optimización de esta fase del proceso de inyección. Aunque un sistema de enfriamiento conformado es adecuado para enfriar áreas complejas, con frecuencia la geometría de la pieza de plástico tiene limitaciones de espacio que dificultan la colocación de estos canales. Esto suele ocurrir cuando es necesario refrigerar zonas delgadas y geometrías con cavidades profundas.

La pieza plástica objeto de estudio se encuadra dentro de este último grupo, presentando grandes limitaciones geométricas caracterizadas por zonas internas de difícil acceso junto a un área central de gran profundidad y anchura. La configuración geométrica de esta pieza evita por tanto, el uso de canales conformes con una distribución equilibrada que permita un proceso de enfriamiento uniforme debido fundamentalmente a dos limitaciones: la primera de ellas se presenta por la falta de su espacio en el núcleo para acceder con una distribución de canales adecuada dentro de todo el sistema de refrigeración; en cuanto a la segunda de ellas referida a el diámetro de estos canales, demasiado pequeño para proporcionar una refrigeración bien dimensionada.

Para resolver dichas limitaciones, este trabajo presenta un diseño de enfriamiento híbrido, basado en el uso de insertos Fastcool en combinación con sistemas de enfriamiento de tipo conformal.

Los insertos Fastcool se caracterizan por su alto coeficiente de transmisión térmica, lo permite que el intercambio de calor en las regiones de alta temperatura en la pieza de plástico se acelere y mejore en gran medida. Sin embargo, la zona del molde en

contacto con el inserto acumula una gran cantidad de flujo de calor que el inserto no es capaz de disipar, generando puntos locales con gran acumulación de calor y altas temperaturas. El uso de canales de refrigeración conformal en estos casos, puede ser muy útil, no tanto para enfriar directamente la pieza de plástico sino para enfriar el propio inserto Fastcool, sobre todo en aquellas piezas de plástico en las que el uso de canales de refrigeración no es suficiente. De esta forma, es posible minimizar el tiempo de enfriamiento de la pieza haciendo sostenible el proceso de moldeo, manteniendo la calidad superficial de la pieza moldeada.

La geometría de los canales de refrigeración, especialmente el diseño de los canales de refrigeración conformal, se ha parametrizado y adaptado tanto a la geometría de pieza como a los requisitos técnicos y tecnológicos que impone el proceso de fabricación aditiva 3D por sinterizado láser (SLS).

Durante este trabajo se detalla el proceso de preparación y modelado del análisis mediante simulaciones numéricas, a partir del cual se evalúa el comportamiento térmico de los canales de enfriamiento conformado, así como los parámetros reológicos asociados al proceso de fabricación de la pieza plástica objeto de estudio.

Por tanto es a partir de este análisis donde se observa el comportamiento térmico y dinámico del flujo de refrigerante a lo largo del diseño de canales de refrigeración, así como el intercambio térmico que se produce entre estos, la pieza de plástico, el inserto Fastcool y el molde de inyección.

7. Torres-Alba, Abelardo, Jorge Manuel Mercado-Colmenero, Juan de Dios Caballero-García y Cristina Martín-Doñate. “Application of New Conformal Cooling Layouts to the Green Injection Molding of Complex Slender Polymeric Parts with High Dimensional Specifications”

En este último artículo, se describe un diseño de sistema de enfriamiento optimizado que garantiza los principios marcados para el proceso de fabricación por inyección, donde la configuración geométrica de la pieza destaca por detalles estilizados de gran formato que incorporan nuevas tecnologías de iluminación LED.

Los diseños actuales demandados en la industria y en especial en el sector de la automoción, complican cada vez más el proceso de fabricación por moldeo. Las nuevas tendencias ponen cada vez más énfasis en el desarrollo de la apariencia visual o estética

del vehículo, complicando el aspecto funcional de las piezas moldeadas. Este hecho aumenta si tenemos en cuenta que, además del estilo, algunas de estas piezas han de cumplir una función óptica a nivel de iluminación o señalización luminosa según las normas.

En el caso de la geometría analizada, la dificultad para establecer una distancia uniforme entre el canal y la topología de la pieza impide que esta longitud se mantenga constante, impidiendo la uniformidad de temperaturas en la superficie de la pieza aumentando el riesgo de rechazos e incluso la no factibilidad de la pieza en cuanto a su función óptica.

De esta forma, en el desarrollo de este artículo y para evaluar el desempeño térmico de la aplicación de canales de enfriamiento conformados e insertos Fastcool, se proponen tres diseños de sistemas de enfriamiento diferentes. Un diseño definido únicamente por canales de enfriamiento conformados y dos diseños híbridos que combinan canales de enfriamiento conformados e insertos Fastcool de diferentes longitudes destacando como resultado óptimo obtenido, la configuración que considera el diseño del sistema de enfriamiento de canal conformal, ya que optimiza la uniformidad del mapa de temperatura y reduce el gradiente de temperatura de la pieza de plástico, en comparación con los diseños que incluyen un inserto de enfriamiento Fastcool. Esto se debe a que los insertos Fastcool, a pesar de ser enfriados con canales de tipo conformado, no intercambian el flujo de calor y lo disipan con la misma eficacia que un canal de enfriamiento conformado, a pesar de estar ubicados más cerca de la superficie de la pieza de plástico

Cabe destacar que los parámetros geométricos que definen los sistemas de refrigeración propuestos, conformal e híbrido, han sido optimizados y adaptados a los requerimientos que presenta su propio proceso de fabricación aditiva 3D SLS, las características geométricas de la pieza plástica objeto de estudio y la propia complejidad del molde de inyección real con el que se fabrica este.

El artículo propone un sistema de refrigeración conformal industrialmente sostenible que puede reducir los tiempos de ciclo, el alabeo longitudinal y las tensiones residuales en la fabricación de piezas moldeadas por inyección de alta complejidad, caracterizada por su gran longitud y esbeltez, así como cambios constantes en el espesor de la pieza.

En este sentido los procesos de fabricación aditiva permiten la fabricación de canales de refrigeración siguiendo el contorno de la pieza, dando flexibilidad al diseño y minimizando las posibles desviaciones derivadas del proceso de inyección.

Actualmente no hay constancia de investigaciones a nivel científico o industrial para la aplicación de conformal layouts en la fabricación de este tipo de geometrías plásticas, las cuales serían difícilmente fabricadas cumpliendo los requisitos de la industria por métodos tradicionales.

Es por tanto que los resultados obtenidos en este trabajo marcan un punto de inflexión en la fabricación por moldeo para este tipo de topología, dado que las características geométricas de fabricación estudiadas presentan una demanda muy alta en los próximos años para la industria del automóvil.

Como conclusión, los resultados de investigación obtenidos muestran que el uso de diseños de enfriamiento conformal en moldes de inyección, permite fabricar piezas siguiendo los altos requisitos dimensionales que demandan las industrias actuales estando los resultados presentados por los autores, en línea con los criterios de sostenibilidad y ahorro energético exigidos por la Unión Europea y el resto del mundo en cuanto a la fabricación de piezas plásticas industriales.

Siguiendo esta línea de trabajo, en la búsqueda de configuraciones de circuitos conformal, que optimicen el proceso de inyección y los resultados del producto fabricado en situaciones especiales, se adjuntan tres trabajos publicados recientemente, del tipo “Conference Paper”. Estas publicaciones corresponden a soluciones adoptadas para la fabricación de piezas de pequeñas dimensiones, geometrías de gran formato pero con acabados y relieves determinados o geometrías con dificultad para planificar un diseño de refrigeración óptimo debido a la existencia de planos rectos y embuticiones, direcciones relativamente pequeñas.

Presentados dos de ellos en el “31 Congreso Internacional INGEGRAF 2022”, celebrado en Málaga y un tercero en el “XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica”.

En todos estos casos, el objetivo planteado es la búsqueda de diseños de circuitos de refrigeración conformal, que optimicen el rendimiento térmico del molde de inyección, durante la fase de enfriamiento.

8. **Torres-Alba, Abelardo**, Jorge Manuel Mercado-Colmenero, Natalia María García-Ruiz, Jose Antonio Amate-Teva y Cristina Martín-Doñate. “*Design of new conformal cooling channels for injection molded parts with complex undercuts and internal mold lifters*” (31st International Conference on Graphics Engineering **INGEGRAF 2022**/University of Malaga / Spain).

Este artículo presenta un nuevo diseño de canal conforme a una geometría difícil de enfriar, utilizando métodos de enfriamiento tradicionales.

El diseño del molde en piezas plásticas con negativos implica el uso de complejos dispositivos móviles que, junto con los elementos encargados de la expulsión, dificultan o impiden la ubicación de canales que enfrían la pieza en la zona del núcleo.

En esta línea, el uso de canales de refrigeración conformados fabricados con tecnología aditiva permite representar geometrías en los canales imposibles de conseguir con métodos de fabricación tradicionales.

Con este nuevo concepto, los resultados obtenidos indican que el uso de un sistema de refrigeración conformal en moldes complejos, es capaz de reducir el tiempo del ciclo de producción al mejorar la distribución de temperatura y la uniformidad en la superficie de la pieza plástica, al mismo tiempo que mejora su calidad.

Del mismo modo los resultados numéricos obtenidos tras el análisis térmico de la fase de enfriamiento y el cálculo mecánico del mapa de tensiones residuales y alabeos confirman que la metodología utilizada para el diseño de los canales de enfriamiento conformados, optimiza el proceso de fabricación de la pieza objeto de estudio.

Por tanto con la utilización de este tipo de canales, es posible enfriar piezas con una alta complejidad geométrica aumentando la uniformidad en la distribución de temperaturas de la pieza al tiempo que reduce el alabeo y el tiempo de ciclo.

Este diseño presenta una ventaja adicional, ya que al reducir el tiempo de ciclo se reduce el gasto energético y las emisiones de gases de efecto invernadero, transformando este proceso de fabricación en un proceso más sostenible, en línea con los objetivos europeos y el pacto verde para la industria.

9. **Torres-Alba, Abelardo**, Jorge Manuel Mercado-Colmenero, Jose Antonio Amate-Teva, Juan de Dios Caballero-García y Cristina Martín-Doñate. “*Application of new cooling systems in the improvement of the injection molded parts sustainability*”. (31st International Conference on Graphics Engineering INGEGRAF 2022/University of Malaga / Spain).

Esta investigación presenta la aplicación de un nuevo sistema de enfriamiento conformal para el enfriamiento de piezas plásticas de inyección complejas de gran tamaño y cambios en plano muy marcados, en las que el uso del enfriamiento tradicional es ineficiente.

La geometría incluye un conjunto de características geométricas complejas por el hecho de estar reforzada con varios nervios para mejorar la resistencia durante su vida útil y montaje de esta.

Asimismo, dadas las grandes y profundas dimensiones de la pieza, se ha diseñado un conjunto complejo de expulsores en forma de insertos para optimizar la fase de expulsión de esta, fuera del molde.

En este caso el uso de estos expulsores es necesario ya que la expulsión con cilindros tipo estándar, no es factible dada la profundidad de la pieza y el riesgo de pandeo de la misma al realizar la expulsión.

Con el objetivo de mejorar el enfriamiento de la pieza plástica con una distribución lógica de los canales de enfriamiento que rodean la pieza y que permiten realizar el proceso de intercambio de calor de manera uniforme y eficiente, se diseñó una red de canales de enfriamiento conformados de 8mm de diámetro.

Estos canales se han distribuido a lo largo de los espacios libres entre los múltiples elementos del molde en forma de zig-zag.

Con todos estos condicionantes, los resultados obtenidos de la investigación muestran una reducción importante en el tiempo del ciclo al mejorar la uniformidad de temperaturas en la superficie de la pieza plástica, comparándola con el sistema de refrigeración tradicional y la implicación de este en la calidad percibida de la pieza fabricada, así como el aspecto sostenible que implica este proceso de fabricación.

10. **Torres-Alba, Abelardo**, Jorge Manuel Mercado-Colmenero, Jose Antonio Amate-Teva y Cristina Martín-Doñate. “*Aplicación de nuevos sistemas de refrigeración conformal para moldes de inyección sostenibles*”.

(XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica / Madrid, España 2022).

Esta investigación presenta la aplicación de un nuevo sistema de refrigeración conformal para el enfriamiento de una pieza plástica compleja con cambios significativos en cuanto a profundidad, donde el uso de la refrigeración tradicional es ineficiente.

Tras realizar el modelado CAD 3D de los diferentes sistemas de refrigeraciones propuestas, (cooling tradicional vs cooling conformal) y en base a los resultados obtenidos, se analizan factores como el comportamiento térmico, mecánico y aspecto final de pieza en cada uno de los sistemas analizados.

Analizar de forma detallada aspectos como el comportamiento térmico del circuito de refrigeración, contracciones longitudinales y deformaciones en pieza o las tensiones residuales resultantes de la inyección, hacen de la simulación de reología una herramienta indispensable en el proceso de análisis y evaluación de un diseño cualquiera de sistema de refrigeración, a la hora de fabricar un molde de inyección.

En base a los resultados numéricos obtenidos en las simulaciones térmicas y reológica analizadas mediante la utilización del software Moldex 3D, se demuestra que la metodología de diseño conformal aplicada a los canales de refrigeración, optimiza el proceso de fabricación de la pieza en gran medida, haciendo de estos sistemas de refrigeración conformal, una herramienta imprescindible en la industria manufacturera de molde moldeo por inyección.

1.5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Esta tesis doctoral se presenta como un conjunto de trabajos de investigación encaminados a superar el estado de la técnica, creando complejas configuraciones en sistemas de enfriamiento, enmarcadas en la búsqueda de diseños automatizados o estandarizados de circuitos de refrigeración conformal en moldes de inyección de plástico, usando fabricación aditiva SLM.

Dicho sistema tiene como finalidad alcanzar varios objetivos descritos a continuación, dentro del sector productivo en el que nos encontramos.

En primer lugar se consigue simplificar de forma notable las necesidades de medios y conocimiento asociados a la fase de diseño de un sistema de refrigeración para un molde de inyección.

En segundo lugar se consigue disminuir enormemente los costes de producción con las novedosas configuraciones en sistemas de refrigeración desarrolladas durante la realización de la tesis.

Por último y no menos importante, el hacer factible el proceso de moldeo por inyección en sectores estratégicos de la sociedad como el biomédico o el óptico/electrónico en los cuales debido a factores como tamaño de pieza, estabilidad dimensional o funcionalidad de la misma, lo hacen de escasa aplicación.

Del mismo modo, durante el desarrollo de esta tesis hemos alcanzado conocimientos e información relevante en el ámbito de la investigación de este campo, la cual sustenta y genera las bases para la colaboración y desarrollo de metodologías mucho más eficientes y competitivas en el sector industrial del plástico; sector este con notable peso dentro de la economía de la provincia.

En resumen, para cada uno de los trabajos de investigación presentados, las principales conclusiones obtenidas han sido las siguientes:

El primer objetivo alcanzado con la realización del diseño automatizado del circuito de refrigeración en un molde, programado en Matlab y basado en algoritmos expertos de

tipo genético, es la posibilidad de gestionar el diseño y fabricación de un molde de inyección sin la intervención de personal altamente cualificado y sin herramientas de simulación, como ayuda para el diseño y verificación de un sistema de enfriamiento optimizado.

Para la validación del sistema de refrigeración proyectado, se han evaluado 4 piezas reales con diferentes geometrías obteniendo de cada una de ellas, un mapa de temperaturas que permitirá junto con la configuración geométrica de cada una de ellas y el uso de sistemas expertos, obtener un diseño automatizado de los canales de refrigeración en moldes aptos para la fabricación. Este algoritmo permite la obtención del circuito de refrigeración mediante un sistema de fabricación inteligente, extrayendo información geométrica de la pieza y cumpliendo con parámetros de tipo tecnológico, mediante el uso de estos sistemas expertos.

El segundo objetivo desarrollado consiste en establecer una metodología estándar de trabajo, para casos en los que la propia configuración del molde limita tanto en forma, como en trazado el desarrollo de un sistema de refrigeración conformal equilibrado, acorde a las restricciones que acompañan a la fabricación aditiva. Ambas limitaciones condicionan en gran medida el sistema de enfriamiento del molde con superficies curvas y/o detalles geométricos complejos, lo que repercute directamente en el tiempo de enfriamiento y en la calidad del producto inyectado debido a la imposibilidad de obtener un enfriamiento uniforme.

Para llevar a cabo la validación del diseño en este tipo de sistemas de refrigeración, se han evaluado 2 geometrías con distintas configuraciones tanto geométricas como de diseño en molde, que debido a las limitaciones que presentan, requieren la consideración de un sistema híbrido de refrigeración en molde.

Con el desarrollo de esta metodología de diseño y fabricación de sistemas de enfriamiento bajo condiciones específicas de geometría en piezas muy concretas; se consigue aportar soluciones técnicas de calado a la demanda de sectores determinados de la población, que precisan una fabricación fuera del ámbito general del sector del plástico, como lo pueden ser el campo de la medicina o el óptico/electrónico; en los cuales el tamaño de pieza, con reducidas tolerancias de forma y aspecto, determinan la aceptación o no de esta fabricación por inyección de plástico.

El desarrollo de novedosas tecnologías para el diseño y fabricación de moldes de inyección, capaces de alcanzar los condicionantes exigidos en la fabricación de productos dentro de estos campos estratégicos de la ciencia, abren un nuevo horizonte para este sector de fabricación.

Actualmente la demanda de fabricación de materiales plásticos, con especificaciones muy concretas en el ámbito de la medicina, se incrementa de forma exponencial. Esto se debe a los beneficios que ofrece el incipiente sector del plástico frente al resto, en aspectos determinantes en la fabricación como lo son la rapidez y estabilidad dimensional o incluso la capacidad de producir de forma limpia bajo sistemas productivos que permiten mantener la higiene durante la fabricación de elementos como las prótesis quirúrgicas, a partir del amplio abanico de materiales desarrollados en la actualidad que cumplen con las exigencias del campo médico.

Si nos centramos en el ámbito de la óptica/electrónica, hoy en día es impensable una producción competitiva de componentes para la industria electrónica, sin recurrir a los plásticos. El moldeo por inyección de componentes ópticos exige el estricto cumplimiento de unos principios fundamentales.

En comparación con las piezas técnicas más estrictas, que exigen tolerancias de décimas de milímetro o a lo sumo de algunas centésimas, las exigencias de los componentes ópticos son hasta 100 veces más elevadas, y no solamente en valor, sino en forma, con el fin de evitar aberraciones y garantizar la funcionalidad de la pieza fabricada.

Bajo estas condiciones de fabricación exigidas para ciertos ámbitos de la ciencia, el diseño de un sistema de refrigeración híbrido, formado por un inserto de acero con coeficiente de transferencia térmica mejorado con respecto al acero utilizado para el resto del molde, combinado con un sistema de refrigeración conformal, permite una fabricación optimizada de piezas plásticas con unas consideraciones especiales tanto a nivel geométrico, óptico y de acabado superficial, destacando una notable mejora en la eficiencia del proceso traducida en una fabricación más eficiente, limpia y respetuosa con el medioambiente ofreciendo como resultado productos de alta calidad y sostenibles dentro de un entorno de economía circular.

Es por tanto que el desarrollo de esta tesis abre un abanico de soluciones a la fabricación, dentro novedosos sectores estratégicos de la industria actual, que ayudará a

CAPÍTULO I: MEMORIA

resolver limitaciones térmicas asociadas a la fabricación de moldeo por inyección, que impactan de forma directa no solo en la rentabilidad del proceso productivo, sino también en la estabilidad del proceso y del producto resultante.

Aspectos como el tamaño, acabado dimensional y aspecto final de piezas fabricadas por inyección encuentran soluciones robustas mediante la aplicación de las herramientas y metodologías desarrolladas en esta tesis doctoral.

1.6. REFERENCIAS

- [1] Kanbur, B. B., Suping, S., & Duan, F. (2020). Design and optimization of conformal cooling channels for injection molding: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(7), 3253-3271.
- [2] Kasala, S. (2018). Recycled technical plastics as raw material for plastics and composite products.
- [3] Kazmer, D. O. (2016). *Injection mold design engineering*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- [4] Injection Molded Plastics Market Size, Share & Trends Analysis Report By Raw Material (Polypropylene, ABS, HDPE, Polystyrene), By Application (Packaging, Automotive & Transportation, Medical), By Region, And Segment Forecasts, 2021 – 2028
- [5] Injection Molded Plastics Market Size, Share and Industry Analysis Report by Raw Material (Polystyrene, HDPE, ABS, Polypropylene) and Application (Building & Construction, Automotive, Consumables & Electronics, Packaging), Regional Outlook, Application Potential, Competitive Market Share & Forecast, 2021– 2027
- [6] Fu MW, Nee AYC, Fuh JYH. The application of surface visibility and moldability to parting line generation. *Compute Aided Des* 2002; 34(6):469–80.
- [7] 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.
- [8] Rashid, O., Low, K. W. Q., & Pittman, J. F. T. (2020). Mold cooling in thermoplastics injection molding: Effectiveness and energy efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121375.
- [9] Carrupt, M. C., & Piedade, A. P. (2021). Modification of the cavity of plastic injection molds: A brief review of materials and influence on the cooling rates. *Materials*, 14(23), 7249.

- [10] Kuo, C. C., Chen, W. H., & Xu, W. C. (2017). A cost-effective approach for rapid manufacturing wax injection molds with complex geometrical shapes of cooling channels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(5), 1689-1695.
- [11] Kuo, C. C., Chen, W. H., Zhang, J. W., Tsai, D. A., Cao, Y. L., & Juang, B. Y. (2017). A new method of manufacturing a rapid tooling with different cross-sectional cooling channels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(9), 3481-3487.
- [12] Jahan, S. A., & El-Mounayri, H. (2018). A thermomechanical analysis of conformal cooling channels in 3D printed plastic injection molds. *Applied Sciences*, 8(12), 2567.
- [13] Gries, S., Meyer, G., Wonisch, A., Jakobi, R., & Mittelstedt, C. (2021). Towards Enhancing the Potential of Injection Molding Tools through Optimized Close-Contour Cooling and Additive Manufacturing. *Materials*, 14(12), 3434.
- [14] Tuteski, O., & Kočov, A. (2018). Conformal cooling channels in injection molding tools—design considerations. *Machines. Technologies. Materials*. 12(11), 445-448.
- [15] Gao, Z., Dong, G., Tang, Y., & Zhao, Y. F. (2021). Machine learning aided design of conformal cooling channels for injection molding. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1-19.
- [16] 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.
- [17] Kuo, C. C., & Xu, W. C. (2018). Effects of different cooling channels on the cooling efficiency in the wax injection molding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(1), 887-895.
- [18] Abbès, B., Abbès, F., Abdessalam, H., & Urganlawar, A. (2019). Finite element cooling simulations of conformal cooling hybrid injection molding tools manufactured

by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(5), 2515-2522.

[19] 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.

[20] Mazur, M.; Brincat, P.; Leary, M.; Brandt, M. (2017) Numerical and experimental evaluation of a conformally cooled H13 steel injection mould manufactured with selective laser melting. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 93, 881–900.

[21] Park, H.S.; Dang, X.P.; Nguyen, D.S.; Kumar, S. (2020) Design of advanced injection mold to increase cooling efficiency. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Technol.* 7, 319–328.

[22] Tang, Y., Gao, Z., & Zhao, Y. F. (2019). Design of conformal porous structures for the cooling system of an injection mold fabricated by Additive Manufacturing Process. *Journal of Mechanical Design*, 141(10).

[23] 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.

[24] Kariminejad, M., Kadivar, M., McAfee, M., McGranaghan, G., & Tormey, D. (2022). Comparison of Conventional and Conformal Cooling Channels in the Production of a Commercial Injection-Moulded Component. In *Key Engineering Materials* (Vol. 926, pp. 1821-1831). Trans Tech Publications Ltd.

[25] 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.

[26] Oh, S. H., Ha, J. W., & Park, K. (2022). Adaptive Conformal Cooling of Injection Molds Using Additively Manufactured TPMS Structures. *Polymers*, 14(1), 181.

- [27] Gotlih, J., Brezocnik, M., Pal, S., Drstvensek, I., Karner, T., & Brajljeh, T. (2022). A Holistic Approach to Cooling System Selection and Injection Molding Process Optimization Based on Non-Dominated Sorting. *Polymers*, 14(22), 4842.
- [28] Souza, A., Capela, P., Lopes, V., Prior, F., Puga, H., Soares, D., & Teixeira, J. (2022). Thermal Contact Resistance between Mold Steel and Additively Manufactured Insert for Designing Conformal Channels: An Experimental Study. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6(5), 99.
- [29] 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.
- [30] Mohd Hanid, M. H., Abd Rahim, S. Z., Gondro, J., Sharif, S., Al Bakri Abdullah, M. M., Zain, A. M., ... & Nabilek, 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.
- [31] Rocha, S. B., Zhiltsova, T., Neto, V., & Oliveira, M. S. (2022). Optimization to Assist Design and Analysis of Temperature Control Strategies for Injection Molding. A Review. *Materials*, 15(12), 4048.
- [32] 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.
- [33] Torres-Alba, A., Mercado-Colmenero, J. M., Caballero-García, J. D. D., & Martín-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.
- [34] Comisión Europea, Dirección General de Mercado Interior, Industria, Emprendimiento y Pymes, (2019). A vision for the European industry until 2030: final

report of the Industry 2030 high level industrial roundtable, Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/102179>.

[35] Comunicación de la comisión al parlamento europeo, al consejo europeo, al consejo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones. El pacto verde europeo (2019) Publications Office.

[36] Karakoc, C., Dizdar, K. C., & Dispinar, D. (2022). Investigation of effect of conformal cooling inserts in high-pressure die casting of AlSi9Cu3. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(11), 7311-7323.

[37] Kuo, C. C., & You, Z. Y. (2022). A simple method for enhancing the flexural strength of epoxy-based rapid soft tooling with conformal cooling channels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-11.

[38] Lee, J. W., Oh, S. H., Ha, J. W., & Park, K. (2021). Improvement in cooling characteristics of injection molds using microcellular cooling structures. *Trans. Kor. Soc. Mech. Engrs. A*, 45, 1099-1107.

[39] Çalışkan, C. İ., Özer, G., Koç, E., Sarıtaş, U. S., Yıldız, C. F., & Çiçek, Ö. Y. (2021). Efficiency Research of Conformal Channel Geometries Produced by Additive Manufacturing in Plastic Injection Mold Cores (Inserts) Used in Automotive Industry. *3D Printing and Additive Manufacturing*.

[40] 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.

[41] Kanbur, B. B., Zhou, Y., Shen, S., Wong, K. H., Chen, C., Shocket, A., & Duan, F. (2022). Metal additive manufacturing of conformal cooling channels in plastic injection molds with high number of design variables. *Materials Today: Proceedings*.

[42] You, J. H., Lee, J. W., Oh, S. H., & Park, K. (2022). 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*, 9(6), 1463-1476.

[43] Kuo, C. C., Qiu, S. X., Lee, G. Y., Zhou, J., & He, H. Q. (2021). Characterizations of polymer injection molding tools with conformal cooling channels fabricated by direct and indirect rapid tooling technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(1), 343-360.

[44] 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.

[45] Kuo, C. C., Qiu, S. X., Lee, G. Y., Zhou, J., & He, H. Q. (2021). Characterizations of polymer injection molding tools with conformal cooling channels fabricated by direct and indirect rapid tooling technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(1), 343-360.

[46] Heogh, W., Yeon, S. M., Kang, D. S., Park, S., Park, S., Ryu, K. ...& Ha, C. W. (2022). The design and additive manufacturing of an eco-friendly mold utilized for high productivity based on conformal cooling optimization. *Materials & Design*, 222, 111088.

[47] Çalışkan, C. İ., Khan, H. M., Özer, G., Waqar, S., & Tütük, İ. (2022). The effect of conformal cooling channels on welding process in parts produced by additive manufacturing, laser powder bed fusion. *Journal of Manufacturing Processes*, 83, 705-716.

[48] Jarfors, A. E., Sevastopol, R., Seshendra, K., Zhang, Q., Steggo, J., & Stolt, R. (2021). On the Use of Conformal Cooling in High-Pressure Die-Casting and Semisolid Casting. *Technologies*, 9(2), 39.

[49] Piekło, J., Burbelko, A., & Garbacz-Klempka, A. (2022). Shape-Dependent Strength of Al Si9Cu3FeZn Die-Cast Alloy in Impact Zone of Conformal Cooling Core. *Materials*, 15(15), 5133.

[50] Piekło, J., Burbelko, A., & Garbacz-Klempka, A. (2022). Shape-Dependent Strength of Al Si9Cu3FeZn Die-Cast Alloy in Impact Zone of Conformal Cooling Core. *Materials* 2022, 15, 5133.

[51] 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.

[52] 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.

[53] Liu, H., Zhang, X., Quan, L., & Zhang, H. (2020). Research on energy consumption of injection molding machine driven by five different types of electro-hydraulic power units. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118355.

[54] Cheung, W. M., Leong, J. T., & Vichare, P. (2017). Incorporating lean thinking and life cycle assessment to reduce environmental impacts of plastic injection moulded products. *Journal of Cleaner Production*, 167, 759-775.

[55] Lucchetta, G., Masato, D., & Sorgato, M. (2018). Optimization of mold thermal control for minimum energy consumption in injection molding of polypropylene parts. *Journal of Cleaner Production*, 182, 217-226.

[56] Mercado-Colmenero, J. M., Martín-Doñate, C., Moramarco, V., Attolico, M. A., Renna, G., Rodríguez-Santiago, M., & Casavola, C. (2020). Mechanical characterization of the plastic material GF-PA6 manufactured using FDM technology for a compression uniaxial stress field via an experimental and numerical analysis. *Polymers*, 12(1), 246.

[57] Berger, G.R.; Zorn, D.; Friesenbichler, W.; Bevc, F.; Bodor, C.J. (2019) Efficient cooling of hot spots in injection molding. A biomimetic cooling channel versus a heat-conductive mold material and a heat conductive plastics. *Polym. Eng. Sci.* 59, E180–E188.

[58] Valls, I.; Hamasaiid, A.; Padré, A. (2017) High thermal conductivity and high wear resistance tool steels for cost-effective hot stamping tools. *J. Phys. Conf. Ser.*, 896, 012046

[59] Nian, S.C.; Chen, P.W.; Huang, M.S. Multilayer injection molding of high-profile convex lens. *J. Appl. Polym. Sci.* 2020, 137, 48600.

- [60] Spina, R.; Walach, P.; Schild, J.; Hopmann, C. Analysis of lens manufacturing with injection molding. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2012, 13, 2087–2095.
- [61] Shieh, J.Y.; Wang, L.K.; Ke, S.Y. A feasible injection molding technique for the manufacturing of large diameter aspheric plastic lenses. *Opt. Rev.* 2010, 17, 399–403.
- [62] Wang, Y.; Yu, K.-M.; Wang, C.C.L.; Zhang, Y. Automatic design of conformal cooling channels for rapid tooling. *Comput. Aided Des.* **2011**, 43, 1001–1010.
- [63] Brooks, H.; Brigden, K. Design of conformal cooling layers with self-supporting lattices for additively manufactured tooling. *Addit. Manuf.* **2016**, 11, 16–22.
- [64] Dick, L. High Precision Freeform Polymer Optics: Optical freeform surfaces—increased accuracy by 3D error compensation. *Opt. Photonik* **2012**, 7, 33–37.
- [65] Macías, C.; Meza, O.; Pérez, E. Relaxation of residual stresses in plastic cover lenses with applications in the injection molding process. *Eng. Fail. Anal.* **2015**, 57, 490–498.

CAPÍTULO II: COMPENDIO DE TRABAJOS PUBLICADOS

La tesis doctoral se compone de un compendio de cuatro artículos de investigación que cumplen los criterios establecidos por la Comisión Nacional Evaluadora de la Actividad Investigadora (CNEAI). Dichos artículos se encuentran publicados en revistas científicas de alto impacto y calidad reconocida, indexadas en las bases de datos bibliográficas y bibliométricas **ISI JCR** (Journal Citation Reports), **ISI WOS** (Web of Science) e **ISIS Scopus**. Las dos publicaciones restantes son del tipo “Conference Paper”. Publicaciones de impacto indexadas en las bases de datos bibliográficas y bibliométricas **ISIS Scopus**.

Todas estas publicaciones, han sido citadas por diferentes autores en revistas o plataformas de alto nivel científico, considerando por tanto que dichas citas suponen un reconocimiento al trabajo desarrollado en este campo y fundamentar así las contribuciones de investigaciones futuras.

El doctorando aparece como primer autor en cuatro de ellas, estando las fechas de publicación de las mismas comprendidas entre el inicio y final de los estudios de doctorado del autor. En este sentido y conforme a la normativa de la Universidad de Jaén para la defensa de tesis doctorales (Extracto de los artículos del reglamento de estudio de doctorado de la Universidad de Jaén adaptada a las directrices del R.D. 99/2011 y aprobado en Consejo de Gobierno el 6 de febrero de 2012), estos artículos se enmarcan en el área de trabajo de esta tesis además de estar adjuntos en esta segunda parte de la memoria. Por último, para completar el compendio de trabajos desarrollados durante la investigación, se citan tres aportaciones relevantes efectuadas en congresos internacionales, relacionados todos ellos con la temática tratada durante el desarrollo de esta tesis.

2.1. ARTICULOS PUBLICADOS EN REVISTAS

JCR y SCOPUS

1. **Torres-Alba, Abelardo**, Jorge Manuel Mercado-Colmenero, Daniel Díaz-Perete y Cristina Martín-Doñate. “*A New Conformal Cooling Design Procedure for Injection Molding Based on Temperature Clusters and Multidimensional Discrete Models*”. *Polymers* **2020**, 12(1), 154; <https://doi.org/10.3390/polym12010154>
2. **Torres-Alba, Abelardo**, Jorge Manuel Mercado-Colmenero, Juan de Dios Caballero-García y Cristina Martín-Doñate. “*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* **2021**, 13(17), 2944; <https://doi.org/10.3390/polym13172944>
3. **Torres-Alba, Abelardo**, Jorge Manuel Mercado-Colmenero, Juan de Dios Caballero-García y Cristina Martín-Doñate. “*A Hybrid Cooling Model Based on the Use of Newly Designed Fluted Conformal Cooling Channels and Fastcool Inserts for Green Molds*”. *Polymers* **2021**, 13(18), 3115; <https://doi.org/10.3390/polym13183115>
4. **Torres-Alba, Abelardo**, Jorge Manuel Mercado-Colmenero, Juan de Dios Caballero-García y Cristina Martín-Doñate. “*Application of New Conformal Cooling Layouts to the Green Injection Molding of Complex Slender Polymeric Parts with High Dimensional Specifications*”. *Polymers* **2023**, 15(3), 558
5. Jorge Manuel Mercado-Colmenero, **Torres-Alba, Abelardo**, Javier Catalá-Requena y Cristina Martín-Doñate. “*A New Conformal Cooling System for Plastic Collimators Based on the Use of Complex Geometries and Optimization of Temperature Profiles*”. *Polymers* **2021**, 13(16), 2744; <https://doi.org/10.3390/polym13162744>
6. **Torres-Alba, A.**, Diaz-Perete, D., Martin-Doñate, C., & Mercado-Colmenero, J. M. (2019, June). “*Conformal Cooling Systems Design and Dimensioning for Injection Molds*”. In International conference on The Digital Transformation in the Graphic

Engineering (pp. 166-174). Springer, Cham.<https://doi.org/10.1007/978-3-030-41200-5> **18**

7. Martin-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.<https://doi.org/10.1007/978-3-030-70566-4> **49**

CAPÍTULO II: COMPENDIO DE TRABAJOS PUBLICADOS

Referencia / Reference: **Torres-Alba, Abelardo**, Jorge Manuel Mercado-Colmenero, Daniel Díaz-Perete y Cristina Martín-Doñate. “*A New Conformal Cooling Design Procedure for Injection Molding Based on Temperature Clusters and Multidimensional Discrete Models*”. *Polymers* **2020**, 12(1), 154; <https://doi.org/10.3390/polym12010154>

Estado / Status: Publicado / Published.

Índice de impacto / Impact Factor: 4.967(JCR Year 2021).

Categoría / Category: Polymer Science in SCIE edition.

Ranking: 16/90 (JCR Year 2021)

Quartile: Q1 (JCR Year 2021)

Citas en WOS: 17

Citas en SCOPUS: 17

Citas en Google Scholar: 18

CAPÍTULO II: COMPENDIO DE TRABAJOS PUBLICADOS

Referencia / Reference: **Torres-Alba, Abelardo**, Jorge Manuel Mercado-Colmenero, Juan de Dios Caballero-García y Cristina Martín-Doñate. “*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* **2021**, 13(17), 2944; <https://doi.org/10.3390/polym13172944>

Estado / Status: Publicado / Published.

Índice de impacto / Impact Factor: 4.967 (JCR Year 2021).

Categoría / Category: Polymer Science in SCIE edition.

Ranking: 16/90 (JCR Year 2021)

Quartile: Q1 (JCR Year 2021)

Citas en WOS: 10

Citas en SCOPUS: 10

Citas en Google Scholar: 11

CAPÍTULO II: COMPENDIO DE TRABAJOS PUBLICADOS

Referencia / Reference: **Torres-Alba, Abelardo**, Jorge Manuel Mercado-Colmenero, Juan de Dios Caballero-García y Cristina Martín-Doñate. “A *Hybrid Cooling Model Based on the Use of Newly Designed Fluted Conformal Cooling Channels and Fastcool Inserts for Green Molds*” *Polymers* **2021**, 13(18), 3115; <https://doi.org/10.3390/polym13183115>

Estado / Status: Publicado / Published.

Índice de impacto / Impact Factor: 4.967 (JCR Year 2021).

Categoría / Category: Polymer Science in SCIE edition.

Ranking: 16/90 (JCR Year 2021)

Quartile: Q1 (JCR Year 2021)

Citas en WOS: 8

Citas en SCOPUS: 9

Citas en Google Scholar: 9

CAPÍTULO II: COMPENDIO DE TRABAJOS PUBLICADOS

Referencia / Reference: **Torres-Alba, Abelardo**, Mercado-Colmenero, J. M., Caballero-García, J. D. D., & Martin-Doñate, C. (2023).” Application of New Conformal Cooling Layouts to the Green Injection Molding of Complex Slender Polymeric Parts with High Dimensional Specifications”. *Polymers*, 15(3), 558.

Estado / Status: Publicado / Published.

Índice de impacto / Impact Factor: 4.967 (JCR Year 2022).

Categoría / Category: Polymer Science in SCIE edition.

Ranking: 16/90 (JCR Year 2022)

Quartile: Q1 (JCR Year 2022)

Citas en WOS: 8

Citas en SCOPUS: 9

Citas en Google Scholar: 9

CAPÍTULO II: COMPENDIO DE TRABAJOS PUBLICADOS

Referencia / Reference: Jorge Manuel Mercado-Colmenero, **Torres-Alba, Abelardo**, Javier Catalán-Requena y Cristina Martín-Doñate. “*A New Conformal Cooling System for Plastic Collimators Based on the Use of Complex Geometries and Optimization of Temperature-Profiles*”. *Polymers* **2021**, 13(16).
2744;<https://doi.org/10.3390/polym13162744>

Estado / Status: Publicado / Published.

Índice de impacto / Impact Factor: 4.967 (JCR Year 2021).

Categoría / Category: Polymer Science in SCIE edition.

Ranking: 16/90 (JCR Year 2021)

Quartile: Q1 (JCR Year 2021)

Citas en WOS: 6

Citas en SCOPUS: 6

Citas en Google Scholar: 8

Referencia / Reference: **Torres-Alba, A.**, Diaz-Perete, D., Martin-Doñate, C., & Mercado-Colmenero, J. M. (2019, June). “*Conformal Cooling Systems Design and Dimensioning for Injection Molds*”. In International conference on The Digital Transformation in the Graphic Engineering (pp. 166-174). Springer, Cham.

Estado / Status: Publicado / Published.

Tipo de publicación / Publication type: “Conference Paper”

Comunicación publicada en el libro “Advances in Design Engineering” de la colección Lecture Notes in Mechanical Engineering y editorial SPRINGER.

Publicación de impacto indexada en SCOPUS con índice de impacto SJR Q4.

Categoría / Category: Mechanical Engineering.

Conferencia / Conference: International conference on The Digital Transformation in the Graphic Engineering “INGEGRAF 2019”

Citas en SCOPUS: 2

Citas en Google Scholar: 2

Ubicación / Ubication: Logroño, Spain

Fecha / Date: **06/2019**

Este artículo de investigación ha sido premiado como “**Best Paper in the topic “Manufacturing and Industrial Process Design”**”.

CAPÍTULO II: COMPENDIO DE TRABAJOS PUBLICADOS



Referencia / Reference: Martin-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. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70566-4_49

Estado / Status: Publicado / Published.

Tipo de publicación / Publication type: “Conference Paper”

Comunicación publicada en el libro “Advances in Design Engineering” de la colección Lecture Notes in Mechanical Engineering y editorial SPRINGER.

Publicación de impacto indexada en SCOPUS con índice de impacto SJR Q4.

Categoría / Category: Mechanical Engineering.

Conferencia / Conference: International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing JCM 2020

Citas en SCOPUS: 3

Citas en Google Scholar: 3

2.2. COMUNICACIONES A CONGRESOS INTERNACIONALES.

1. Torres-Alba, Abelardo, Jorge Manuel Mercado-Colmenero, Jose Antonio Amate-Teva, Juan de Dios Caballero-García y Cristina Martín-Doñate. *“Application of new cooling systems in the improvement of the injection molded parts sustainability”*.

Estado / Status: Publicado / Published.

Tipo de publicación / Publication type: “Conference Paper”

Categoría / Category: Mechanical Engineering.

Conferencia / Conference: (31st International Conference on Graphics Engineering INGEGRAF **2022**/University of Malaga / Spain).

Ubicación / Ubication: Málaga, Spain

Fecha / Date: **06/2022**

2. Torres-Alba, Abelardo, Jorge Manuel Mercado-Colmenero, Natalia María García-Ruiz, Jose Antonio Amate-Teva y Cristina Martín-Doñate. “*Design of new conformal cooling channels for injection molded parts with complex undercuts and internal mold lifters*” (31st International Conference on Graphics Engineering **INGEGRAF 2022**/University of Malaga / Spain).

Estado / Status: Publicado / Published.

Tipo de publicación / Publication type: “Conference Paper”

Categoría / Category: Mechanical Engineering.

Conferencia / Conference: (31st International Conference on Graphics Engineering **INGEGRAF 2022**/University of Malaga / Spain).

Ubicación / Ubication: Málaga, Spain

Fecha / Date: **06/2022**

3. Torres-Alba, Abelardo, Jorge Manuel Mercado-Colmenero, Jose Antonio Amate-Teva y Cristina Martín-Doñate. *“Aplicación de nuevos sistemas de refrigeración conformal para moldes de inyección sostenibles”*.

Estado / Status: Publicado / Published.

Tipo de publicación / Publication type: “Conference Paper”

Categoría / Category: Mechanical Engineering.

Conferencia / Conference: (XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica / Madrid, España 2022).

Ubicación / Ubication: Madrid, Spain

Fecha / Date: **11/2022**

