

SIMULACIÓN DE UN MOLDE DE RESPUESTA TÉRMICA RÁPIDA CON SISTEMA DE ENFRIAMIENTO CONFORMADO MEDIANTE FEM

SIMULATION OF A RAPID THERMAL RESPONSE MOLD WITH CONFORMED COOLING SYSTEM BY FEM

Hugo Ulises Mandujano Rodríguez

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México
m1803090@itcelaya.edu.mx

Francisco Javier Cervantes Vallejo

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México
francisco.cervantes@itcelaya.edu.mx

Karla Anhel Camarillo Gómez

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México
karla.camarillo@itcelaya.edu.mx

José Guadalupe Zavala Villalpando

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México
jg.zavala@itcelaya.edu.mx

Humberto Soto López

Tecnológico Nacional de México en Celaya, México
humberto.soto@itcelaya.edu.mx

Recepción: 16/septiembre/2019

Aceptación: 30/octubre/2019

Resumen

En el presente estudio se analiza un molde de respuesta térmica rápida mediante el estudio de campos acoplados, sabiendo que el tiempo de ciclo depende en gran medida del tiempo de enfriamiento, se diseñan y evalúan canales conformados rectangulares utilizando análisis de elementos finitos y análisis térmico de transferencia de calor. Se propone un diseño de sistema de enfriamiento de canales conformados y se analiza térmicamente en dos pasos de carga. Por último, se realiza la evaluación estructural obteniendo los esfuerzos de Von Mises mediante campos acoplados y se observó la reducción del tiempo de calentamiento, así como la reducción del porcentaje de tiempo de enfriamiento, manteniendo esfuerzos debajo de 500 MPa, prolongando la vida útil de insertos del molde.

Palabras Clave: Análisis Térmico, Molde de Respuesta Térmica Rápida (MRTR), Moldeo por Inyección, Tiempo ciclo.

Abstract

In this paper, a rapid thermal response mold is analyzed by studying coupled fields, knowing that the time depends largely on the cooling time, rectangular conformal channels are designed and evaluated through finite element analysis and thermal transfer heat analysis. A cooling system design of conformal channels is proposed and thermally analyzed in two load steps. Finally, the structural evaluation is carried out, obtaining the Von Mises Stress through coupled fields and it was observed the heating time is reduced, as well as the reduction of cooling time percent of the total cycle time keeping below 500 MPa that the useful life of the mold inserts.

Keywords: *Thermal Analysis, Rapid Thermal Respond Mold (MRTR), Injection Mold, Cycle time.*

1. Introducción

El moldeo por inyección es un proceso de fabricación ampliamente utilizado y aceptado para la producción de piezas de plástico. La secuencia de etapas en el proceso de moldeo por inyección en moldes de respuesta térmica rápida (MRTR) comienza con un calentamiento del molde, seguido de la inyección, empaquetamiento, enfriamiento y finalmente con el proceso de eyección [Lin, 2002]. Durante la etapa del calentamiento las cavidades del molde deben tener una temperatura estable, generalmente la temperatura de cristalización (T_c) en los polímeros semicristalinos [Wang, Zhao, Guan, Wu y Hui, 2015], una vez alcanzada esta temperatura, el molde se cierra para llenar las cavidades con polímero fundido (inyección). El polímero se continúa inyectando hasta llenar todo el espacio en las cavidades, la etapa de empaquetamiento concluye hasta que la compuerta en la cavidad se enfría. Inmediatamente comienza a fluir el refrigerante por los canales de enfriamiento, terminando la solidificación del polímero. Una vez que los plásticos fundidos son lo suficientemente rígidos en una etapa de enfriamiento, el molde se abre y la pieza moldeada se expulsa de las cavidades del molde. Los moldes se

cierran para el ciclo de moldeo posterior [Li, 2007]. El control de la temperatura en el proceso de inyección en los MRTR [Wang, Zhao, Guan, Wu y Hui, 2015] es importante para la obtención de una pieza de calidad tanto en apariencia como en resistencia estructural. Se sabe que el enfriamiento es la etapa que implica del 60% al 80% del tiempo de ciclo para cada toma de las piezas moldeadas en un proceso de moldeo por inyección [Saifullah y Masood, 2007]. Un buen diseño de un sistema de canales de refrigeración tiene la capacidad de mejorar la productividad sin comprometer la calidad. Los canales de refrigeración eficientes dan como resultado una distribución térmica uniforme, ya que una distribución térmica no uniforme causará un mayor tiempo de ciclo, contracción diferencial y defectos de alabeo en las piezas moldeadas con la proximidad entre los canales de refrigeración y la superficie del molde. Cheng-Long y Han-Xiong [2014] realizaron simulaciones y experimentaciones para evaluar la repuesta de la temperatura de un MRTR y una variante de un MRTR con un inserto de la cavidad, ambos para policarbonato y policarbonato reforzado con fibra de vidrio al 20%, observaron que la máxima diferencia de temperaturas en la superficie de la cavidad fue de 10 °C, y un mejor acabado superficial de ambos polímeros inyectados en un MRTR en comparación con un molde de inyección convencional. Referente al análisis de esfuerzos, compararon los esfuerzos máximos del MRTR con y sin insertos, informando una reducción del 75% del esfuerzo utilizando los insertos de la cavidad. Cervantes et al. [2018] realizaron una optimización para la etapa de calentamiento en un MRTR, con una temperatura inicial del molde de 30 °C, equivalente a la temperatura del aire ambiente, en una sola placa de acero; donde se posicionaron las resistencias y la cavidad; con una condición de convección del aire en la parte superior e inferior de la misma. Llegando a la conclusión de una separación entre resistencias de 18.03 mm, una separación entre resistencia y superficie de la cavidad de 8 mm y un flujo de calor de 2.82 W/m². De acuerdo a Lucchetta et al. [2012] propone una temperatura de 60 °C, equivalente a la temperatura de trabajo de un proceso de producción antes de cada fase de llenado para reducir el tiempo de calentamiento, sin comprometer la calidad de la pieza. Utilizando los valores obtenidos de la optimización del trabajo anterior para la etapa de calentamiento, se realizó una

simulación térmico-estructural con un precalentamiento de 60 °C de un MRTR con dos placas, una de acero, donde están las resistencias eléctricas del sistema de calentamiento y otra de aluminio para el sistema de enfriamiento, esta última que reemplazó los canales de enfriamiento convencionales con canales de sección transversal rectangular, ubicadas detrás de la superficie de la cavidad del molde. El propósito de esta investigación es realizar una simulación térmica-estructural con la finalidad de analizar los tiempos de calentamiento y enfriamiento en el MRTR con un diseño de canales rectangulares, evaluar cómo afectan los esfuerzos térmicos y las presiones de inyección en el diseño propuesto, con la finalidad de validar la vida útil del molde.

2. Método

Molde de respuesta térmica rápida (MRTR)

La diferencia principal entre el moldeo por inyección convencional (MIC) de colada fría y el moldeo con un MRTR es la estrategia de control de la temperatura del molde sobre la superficie de la cavidad con la misma tipología de canales de inyección de un MIC. En el MRTR, la superficie de la cavidad del molde debe calentarse y enfriarse rápidamente para lograr un moldeo por inyección a alta temperatura sin aumentar demasiado el tiempo ciclo de moldeo.

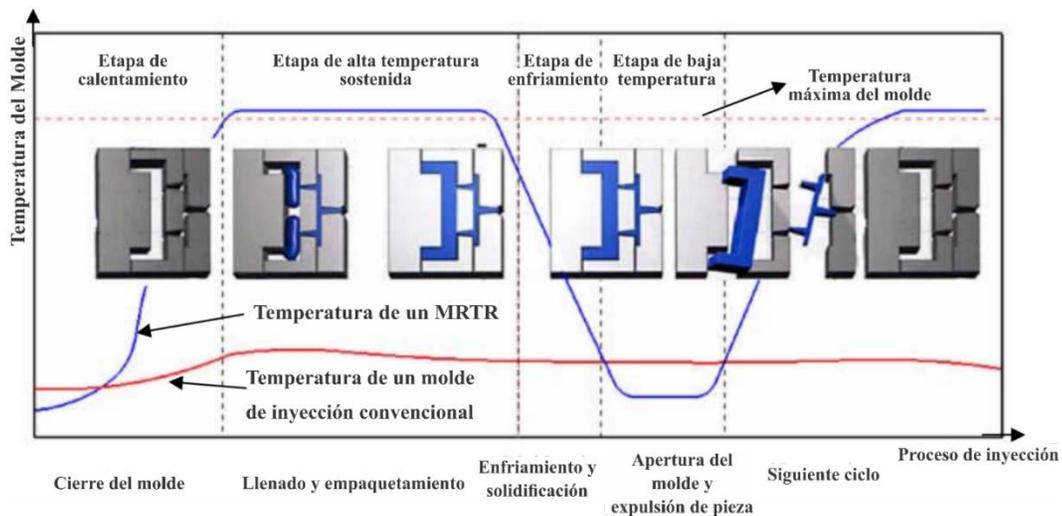
Principio del proceso

Las técnicas del calentamiento y refrigeración del molde son los factores clave para la aplicación exitosa del MRTR. En esta sección, se describirá principalmente el proceso de MRTR utilizando calentamiento por resistencias eléctricas y enfriamiento por refrigerante. La figura 1 muestra de manera esquemática el ciclo de inyección en un MRTR.

Transferencia de calor del MRTR con el calentamiento eléctrico

Un control dinámico de la temperatura del molde se implementa calentando y enfriando el molde en cada ciclo del proceso, por lo que la transferencia de calor es muy diferente de la del proceso MIC. A continuación, se examina la transferencia

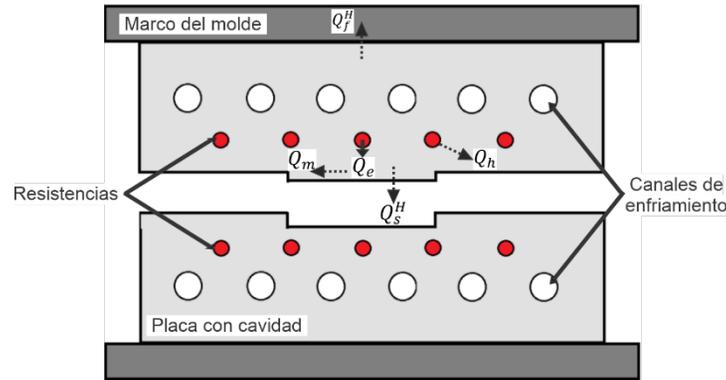
de calor en las etapas de calentamiento y enfriamiento del MRTR con calentamiento eléctrico y enfriamiento con refrigerante. De este modo, se pueden determinar factores clave que tienen efectos significativos en la eficiencia de respuesta térmica del molde, proporcionando así una guía útil para diseñar MRTR con calentamiento eléctrico.



Fuente: Cheng-Long y Han-Xiong, 2009.

Figura 1 Esquema del tiempo ciclo de inyección para un MRTR [13].

De acuerdo a Wang et al. [2015], al implementar la T_c en la superficie de la cavidad del molde en el ciclo de moldeo del polímero semicristalino PP, la pieza final se contiene con un esfuerzo residual térmico menor, una mayor cristalinidad y disminución de alabeo y contracción volumétrica. Dado que el PP y el PEAD pertenecen a la misma familia de los semicristalinos, presentan el mismo perfil térmico, con diferentes temperaturas de cristalización. Por lo tanto, en la etapa de calentamiento del molde, este debe ser calentado hasta la temperatura preestablecida utilizando resistencias eléctricas, generalmente la temperatura de cristalización del polímero. El calor generado se transfiere principalmente al acero del molde a través de la conducción del calor, solamente una pequeña cantidad de calor se acumula en las resistencias eléctricas y en el marco del molde, y otra se disipa al ambiente. La figura 2 ilustra esquemáticamente la transferencia de calor en la etapa de calentamiento del MRTR con calentamiento eléctrico.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2 Esquema de transferencia de calor en la etapa de calentamiento del MRTR con calentamiento eléctrico.

Basándose en la ley de conservación de la energía, la ecuación que describe el equilibrio de transferencia de calor del molde durante la etapa de calentamiento, ecuación 1.

$$Q_e = Q_m + Q_h + Q_s^H + Q_f^H \quad (1)$$

Donde Q_e es el calor generado por las resistencias eléctricas; Q_m es el calor transferido al acero del molde; Q_h indica el calor acumulado en las resistencias eléctricas; Q_s^H y Q_f^H representan el calor disipado al ambiente y al marco del molde en la etapa de calentamiento del molde, respectivamente.

Los Q_h , Q_s^H y Q_f^H son bastante pequeños en comparación con él Q_m , por lo tanto, tienen efectos despreciables sobre el campo de temperatura del molde durante el calentamiento. Así la ecuación 1 se puede escribir mediante ecuación 2.

$$Q_e \approx Q_m \quad (2)$$

Donde Q_e y Q_m se determinan mediante ecuaciones 3 y 4.

$$Q_e = P_h t_{rh} \quad (3)$$

$$Q_m = C_m \rho_m V_m (\bar{T}_m - \bar{T}_m^0) \quad (4)$$

Donde P_h es la potencia total de las resistencias eléctricas; t_{rh} es el tiempo de calentamiento requerido; \bar{T}_m^0 es la temperatura inicial del molde; \bar{T}_m es la temperatura media del molde en el tiempo t_{rh} ; C_m , ρ_m y V_m representan el calor específico, densidad y volumen del molde, respectivamente.

Sustituyendo las ecuaciones 3 y 4 en ecuación 2, se obtiene ecuación 5. Donde t_{rh} es el tiempo de calentamiento requerido.

$$t_{rh} \approx \frac{C_m \rho_m V_m (\bar{T}_m - \bar{T}_m^0)}{P_h} \quad (5)$$

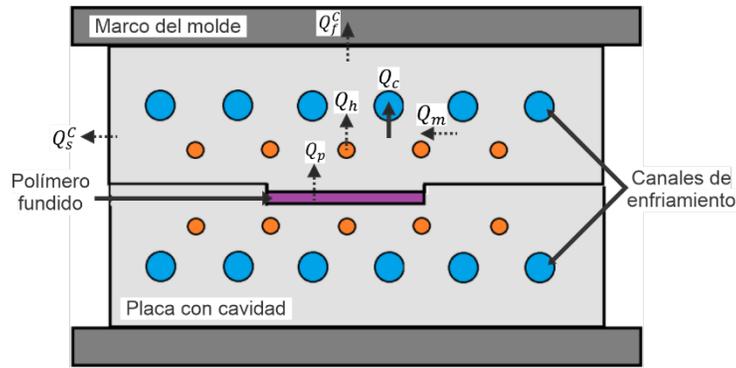
Cuando se moldea una pieza de plástico específica usando un MRTR, las \bar{T}_m y \bar{T}_m^0 están generalmente predeterminadas y por lo tanto, pueden considerarse constantes. El t_{rh} depende principalmente de los parámetros C_m , ρ_m , V_m y P_h . La eficiencia de calentamiento del molde se puede mejorar, es decir, el t_{rh} en la ecuación 5 se puede minimizar), reduciendo los valores de C_m , ρ_m , V_m y/o aumentando el valor de P_h .

Se puede observar que el producto del C_m y la ρ_m para la mayoría de los materiales del molde tiene poca diferencia, por lo que la forma de seleccionar el material del molde con menor C_m y ρ_m para mejorar la eficiencia de calentamiento del molde en realidad no es muy útil [Li, Zhao y Guan, 2009]. Por lo tanto, bajo la condición de resistencia y rigidez estructural del molde adecuadas, el volumen del molde calentado debe reducirse tanto como sea posible para reducir la capacidad calorífica del molde. Además, aumentar el número y o la densidad de potencia de las resistencias eléctricas adecuadamente, puede mejorar aún más la eficiencia de calentamiento del molde.

En la etapa de enfriamiento del molde, se bombea refrigerante a los canales de enfriamiento del molde para enfriar rápidamente el molde y la pieza moldeada. El calor acumulado en el molde de acero y las resistencias eléctricas en la etapa de calentamiento, así como el calor liberado de la masa fundida de polímero, durante el enfriamiento son eliminados por el refrigerante en circulación; además, una pequeña cantidad de calor disipa al ambiente y al marco del molde. La figura 3 muestra esquemáticamente la transferencia de calor en la etapa de enfriamiento del MRTR.

La ecuación de equilibrio de transferencia de calor del molde durante su enfriamiento, se expresa con ecuación 6.

$$Q_p + Q_m + Q_h = Q_c + Q_s^C + Q_f^C \quad (6)$$



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3 Esquema de transferencia de calor en la etapa de enfriamiento del MRTR con calentamiento eléctrico.

En ecuación 6 Q_p es el calor liberado del polímero fundido; Q_c representa el calor removido por el refrigerante; Q_s^C y Q_f^C representan el calor disipado al medio ambiente y al marco del molde en la etapa de enfriamiento del molde, respectivamente. El Q_p y el Q_c se determinan por ecuaciones 7 y 8.

$$Q_p = C_p \rho_p V_p (\bar{T}_p^0 - \bar{T}_p) \quad (7)$$

$$Q_c = h_c A_c \int_0^{t_{rc}} [\bar{T}_{cs}(t) - T_c] dt \quad (8)$$

Donde C_p , ρ_p y V_p representan el calor específico, la densidad y el volumen de la masa fundida de polímero, respectivamente; \bar{T}_p^0 es la temperatura inicial del polímero fundido; \bar{T}_p es la temperatura de inyección de la pieza; h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el refrigerante y los canales de enfriamiento; A_c es la superficie interna de los canales de refrigeración; t_{rc} representa el tiempo de enfriamiento requerido; $\bar{T}_{cs}(t)$ indica la temperatura media de la pared de los canales de refrigeración en el instante t ; y T_c es la temperatura del refrigerante. Al sustituir las ecuaciones 4, 7 y 8 en ecuación 6, se obtiene ecuación 9.

$$C_p \rho_p V_p (\bar{T}_p^0 - \bar{T}_p) + C_m \rho_m V_m (\bar{T}_m - \bar{T}_m^0) + Q_h = h_c A_c \int_0^{t_{rc}} [\bar{T}_{cs}(t) - T_c] dt + Q_s^C + Q_f^C \quad (9)$$

Los efectos de Q_h , Q_s^C y Q_f^C en el campo de temperatura del molde durante el enfriamiento pueden ser despreciables, por lo que se simplifica a ecuación 10.

$$C_p \rho_p V_p (\bar{T}_p^0 - \bar{T}_p) + C_m \rho_m V_m (\bar{T}_m - \bar{T}_m^0) \approx h_c A_c \int_0^{t_{rc}} [\bar{T}_{cs}(t) - T_c] dt \quad (10)$$

Mediante el uso del teorema del valor medio de las integrales, la ecuación 10 se reduce a ecuación 11.

$$t_{rc} = \frac{C_p \rho_p V_p (\bar{T}_p^0 - \bar{T}_p) + C_m \rho_m V_m (\bar{T}_m - \bar{T}_m^0)}{h_c A_c [\bar{T}_{cs}(\xi) - T_c]} \quad 0 \leq \xi \leq t_{rc} \quad (11)$$

En el moldeo de una parte de plástico específica, se predeterminan el material polimérico correspondiente, el volumen de pieza y los parámetros de procesamiento. Es decir, el C_p , ρ_p , V_p , \bar{T}_p^0 , \bar{T}_p , \bar{T}_m^0 , \bar{T}_m en la ecuación 11 pueden considerarse constantes. Por lo tanto, el t_{rc} depende principalmente de los parámetros C_m , ρ_m , V_m , h_c , A_c y T_c .

Para mejorar la eficiencia de enfriamiento del molde (es decir, acortar el valor de t_{rc} en la ecuación 11, se necesita disminuir los valores de C_m , ρ_m , V_m y T_c , y/o aumentar los valores de h_c y A_c . La reducción del volumen del molde para mejorar la eficiencia de su calentamiento, también puede mejorar la eficiencia de su enfriamiento. Además, la eficiencia de enfriamiento del molde puede mejorarse aumentando el caudal de refrigerante, bajando la temperatura del refrigerante y aumentando el área de enfriamiento del molde.

Análisis térmico estructural

El análisis térmico transitorio y el análisis térmico-estructural se implementaron con base a un software comercial de FEM para analizar la respuesta térmica y la resistencia estructural del MRTR. Para MRTR, el sistema de enfriamiento conformado por canales rectangulares se puede utilizar para un enfriamiento uniforme y eficiente, especialmente para partes de formas complejas. La figura 4a muestra la vista de corte medio de un MRTR y la figura 4b muestra la sección de interés a simular de la cavidad de la probeta de ensayo de tensión, bajo la norma ASTM D3641-02 [18]. La figura 5a muestra la geometría de interés del corte medio del MRTR, se observa que es simétrica el área de estudio del molde, la figura 5b muestra la geometría simplificada de la simulación térmico-estructural para un

molde con dos probetas de inyección, el área de interés es la parte central de la probeta y se puede modelar de la forma presentada.

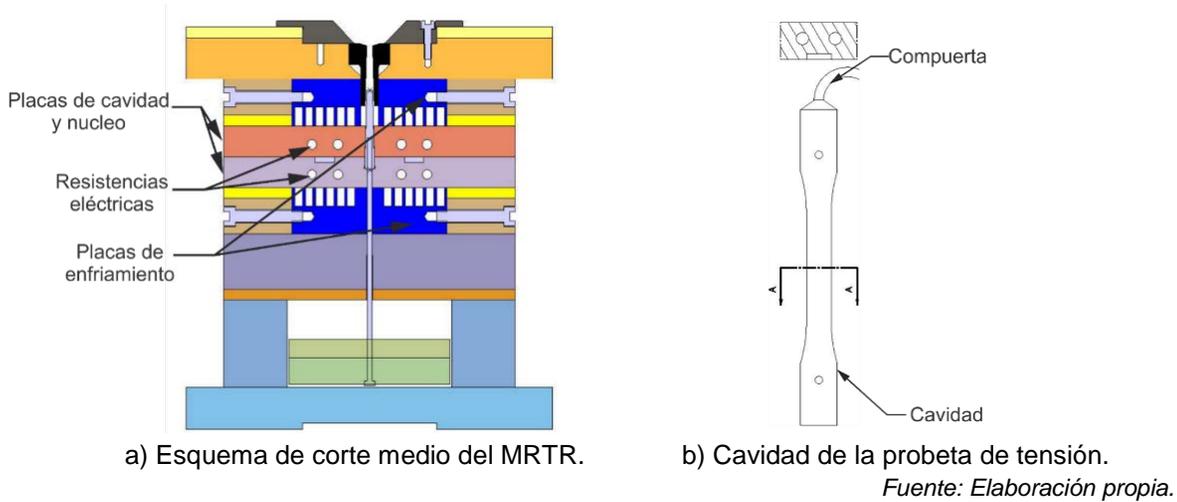


Figura 4 Esquema del MRTR para una probeta de tensión.

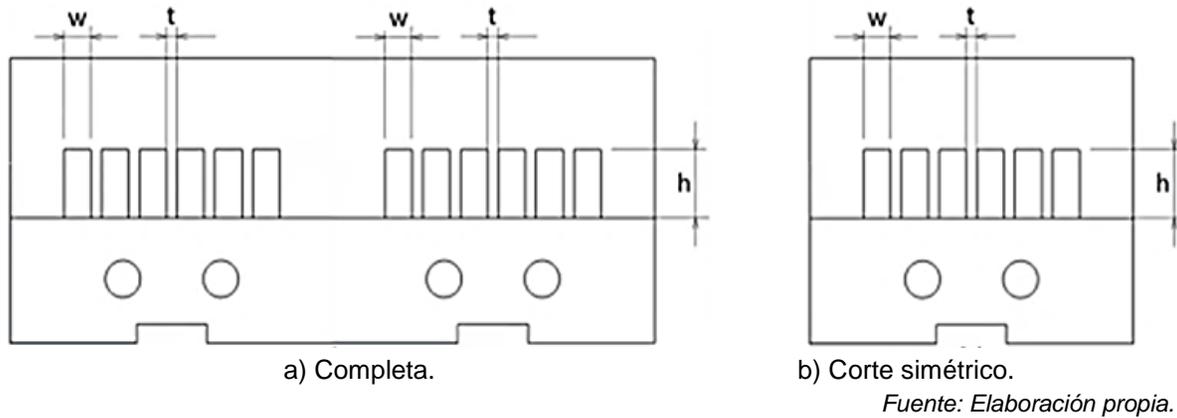


Figura 5 Geometría para simulación (inserto de la cavidad, resistencias eléctricas y sistema de enfriamiento)

En esta ilustración, h representa la altura de 12 mm, w ancho de canal de enfriamiento de 5 mm y t el espesor que divide los canales de enfriamiento de 2 mm. El material de la cavidad del molde es un acero pre-endurecido (AISI P20), para el sistema de enfriamiento es aluminio 6061, las resistencias eléctricas están recubiertas con un acero 304L, el aislamiento que separa a las partes de mayor espesor entre la cavidad y el sistema de enfriamiento es un polímero, las propiedades físicas se enumeran en la tabla 1.

Tabla 1 Propiedades físicas del inserto del molde.

Material	Densidad (kg/m³)	Calor específico (kj/kg °C)	Conductividad térmica (W/m °C)	Módulo de elasticidad (GPa)	Coefficiente de Poisson
AISI P-20	7850	460	33.4	207	0.285
Aluminio	2700	900	210	69	0.330
Aislamiento	2190	1300	0.250	31	0.460
Resistencias	8000	500	16.2	200	0.280

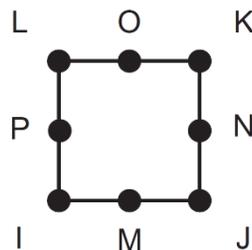
Fuente: Elaboración propia.

Para realizar la simulación de campos acoplados térmico-estructural se utilizó el elemento PLANE 77 para el análisis térmico, posteriormente se implementó el cambio de elemento a un PLANE 183 para el análisis estructural, la tabla 2 muestra las características de cada tipo de elemento utilizado. La forma de los ambos elementos se puede observar en la figura 6.

Tabla 2 Características de los elementos utilizados en la simulación.

Elemento	Orden	Forma	Nodos	Física	GDL
PLANE77	2D	Cuadrilátero	8	Térmica	TEMP
PLANE183	2D	Cuadrilátero	8	Estructural	UX,UY

Fuente: Elaboración propia.



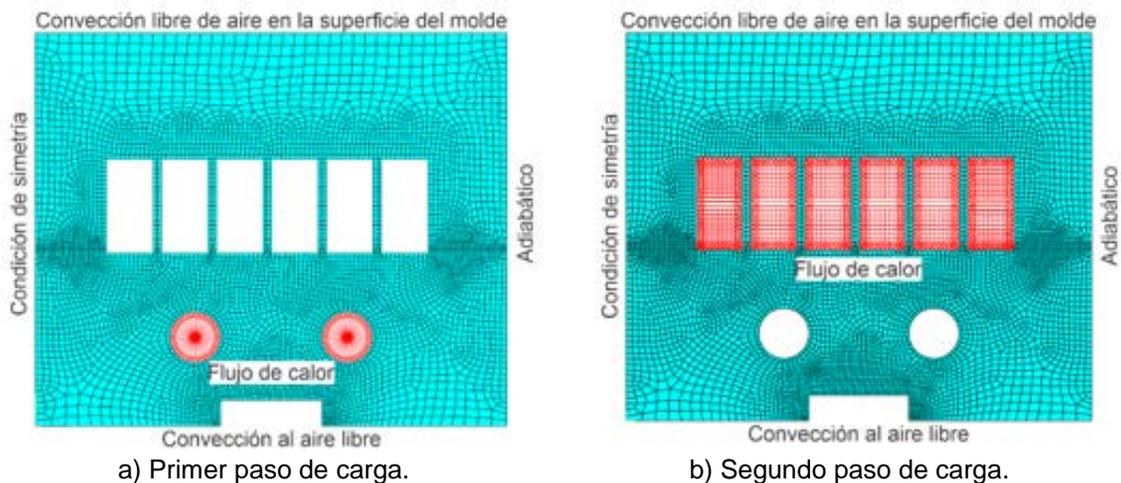
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6 Forma de elemento PLANE77 y PLANE 183 de 8 nodos.

Análisis de respuesta térmica

El modelo de malla y condiciones de frontera en el análisis transitorio de transferencia de calor se muestran en la figura 7. Se considera la temperatura inicial del molde de 60 °C [Luchieta et al., 2012], equivalente a la temperatura de trabajo de un proceso de producción. La condición de convección de aire libre se cargó en

la superficie externa del molde y el coeficiente de transferencia de calor de convección correspondiente fue de 20 W/m^2 [Au K. y Yu K., 2006]. Para la parte lateral izquierda se implementó una condición de simetría que permite reducir el modelo de malla, y del lateral derecho se implementó una condición adiabática, debido a la capa de aislamiento. Para el primer paso de carga el medio para calentar el inserto del molde son las resistencias eléctricas que producen un flujo de calor de $2.93 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ como se muestra en la figura 7a, en el modelo se incluye la capa delgada de aislamiento de 2 mm de espesor que restringe el flujo de calor entre el inserto de la cavidad y el sistema de enfriamiento. Para el segundo paso de carga se apagan las resistencias de calentamiento, y el medio para refrigerar el inserto es un intercambio de calor entre el fluido y las paredes internas del inserto de aluminio (canales de enfriamiento) y la superficie posterior del inserto de la cavidad por transferencia de calor de convección forzada, con un coeficiente de aproximadamente $3600 \text{ W/(m}^2\text{C)}$ [Cheng-Long y Han-Xiong, 2015], como se muestra en la figura 7b.



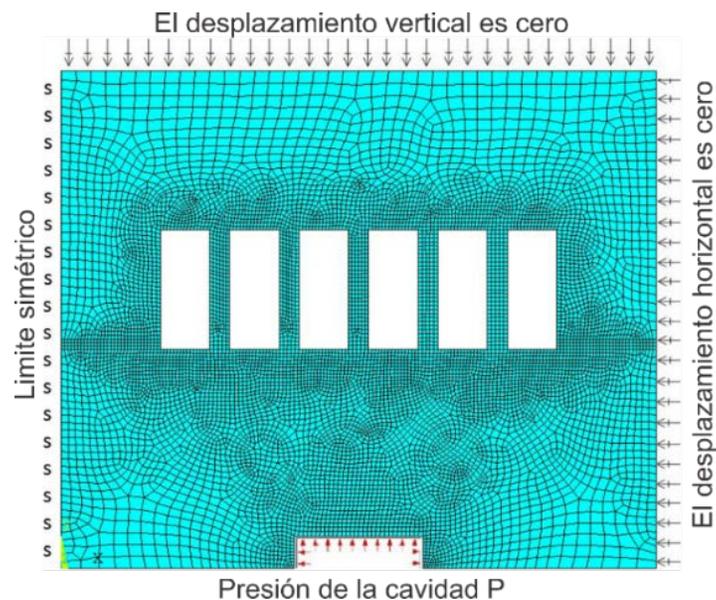
Fuente: Elaboración propia.

Figura 7 Malla y condiciones de frontera, análisis transitorio de transferencia de calor.

Análisis térmico estructural

En las fases de llenado y empaque, la superficie de la cavidad del molde sufrirá una presión de cavidad grande. Por lo tanto, el molde debe ser lo suficientemente fuerte para reducir la deformación de la superficie de la cavidad y mejorar su

durabilidad. La posición de las resistencias eléctricas no sólo tiene un gran efecto sobre la eficiencia de respuesta térmica del molde, sino que también afecta significativamente su resistencia estructural. Por ejemplo, situar las resistencias eléctricas mucho más cerca de la superficie del molde puede aumentar la eficiencia de calentamiento, pero disminuir la resistencia estructural del molde. Como resultado, es necesario estudiar el efecto de la posición de las resistencias eléctricas sobre la resistencia estructural del molde, así mismo en el sistema de refrigeración si el canal es muy grande puede provocar una deflexión significativa en el inserto de la cavidad, lo que provocaría que las piezas finales inyectadas no cumplan con los parámetros de calidad establecidos, otra consideración en este análisis es la separación entre los canales de enfriamiento, al ser pequeña la separación (t) ayudan a un mayor flujo de calor, pero esto podría provocar una cedencia ante las grandes presiones de inyección. La figura 8, muestra el modelo de malla y las condiciones de frontera para el análisis de resistencia estructural, en donde P representa la presión de inyección que es de 80 MPa, de acuerdo a Cervantes et al. [2018]. En el límite izquierdo del modelo, la condición de simetría es implementada en el límite derecho, el desplazamiento en la dirección normal es cero.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8 Malla y condiciones de frontera, análisis térmico-estructural.

Dado que los insertos de molde son soportados por la placa de retención para la fijación, el desplazamiento en el borde inferior del modelo es también cero en la dirección vertical.

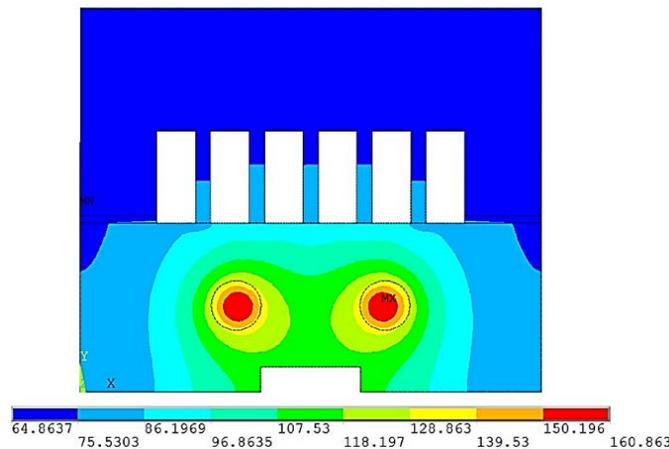
3. Resultados

La productividad es un indicador importante en la industria del moldeo por inyección, se desea que el tiempo ciclo sea lo más corto posible. Haciendo uso de los parámetros de una inyectora de plástico modelo Ergotech viva 50-270, marca Demag, la cual tiene una fuerza de cierre de 500 kN y una presión de inyección de 190 MPa, superiores a la fuerza de cierre y presión de inyección requeridas para la pieza de estudio. Por lo tanto, en este trabajo se investigó mediante simulación por elementos finitos un MRTR implementando un sistema de enfriamiento de canales conformados, a fin de conocer el tiempo de calentamiento y enfriamiento que puede generar. Al mismo tiempo, la variación de la temperatura de la superficie del molde de acuerdo a la norma ASTM-D 6341-98 y D 4703-03 [20,21], debe ser inferior a 5 °C para garantizar la calidad de la superficie de la pieza. Los esfuerzos máximos de Von Mises no deben ser superior a 500 MPa, para la vida útil del molde superior a 1×10^7 ciclos [ASTM D4703-02, 2002]. Se realizó la simulación térmica y el análisis térmico-estructural para evaluar los tiempos de calentamiento y enfriamiento. Se utilizó un tiempo de calentamiento requerido para que toda la superficie del molde calentara a la temperatura designada. El polímero inyectado es un PEAD-65050 [Cengel y Boles, 2002], [Dorigato et al., 2012] suministrado por la empresa PEMEX, la cual presenta una T_c de 116 °C.

La figura 9 muestra la distribución de temperatura, el primer paso de carga en la etapa de calentamiento, se observa que la temperatura máxima se presenta en las resistencias eléctricas y la temperatura mínima en la placa del sistema de enfriamiento, el tiempo que tarda en calentar la superficie de la cavidad a la T_c del polímero es 15.3 s.

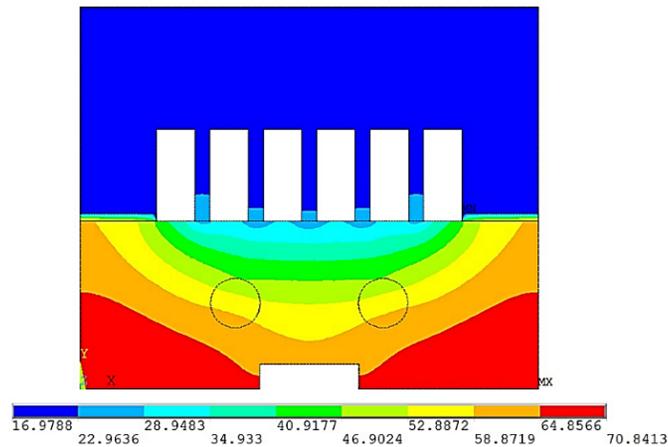
En la etapa de enfriamiento del molde, (segundo paso de carga térmico) dentro de las condiciones de frontera se canceló el flujo de calor provocado por las resistencias eléctricas, el agua con una temperatura inferior (aproximadamente 15

°C) se bombea a través de los canales de enfriamiento, para disminuir la temperatura del molde hasta la temperatura de expulsión de la pieza inyectada. La figura 10 muestra la distribución de temperatura en la etapa de enfriamiento, se observa la temperatura máxima en los extremos del inserto de la cavidad del molde, y en la superficie de la cavidad, la temperatura de expulsión es de 60 °C, mientras que la temperatura mínima está en el sistema de enfriamiento.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 9 Distribución de temperaturas en sistemas propuestos, etapa de calentamiento.



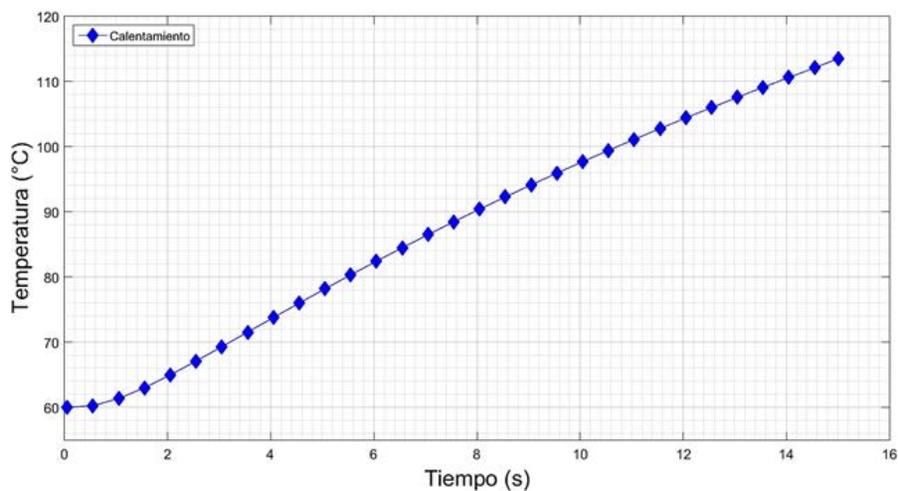
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10 Distribución de temperaturas en sistemas propuestos, etapa de enfriamiento.

Los valores obtenidos de la simulación fueron un tiempo de calentamiento de 15.3 s, un tiempo de enfriamiento de 27.17 s, dando como resultado un tiempo total de

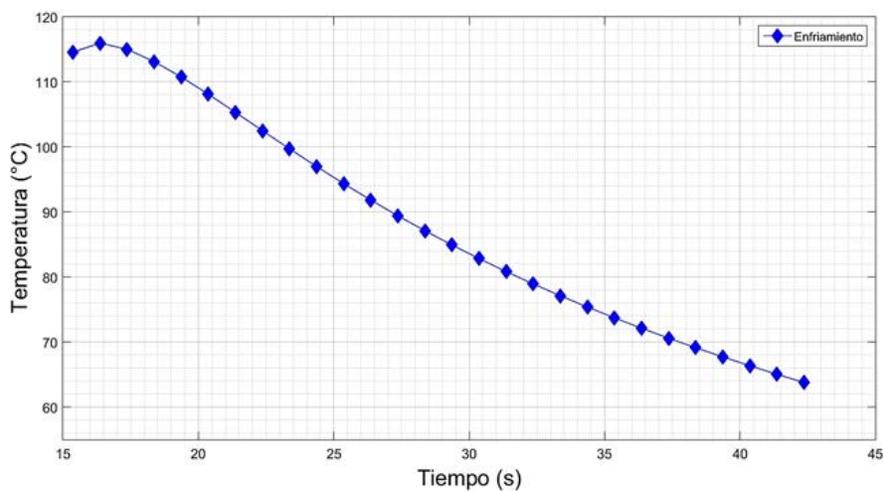
47.27 s, y un esfuerzo máximo de Von Mises de 446 MPa, manteniéndose abajo del límite de 500 MPa, asegurando una vida útil en los insertos del molde superior a 1×10^7 ciclos [ASTM D4703-02, 2002].

Las figuras 11 y 12 muestran el perfil de la temperatura en la posición central de cavidad durante las fases de calentamiento y enfriamiento respectivamente, del MRTR de ciclo único. Durante la etapa de calentamiento se observa que la temperatura aumenta con el tiempo de forma casi lineal y la velocidad de calentamiento promedio es de aproximadamente $4.5 \text{ }^\circ\text{C/s}$.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11 Respuesta de la temperatura de la superficie de la cavidad en la posición central durante el calentamiento del MRTR de un solo ciclo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12 Respuesta de la temperatura de la superficie de la cavidad en la posición central durante el enfriamiento del MRTR de un solo ciclo.

Cuando la temperatura en la superficie de la cavidad se eleva al objetivo, las resistencias eléctricas se apagan para detener el calentamiento y el fluido se bombea a la cavidad de enfriamiento para enfriar rápidamente el molde. Debido a la inercia de la temperatura, todavía se eleva en aproximadamente 2 °C en los siguientes 2 s.

Durante el enfriamiento del molde, la temperatura de la cavidad se baja rápidamente en la etapa de enfriamiento inicial debido a la diferencia de temperatura entre el fluido y la inserción de la cavidad. La diferencia de temperatura disminuye gradualmente y, en consecuencia, la velocidad de enfriamiento se reduce con el tiempo de forma casi lineal a una velocidad aproximada de 1.5 °C/s.

Sabiendo que la variación de la temperatura en la superficie del molde de acuerdo a la norma ASTM D6341-98 y ASTM D4703-02, debe ser inferior a 5 °C para garantizar la calidad de la superficie de la cavidad. En el tiempo de calentamiento requerido de 15.3 s se obtuvo una temperatura mínima de 114.289 °C y una máxima de 116.008 °C, dando como resultado una diferencia de temperatura de 1.719 °C. En la etapa de enfriamiento en 42.75 s del tiempo total ciclo, se obtuvo una temperatura mínima de 60.043°C y una máxima de 63.331 °C, como resultado una diferencia de temperatura de 3.288 °C. Se observa que no sobrepasa el límite establecido por las normas en la etapa de enfriamiento, al igual que en la etapa de calentamiento se encuentra por debajo de los límites críticos.

La figura 13a muestra la gráfica de contornos de los esfuerzos de Von Mises en el área evaluada, se observa que los esfuerzos están concentrados en las superficies de contacto entre las resistencias eléctricas y la placa de calentamiento, la Figura 13b facilita la lectura de los datos con mayor precisión a lo largo de esta zona de interés, se observaron los esfuerzos provocados por el cambio térmico a lo largo de esta zona y en específico alrededor de las superficies de contacto.

4. Discusión

Por medio de este estudio se analizó la respuesta térmica de un MRTR, así como su resistencia estructural, haciendo uso de campos acoplados térmico-estructural. En los resultados de los análisis térmicos se observa que el molde de inyección

tiene la capacidad de ser calentado y enfriado rápida y uniformemente, utilizando resistencias eléctricas en la etapa de calentamiento, y un refrigerante en la etapa de enfriamiento.

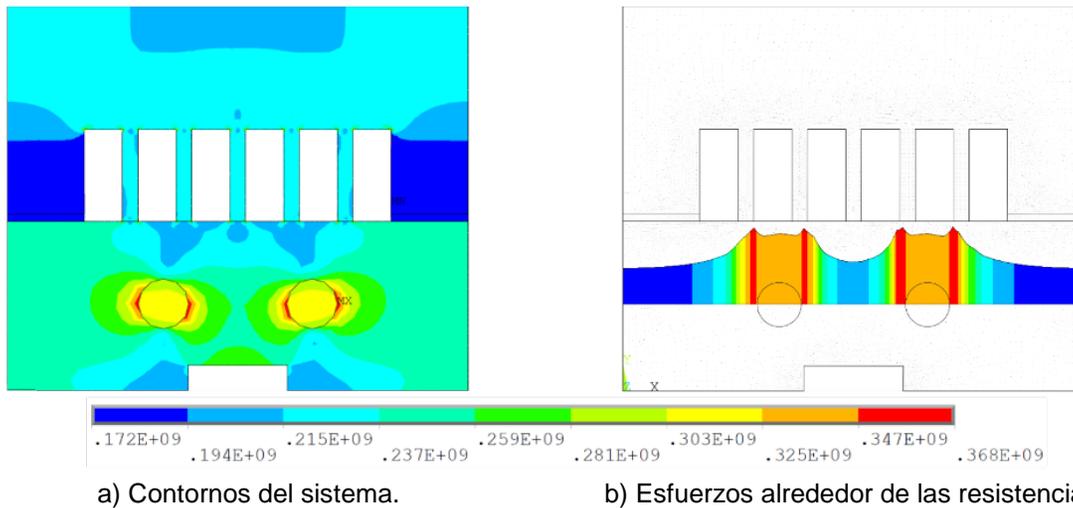


Figura 13 Esfuerzos de Von Mises en la placa de calentamiento.

Dentro de los resultados obtenidos del estudio, se observa que existen concentradores de esfuerzos en los bordes de las resistencias eléctricas cerca de la cavidad del molde, esta concentración de esfuerzos y relajación a lo largo del ciclo de inyección del MRTR puede conducir al inicio de microfisura, en los orificios donde se posicionan las resistencias eléctricas, lo cual puede extenderse a una fatiga térmico-mecánica de ciertos ciclos de moldeo. Para garantizar la calidad de la superficie de la pieza, se estableció bajo la norma ASTM D6341-02 y ASTM D4703-02 que la variación de la temperatura del molde debe ser inferior a 5 °C, se observa que la variación en la etapa de calentamiento es de 1.719 °C y en la etapa de enfriamiento presenta una variación de 3.288 °C, lo que demuestra que se cuenta con una buena distribución de temperatura sobre la superficie de la cavidad, y está bajo norma, por lo tanto las piezas obtenidas serán de buena calidad superficial. Con base a la información obtenida del análisis térmico-estructural, se observa que los esfuerzos máximos de Von Mises se mantuvieron por debajo de los 500 MPa, asegurando la vida útil en los insertos del molde superior a 1×10^7 ciclos.

Por lo tanto, se visualiza que el tiempo de calentamiento puede ser reducido manteniendo el precalentamiento del molde a 60 °C previo al inicio del ciclo, dado que el tiempo fue reducido un 31.87% en comparación al trabajo realizado por Cervantes et al. [2018]. Además, se puede observar que el tiempo de enfriamiento es el 55.23% del tiempo total de calentamiento y enfriamiento, por lo cual existe una reducción de tiempo de enfriamiento menor al 60% del ciclo de moldeo, se recomienda una optimización en la siguiente etapa de investigación, a fin de encontrar el óptimo diseño con los mejores tiempos de calentamiento y enfriamiento que minimicen el tiempo de ciclo de un MRTR.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Lin J. C., Optimum cooling system design of a free-form injection mold using an abductive network, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 120, pág. 226-236, 2002.
- [2] Wang W., Zhao G., Guan Y., Wu X., Hui Y., Effect of rapid heating cycle injection mold temperature on crystal structures, morphology of polypropylene and surface quality of plastic parts, *Journal of Polymer Research*, Vol. 22, pág. 84, 2015.
- [3] Li C. L., Part segmentation by superquadric fitting-a new approach towards automatic design of cooling system for plastic injection mould, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 35, pág. 102-114, 2007.
- [4] Wang W., Zhao G., Guan Y., Wu X., Hui Y., Research on a new variotherm injection molding technology and its applications on the molding of a large LCD panel, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 48, pág. 671-681, 2009.
- [5] Xu R., Sachs E., Rapid thermal cycling with low thermal inertia tools, *Polymer Engineering & Science*, Vol. 49, pág. 305-316, 2009.
- [6] Xiao C. L., Huang H. X., Multiobjective optimization design of heating system in electric heating rapid thermal cycling mold for yielding high gloss parts, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 131, 2014.

- [7] Zhao G., Wang G., Guan Y., Huiping L., Research and application of a new rapid heat cycle molding with electric heating and coolant cooling to improve the surface quality of large LCD TV panels, *Polymers for Advanced Technologies*, Vol. 22, pág. 476-487, 2011.
- [8] Xiao C. L., Huang H. X., Development of rapid thermal cycling molding with electric heating and water impingement cooling for injection molding applications, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 73, pág. 712-722, 2014.
- [9] Li X. P., Zhao G. Q., Guan Y. J., Ma M. X., Optimal design of heating channels for rapid heating cycle injection mold based on response surface and genetic algorithm, *Materials & Design*, Vol. 30, pág. 4317-4323, 2009.
- [10] Saifullah A. B. M., Masood S. H, Finite Element Thermal Analysis of Conformal Cooling Channels in Injection Moulding, 5th Australasian Congress on Applied Mechanics, Vol. 1, pág. 337-341, 2007.
- [11] Cervantes Vallejo J. F., Camarillo Gómez K. A, Pérez Soto G. I, Louvier Hernández J. F, Orozco Mendoza H., Optimización del tiempo de calentamiento en un molde de respuesta rápida térmica mediante FEM-MSR-PSO, *Memorias del XXIV Congreso Internacional Anual de SOMIM*, Vol. 24, pág 8-17, 2018.
- [12] Cengel Y. A., Boles M. A., *Thermodynamics: an engineering approach*, 2002.
- [13] Luchietta G., Fiorotto M., Bariani P.F., Influence of rapid mold temperature variation on surface topography replication and appearance of injection molded parts, *Manufacturing Technology*, Vol. 61, pág. 539-542, 2012.
- [14] Xiao C. L., Huang H. X., Yang X., Development and application of rapid thermal cycling molding with electric heating for improving surface quality of microcellular injection molded parts, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 100, pág. 478-489, 2016.
- [15] Li X., Zhao G., Guan Y., Li H., Research on thermal stress, deformation, and fatigue lifetime of the rapid heating cycle injection mold, *Advance Manufacturing Technology*, Vol. 45, pág. 261-275, 2009.
- [16] Ashraf A., *Thermal Analysis of Polymer by DSC*, Center for Advanced Materials, Vol. 2, pág. 5, 2015.

- [17] Au K. M., Yu K. M., A scaffolding architecture for conformal cooling design in rapid plastic injection moulding, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 34, pág. 496-515, 2006.
- [18] Dorigato A., D'Amato M., Pegoretti A., Thermo-mechanical properties of high-density polyethylene-fumed silica nanocomposites: effect of filler surface area and treatment, *Journal of Polymer Research*, Vol. 19, pág. 9889, 2012.
- [19] Standard, ASTM D3641-02, Standard Practice for Injection Molding Test Specimens of Thermoplastic Molding and Extrusion Materials, 2002.
- [20] Standard, ASTM D6341-98, Standard Test Method for Determination of the Linear Coefficient of Thermal Expansion of Plastic Lumber and Plastic Lumber Shapes Between -30 and 140°F (-34.4 and 60°C), 1998.
- [21] Standard, ASTM D4703-02, Compression Molding Thermoplastic Material into Test Specimens, Plaques, or Sheets, 2002.
- [22] Wang G., Zhao G., Li H., Guan Y., Multi-objective optimization design of the heating/cooling channels of the steam-heating rapid thermal response mold using particle swarm optimization, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, pp. 790-802, 2011.