



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Análisis de la tecnología de calentamiento rápido del molde mediante inducción utilizada en el proceso de inyección

Analysis of mould rapid heating technology by means of induction used in injection process

Autor

Mario Miñano Guilló

Directores

Jorge Aisa Arenaz | Área de Ingeniería Mecánica

José María Marín Herrero | Área de Máquinas y Motores Térmicos

Máster en Ingeniería Industrial

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

25 de enero de 2022

Análisis de la tecnología de calentamiento rápido del molde mediante inducción utilizada en el proceso de inyección

Resumen

En el presente trabajo se estudian las técnicas y características actuales de los diseños de calentamiento inductivo de moldes de inyección implementados hasta el momento. A partir de estos diseños se propone uno concreto, con el que se analiza la influencia de algunos de los factores más importantes en este proceso (intensidad, frecuencia, tiempo de calentamiento...) respecto al resultado final (temperatura de molde, presión de llenado, tiempo de ciclo...).

Se plantea un sistema de ecuaciones en 2D simplificado, que representa los principales procesos térmicos que intervienen, resolviéndose mediante el programa de cálculo EES®. Este programa permite obtener de una forma muy rápida el rango en el cual se moverán los valores de entrada y salida del sistema.

A partir de estos resultados se crea un diseño en 3D de cada componente y se ensambla, para luego analizarlo mediante el programa de cálculo por elementos finitos Moldflow®, en el que se introducirán valores de entrada que oscilan en el rango estudiado en EES®. Este segundo programa nos permite simular el proceso de inyección real, con una mayor precisión de cálculo e implementando muchas más variables, propias de este proceso de fabricación.

Tras los cálculos y simulaciones se puede afirmar que se consigue elevar la temperatura de una superficie de la cavidad del molde de 80°C hasta valores en torno a 150°C en apenas 5-10 segundos. Esto supone una velocidad de calentamiento relativamente alta, aunque también un coste energético importante, ya que el rango de intensidades empleado en la inducción es de centenares de amperios.

A pesar de dicho coste, el calentamiento conseguido es selectivo, ya que permite elevar la temperatura de una superficie en concreto, en lugar de un volumen de molde elevado, como en los métodos convectivo o resistivo. Además, se puede disminuir la intensidad necesaria mediante el aumento de la frecuencia de esa corriente, reduciendo la potencia empleada.

El incremento de tiempo de la fase de calentamiento y de la consecuente extensión de la fase de refrigeración suponen una pérdida de productividad en el proceso, como con cualquier método de calentamiento de moldes. Es por ello, que estas técnicas se justifican en casos concretos donde el producto o el proceso requieren de tales efectos.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	3
2. ESTADO DEL ARTE	4
2.1. Tecnologías Heat & Cool	4
2.1.1. Tipologías de calentamiento de molde	5
2.1.2. Campo de aplicación de las técnicas de calentamiento rápido del molde	6
2.2. Generación de calor por inducción	7
2.3. Diseño del sistema de calentamiento por inducción	8
2.3.1. Tipos de sistemas de calentamiento inductivo	9
2.3.2. Complementos del sistema	9
2.3.3. Diseño del inductor	10
2.3.4. Parámetros de operación	12
3. DISEÑO DEL SISTEMA	13
3.1. Componentes: Geometría y materiales	13
3.1.1. Pieza	13
3.1.2. Placa metálica	13
3.1.3. Bobina	13
3.1.4. Molde	13
3.2. Montaje	14
4. PROCESOS TÉRMICOS	16
4.1. Modelo de resistencias térmicas	16
4.2. Fases	19
4.2.1. Calentamiento placa inducida	19
4.2.2. Llenado y compactación	21
4.2.3. Refrigeración	22
4.3. Modelado en EES	25
5. ESTUDIO MEDIANTE HERRAMIENTAS CAE	29
5.1. Condiciones de proceso	29
5.2. Resultados	30
6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	37
7. BIBLIOGRAFÍA	38

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de moldeo por inyección es un método de fabricación muy desarrollado en el mundo. Sin embargo, las técnicas de calentamiento de moldes son más recientes, sobre todo las realizadas con técnicas de inducción.

El objetivo de este trabajo será analizar el método de calentamiento rápido por inducción y aquellos factores más influyentes, que se puedan modular en un entorno real industrial. Además, se estudiarán los parámetros y reglas básicas de transferencia de calor que permiten trasladar este aumento de temperatura en la placa inducida (una de las superficies de la cavidad del molde) a la pieza inyectada, así como el proceso inverso de enfriamiento de la pieza por la absorción del calor generado en la misma a través de los conductos de refrigeración.

Los programas informáticos empleados en este trabajo serán:

- EES®: Resolución de los sistemas de ecuaciones planteados en cada caso.
- Moldflow®: Simulación de casos con elementos finitos para geometrías 3D.
- AutoCAD®: Creación de planos para el diseño del sistema y los modelos de resistencias empleados.

Un exhaustivo estado del arte permitirá enfocar la casuística de estas técnicas de calentamiento, así como el tipo de diseños probados, complementos de mejora, y rangos de valores en los parámetros, con los que se consiguen efectos notables en el proceso y producto.

Se planteará un diseño de molde, pieza y sistema de inducción con geometría 3D. Lo siguiente será estudiar los procesos térmicos principales que se desarrollan durante un ciclo productivo, con su modelado de resistencia térmicas y fases del proceso, así como la implementación de estos cálculos en el programa de resolución de ecuaciones EES®. A partir de cálculos por modelos simplificados, se realizarán casos por simulación con elementos finitos en el programa Moldflow®, donde se variarán determinados factores del proceso, pudiendo analizar tendencias, relaciones y análisis de sensibilidad. De los resultados de ambos programas se podrán hallar conclusiones interesantes, así como las ventajas e inconvenientes de estas técnicas, justificando su utilización en contextos determinados.

Se adjuntan los siguientes anexos para mayor comprensión de este estudio:

- **ANEXO I – Informe tipo de resultados de EES:** Ejemplo de ecuaciones, parámetros y resultados para el caso 1 planteado en EES®.
- **ANEXO II - Informe tipo de resultados de Moldflow:** Ejemplo de resultados extraídos del programa Moldflow para el caso 1 de simulación.

2. ESTADO DEL ARTE

El moldeo por inyección de termoplásticos es uno de los procesos de conformado más extendidos en todo el mundo para la fabricación de piezas con materiales poliméricos (1). Este método permite generar productos de una alta complejidad de forma a un coste relativamente bajo, siempre y cuando se realice una tirada de piezas suficientemente elevada para amortizar los costes fijos que suponen el molde y otros utillajes y herramientas específicos para el producto.

Estos bajos costes de producción se deben principalmente a la velocidad con la que se puede conformar una pieza a partir de una materia prima en forma de grano o pellets. Esta velocidad de producción está muy influida por el tamaño de la pieza, así como los espesores y la complejidad de la forma del producto final entre otros (2), consiguiendo en muchos casos valores de tiempo de ciclo del orden de los segundos. La parte más relevante en el tiempo de ciclo de pieza es la fase de refrigeración (superando en la mayoría de los casos el 50% del tiempo total), en la cual se disminuye la temperatura del material fundido lo suficiente como para solidificar la pieza y poder extraerla del molde.

La defectología en este tipo de procesos es muy variada (alabeo, sobrecompactación, oclusiones de aire, líneas de soldadura, rechupes...) y sus causas también lo son (diferencias notables de espesores, mala elección de los puntos de inyección o de la ubicación de las líneas de soldadura, etc.). Por ello desde hace muchos años se lleva trabajando en la utilización de distintos tipos de tecnologías de calentamiento rápido de molde, consiguiendo reducir alguno de estos defectos, así como permitiendo el desarrollo y/o la mejora de procesos derivados como la microinyección o el moldeo con superficies de pieza microtexturizadas (3).

En inyección deben conjugarse de forma adecuada el diseño de la pieza a fabricar (formas para facilitar su posterior desmoldeo y espesores como elemento que gobierna el flujo del material por la cavidad), la máquina y sus parámetros de control y, por último, y como elemento clave desde el punto de vista industrial, la concepción y realización del utillaje, el molde de inyección. En el molde, que contiene el “negativo” o cavidad de la pieza a llenar con el material plástico fundido, se interrelacionan cuatro funcionalidades básicas (4):

- Función estructural
- Función cinemática
- Función reológica
- Transferencia de calor

2.1.Tecnologías Heat & Cool

Una de las causas de defectos en este proceso de fabricación es el enfriamiento prematuro de las capas de material fundido que entran primero en el molde y quedan en contacto con su superficie, adhiriéndose a esta, reduciendo su velocidad de avance y solidificando a causa de dicho enfriamiento. Este hecho limita también el tamaño mínimo de espesores de pieza con los que se puede trabajar sin que se detenga el flujo de material por obstrucción durante el llenado del molde. Además, esta diferencia de temperaturas entre el material fundido y la pared del molde dificulta la obtención de determinados acabados de mayor valor añadido,

como caras más brillantes en algunas zonas de la pieza o la replicación de texturas y relieves en la superficie de esta.

Por estos motivos se lleva trabajando durante muchos años en técnicas y métodos denominados comúnmente como “Heat & Cool” o RHCM (Rapid Heating Cycle Moulding), en los cuales se añade una fase de calentamiento del molde (o de una zona de este) previo al llenado, para disminuir en la medida de lo posible el gradiente de temperatura al que se ve sometido el frente del flujo del material fundido respecto de la superficie de la cavidad. Esto permite ralentizar el enfriamiento de la capa límite del fluido y disminuir el espesor de dicha capa, evitando los problemas comentados anteriormente, entre los que se incluyen la aparición de líneas de soldadura y el alabeo de la pieza por diferencias de velocidades de enfriamiento en distintas zonas de la pieza (defectos comunes en estos procesos de fabricación).

2.1.1. Tipologías de calentamiento de molde

Existen varias técnicas de calentamiento empleadas hasta el momento (5), las cuales se exponen brevemente a continuación. Se incluye una comparación entre los tiempos de ciclo para los distintos tipos de calentamientos (Figura 1).

- 1. Por convección (históricamente conocido como RHCM, debido a que fue el primer método empleado):** En la fase posterior a la refrigeración y extracción de la pieza solidificada, se hace pasar un fluido a alta temperatura por unos canales a través del molde.
- 2. E-mould (Electricity heating mould):** Se colocan estratégicamente resistencias eléctricas en determinadas zonas del molde para generar calor por medio de la electricidad, aprovechando el efecto Joule.
- 3. Por inducción (IHM o Induction Heating Moulding):** En este último caso se emplean bobinas o inductores para calentar placas o insertos del molde también gracias al efecto Joule, esta vez generado por corrientes parásitas de Foucault que produce la inducción electromagnética. Estas bobinas se colocan entre la cavidad y los canales de refrigeración.

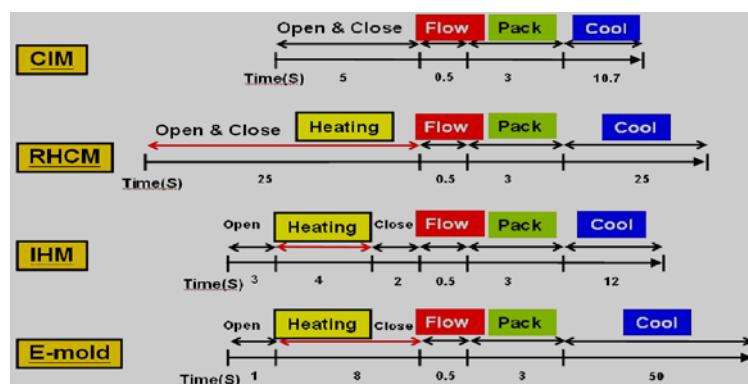


Figura 1. Fases y tiempos del ciclo para las distintas tecnologías de calentamiento (5): CIM (sin calentamiento), RHCM (por convección), IHM (por inducción) y E-mold (por resistencias).

2.1.2. Campo de aplicación de las técnicas de calentamiento rápido del molde

Aunque ya se ha comentado en la introducción que calentar el molde supone reducir algunos de los defectos del proceso de moldeo por inyección, hay ocasiones en los que la utilización de este tipo de técnicas y tecnologías es muy conveniente o incluso indispensable:

Rugosidad/textura relevante en el diseño

Si la superficie de la pieza final (o una parte de ella) necesita replicar una superficie texturizada del molde, el calentamiento de este antes de la inyección es casi una técnica obligada. El moldeo de estas superficies es complejo ya que existe una gran densidad de superficie por unidad de volumen (Figura 2), por lo que el enfriamiento prematuro de la capa límite de la masa fundida en contacto con el material es muy común.

Según un estudio (3), el calentamiento por inducción aumenta la rugosidad replicada del molde a la pieza al doble del valor conseguido por un moldeo tradicional (sin calentamiento previo).

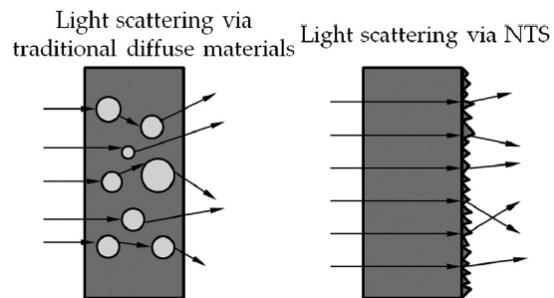


Figura 2. Métodos de obtención de material difuso (3).

Espesor de pieza muy delgado

El valor límite del espesor mínimo fabricable para una pieza por inyección está condicionado por la viscosidad del material fundido, que depende a su vez de la temperatura de este, así como de la presión y velocidad de cizalla. Cuanto más viscoso es el material, mayor resistencia tiene a la deformación por el esfuerzo, en este caso, de cizalladura o esfuerzo cortante.

Cuando la capa del flujo en contacto con la pared de la cavidad se enfriá, aumenta su viscosidad desde el centro del eje del flujo hasta la pared del molde (donde tiene velocidad nula), dificultando el avance del material, según Figura 3.

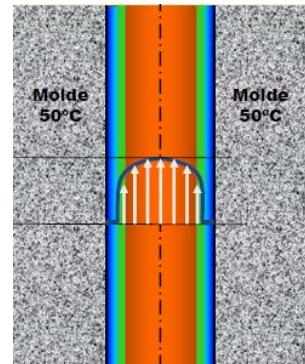


Figura 3. Perfil del flujo en el interior del molde (2).

La capa en contacto con la pared se enfriá y solidifica, reduciendo la sección de paso del flujo. Elevando la temperatura de la pared se consigue reducir el espesor de la capa solidificada.

Control dimensional exigente

Las dimensiones finales de la pieza dependen también del control térmico del proceso. Si la cavidad no se llena correctamente a causa de un enfriamiento prematuro de ciertas zonas la pieza final no cumplirá las tolerancias dimensionales exigidas. Por ejemplo, en una pieza plana y delgada, la diferencia de temperaturas y por tanto de la velocidad de solidificación de ambas caras puede

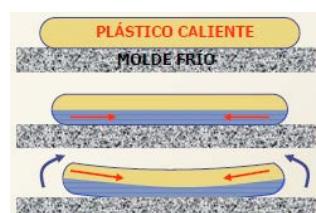


Figura 4. Alabeo por enfriamiento diferencial (2).

conllevar a una contracción desigual entre estas, dando lugar a fallos de planicidad (alabeo por enfriamiento diferencial, Figura 4) que impliquen un excesivo número de rechazos.

Materiales reforzados con fibras

De manera similar, en el caso de inyectar material fundido con cargas (fibras) en su interior, el enfriamiento no homogéneo de las distintas zonas de la pieza produce una segregación no uniforme de las fibras en su volumen, así como una reorientación incorrecta de estas, provocando un decremento de las propiedades mecánicas del producto final según la zona de la pieza o la dirección de las cargas a resistir en su aplicación.

Calidad superficial

En ocasiones se especifica una necesidad de producir una/s superficie/s de la pieza con gran calidad, ya sea por temas de brillo, reflejo, etc. Por razones similares a lo comentado en el apartado de “rugosidad/textura relevante en el diseño”, conseguir este resultado en la pieza final derivará de una correcta adecuación del flujo de plástico fundido a la superficie de la cavidad, por lo que es conveniente una atemperación de dicha superficie con métodos de calentamiento de moldes.

Reducción del número de puntos de inyección

A veces parece imprescindible aumentar los puntos de inyección de una pieza para conseguir llenarla sin problemas de presión ni solidificación prematura de zonas estrechas de la misma. Sin embargo, estos efectos indeseables causados por la viscosidad del material fundido se pueden mitigar con un aumento de la temperatura de la superficie de la cavidad, ya que así el material no solidificará tan rápido ni aumentará su viscosidad debido al enfriamiento excesivo que sufren las capas que contactan con la superficie del molde. Esto permite un mejor flujo por el interior del molde, pudiendo así reducir los puntos de inyección necesarios.

2.2. Generación de calor por inducción.

El calentamiento por inducción es un método que hace tiempo que se emplea en otros sectores como la cocción de alimentos, pero que es relativamente novedoso para la fabricación de piezas de plástico por inyección. Este procedimiento destaca por su eficiencia, velocidad y posibilidad de control.

Se hace pasar una fuente de electricidad alterna a alta frecuencia a través de una bobina o inductor, la cual genera un campo magnético que induce una corriente eléctrica en aquel material (con propiedades ferromagnéticas) que se coloque cerca de dichas líneas de flujo (6). El principio es el mismo que se emplea para los transformadores, sólo que en este caso el que sería el “devanado secundario”, es una pieza que trabaja en cortocircuito, generando grandes intensidades de corriente, denominadas corrientes de Foucault, que siguen la ley de Lenz.

Estas corrientes parásitas generadas en la pieza provocan un calentamiento de esta, debido al efecto Joule, que sigue la siguiente ecuación:

$$P(W) = i_f^2 * R_{eq}$$

i_f: Corriente de Foucault generada en la pieza a calentar.

Donde la resistencia equivalente es la suma de la resistencia y la inductancia del sistema (7):

$$R_{eq} = \left(1 - e^{-\frac{2r}{\delta}}\right) * N^2 * \rho * \frac{2\pi r}{\delta * l}$$

r: Radio del solenoide.

δ: Profundidad de penetración del campo magnético.

N: Número de espiras del solenoide.

ρ: Densidad del material del solenoide.

L: Longitud del solenoide.

Esta expresión de R_{eq} hace referencia a la resistencia de una pieza de geometría cilíndrica, alojada en el interior de la bobina, como se muestra en la Figura 5. Para geometrías que difieran de esta, el cálculo no es tan trivial, como ocurre en el diseño planteado para este trabajo.

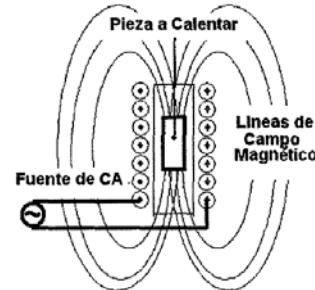


Figura 5. Esquema de calentamiento por inducción (7).

En este proceso será muy relevante la profundidad de penetración δ de esta corriente, es decir, el espesor de capa del material inducido donde se concentra cerca del 90% de la potencia generada. A este fenómeno se le denomina “efecto piel”, el cual depende principalmente de las propiedades electromagnéticas del material a calentar y de la frecuencia empleada, siguiendo la ecuación de Maxwell:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega * \sigma * \mu}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi * \mu * f}}$$

f: Frecuencia de variación temporal del campo magnético.

ρ: Resistividad eléctrica.

σ: Conductividad eléctrica.

μ: Permeabilidad magnética¹.

Como se verá en apartados posteriores, el tiempo de transmisión del calor por conducción en la placa inducida es tan bajo que toda ella se puede considerar a la misma temperatura. De no ser así, se debería calcular esta profundidad de penetración y la distribución de temperaturas en el resto del espesor de la placa.

2.3.Diseño del sistema de calentamiento por inducción

Existen multitud de factores y parámetros influyentes en las tecnologías de calentamiento de moldes por inducción, además de un amplio desarrollo e investigación en distintos diseños de inducción y de complementos adheridos a estos sistemas.

¹ A pesar de que σ y μ dependen de la temperatura, en este trabajo se considerarán constantes (excepto en el programa de simulación).

2.3.1. Tipos de sistemas de calentamiento inductivo

En primer lugar, se exponen los tipos de sistemas de calentamiento inductivo, en función de la implementación de estos en el conjunto del molde y de las máquinas y herramientas que hacen posible este tipo de fabricación por conformado (8):

- **Externo fijo (unmovable external hung-up type)**
- **Externo móvil (movable external hung-up type)**
- **Envoltorio (wrapped type)**
- **Inserto (inserted type):** El sistema de inducción se introduce dentro del molde, en contacto con la cavidad (Figura 6). Una espira plana calienta la superficie de la cavidad que se necesita por diversos motivos (alta calidad de brillo, reducción de líneas de soldadura, replicación de superficie textura, zona de espesor reducido, microinyección...). Para este trabajo se empleará el diseño de inserto, por su eficiencia y velocidad de calentamiento, así como la implementación sencilla en el programa de simulación empleado.

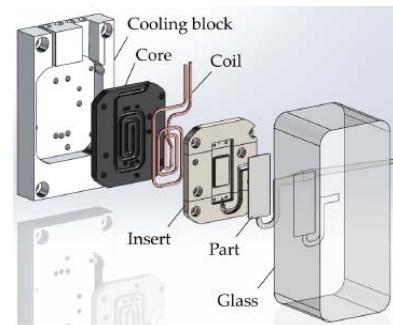


Figura 6. Configuración con inserto (12).

2.3.2. Complementos del sistema

Partiendo de la utilización del sistema de inserto, a continuación se explican dos componentes adicionales a la bobina inductora que se han investigado y desarrollado desde hace años (6) (9) (10) (11) (12) (13) (14), con sus respectivas ventajas añadidas, algunas de ellas de carácter imprescindible para conseguir una buena eficiencia de calentamiento.

Concentrador de flujo

Como el molde está fabricado normalmente en aleaciones de acero, las corrientes generadas calientan todo el volumen del molde cercano a la bobina, generando un calor en todas direcciones, lo que aumenta las pérdidas de energía y disminuye la eficiencia de este proceso. Para aprovechar mejor esta energía es recomendable instalar componentes fabricados en material con elevados valores de permeabilidad magnética y conductividad térmica cerca de la cavidad donde se producirá la pieza inyectada. Normalmente se dispone una placa (o varias) en la superficie de dicha cavidad para atraer o concentrar las líneas de flujo hacia la zona que queremos calentar (Figura 7).

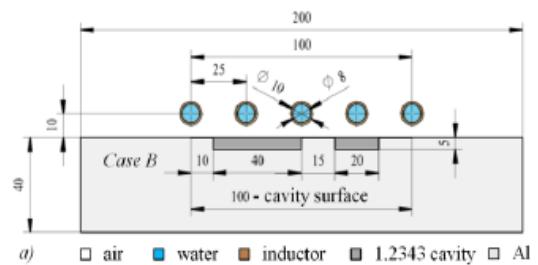


Figura 7. Configuración de un sistema de calentamiento inductivo con concentradores de flujo (10).

Carcasa o blindaje magnético

Con el mismo objetivo de direccionar las líneas de campo generadas en la bobina únicamente hacia la superficie que queremos calentar, la zona opuesta a ella se suele cubrir con una carcasa que impide la difusión de dicho campo (Figura 8).

Además, hay estudios (15) que afirman que la forma de la ranura donde se aloja la bobina también influye en el direccionamiento de las líneas de campo magnético generadas, tal y como se observa en la Figura 9.

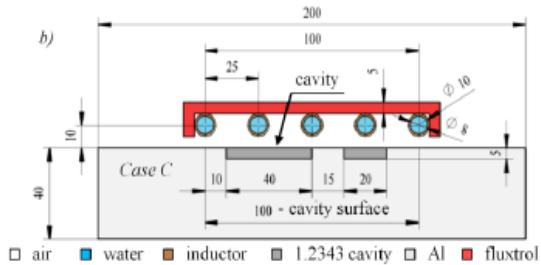


Figura 8. Configuración de un sistema de calentamiento inductivo con blindaje magnético (10).

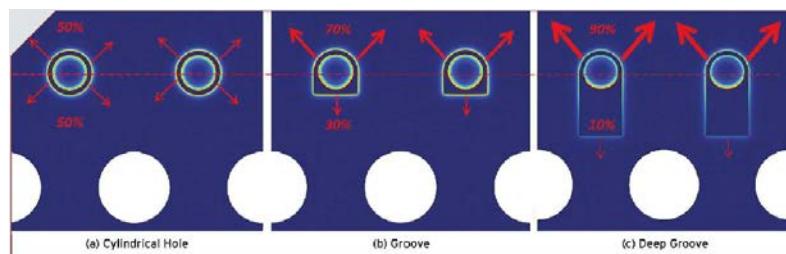


Figura 9. Direcciónamiento del campo magnético según la ranura donde se aloja la bobina (15).

2.3.3. Diseño del inductor

La mayoría de los parámetros más influyentes en el proceso desarrollado son relativos al diseño de la bobina o inductor (dimensiones, ubicación, forma...). A continuación, se explican los factores más relevantes:

Distancia del inductor a la pieza inducida

Ya sea la placa metálica que coloquemos (concentrador de flujo) o directamente la superficie de la cavidad del molde que queramos calentar, la distancia desde la bobina a esta es uno de los parámetros más importantes del proceso. Los valores óptimos normalmente se encuentran en el rango de 1 a 10mm (8) (10) (11) (14), aunque a veces por necesidades constructivas o de resistencia es necesaria una distancia del orden de varios centímetros.

Sentido de la corriente

El diseño del recorrido de las espiras de la bobina influye en la dirección del campo magnético (Figura 10). Un diseño en espiral implica que toda la corriente circula en el mismo sentido y, por el contrario, cuando el recorrido se realiza en zigzag, el sentido de la corriente se va alternando. Se demostró (9) que cuando toda la corriente va en el mismo sentido, la ratio de calentamiento es mayor que cuando se alternan ya que, al sumarse los campos magnéticos generados entre tramos contiguos de la espira, la densidad de corriente generada en la placa inducida aumenta y con ello la generación de calor por efecto Joule.

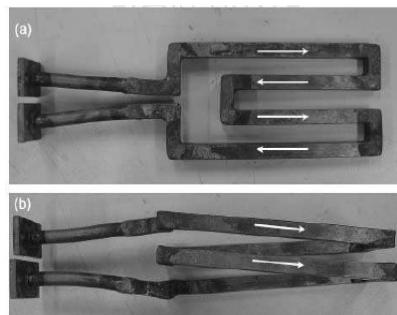


Figura 10. Bobinas con corrientes en sentido opuesto (a) o idéntico (b). (9)

Espacio entre espiras

A colación del efecto anterior explicado, el espacio entre espiras (denominado “pitch” en inglés) también influirá en la homogeneidad y velocidad de calentamiento debido al efecto de proximidad.

Una solución ingeniosa para reducir este efecto sin alejar en exceso las espiras consiste en colocar piezas ferríticas entre estas (8), o en las esquinas de una bobina rectangular, donde el efecto de proximidad también se produce, reduciendo el calentamiento en esas zonas. Ambas alternativas se muestran en la Figura 11.

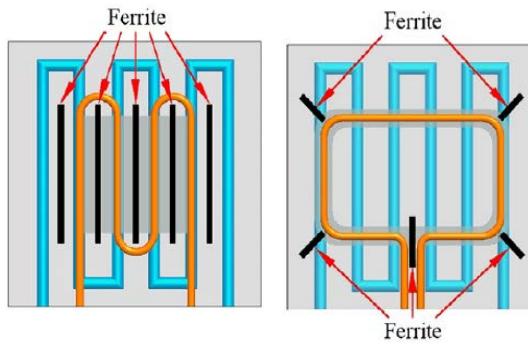


Figura 11. Piezas ferríticas entre espiras (8).

Tipología de bobina

Según un estudio (16), la tipología constructiva de la bobina sobre el sistema influye también en los resultados. En ese caso se comparaban dos tipos: una bobina aglutinada con varias vueltas una encima de otra en una zona concreta (o varias de estas en determinados puntos de la pieza) a la que denominan “a granel” (“bulk” en inglés) y otra con una sola vuelta en forma de espiral que abarca toda la superficie a calentar, denominada “panqueque” (“pancake” en inglés), Figura 12.

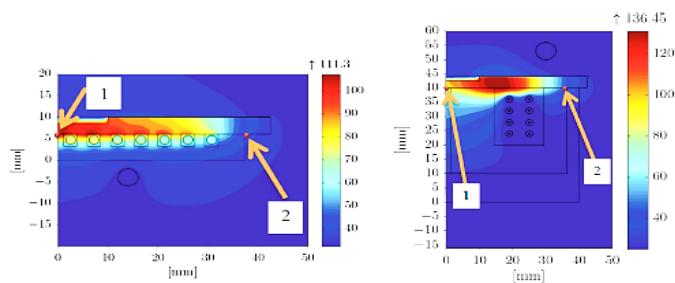


Figura 12. Calentamiento inductivo con bobinas tipo "pancake" (izquierda) y tipo "bulk" (derecha). (16)

Los resultados afirman que la tipología panqueque consigue una mayor uniformidad y velocidad de calentamiento en toda la pieza, aunque la bobina “a granel” permite alcanzar un mayor valor de temperatura máxima (pero de carácter puntual), consiguiendo así llenar espesores de pieza más delgados.

2.3.4. Parámetros de operación

Una vez fabricado el sistema de calentamiento por inducción, se deben elegir los parámetros con los que se controlará el proceso. Aunque las magnitudes objetivo son la temperatura alcanzada (y su uniformidad a lo largo de la cavidad) y el tiempo empleado en el calentamiento, los factores con los que se controla y varía el proceso son principalmente la potencia suministrada a la bobina y la frecuencia de trabajo de esta corriente alterna.

Intensidad

Dado que la impedancia Z (parte resistiva R y parte inductiva L) ofrecida por la bobina es fija, el valor con el que se suele controlar la potencia eléctrica es la intensidad. También podría ser la diferencia de voltaje entre los bornes de la bobina, pero suele resultar más cómodo operativamente variar la intensidad suministrada desde la fuente. Los valores entre los que se mueve la corriente eléctrica generada en la bobina oscilan entre los 100 y los 1000A (10) (11) (12) y (17).

Frecuencia

A partir de la ecuación de Maxwell se comprueba que a mayor frecuencia menor profundidad de penetración de la corriente inducida, optimizando el calentamiento de láminas metálicas finas como la de nuestro modelo y este tipo de aplicaciones (calentamiento de superficies delgadas).

Según los artículos consultados (10) (12) (16) (17), el rango de frecuencias empleado para las aplicaciones de calentamiento de moldes por inducción es de 10-100kHz.

Tiempo de calentamiento

El tiempo durante el que está encendida la bobina resulta también un parámetro fundamental, ya que no sólo controla la cantidad de calor aportado al sistema, sino que también influye de forma directa en el tiempo total del ciclo de pieza. Como ya se ha comentado, el tiempo que se necesita para fabricar una pieza determina la productividad del proceso industrial.

Este tiempo de calentamiento necesario para alcanzar la temperatura deseada puede estar entre los 5 y los 10 segundos, valores con los cuales se realizarán los cálculos en este estudio.

3. DISEÑO DEL SISTEMA

El sistema de calentamiento estudiado será similar a los anteriormente vistos en otros artículos y trabajos. Se implementarán unas geometrías sencillas con las cuales poder apreciar la sensibilidad e influencia de determinados factores al proceso de calentamiento mediante cálculos de transferencia de calor (con EES[®]), y los efectos que este calentamiento rápido produce en la pieza final a través del programa de simulación Moldflow[®], en su versión 2016, última licencia comercial disponible en el grupo de trabajo TIIP del Departamento de Ingeniería Mecánica. A continuación, se detallan las principales características de los componentes y del sistema final ensamblado.

3.1. Componentes: Geometría y materiales

3.1.1. Pieza

La pieza para fabricar en cuestión será una placa plana de 110mm de largo y 80mm de ancho (Figura 13), con un espesor de 2mm, la cual se inyectará desde el centro de la cara plana con una colada fría (la cual quedará solidificada junto a la pieza²).

3.1.2. Placa metálica

En segundo lugar, colocaremos junto a una cara de la pieza una placa metálica (Figura 14), que conformará esa superficie de la cavidad del molde, para así poder influir en su calentamiento previo a la inyección, por medio del método inductivo explicado en este trabajo. Esta placa magnética tendrá las mismas dimensiones de la pieza, pero con un espesor de 3mm. Este espesor es de un valor arbitrario, pero en la aplicación final sería el resultado de un cálculo resistivo derivado de la presión a soportar por la misma en los procesos de llenado y compactación.

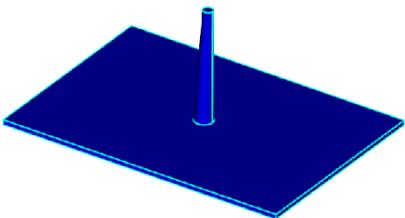


Figura 13. Pieza inyectada.

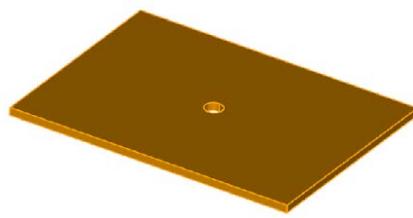


Figura 13. Placa metálica inducida.

3.1.3. Bobina

El inductor o bobina empleado (Figura 15) es una espiral plana con 9 vueltas, un diámetro total de 90mm, un diámetro del cable de 2,5mm, y un espaciado entre espiras o “pitch” de 2mm. Se escoge esta bobina del tipo “pancake” estudiado anteriormente (16) debido a la uniformidad del calentamiento que puede generar.

3.1.4. Molde

Por último, se incluyen en el estudio por simulación los dos bloques de molde (fijo y móvil) que albergan todos estos elementos en su interior, con dimensiones idénticas de 150mm de ancho, 150mm de largo y 45mm de espesor (Figura 16). Ambos bloques del molde albergan unos

² Esta colada fría permitirá el llenado del molde sin problemas en la compilación del programa de simulación por elementos finitos. A efectos de cálculos térmicos analíticos no se considera.

canales de refrigeración en su interior en forma de “U”, los cuales se fabrican por taladrado, cuyo diámetro es de 6mm y recorren el molde casi hasta el final, con una distancia entre el canal de ida y el de vuelta de 50mm y centrados en el eje de simetría del molde.

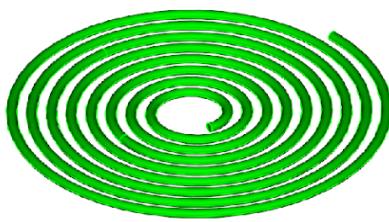


Figura 15. Bobina de inducción.

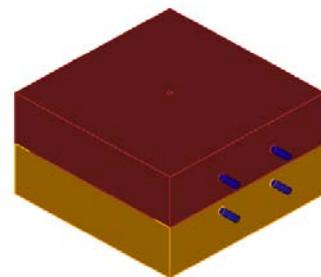


Figura 14. Bloques inferior y superior del molde.

3.2. Montaje

El planteamiento del sistema ensamblado para la simulación (Figura 17, Figura 18 y Figura 19) constará de los componentes explicados anteriormente. En el centro se sitúa la cavidad para la pieza a inyectar, coincidiendo la línea de partición del molde con uno de los planos de simetría de la pieza (sin contar la colada fría), quedando por tanto la mitad del espesor en cada bloque del molde. La placa magnética irá adyacente a esta cavidad en una de sus caras planas. A una distancia de 10mm del plano de partición del molde se colocará la bobina que la calentará.

Por último, los canales de refrigeración de ambos lados del molde se deben situar lo más cercanos posibles a la pieza, para una mejor eficiencia de enfriamiento. De esta manera la mitad de molde que sólo aloja la pieza permite que los canales estén a 10mm de la superficie de la cavidad. Sin embargo, en la otra mitad de molde, donde se encuentran la bobina y la placa magnética, es necesaria una mayor distancia de la pieza a los canales de refrigeración, quedando finalmente estos a 20mm de dicha cavidad.

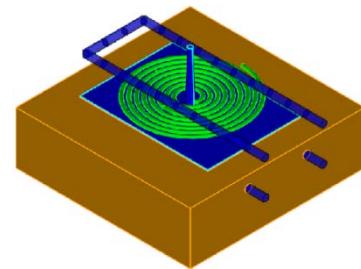


Figura 15. Montaje del sistema (ocultando bloque superior del molde).

A continuación, se muestran las propiedades principales de los materiales empleados, extraídas a partir de la información y los cálculos realizados en los programas EES® y Moldflow®, así como de las tablas termofísicas de la referencia bibliográfica (18).

Componente	Material	$\rho [kg/m^3]$	$k [W/K\cdot m]$	$c_p a 100^\circ C [J/kg\cdot K]$
Bloques de molde	Acero P-20 (1.2312)	7750	28	460
Cavidad molde vacía	Aire	0,871	0,034	1014
Placa magnética	Níquel	8900	80	485
Pieza inyectada PP	PP (Polipropileno)	1170	0,17	1930
Pieza inyectada PEEK	PEEK CF40	1506	0,7	1135
Fluido refrigeración	Agua líq. a 60°C 3bar	983	0,6411	4182

Tabla 1. Propiedades principales de los materiales empleados en este estudio.

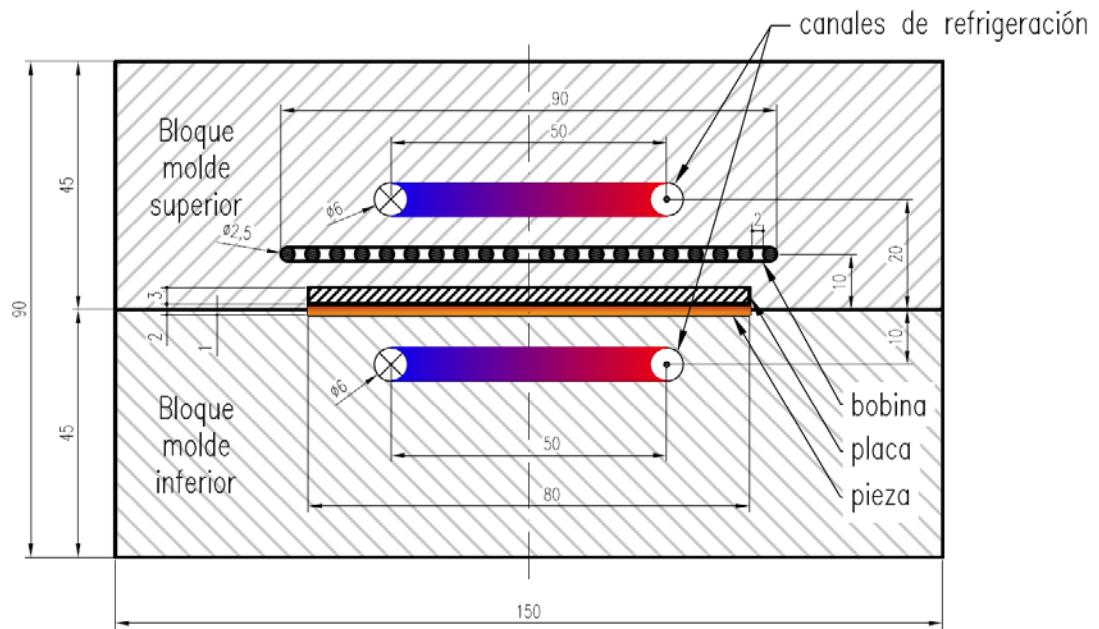


Figura 16. Vista en corte del alzado del sistema.

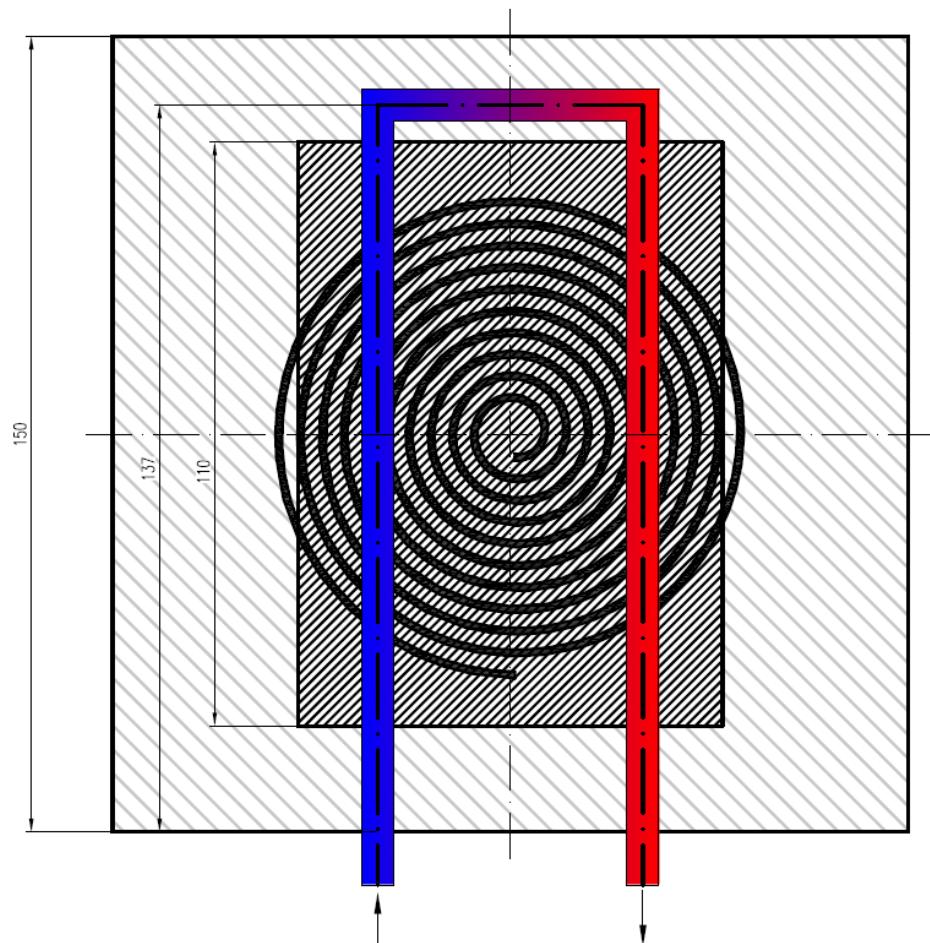


Figura 17. Vista en planta del sistema (ocultando bloque superior del molde).

4. PROCESOS TÉRMICOS

A continuación, se detalla el estudio de este diseño desde el punto de vista de la termodinámica y de los procesos de transferencia de calor que existirán en cada ciclo de fabricación. Se plantea un modelo de resistencias térmicas con el cual hallar una primera aproximación del rango en el cual se moverán los valores de entrada y salida del sistema.

Los cálculos térmicos se desarrollarán con el programa de resolución de ecuaciones EES®. Cabe destacar que estos se realizan para un modelo en 2D simplificado, donde las ecuaciones están por unidad de longitud, suponiendo su continuidad a lo largo de la dirección normal al plano de corte, apareciendo el superíndice (') para expresarlo. Aunque estos cálculos muestren valores inexactos, debido a las diferencias existentes entre el modelo unidimensional y la complejidad de la geometría 3D, este programa ofrece una rapidez de iteración y modificación de parámetros muy superior a la de las simulaciones que se realizarán posteriormente.

Los resultados hallados se contrastarán con los que proporcione el software de simulación del proceso de inyección Moldflow®, salvando siempre ciertas diferencias existentes entre el planteamiento teórico y los cálculos internos complejos que se desarrollan en la simulación por elementos finitos.

4.1. Modelo de resistencias térmicas

Se calculan las resistencias térmicas que se encuentra el flujo de calor desde la pieza de plástico fundido (Figura 20), el cual supondrá el mayor foco de calor, hacia los focos fríos, es decir, los circuitos de refrigeración que se encuentran en ambos bloques del molde. Por ello se diferencian las resistencias por encima y por debajo de la pieza, así como la que representa el aire que se encuentra en la cavidad del molde en el momento del ciclo en el que este no contiene material plástico (expulsión de la pieza y calentamiento de la cavidad).

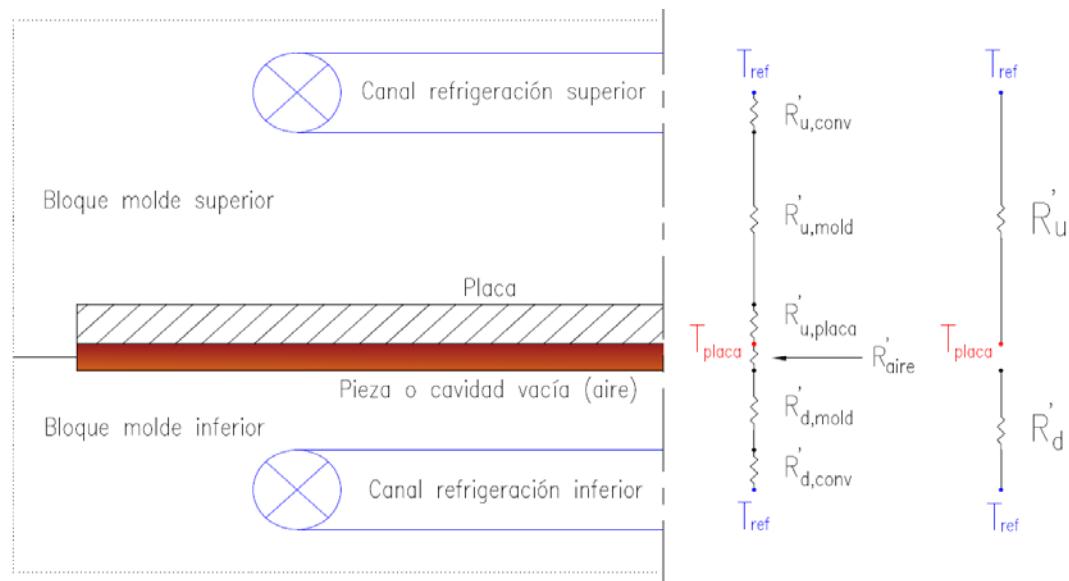


Figura 18. Modelo de resistencias térmicas.

Resistencia inferior R'_d :

Se tiene en cuenta las resistencias de conducción del molde $R'_{d,mold}$ y de convección de los tubos correspondientes al circuito de refrigeración inferior $R'_{d,conv}$:

$$R'_d = R'_{d,mold} + R'_{d,conv}$$

Resistencia de conducción del molde $R'_{d,mold}$:

$$R'_{d,mold} = \frac{1}{2S'k_{mold}}$$

k_{mold} : Conductividad del material del molde.

**El factor 2 en el denominador se incorpora debido a que existen dos tubos en cada circuito de refrigeración (uno de ida y otro de vuelta) los cuales se supondrán a la misma temperatura de fluido (la inercia térmica de la pieza fabricada por inyección es muy reducida –debido a su pequeño volumen- para influir apenas en el calentamiento del fluido a lo largo del recorrido del circuito de refrigeración). Este hecho implica la formación de dos caminos paralelos de evacuación del calor, reduciendo a la mitad la resistencia térmica inicial.*

S' : Factor de forma de una resistencia de conducción desde una superficie plana hasta un tubo cilíndrico enterrado (18 pág. 75). La siguiente expresión del factor de forma es válida para los casos donde $L \gg D$ y $z \geq 3L/2$, siendo L la longitud de la placa (110mm), D el diámetro de los circuitos de refrigeración (6mm) y z la distancia vertical entre la superficie y el eje del tubo. Estas condiciones se satisfacen en el modelo estudiado.

$$S' = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{4z}{D}\right)} = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{4 * 0.010m}{0.006m}\right)} = 3.31$$

Por tanto:

$$R'_{d,mold} = \frac{1}{2 * 3.31 * 28 \frac{W}{K \cdot m}} = 5.39 * 10^{-3} \frac{K \cdot m}{W}$$

Resistencia de convección de los tubos $R'_{d,conv}$:

$$R'_{d,conv} = \frac{1}{2\bar{h}\pi D}$$

**El factor 2 se añade por el mismo motivo explicado anteriormente.*

h =Coeficiente de convección en el interior del tubo.

$$\bar{h} = \frac{\bar{N}_u k_{ref}}{D}$$

k_{ref} : Conductividad del fluido que circula por el tubo (agua).

Nu: Número de Nusselt (18 pág. 222).

$$\bar{N}_u = 0.012(Re^{0.87} - 280)Pr^{0.4} \left[1 + \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \left(\frac{T_m}{T_s} \right)^{0.45}$$

El factor D/L hace referencia a la relación entre el diámetro del tubo y la longitud de este. Como los valores son de 6mm y 110mm respectivamente, se puede despreciar dicho cociente.

Por otra parte, el cociente entre T_m y T_s tiene en cuenta la proporción existente entre las temperaturas media del fluido y la de dicho fluido en la superficie del conducto respectivamente, cuyos valores se supondrán equivalentes, eliminando por tanto este factor de la ecuación (tiende a 1).

Teniendo en cuenta estas simplificaciones, la ecuación finalmente queda como:

$$\bar{N}_u = 0.012(Re^{0.87} - 280)Pr^{0.4}$$

Re: Número de Reynolds en el interior del tubo:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} 1 \frac{m}{s} 0.006m}{4.5 * 10^{-4} Pa * s} = 13,333$$

Re>1000 → Régimen turbulento

ρ : Densidad del fluido que circula por el tubo.

μ : Viscosidad dinámica del fluido que circula por el tubo.

v : Velocidad del fluido que circula por el tubo. Inicialmente tomamos 1m/s, valor a partir del cual hallamos el caudal volumétrico V correspondiente del refrigerante.

$$\dot{V} = vA = v\pi r^2 = 1 \frac{m}{s} \pi (0.003m)^2 * \frac{1000L}{1m^3} \frac{60s}{1min} = 1.7 l/min$$

Pr: Número de Prandtl en el interior del tubo, cuyo valor para el agua a la temperatura a la que se encuentra dentro de los canales de refrigeración (dato obtenido del programa EES®) es:

$$Pr = 3.24$$

Por tanto:

$$\bar{N}_u = 0.012(Re^{0.87} - 280)Pr^{0.4} = 0.012(13333^{0.87} - 280)3.24^{0.4} = 69.1$$

$$\bar{h} = \frac{\bar{N}_u k_{ref}}{D} = \frac{69.1 * 0.58 \frac{W}{K \cdot m}}{0.006m} = 6.680 \frac{W}{m^2 K}$$

$$R'_{d,conv} = \frac{1}{2\bar{h}\pi D} = \frac{1}{2 * 6680 \frac{W}{m^2 K} \pi 0.006m} = 3.97 * 10^{-3} \frac{K \cdot m}{W}$$

$$R'_d = R'_{d,mold} + R'_{d,conv} = 5.39 * 10^{-3} \frac{K \cdot m}{W} + 3.97 * 10^{-3} \frac{K \cdot m}{W} = 9.36 * 10^{-3} \frac{K \cdot m}{W}$$

Resistencia superior R'_u :

Al igual que en la inferior, también se calculan las resistencias de conducción del molde $R'_{u,mold}$ y de convección de los tubos de refrigeración $R'_{u,conv}$, pero en este caso añadimos también la resistencia de conducción de la placa metálica $R'_{u,placa}$:

$$R'_u = R'_{u,mold} + R'_{u,conv} + R'_{u,placa}$$

Las dos primeras se calculan del mismo modo que el desarrollo explicado para la resistencia inferior, modificando sólo la distancia z de la pieza a los tubos de refrigeración, así como la velocidad del fluido si esta cambiara.

Resistencia de conducción de la placa metálica $R'_{u,placa}$ (18 pág. 30):

$$R'_{u,placa} = \frac{e_{placa}}{w_{placa} * k_{placa}} = \frac{0.003m}{0.080m * 91 \frac{W}{mK}} = 4.12 * 10^{-4} \frac{mK}{W}$$

k_{ref} : Conductividad de la placa metálica.

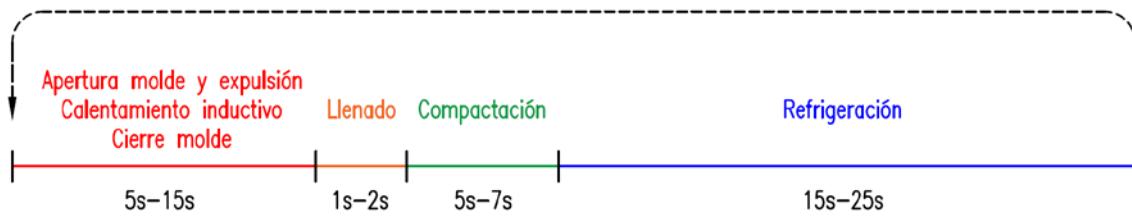
Resistencia del aire de la cavidad R'_{aire} :

Por último, calculamos la resistencia térmica que supone el aire del interior de la cavidad del molde en el momento del ciclo que no hay pieza.

$$R'_{aire} = \frac{e_{aire}}{w_{aire} * k_{aire}} = \frac{0.002m}{0.080m * 0.034 \frac{W}{m \cdot K}} = 0.735 \frac{K \cdot m}{W}$$

4.2.Fases

El proceso de fabricación desde el punto de vista térmico se divide en 3 fases (calentamiento, llenado-compactación y refrigeración), las cuales se estudiarán por separado tanto de forma analítica como a través del programa de resolución de ecuaciones EES®. A continuación, se muestra las distintas fases del proceso a lo largo de cada ciclo (Figura 21).



4.2.1. Calentamiento placa inducida

En esta primera fase se estudia el proceso en el cual la placa metálica eleva su temperatura mediante pérdidas por corrientes de Foucault generadas por inducción, convirtiéndose en el foco caliente y transmitiendo esta energía térmica a ambos lados del molde hasta los circuitos de refrigeración superior e inferior. Este momento coincide con la fase del ciclo del proceso

productivo en la cual se abre el molde y se expulsa la pieza ya solidificada, aprovechando este tiempo de apertura y cierre del molde para un calentamiento rápido.

Como existe un tiempo de molde abierto, las resistencias térmicas del bloque inferior del molde se desconectan del sistema, formándose un único flujo de transmisión y fuga del calor desde la placa inducida hasta el circuito de refrigeración superior (Figura 22). Además, durante el tiempo desde que el molde está cerrado de nuevo hasta que se introduce el plástico fundido en la cavidad, la película de aire que ocupa la cavidad del molde actúa de aislante, elevando la resistencia inferior, y siendo esta mucho mayor que la de la parte superior del molde, como se verá en los cálculos analíticos posteriores.

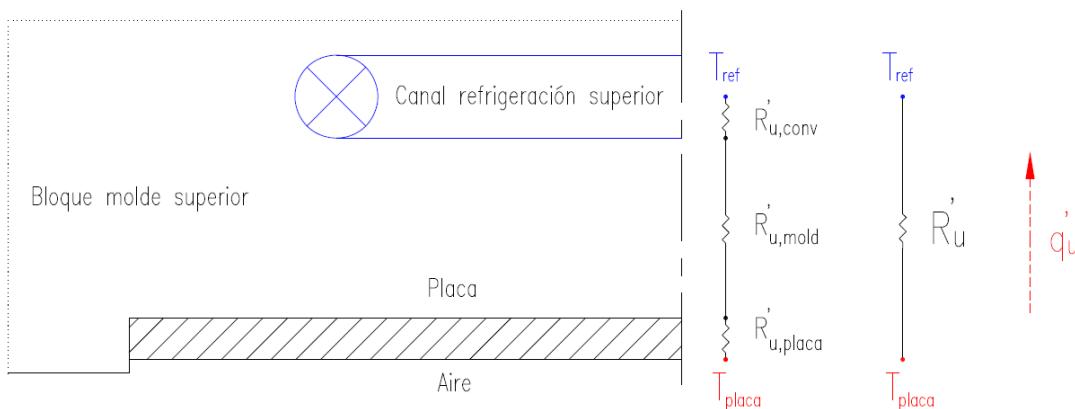


Figura 20. Modelo de resistencias térmicas simplificado para la fase de calentamiento.

El sistema de refrigeración funciona constantemente durante todo el ciclo del proceso. Esto supone que mientras se eleva la temperatura de la placa por inducción, existe una fuga de calor de esta hacia el circuito superior de refrigeración.

A continuación, se calcula dicha fuga de calor en el momento de mayor temperatura de la placa para comprobar si es o no despreciable en el proceso. Se supondrá una temperatura de placa de 100°C (valor por el cual rondan los valores calculados en EES® y Moldflow®) y de 60°C para el agua de los circuitos de refrigeración.

Valor máximo del calor fugado q_u durante el calentamiento de la placa:

$$q_u = q'_u * L = \frac{T_{placa} - T_{ref}}{R'_u} L = 259W$$

Como los valores de potencia calorífica generada en la placa son del orden de entre 500-2000W, la cantidad de calor fugado en el proceso de calentamiento no es despreciable y se deberá incluir en los cálculos siguientes.

La ecuación de calentamiento de la placa será:

$$q_{ind} - \frac{T_{placa} - T_{ref}}{R_u} = C_{placa} \frac{dT_{placa}}{dt}$$

q_{ind} : Calor generado en la placa por inducción.

C_{placa} : Capacidad calorífica de la placa.

$$C_{placa} = \rho_{placa} V_{placa} c_{p,placa} = 8900 \frac{kg}{m^3} (80 * 110 * 3) * 10^{-9} m^3 485 \frac{J}{kgK} = 114 \frac{J}{K}$$

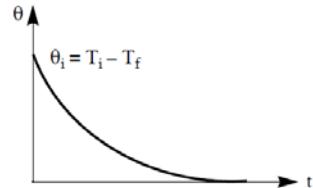
$c_{p,placa}$: Calor específico de la placa.

V_{placa} : Volumen de la placa.

Por tanto,

$$\frac{dT_{placa}}{dt} + \frac{T_{placa} - T_{ref}}{R_u C_{placa}} = \frac{q_{ind}}{C_{placa}} \rightarrow \frac{dT_{placa}}{dt} + \frac{T_{placa} - T_{ref}}{\tau_{ext,placa}} = \frac{q_{ind}}{C_{placa}}$$

$\tau_{ext,placa}$: Tiempo de relajación exterior (Figura 23). Es el que necesita la placa para estabilizarse térmicamente, es decir, para equilibrar la temperatura de su superficie con la de su entorno (18 pág. 97).



$$\tau_{ext,placa} = R_u C_{placa}$$

Figura 21. Tiempo de relajación exterior (18).

Cambio de variable:

$$\theta_{placa} = T_{placa} - T_{ref} - q_{ind} R_u \rightarrow \frac{d\theta_{placa}}{dt} = -\frac{\theta_{placa}}{\tau} \rightarrow \theta_{placa} = \theta_{placa,i} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\theta_{placa} = T_{placa} - T_{ref} - q_{ind} R_u = -75^{\circ}C$$

$$\theta_{placa} = (-75^{\circ}C) e^{-\frac{10}{16}} = -40^{\circ}C$$

En el caso de que la fase de calentamiento dure 10 segundos, la temperatura de la placa al final de este tiempo será:

$$T_{placa}(10s) = 95^{\circ}C$$

4.2.2. Llenado y compactación

La fase de llenado es la más rápida del proceso de inyección, la cual oscila entre 1 y 2 segundos para piezas de reducido tamaño como el de nuestro modelo a estudiar. Por esta razón se despreciarán los cálculos que pudieran surgir en este periodo respecto a lo que se refiere a procesos térmicos y de transferencia de calor. Se supondrá por tanto que el plástico aparece en la cavidad de forma instantánea, a partir de la cual comenzará el proceso de refrigeración de la pieza.

También se supone un contacto perfecto entre la pared de la cavidad del molde y el plástico, despreciando la resistencia térmica que las partículas de aire atrapado entre los dos materiales pudieran añadir para los presentes cálculos. De hecho, una de las ventajas ya citadas que permite el calentamiento del molde para el proceso de fabricación es la de mejorar el contacto entre el plástico fundido que entra en la cavidad y la superficie de esta.

Por otro lado, la fase de compactación dura más tiempo (en torno a 5-7 segundos) sin embargo, al no aumentar apenas la cantidad de material inyectado y, por ende, el aporte de

calor al sistema, para estos cálculos térmicos se considerará incluida en la fase de refrigeración ya que, a efectos térmicos, es un periodo más donde la pieza se está enfriando.

4.2.3. Refrigeración

En la fase de enfriamiento de la pieza, se tomará esta como foco caliente, a partir de la cual se dividirán dos flujos de calor unidimensionales, hacia los bloques de molde inferior y superior, donde se encuentran los sumideros de calor (circuitos de refrigeración).

Tanto la placa metálica como la pieza de plástico fundido (en proceso de solidificación) se enfriarán de manera simultánea. Para evaluar la rapidez de esta fase en ambas partes se recurre al tiempo de relajación exterior (anteriormente explicado para la placa) y al tiempo de relajación difusivo de cada una de ellas.

Además, para los cálculos posteriores necesitaremos el valor del tiempo de relajación exterior de la última lámina inferior de la pieza (además del de la placa, previamente calculado), la cual está en contacto con el foco frío del circuito de refrigeración a través de la resistencia inferior R_d :

$$\tau_{ext,pp} = C_{pp}R_d = m_{pp}c_{pp}R_d = \rho_{pp}V_{pp}c_{pp} \frac{R_d}{N}$$

τ_{dif} : Tiempo de relajación difusivo. Es el tiempo de homogenización de la temperatura en el volumen del sólido (en este caso en la dirección del espesor) y viene dado por:

$$\tau_{dif} = \frac{e^2}{4a}$$

a: Difusividad térmica (18 pág. 20). Es una propiedad específica del material para caracterizar la conducción de calor en condiciones no estacionarias, describiendo cuán rápido reacciona a un cambio de temperatura.

$$a = \frac{k}{\rho c_p}$$

Los valores de τ_{dif} hallados para la placa y la pieza son:

$$\tau_{dif,placa} = \frac{e_{placa}^2}{4a_{placa}} = 0,12s$$

$$\tau_{dif,pp} = \frac{e_{pp}^2}{4a_{pp}} = 13,28s$$

Esto corrobora el hecho de que la placa fabricada en níquel transmite mucho más rápido el calor y su fase transitoria es muy rápida en comparación con la pieza de plástico. Por lo que, aunque las corrientes de Foucault generadas por la inducción se concentren en la primera capa superficial de la placa (la opuesta a la que está en contacto con el plástico) y por tanto eleven la temperatura en esa zona, la transmisión del calor a lo largo del espesor se realiza tan rápido que puede considerarse una temperatura uniforme en toda ella.

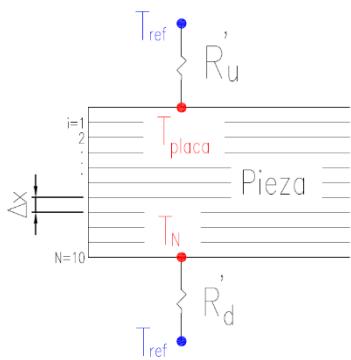
Sin embargo, en la pieza de plástico la transmisión de calor es muy lenta, por lo que la diferencia de temperatura entre las distintas capas del sólido es lo suficientemente elevada

como para tener que recurrir a un cálculo más fino para evaluar el proceso térmico que se lleva a cabo en el interior de dicha pieza. Por ello se empleará el método de diferencias finitas (18 págs. 111-113) para la resolución de estos cálculos, los cuales se realizarán únicamente en el programa EES®.

Se discretiza el espesor de la pieza en 10 celdas idénticas (Figura 24) y el tiempo de enfriamiento en saltos temporales de 0,5 segundos. Las ecuaciones con las cuales calculará EES® los diferentes puntos de este sistema espaciotemporal serán las siguientes:

Balance de energía de un nudo interior cualquiera "j" y un instante de tiempo "i":

$$\rho c_p (\Delta x A) \frac{T_i^j - T_i^{j-1}}{\Delta t} = k A \left(\frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x} + \frac{T_{i-1}^j - T_i^j}{\Delta x} \right) + q''' (\Delta x A)$$



Δx : Tamaño de las celdas en las que se divide el espesor total de la pieza. En nuestro caso el valor será de 2mm/10=0.2mm.

k_{ref} : Conductividad térmica de la pieza.

q''' : Término de generación térmica. En la pieza de plástico no existe generación interna de calor, por lo que este término desaparece de la ecuación.

En nuestro caso los cálculos se realizan por unidad de área transversal al flujo de calor, por los que se elimina dicha variable "A" de la ecuación. Por lo tanto, para un nudo cualquiera de la pieza de plástico³, la ecuación será:

$$(\rho c_p)_{pp} \Delta x \frac{T_i^j - T_i^{j-1}}{\Delta t} = k_{pp} \left(\frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x} + \frac{T_{i-1}^j - T_i^j}{\Delta x} \right)$$

$$(\rho c_p)_{pp} \Delta x \frac{T_i^j - T_i^{j-1}}{\Delta t} = k_{pp} \left(\frac{T_{i+1}^j + T_{i-1}^j - 2T_i^j}{\Delta x} \right)$$

Reordenando términos para la simplificación de la ecuación de cara al método numérico iterativo a implementar en el programa de cálculo EES®, nos queda:

$$T_i^j (1 + 2Fo) = T_i^{j-1} + Fo(T_{i-1}^j + T_{i+1}^j)$$

$$\text{Número de Fourier: } Fo = \frac{a_{pp} \Delta t}{(\Delta x)^2}$$

Para el nudo 1, el cual está en contacto con la temperatura de la placa y la del nudo 2, la ecuación será:

³El subíndice "pp" indica que la variable o constante está referida al polipropileno, plástico con el cual se inyecta la pieza en el programa EES®.

$$(\rho c_p)_{pp} \Delta x \frac{T_1^j - T_1^{j-1}}{\Delta t} = k_{pp} \left(\frac{T_2^j - T_i^j}{\Delta x} + \frac{T_{placa}^j - T_i^j}{\Delta x} \right)$$

Reordenando términos de la misma manera que antes, quedará:

$$T_1^j = T_1^{j-1} + Fo(T_{placa}^j + T_2^j - 2T_1^j)$$

Para el nudo final N, el cual está en contacto con la temperatura del bloque inferior (o, dicho de otra forma, con el circuito de refrigeración inferior a través de la resistencia $R_{d,mold.}$) y la del nudo N-1, la ecuación será:

$$(\rho c_p)_{pp} \Delta x \frac{T_N^j - T_N^{j-1}}{\Delta t} = \frac{T_{ref}^j - T_N^j}{R_d''} + \frac{T_{N-1}^j - T_N^j}{\Delta x} k_{pp}$$

$$\frac{T_N^j - T_N^{j-1}}{\Delta t} = \frac{T_{ref}^j - T_N^j}{\tau_{ext,pp}/N} + \frac{a_{pp}}{\Delta x^2} (T_{N-1}^j - T_N^j)$$

Balance de energía en la placa metálica:

$$-(\rho c_p e)_{placa} \frac{T_{placa}^j - T_{placa}^{j-1}}{\Delta t} = k_{placa} \left(\frac{T_{placa}^j - T_{ref}^j}{\Delta x} + \frac{T_{placa}^j - T_1^j}{\Delta x} \right)$$

$$-(\rho c_p e)_{placa} \frac{T_{placa}^j - T_{placa}^{j-1}}{\Delta t} = \frac{T_{placa}^j - T_{ref}^j}{R_u''} + \frac{T_{placa}^j - T_1^j}{\Delta x} k_{placa}$$

$$\frac{T_{placa}^j - T_{placa}^{j-1}}{\Delta t} = \frac{T_{ref}^j - T_{placa}^j}{\tau_{placa}} + \frac{T_1^j - T_{placa}^j}{\Delta x} \frac{k_{placa}}{(\rho c_p e)_{placa}}$$

4.3. Modelado en EES

Se analizan las relaciones existentes entre el tiempo y potencia de calentamiento por inducción de la placa metálica⁴, con la temperatura alcanzada en la placa y el tiempo de refrigeración necesario para solidificar la pieza antes de la expulsión, ecuaciones y resultados consultables en el **ANEXO I “Informe tipo de resultados de EES”** (ejemplo de datos y resultados para el caso 1). Mediante la variación de las condiciones comentadas, se hallarán y contrastarán los siguientes resultados:

El aumento tanto de la potencia de calentamiento como del tiempo de dicha fase suponen un incremento de temperatura de la placa metálica inducida. El rango aproximado de temperaturas de calentamiento que se pretende estudiar es de 100-150°C, ya que se considera suficiente para la finalidad de atemperar esa superficie del molde antes del llenado.

El aumento de temperatura de la placa conlleva una fase de refrigeración más lenta, ya que la cantidad de calor a evacuar del sistema aumenta. Esto provoca un incremento en el tiempo de refrigeración que deriva a su vez en un aumento del tiempo de ciclo total.

A continuación, se muestra la tabla de resultados de los cálculos térmicos expuestos (Tabla 2):

N.º caso	Tipo	t_{ind} [s]	Q_{ind} [W]	T_{placa} [°C]	t_{ref} ⁵ [s]
0	Calentamiento inductivo corto	0	0	70,0	13,0
1			1000	108,7	16,0
2			1500	127,3	17,5
3			2000	145,9	19,0
4			2500	164,8	20,0
5	Calentamiento inductivo medio	5	500	96,9	15,0
6			1000	127,9	17,5
7			1500	158,0	20,0
8			2000	187,9	22,0
9	Calentamiento inductivo largo	10	500	102,0	15,5
10			1000	140,1	18,5
11			1500	177,4	21,5
12			2000	214,5	24,0

Tabla 2. Casos de cálculos térmicos en EES®.

t_{ind} : tiempo durante el cual está encendida la bobina y, por tanto, durante el cual se calienta la placa metálica. (“ Dt_{ind} ” en ANEXO I, pág. 2)

Q_{ind} : Potencia calorífica que emana de la placa, derivada de la inducción. (“ q_{ind} ” en ANEXO I, pág. 2)

T_{placa} : Temperatura de la placa metálica después del calentamiento. (“ $Tpm[0]$ ” en ANEXO I, pág. 7)

⁴ La temperatura inicial de la placa metálica antes del calentamiento (“ $Tpmi$ ” en ANEXO I, pág. 2) será igual a la temperatura que tiene esta al final de la fase de refrigeración (“ $Tpm (i=M)$ ” en ANEXO I, pág. 7) (cálculo iterativo hasta convergencia).

⁵ Para poder comparar tiempos de refrigeración, Se mantiene constante la temperatura de expulsión de la pieza a 90°C, que es el valor recomendado para la fabricación de piezas con polipropileno.

⁶ Caso sin calentamiento. Los canales de refrigeración superiores e inferiores se encontrarán a la misma distancia de la pieza, ya que no es necesario un espacio que albergue el sistema inductivo.

t_{ref} : Tiempo de refrigeración ("M-Dt" en ANEXO I, pág. 1) necesario para expulsar la pieza a los 90 °C de consigna impuestos (" $T_{i,max}(t=16seg)<90°C$ en ANEXO I, págs. 7-8).

Las tendencias al alza de la temperatura de la placa y el tiempo de refrigeración son del orden esperado (Figura 25 y Figura 26 izquierda). Además, se puede observar como para potencias elevadas (2000-2500W) el incremento del tiempo de refrigeración disminuye un poco.

Al aumentar la temperatura de la placa, el calor a evacuar en el sistema también lo hace y, por tanto, es necesario un mayor tiempo de refrigeración (Figura 26 derecha). Al incrementar desde los 70°C iniciales de la placa hasta los 200°C, el tiempo aumenta de 13s a 24s. La relación lineal es aproximadamente de 1s extra de refrigeración por cada 12°C de temperatura de la placa. Si añadimos al tiempo de refrigeración el de calentamiento de la placa (en el caso sin calentamiento añadimos 3 segundos como tiempo de expulsión de pieza), el resultado es el tiempo de ciclo total. La Figura 26 derecha refleja un aumento del tiempo de ciclo del doble (incluso el triple en los casos de mayor calentamiento) del tiempo convencional. Sin embargo, cabe destacar que estos cálculos parten de un modelo simplificado unidimensional, donde se desprecia la fuga de calor del molde al ambiente, tanto en la fase de calentamiento como en la de refrigeración, por lo que en la realidad estos tiempos serían algo inferiores.

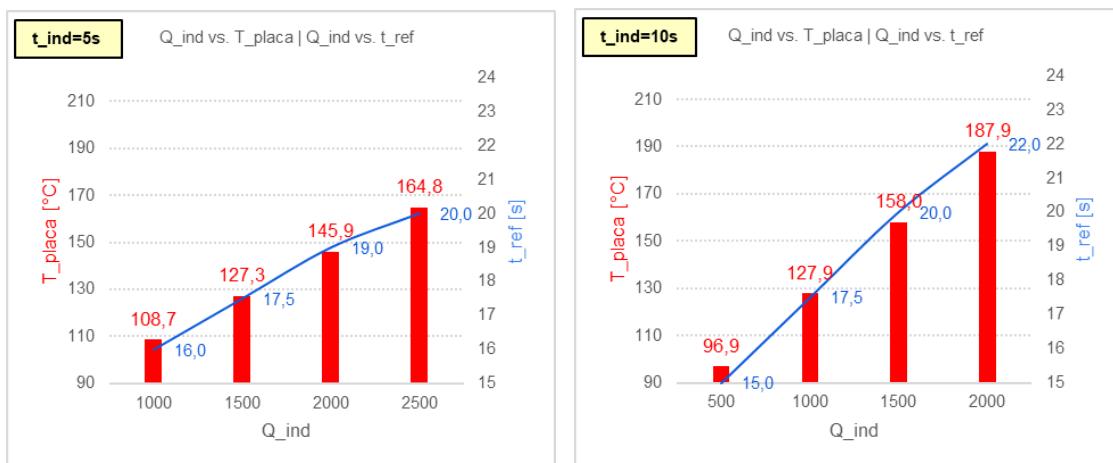


Figura 23. Relación de T_{placa} y t_{ref} respecto a la potencia calorífica Q_{ind} , durante un tiempo de calentamiento de 5 segundos (izquierda) y 10 segundos (derecha).

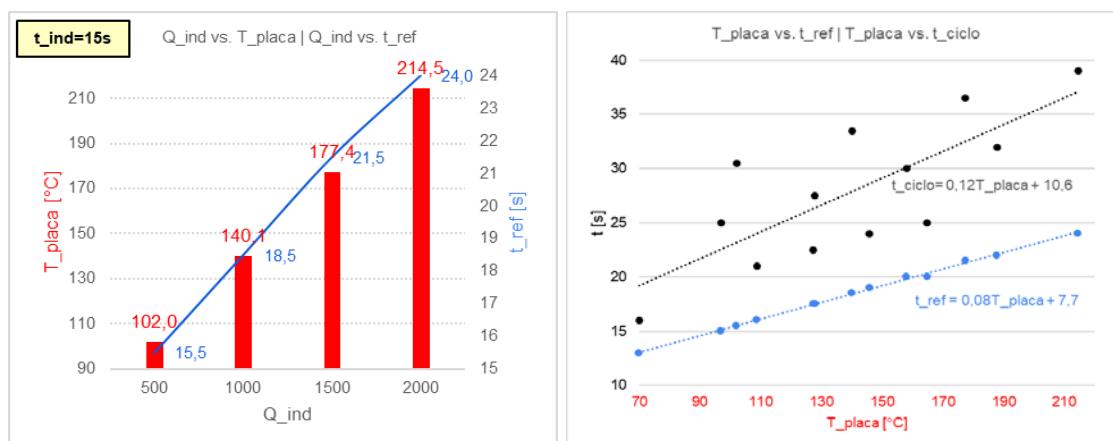


Figura 24. Relación de T_{placa} y t_{ref} respecto a Q_{ind} , durante un tiempo de calentamiento de 15 segundos (izquierda). Tendencia de tiempos de refrigeración y ciclo respecto a la temperatura de la placa (derecha).

Se puede comprobar también que conforme varía el tiempo de calentamiento de 5, 10 y 15 segundos, el incremento de temperatura de la placa por cada salto de 500W de potencia aumenta en una media de 25, 35 y 45°C respectivamente (Figura 27 y Figura 28). El rango de velocidades de calentamiento en este orden de potencias es por tanto de 3-5°C/s, aunque la progresión no es lineal, ya que conforme se aumenta el tiempo de calentamiento también lo hace la fuga de calor durante el mismo hacia el circuito de refrigeración superior. De hecho, en los primeros 5 segundos se experimenta una velocidad de calentamiento muy superior al de estos valores (entre 6-13°C/s para potencias del rango de 1000-2000W).

En la Figura 29 se observa cómo el núcleo de la pieza se enfriá más lento que el perímetro, desde los 200°C iniciales hasta los 90°C necesarios para la expulsión. De forma simultánea la placa se enfriá también, mientras resulta condición de contorno de una de las caras de la pieza (nodo 0). El enfriamiento asimétrico se puede apreciar por las diferencias térmicas entre los nodos 0 y 10, causado por la propia asimetría de los sistemas tanto de calentamiento como de refrigeración.

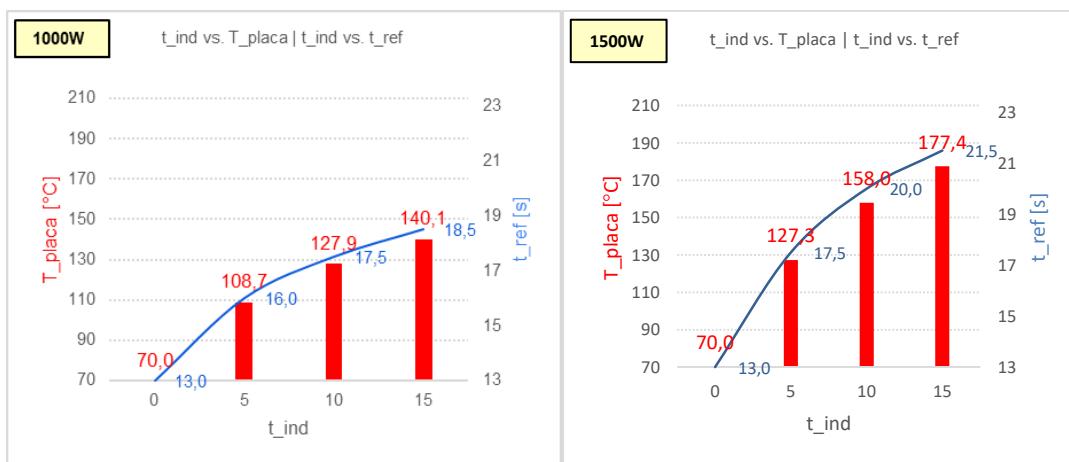


Figura 25. Relación entre el tiempo de calentamiento y la temperatura de la placa y tiempo de refrigeración para 1000W (izquierda) y 1500W (derecha).



Figura 26. Relación entre el tiempo de calentamiento y la temperatura de la placa y tiempo de refrigeración para 2000W.

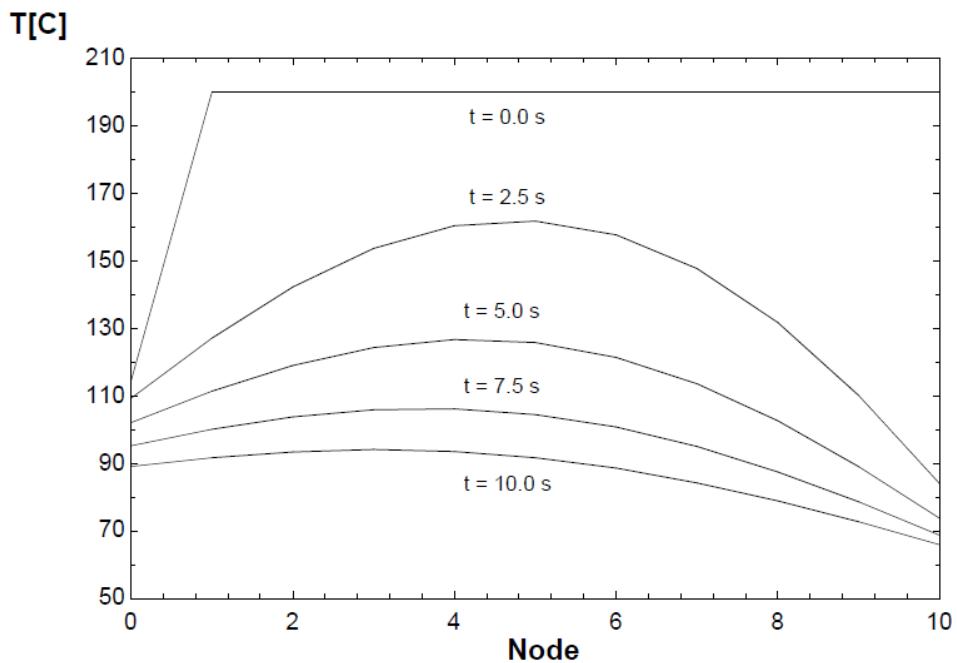


Figura 27. Perfil de temperaturas a lo largo del espesor de la pieza y su evolución durante el enfriamiento (EES).

5. ESTUDIO MEDIANTE HERRAMIENTAS CAE

Este programa de elementos finitos se ha empleado para simular un sistema como el diseñado, y reproducir una situación similar al proceso de moldeo por inyección. Este entorno permite incluir un sistema de calentamiento por inducción, indicando al programa la intensidad y frecuencia a las cuales trabajará la bobina.

Con estos medios se han extraído relaciones entre variables tales como la intensidad y frecuencia de la bobina, el calor generado en la placa, las temperaturas de calentamiento de dicha placa o de expulsión de la pieza, entre otros. Además, como es lógico, esta aplicación nos da información propia del proceso de inyección, como presión de llenado de la cavidad, tiempos de las fases del proceso, deformaciones en la pieza final, o viscosidad del plástico fundido en cualquier punto de la cavidad del molde.

La mayoría de los casos se realizan para una pieza de polipropileno (PP), pero también se hacen un par de simulaciones con un termoplástico más técnico, de la familia de los PEEK (polieteretercetonas), como es el “*Luvocom 1105/CF/10/GR/10/TF10*” del fabricante “*Lehmann&Voss&Co®*”, el cual tiene una mayor densidad y carga de fibras de carbono, además de una gran viscosidad, lo que lo hace más difícil de inyectar en el molde y con el cual se comprobará alguna de las ventajas del calentamiento rápido de moldes. Este material se denominará a partir de ahora únicamente como “PEEK”.

5.1. Condiciones de proceso

Además de las geometrías y materiales de los componentes, para todos los casos de simulación los siguientes datos permanecen constantes:

Temperaturas:

- Ambiente⁷: 50°C
- Material fundido (PP): 200°C
- Material fundido (PEEK): 380°C

Círculo refrigeración:

- Refrigerante: Agua líquida
- Caudal: 1,7 l/min
- Temperatura: 60°C
- Presión: 3 bar

Se realizan un total de 14 casos de simulación, los cuales se dividen en 12 casos con inyección con PP y 2 con PEEK. Además, se incluye un “caso 0” como en los cálculos realizados en EES®, en el que no se emplea calentamiento de molde, para poder comparar la inyección convencional con la tecnología de calentamiento rápido del molde por inducción.

⁷ Aunque parezca un valor elevado, hay que tener en cuenta que es la temperatura a la cual está el aire colindante a la máquina de inyección, la cual trabaja con plástico fundido a 200°C. A pesar de que en el modelo de EES® no se tenga en cuenta, el molde está expulsando calor al entorno durante el proceso.

Se realizan 3 bloques de casos distintos con PP: el primero simula un calentamiento rápido (5 segundos de calentamiento, 20 de ciclo total y 100kHz de frecuencia), el segundo un calentamiento más extenso (10 segundos de calentamiento y 28 de ciclo total), y el tercero será rápido, pero a baja frecuencia (como el primero, pero a 50kHz).

Por último, los casos 13 y 14 modifican el material de inyección a PEEK, el 13 sin calentamiento y el 14 con calentamiento de 5 segundos (20 segundos de ciclo total) a 100kHz y 400A de intensidad.

5.2.Resultados

Los parámetros de operación y resultados de los casos comentados se muestran resumidos en la Tabla 3. Los resultados reflejados en ella se extraen a partir de los informes detallados que devuelve el programa, los cuales son de la forma del **ANEXO II “Informe tipo de resultados de Moldflow”** (informe de uno de los casos simulados, a modo de ejemplo), donde se pueden observar cada uno de los cálculos que realiza el programa en orden cronológico.

A pesar de trabajar con un modelo en 3D, donde los valores son distintos en cada uno de los elementos de los que se compone la malla creada, en este informe se incluyen los valores medios, mínimos y máximos. A continuación de esta tabla se referencia el significado de cada dato y el campo del informe de donde se recoge cada resultado (resaltados en amarillo en dicho anexo).

N.º	Tipo	t_{ind} [s]	t_c [s]	Frec. [kHz]	I [A]	Q_{ind} [W]	$T_{pl_máx}$ [°C]	T_{placa} [°C]	T_{pieza} [°C]	$\delta_{máx}$ [mm]	$P_{máx}$ [MPa]
0	Convencional	0	7	0	0	0	-	-	86,7	1,44	9,80
1	Calentamiento inductivo rápido	5	20	100	250	1022	102,4	92,7	84,7	2,20	9,40
2					300	1471	116,9	103,0	90,2	2,76	9,06
3					350	2003	134,0	115,2	96,6	3,27	8,72
4					400	2616	153,6	129,2	104,0	4,00	8,34
5	Calentamiento inductivo extenso	10	28	100	250	1022	111,0	97,3	83,2	2,37	9,41
6					300	1471	130,8	111,0	89,3	3,03	8,98
7					350	2003	154,1	127,2	96,6	3,76	8,57
8					400	2616	180,8	145,8	104,8	4,72	8,21
9	Calentamiento inductivo baja frecuencia	5	20	50	250	564	88,4	82,3	79,1	1,70	9,86
10					300	812	96,7	88,1	82,2	2,01	9,69
11					350	1105	106,5	95,0	85,8	2,28	9,35
12					400	1444	119,6	103,3	89,9	2,75	9,10
13	PEEK convencional	0	20	0	0	0	-	-	89,8	0,49	111,60
14	PEEK calentamiento	5	20	100	400	2616	168,3	143,5	121,7	0,93	98,00

Tabla 3. Resultados de las simulaciones realizadas en Moldflow® para los distintos casos planteados.

t_{ind} : tiempo durante el cual está encendida la bobina y, por tanto, durante el cual se calienta la placa metálica.

t_c : Tiempo total de ciclo (llenado, compactación, refrigeración y calentamiento).

I : Intensidad que circula por la bobina.

F : Frecuencia de la corriente alterna que circula por la bobina.

Q_{ind} : Potencia calorífica que emana de la placa magnética, derivada de la inducción. (“Calor en Julios”, del análisis electromagnético del ANEXO II, pág. 3).

$T_{pl\ máx}$: Temperatura máxima de la placa metálica después del calentamiento y antes del llenado. (“Temperatura de inserto de molde – máxima”, Resumen de resultados Al principio/Final del ciclo del ANEXO II, pág. 10).

T_{pl} : Temperatura media de la placa metálica después del calentamiento y antes del llenado. (“Temperatura de inserto de molde – media”, Resumen de resultados Al principio/Final del ciclo del ANEXO II, pág. 10).

T_{pieza} : Temperatura de la superficie de la pieza al final de la refrigeración (es decir, temperatura de expulsión de la pieza). (“Temperatura de la superficie de la pieza – media”, Resumen de resultados Al principio/Final del ciclo del ANEXO II, pág. 10).

$\delta_{máx}$: Deformación máxima en la pieza final respecto al diseño teórico. (Valor máximo del resultado gráfico “deflexión todos los efectos”).

$P_{máx}$: Presión máxima que ejerce la máquina de inyección durante el llenado. (“Presión de inyección en la conmutación de velocidad/presión”, Resumen de resultados del final de la fase de llenado del ANEXO II, pág. 13).

En los cálculos con el modelo 2D simplificado (EES[®]) se supone una distribución homogénea de temperaturas en la dirección del espesor de la placa, la cual se mantiene en los resultados de simulación. Sin embargo, en la dirección perpendicular al espesor (largo y ancho de la placa) las diferencias de temperatura son considerables, como se puede apreciar en la Figura 30, donde también se comprueba que este efecto se acentúa a medida que aumenta la temperatura media de calentamiento de la placa. Por ese motivo la bobina debería replicar lo mejor posible la geometría de la placa a calentar, igual que se suele hacer para el diseño de los circuitos de refrigeración respecto de la geometría de la pieza.

En la Figura 31 se observa la evolución y distribución de dos de los valores extraídos como resultados de los casos 0 hasta el 4. En la columna de la izquierda se muestra la temperatura de la placa magnética al final de la fase de calentamiento, la cual aumenta conforme lo hace la intensidad que circula por la bobina (mayor potencia calorífica). Además, se observa una distribución no homogénea, causada por la diferencia entre la geometría circular de la bobina inductora y la rectangular de la placa. Esto produce un calentamiento desigual a lo largo de la superficie de la pieza (columna derecha).

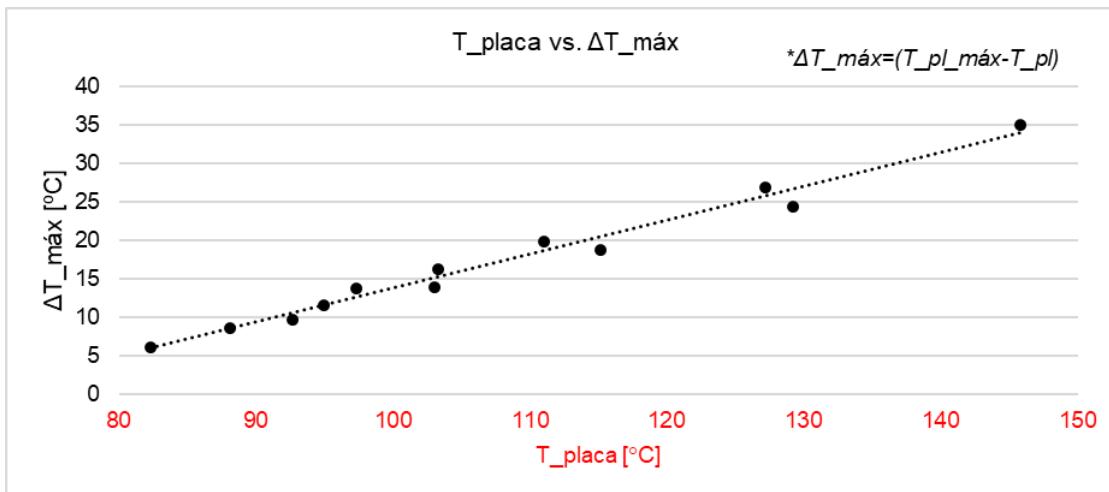


Figura 28. Evolución de la diferencia ($\Delta T_{máx}$) entre temperatura media (T_{placa}) y máxima ($T_{máx}$) de la placa, en función de su temperatura media (T_{placa}).

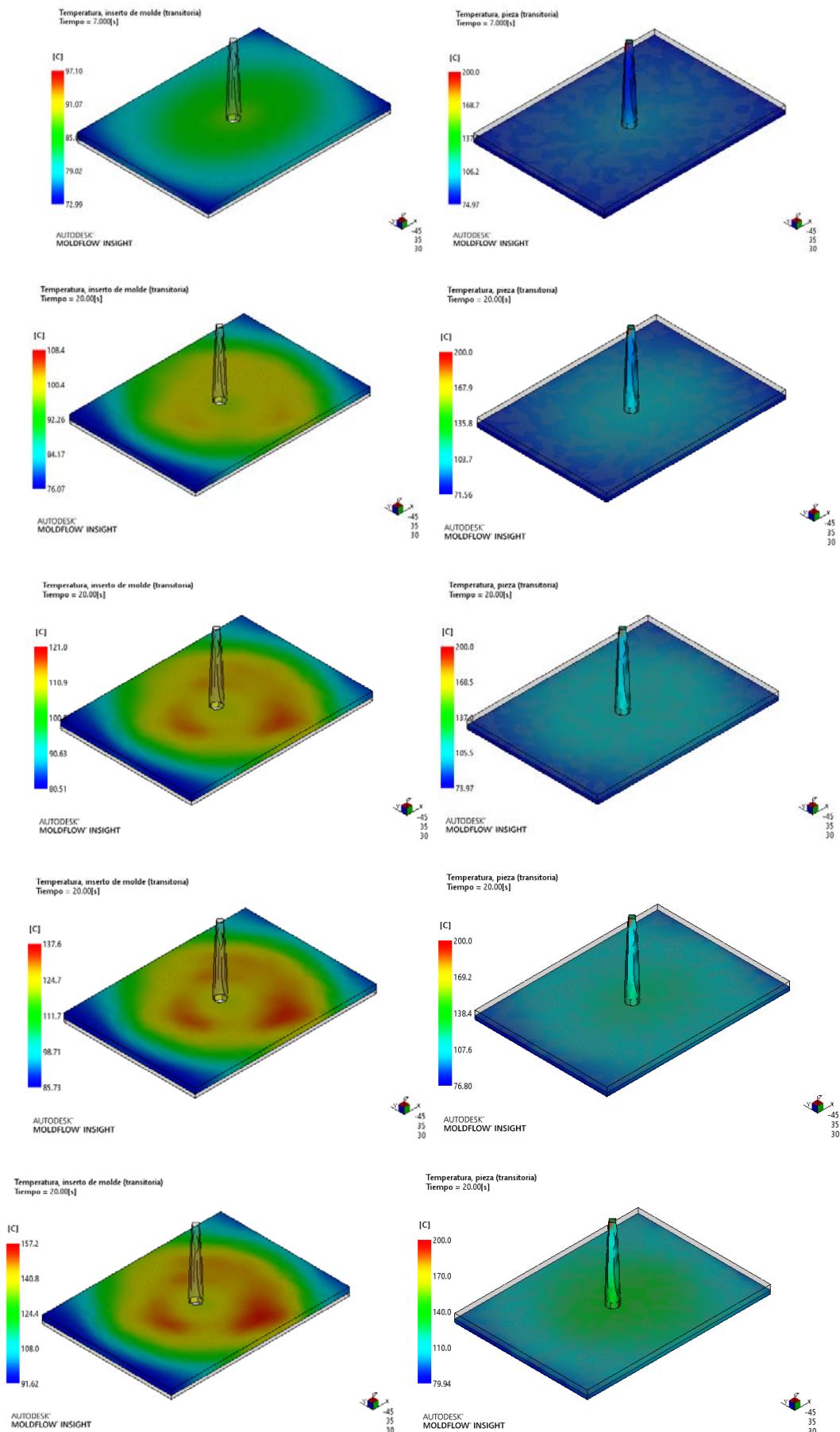


Figura 29. Temperaturas de placa (izquierda) y expulsión de pieza (derecha) de los casos 0, y del 1 al 4 (con diferentes condiciones de calentamiento por inducción).

A continuación se muestra la evolución de la presión ejercida por la máquina de inyección en el llenado y compactación para los casos con PEEK en inyección convencional (Figura 32 izq.) y con calentamiento (Figura 32 dcha.). El pico llega la final de la fase de llenado, donde comuta con la de compactación, que se realiza a una presión constante (80% de la máxima).

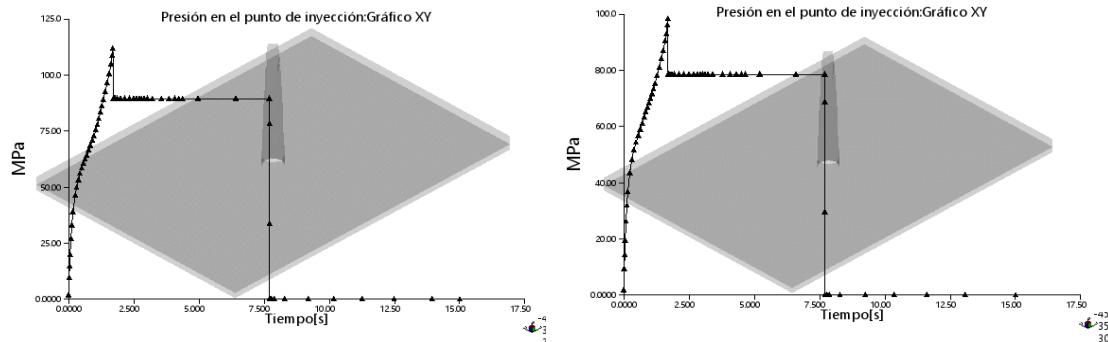


Figura 30. Evolución de la presión en el punto de inyección de la pieza fabricada con PEEK, para caso convencional (izq.) y con calentamiento (dcha.).

Se puede comprobar el valor máximo tanto en la Figura 32 como en la Figura 33. Entre los dos casos se aprecia una disminución en la presión máxima de 112MPa a 98MPa. Sin embargo, este beneficio en el proceso se consigue con una intensidad de 400A, lo que supone un importante gasto energético. En los casos con PP, se reduce la presión máxima de 9,8MPa (inyección convencional) hasta valores que rondan los 8,5MPa (Tabla 3). Para ambos materiales este calentamiento supone una reducción del 12% en la presión máxima, que se debe a la disminución de la viscosidad del flujo en contacto con la superficie del molde, por el calentamiento debido a la inducción. De manera proporcional a la presión, el calentamiento consigue reducir la fuerza de cierre máxima ejercida por la máquina. Para el caso del PEEK se reduce de 50tn a 45tn (Figura 34).

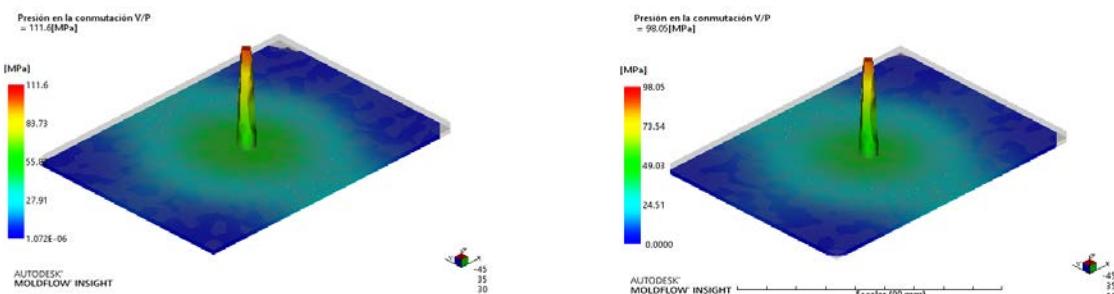


Figura 31. Presión en la comutación V/P (cambio de fase de llenado a compactación), que coincide con la presión máxima, para la pieza fabricada con PEEK, en los casos convencional (izq.) y con calentamiento (dcha.).

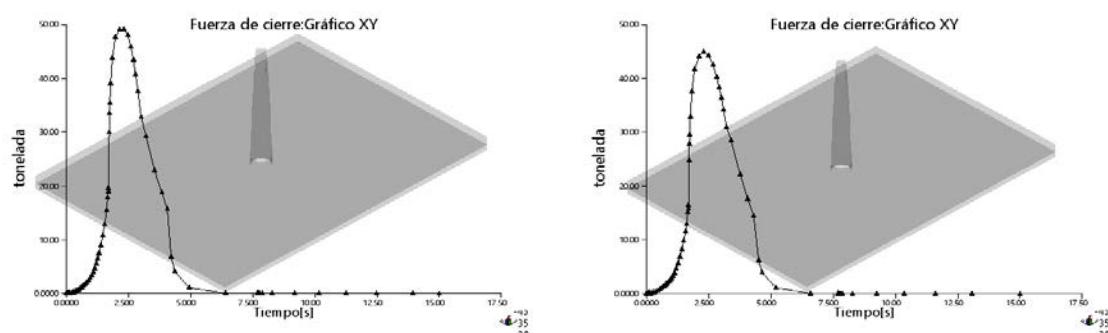


Figura 32. Evolución de la fuerza de cierre en inyección con PEEK, para caso convencional (izq.) y con calentamiento (dcha.).

Se observa en la Figura 35 las influencias de la frecuencia, intensidad y tiempo de calentamiento en la potencia calorífica y temperatura generadas en la placa metálica.

Al duplicar la frecuencia de la corriente, la potencia calorífica generada en la placa aproximadamente se duplica también (casos 1-4 y 9-12, Tabla 3), mientras que relación entre la potencia y la intensidad sigue una tendencia exponencial. Esto se debe a que la potencia depende del cuadrado de la intensidad.

Como se podía esperar, al aumentar el tiempo de calentamiento o la intensidad, la temperatura alcanzada en la placa también lo hace. Este incremento conforme elevamos la potencia calorífica es más elevado a mayor frecuencia de trabajo (se aprecia mayor pendiente entre la líneas azul y roja de la Figura 35).

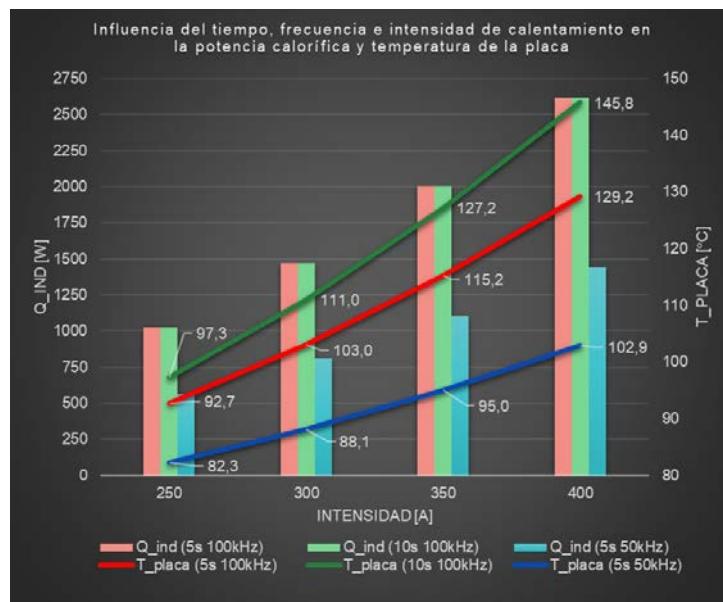


Figura 33. Influencia de t , f e I de calentamiento en la potencia Q_{ind} y temperatura de la placa.

La velocidad media de calentamiento de la placa en los primeros 5 segundos es de entre 2,5-7°C/s (partiendo de los 80°C iniciales de la placa) para potencias del rango de 1000-2000W (línea roja para el rango de 250A-350A de la Figura 35), valores bastante inferiores a los hallados con el modelo simplificado de EES®, y más cercanos a la realidad final del proceso.

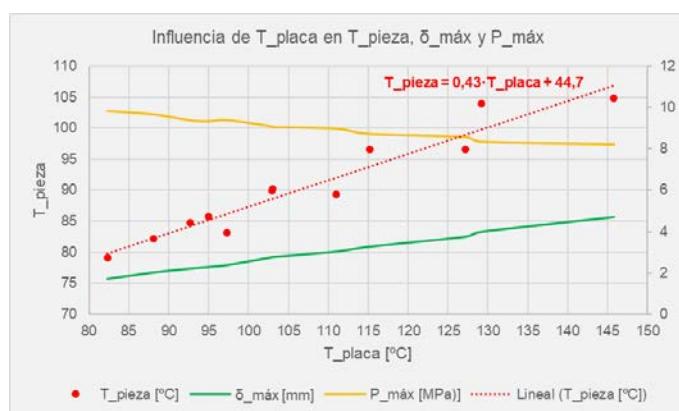


Figura 34. Influencia de la temperatura de la placa en la de la pieza (en la expulsión), la deformación final máxima y la presión máxima en el llenado.

La temperatura de expulsión de la pieza aumenta a un ritmo de casi $0,5^{\circ}\text{C}$ por cada 1°C que lo hace la placa (Figura 36).

La deformación de la pieza final fabricada es mayor cuanto más calentamos la placa, debido a la asimetría térmica del sistema (sólo se calienta la superficie superior de la cavidad). Además, la bobina es circular y el calentamiento provocado tiende a esa geometría, en una pieza de dimensiones rectangulares, creando mayores diferencias de temperatura a lo largo de la pieza. Esta deformación en una aplicación industrial sería motivo de rechazo por calidad, ya que ronda en torno a los 2-4mm en las esquinas (Figura 37).

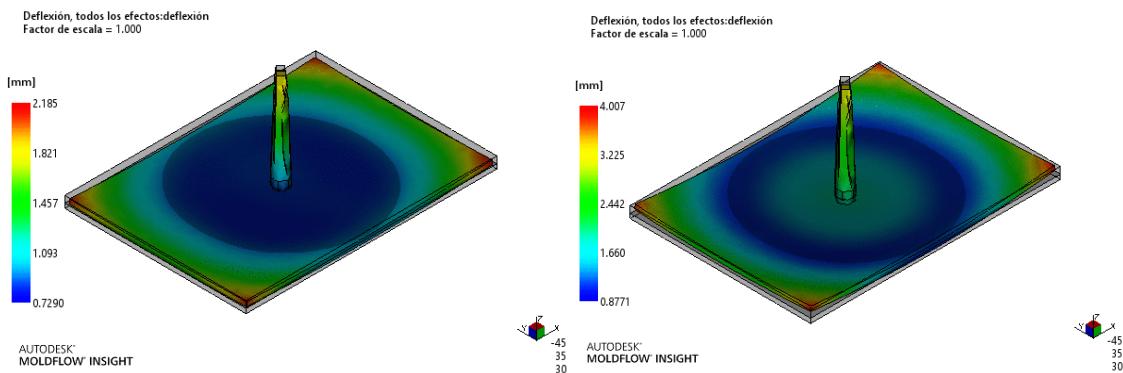


Figura 35. Deformación (deflexión) de la pieza final en los casos 1 (izq.) y 4(dcha.).

Como pasa con la deformación final de la pieza, la asimetría del calentamiento de la cavidad del molde (diferencia térmica entre superficies superior e inferior de la cavidad) provoca una gran disparidad entre valores de viscosidad a lo largo del espesor de la pieza inyectada (Figura 38).

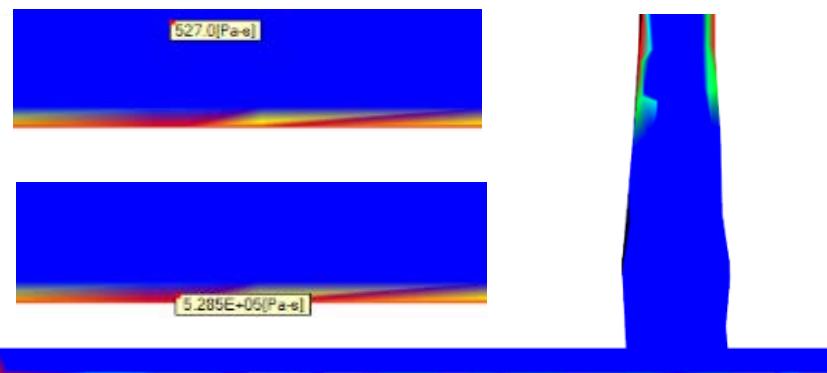


Figura 36. Diferencias de viscosidad a lo largo del espesor (izquierda) y de forma radial a la pieza (derecha).

Tanto en la Tabla 4 como en la Figura 39 se observa que la temperatura de la placa es mayor en los resultados de EES® que en los de Moldflow®, para las mismas potencias y tiempos de calentamiento. Esto se debe a que el modelo simplificado que se implementa en EES® no tiene en cuenta las pérdidas de calor por el molde al ambiente. No obstante, los valores son lo suficientemente parecidos entre programas como para asegurar que el modelo de ecuaciones creado se asemeja bastante al que utiliza el programa de simulación, validando así el planteamiento expuesto en el apartado “PROCESOS TÉRMICOS”.

N.º	t_ind [s]	EES		Moldflow	
		Q_ind [W]	T_placa [°C]	Q_ind [W]	T_placa [°C]
1	5	1000	108,7	1022	92,7
2		1500	127,3	1471	103,0
3		2000	145,9	2003	115,2
4		2500	164,8	2616	129,2
5	10	500	96,9	1022	97,3
6		1000	127,9	1471	111,0
7		1500	158,0	2003	127,2
8		2000	187,9	2616	145,8

Tabla 4. Comparación resultados EES y Moldflow.

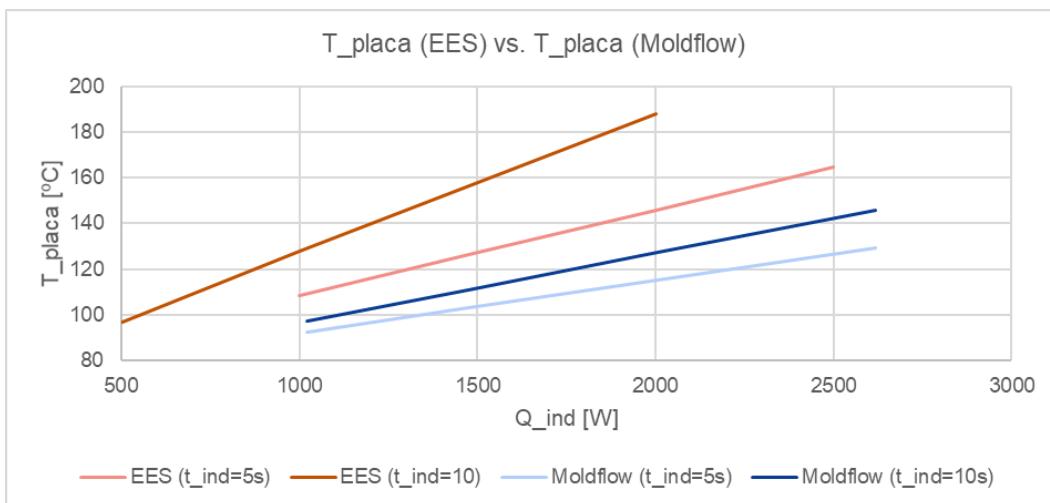


Figura 37. Temperatura de placa en función de la potencia calorífica y el programa empleado.

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El calentamiento inductivo emplea un tiempo reducido (en torno a 5-10 segundos) para elevar la temperatura de una superficie de la cavidad del molde desde los 80°C (temperaturas habituales en estos procesos) hasta temperaturas cercanas a los 150°C.

El incremento de la frecuencia de la corriente que circula por la bobina supone un aumento proporcional en la generación de calor, reduciendo el coste que supone elevar la intensidad de dicha corriente. Sin embargo, el incremento en la intensidad aplicada repercute de una forma cuadrática en el calor generado.

La inducción posibilita el calentamiento selectivo de superficies concretas de la cavidad del molde, pero es fácil generar una asimetría térmica que pueda afectar a la pieza final, por ejemplo, aumentando la contracción y la deformación final de unas zonas de la pieza respecto a otras.

La disminución de la viscosidad en las capas del flujo en contacto con la pared del molde que provoca este aumento de la temperatura de la cavidad facilita la entrada de material en él, por lo que la presión de llenado se ve reducida.

Esta tecnología exige trabajar con valores de intensidad elevados (centenares de amperios) para conseguir temperaturas relativamente altas, lo que supone un coste energético elevado.

El incremento del tiempo de ciclo es inevitable con cualquier tecnología de calentamiento, incluida la de inducción, ya que se añade una fase extra al proceso y se alarga la de refrigeración. Por ello es importante recalcar que su uso está condicionado a determinadas necesidades del producto o proceso específicos, como los explicados en el apartado 2.1.2 de este trabajo.

Por último, hay que recordar que el tipo de calentamiento inductivo con inserto es el método más eficiente de entre los existentes (2.3.1), pero específico para cada pieza y con la complejidad añadida al diseño y fabricación del molde que esto supone, elevando los costes fijos de utilaje.

Este trabajo da pie a su continuación, quedando pendiente la puesta en práctica de este u otro sistema similar y su prueba en laboratorio, haciendo uso del taller disponible en el departamento. También sería interesante indagar sobre aspectos tales como la implementación de una carcasa paramagnética, piezas ferríticas o la variación de la geometría del sistema.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. **Kazmer, D.** *Injection Mold Design Engineering*. s.l. : Hanser, 2007.
2. al., **J. Castany et.** *Apuntes Máster Propio en Diseño y Desarrollo de Componentes de Plástico Inyectado*. Universidad de Zaragoza : s.n., 2013.
3. *Injection moulding of plastic parts with laser textured surfaces with optical applications*. **J. Pina-Estany, A.A. García-Granada, E. Corull-Massana.** 79, Barcelona, Spain : ELSEVIER, March 2018, Optical Materials, pp. 372-380.
4. *El diseño de moldes precisa una concepción integral*. **D. Mercado, F. Serraller, J. Aisa, I. Clavería.** 651, Noviembre 2010, Revista de Plásticos Modernos, Vol. 100.
5. *Rapid heating injection moulding: An experimental surface temperature study*. **R. Sánchez, A. Martínez, D. Mercado, A. Carbonel, J. Aisa.** 93, Zaragoza : ELSEVIER, July 2020, Polymer Testing.
6. *Induction Heating Process Design Using COMSOL® Multiphysics Software*. **Didi Istardi, Andy Triwinarko.** 2, August 2011, TELKOMNIKA, Vol. 9, pp. 327-334.
7. *CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA:DISEÑO y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO*. **ALFREDOACEVEDO PICON, JAIME BARRERO PÉREZ, JULIO AUGUSTO GÉLVEZ FIGUEREDO.** 1, Santander : Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Julio 2007, UIS Ingenierías, Vol. 6, pp. 69-76.
8. *Enhancement of induction heating efficiency on injection mold surface using a novel magnetic shielding method*. **Shih-Chih Nian, Ming-Shyan Huang, Tzung-Hung Tsai.** Taiwan : ELSEVIER, 5 December 2013, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 50, pp. 52-60.
9. *Design of induction heating module for uniform cavity surface heating*. **Yu-Ting Sung, Yu-Ning Lin, Sheng-Jye Hwang, Huei-Huang Lee, Durn-Yuan Huang.** Taiwan : s.n.
10. *Simulation study of induction heating of multi-metallic injection moulds*. **Mrozek, K.** 2, Poznan. Poland : s.n., January 2018, Vol. 17, pp. 220-230.
11. *Rapid Mold Surface Heating/Cooling Using Electromagnetic*. **S. C. Chen, H. S. Peng, J. A. Chang and W. R. Jong.** Taipe, Taiwan : s.n., 2005. International Conference on Mechatronics.
12. *Three-dimensional numerical modeling of an induction*. **Patrick Guerrier, Guido Tosello, Kaspar Kirstein Nielsen, Jesper Henri Hattel.** Denmark : s.n., 21 October 2015, Int J Adv Manuf Technol, Vol. 85, pp. 643-660.
13. *Modeling a working coil coupled with magnetic flux concentrators for barrel induction heating in an injection molding machine*. **Huy-Tien Bui, Sheng-Jye Hwang.** Taiwan : ELSEVIER, 22 February 2015, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 86, pp. 16-30.

14. *Application of Magnetic Concentrator for Improvement in Rapid Temperature Cycling Technology.* **Krzysztof Mrozek, Paweł Muszynski and Przemysław Poszwa.** 13, Poznan, Poland : MPDI, 28 December 2021, Polymers, Vol. 91.

15. **Raalte, Jose Feigenblum and Hanno Van.** MoldMaking Technology. *Simulation of both the induction heating and injection molding processes optimizes cycle time and final part results.* [Online] May 2015. moldmakingtechnology.com.

16. *Comparison of two setups for induction heating in injection molding.* **Stefano Menotti, Hans Nørgaard Hansen, Giuliano Bissacco, Patrick Guerrier, Peter Torben Tang.** 81, London : Springer, 30 May 2015, Int. J. Adv Manuf Technol, pp. 1863-1870.

17. *Key parameters and optimal design of a single-layered induction coil for external rapid mold surface heating.* **Shih-Chih Nian, Sheng-Wei Tsai, Ming-Shyan Huang, Rong-Cheng Huang, Chih-Hau Chen.** 57, Taiwan : ELSEVIER, 18 July 2014, International Communications in Heat and Mass Transfer, pp. 109-117.

18. **José Mª Marín, C. Monné y J. Uche.** *Transferencia de calor.* Universidad de Zaragoza : s.n., 2007.