

## **Análisis térmico de moldes de inyección de plástico utilizando elementos finitos\***

**Yuri H. Villalta Elejalde**

[yelejalde@mecamail.cujae.edu.cu](mailto:yelejalde@mecamail.cujae.edu.cu)

**Dennis Ferrer Rivas**

**Alain Acosta Falcón**

Especialidad: Ingeniería mecánica

Instituto Tecnológico de la Habana (CUJAE) (Cuba)

**Resumen:** Se calculó mediante una simulación computacional, utilizando el método de los elementos finitos, la cantidad de energía en forma de calor extraída del molde de inyección analizado y el tiempo necesario para realizar la extracción de las piezas moldeadas del mismo. Inicialmente se describieron las piezas a inyectar y el molde de inyección a utilizar durante la simulación. Se definió, de forma conceptual, el sistema de refrigeración a utilizar en el modelo, al cual se le asignaron los parámetros requeridos para el procesamiento del material plástico inyectado, así como las condiciones de frontera. Al correr la simulación se obtienen todos los valores del calor extraído del molde mediante conducción, convección y radiación así como el calor acumulado para cada instante de tiempo.

**Palabras clave:** canales; refrigeración; simulación; plásticos; inyección.

---

\* Recibido: 12 octubre 2017/ Aceptado: 10 enero 2018.

## Thermal analysis of plastic injection molds using finite elements

**Abstract:** It was calculated by means of a computational simulation, using the finite element method, the amount of energy in the form of heat extracted from the injection mold analyzed and the time necessary to perform the extraction of the molded parts thereof. Initially, the parts to be injected and the injection mold to be used during the simulation were described. The cooling system to be used in the model was conceptualized, to which the parameters required for the processing of the injected plastic material were assigned, as well as the boundary conditions. The simulation was run obtaining all the values of the heat extracted from the mold by conduction, convection and radiation as well as the accumulated heat for each instant of time.

**Keywords:** channels; refrigeration; simulation; plastics; injection.

## Introducción

La inyección es uno de los procesos más utilizados para la manufacturación de piezas termoplásticas. Dicho proceso toma lugar en el interior del molde de inyección, el cual se compone de varios sistemas, dentro de los cuales el sistema de atemperamiento es uno de los más importantes (Ivascu, Fetecau & Hill, 2010). El sistema de atemperamiento en un molde de inyección de plástico está concebido para extraer de la pieza el calor suficiente hasta alcanzar la temperatura de expulsión, correspondiente al tipo de termoplástico procesado. El calor es extraído mediante los mecanismos de conducción, convección y radiación.

Para asegurar la extracción del calor necesaria en un tiempo determinado en las placas del molde que contienen las cavidades se fabrican agujeros por los cuales se hace circular un líquido refrigerante, por lo general agua; estos agujeros se conocen como canales de enfriamiento. La correcta configuración y disposición de estos canales asegura una óptima calidad de la pieza moldeada. Para el diseño y cálculo de estos canales existen diversas formulaciones, la mayoría de los cuales se basan en teorías empíricas y experiencias personales de cada diseñador de moldes. El tema ha sido abordado en varias investigaciones, tal como se relacionan a continuación.

Saifullah y Masood (2007) realizaron una comparación entre dos tipos diferentes de canales de enfriamiento. Para la comparación utilizaron el método de los elementos finitos, en un molde de inyección de un recipiente de polipropileno. Primeramente se realizó una corrida, considerando el sistema en estado estacionario para obtener las distribuciones de temperaturas en las superficies de intercambio del molde; luego realizaron el mismo análisis dependiente del tiempo con el objetivo de obtener el tiempo de enfriamiento de la pieza fundida.

Babilonia, Simeón & Arzola (2012) describieron el diseño de un sistema de canales de enfriamiento apoyándose en el método de los elementos finitos. Mediante este método realizaron un ajuste iterativo de los componentes del sistema y a través de la variación de las condiciones para su funcionamiento, con el fin de evaluar el comportamiento de estas variaciones en el alabeo, la contracción lineal y volumétrica diferencial de las piezas.

Hong y Xuan (2010) analizaron la relación existente entre la configuración de los canales de enfriamiento, los parámetros del proceso, material del molde, espesor de las placas del molde, creando un algoritmo para calcular la distribución de temperatura en el molde. La relación fue establecida mediante el diseño de experimento y el método de superficie de respuesta. Como resultados obtenidos muestran una disminución del tiempo de enfriamiento y una distribución uniforme de las temperaturas.

En este trabajo se utilizó el método de los elementos finitos para el análisis térmico del molde de inyección estudiado, con el objetivo de evaluar la transferencia de calor en el molde y calcular el tiempo de enfriamiento necesario para las piezas fabricadas.

### Descripción general de las piezas

Las piezas (carcasa inferior y carcasa superior) utilizadas forman parte de un equipo médico, que integran una familia de equipos destinados al diagnóstico y monitoreo de pacientes con problemas cardíacos. Cada pieza tiene dimensiones exteriores igual a 96 mm x 93 mm x 22 mm, con un espesor nominal de pared de 2 mm y un volumen de 18,5 cm<sup>3</sup> y 17,4 cm<sup>3</sup>, respectivamente. El material utilizado para su fabricación es el Lustran ABS Elite HH 1827, en la siguiente tabla se muestran algunas características térmicas del mismo (Tablas 1 y 2).



Figura 1. Piezas plásticas. Carcasa superior (derecha), carcasa inferior (izquierda).

Tabla 1. Comportamiento del calor específico ( $C_p$ ) en función de la temperatura (Lustran ABS Elite HH 1827)

Temp (°C)	50	80	90	100	110	180	210	240	250
$C_p$ (kJ/kg °C)	1 335,1	1 554,1	1 647,7	1 804,2	1 977,1	2 341,1	2 538,9	2 802,1	2 877,1

Tabla 2. Comportamiento de la conductividad térmica ( $k$ ) en función de la temperatura (Lustran ABS Elite HH 1827)

Temp (°C)	43	64	85	105	125	145	165	185	205
k (W/m °C)	0,16	0,163	0,167	0,175	0,177	0,182	0,182	0,184	0,175

### Descripción general del molde de inyección

El molde analizado es un molde de dos placas y está compuesto por dos partes fundamentales (parte fija y parte móvil), las cuales, a su vez, se componen de varias placas que, unidas mediante uniones atornilladas, forman el conjunto general. Las placas donde serán moldeadas las piezas se denominan placa de los núcleos y placa de las cavidades, dichas placas contienen el sistema de atemperamiento del molde.

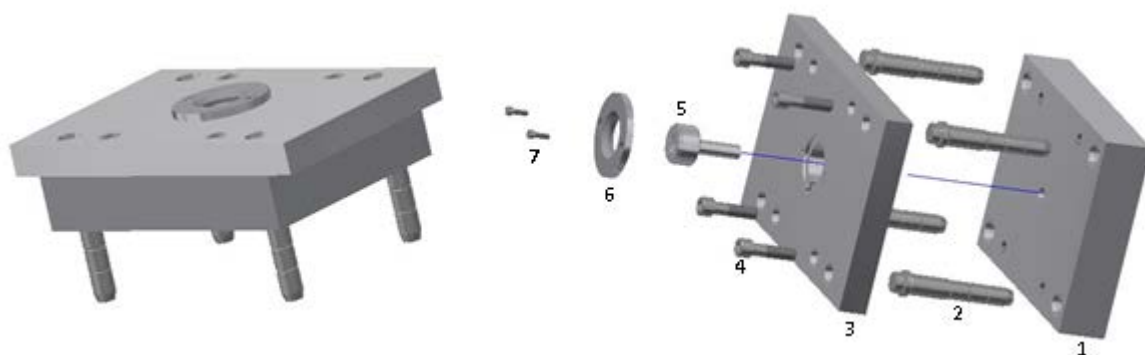


Figura 2. Parte fija del molde de inyección. 1- Placa de las cavidades, 2- Columnas guías, 3- Placa superior, 4- Tornillos M12 x 45, 5- Boquilla, 6- Anillo centrador, 7- Tornillos M5 x 16.

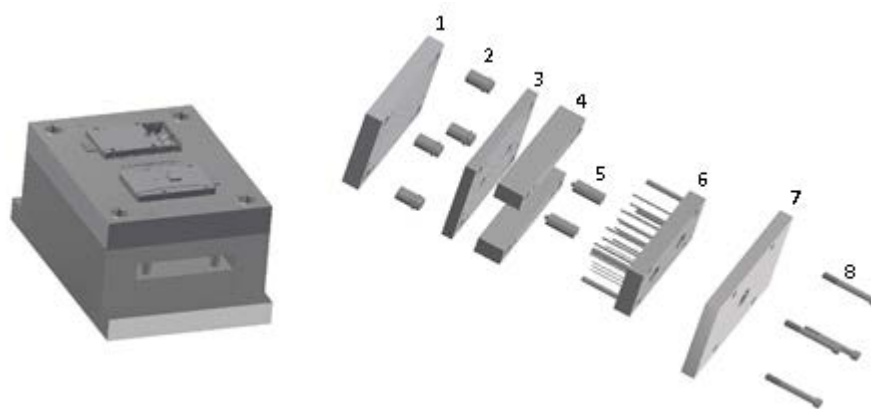


Figura 3. Parte móvil del molde de inyección. 1- Placa de los núcleos, 2- Guías de las columnas, 3- Placa intermedia, 4- Separadores, 5- Columnas de apoyo, 6- Sistema de expulsión, 7- Placa inferior, 8- Tornillos M12 x 100.

### Diseño conceptual del sistema de atemperamiento

Los canales de enfriamiento comúnmente tienen forma circular y son maquinados en las placas de los núcleos y de las cavidades. Existen variantes para hacer fluir el refrigerante por el interior del molde (en serie y en paralelo). Se utilizó un sistema de canales en serie; la ventaja de esta distribución consiste en que, al mantener constante las dimensiones del canal a lo largo del recorrido, se puede sostener perfectamente el estado de turbulencia del flujo, obteniéndose una mejor transferencia de calor en el molde. Para guiar el fluido a través de los canales e impedir su salida del molde se dispone de tapones selladores, provistos de una junta tórica que garantiza la hermeticidad del sistema. Las dimensiones y distancias de los canales fueron elegidas según Shoemaker (2011): diámetro de los canales ( $D=11,1$  mm), distancia entre canales ( $B=33,3$  mm) y distancia del canal a la pieza ( $L= 16,5$  mm).

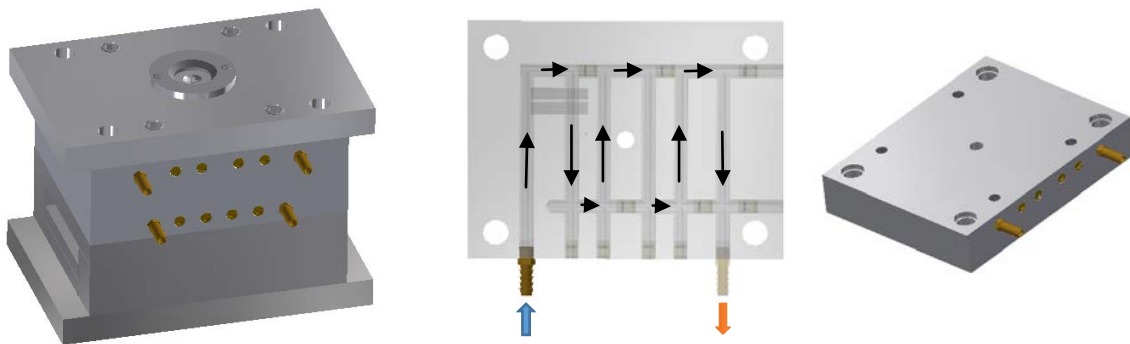


Figura 4. Sentido de circulación del fluido del refrigerante en el interior de las placas de los núcleos y cavidades.

### Transferencia de calor en el molde de inyección

Durante el ciclo de inyección, el calor correspondiente a la variación de entalpía del material inyectado durante el proceso es intercambiado por la superficie moldeada y de esta hacia el exterior (Marques *et al.*, 2015). Para definir el cambio de energía es establecido un equilibrio entre el calor suministrado al molde, el calor acumulado en el interior del molde en cada instante de tiempo y el calor extraído:

$$\dot{Q}_p + \dot{Q}_w + \dot{Q}_{CV} + \dot{Q}_{CD} + \dot{Q}_R = \dot{Q}_A \quad (1)$$

Donde  $\dot{Q}_p$  es el calor aportado por el polímero,  $\dot{Q}_w$  calor intercambiado por el refrigerante,  $\dot{Q}_{CV}$ ,  $\dot{Q}_{CD}$ ,  $\dot{Q}_R$  calor intercambiado por convección, conducción, radiación respectivamente y  $\dot{Q}_A$  corresponde al calor acumulado por el molde en el instante de tiempo analizado.

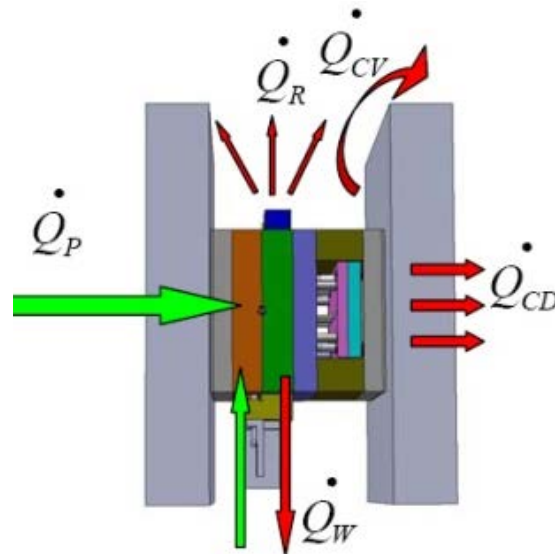


Figura 5. Intercambio de calor en el molde durante el proceso de inyección.

### Simulación computacional del proceso de enfriamiento utilizando el método de los elementos finitos

La simulación permitirá evaluar el comportamiento del molde bajo diferentes cargas térmicas, con este propósito se diseñó un experimento que consistió en aplicar en las cavidades y núcleos del molde el calor aportado por el polímero durante el tiempo fijado para la inyección del material en el molde. En el inicio del proceso, el material plástico es calentado en la máquina de inyección desde la temperatura ambiente hasta la de inyección, dicho tiempo fue denominado (tiempo de calentamiento), luego es inyectado en el molde disminuyendo su temperatura a medida que el tiempo aumenta. Al finalizar la inyección se hace pasar el líquido refrigerante a través de los canales para extraer calor de las piezas hasta que las mismas alcanzan la temperatura de desmoldeo. Después de alcanzar dicha temperatura el molde se abre, expulsa las

piezas solidificadas y comienza el proceso nuevamente. Para el análisis se utilizó el modelo del molde descrito anteriormente y fueron aplicadas las condiciones y parámetros listados en la Tabla 3.

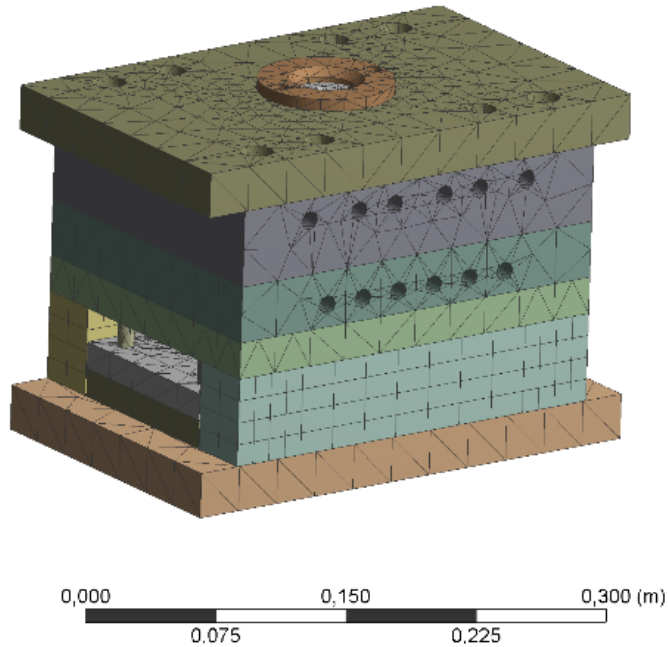


Figura 6. Modelo computacional del molde mallado. Número de elementos = 215188, número de nodos=370808.

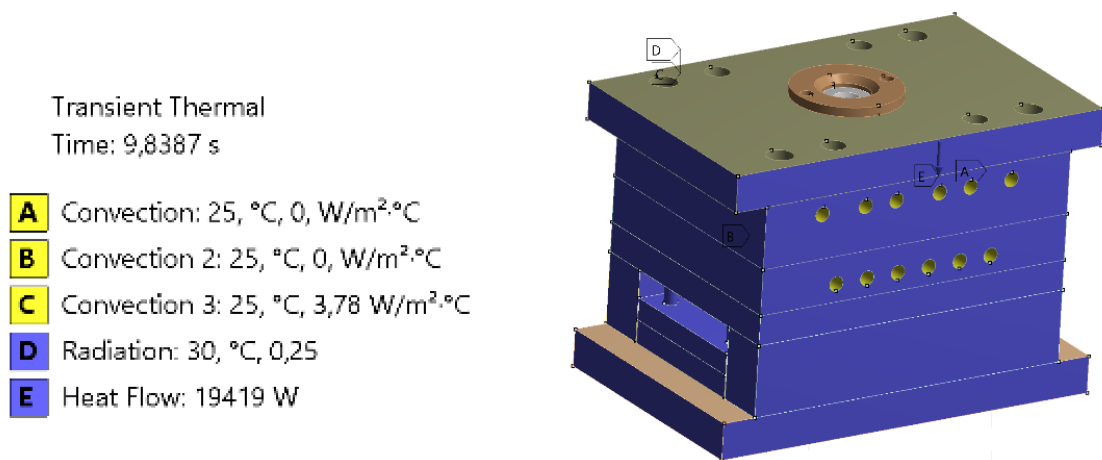


Figura 7. Modelo computacional del molde con las condiciones de frontera y parámetros aplicados, según Tabla 3.



Tabla 3. Parámetros y condiciones de borde aplicadas en la simulación computacional

PARÁMETROS DEL MOLDE	Parámetros	Valores	CONDICIONES DE FRONTERA	Condiciones	Valores
	Material de las placas	AISI 1020		Temp. ambiente	30 °C
	Conductividad térmica de las placas	29 $W/m^2\text{°C}$		Temp. del agua	30 °C
	Calor específico de las placas	460 J/kg °C		Coefficiente de convección (agua)	2200 $W/m^2\text{°C}$
	Temp. de inyección	260 °C		Coefficiente de convección (aire)	Ver gráfica (Figura 7)
	Temp. del molde	80 °C		Número de Reynolds	4254
	Temp. de desmoldeo	89 °C		Velocidad del agua	0,35 m/s
	Tiempo de inyección	1,5 s		Tiempo de calentamiento	8,5 s
	Material a inyectar	Lustran ABS Elite HH 1827		Calor aportado por el plástico	19419 W
				Emisividad	0,25

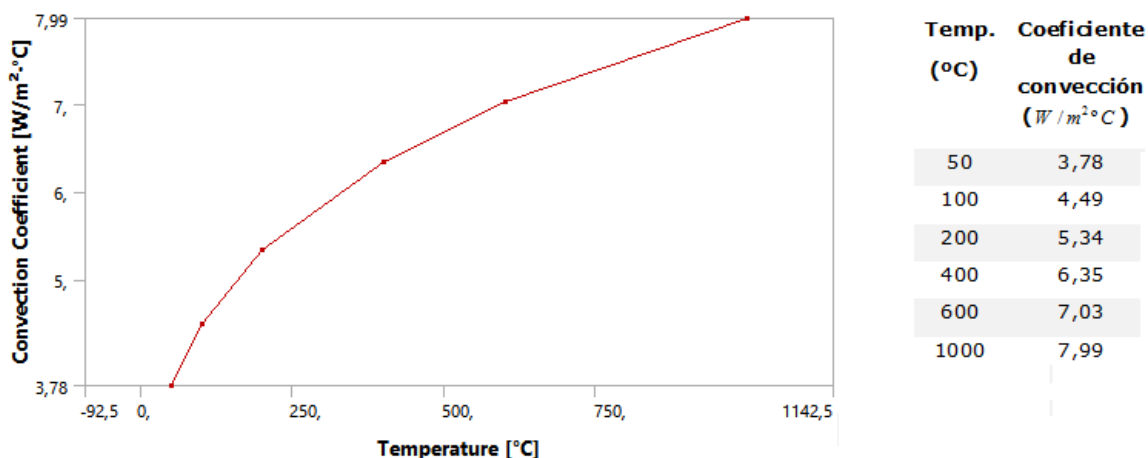


Figura 8. Comportamiento del coeficiente de convección del aire con respecto a la temperatura. Datos correspondientes al aire con un comportamiento laminar en placas verticales.

La simulación tendrá una duración de 40 s, con tiempo inicial en 0 s. Se consideró inicialmente el calentamiento del plástico; durante este período se suministrará energía en forma de calor a las cavidades (19 419 W), el cual se mantendrá constante hasta el final de la inyección del material plástico en el molde, todo este proceso

tendrá una duración de 10 s. Luego de este tiempo el calor suministrado al molde será nulo, comenzando el período de refrigeración, en este instante se hace pasar el agua refrigerante a través de los canales de las placas.

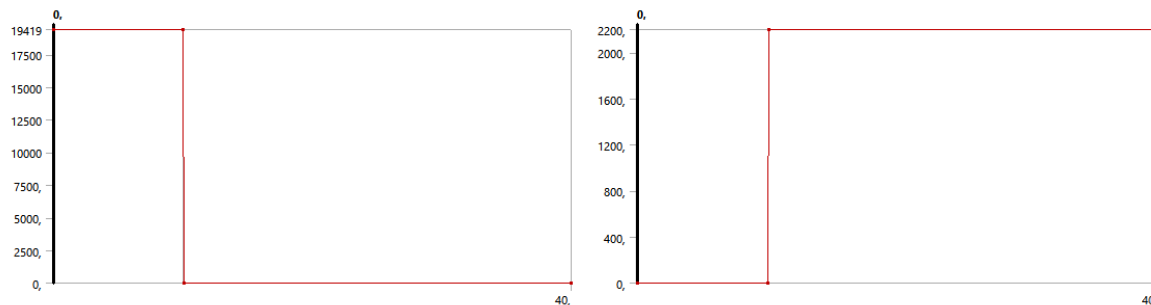


Figura 9. Gráfica de la energía suministrada al molde durante el calentamiento e inyección del plástico y gráfica del inicio de la refrigeración en el molde, (derecha e izquierda), respectivamente.

## Resultados y discusión

La Figura 10 muestra como resultado las temperaturas durante todo el tiempo analizado. En los primeros 8 s toma su valor máximo (257,31 °C), siendo la temperatura recomendada para el procesado del material plástico inyectado de 260 °C. Luego dicho valor comienza a descender a medida que aumenta el tiempo. Un resultado de notable importancia es el tiempo de extracción de la pieza moldeada, el cual no es más que el instante en el cual la pieza es lo suficientemente sólida como para no sufrir ninguna deformación al ser extraída del molde. La gráfica muestra el instante en que la temperatura alcanza el tiempo de desmoldeo del material (89 °C), donde el intervalo de refrigeración está acotado desde que el plástico alcanza su valor máximo (7,7 s) hasta que toma el primer valor inferior a la temperatura de extracción (24,4 s), dando como resultados un tiempo de 16,7 s para el ciclo de enfriamiento.

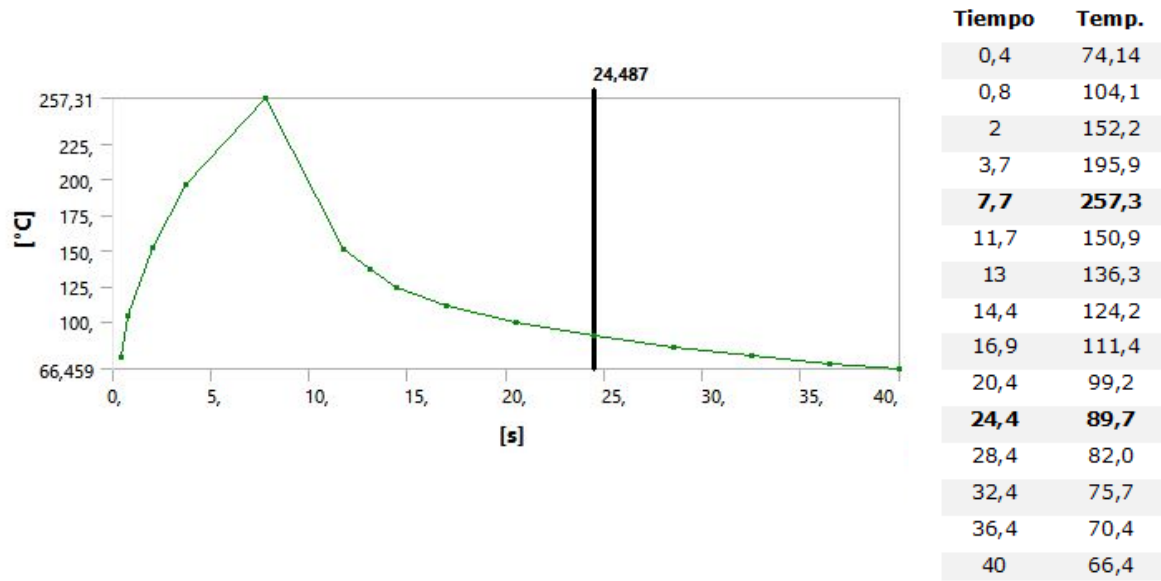


Figura 10. Gráfica de la distribución de la temperatura en el tiempo. Tiempo de desmoldeo de la pieza.

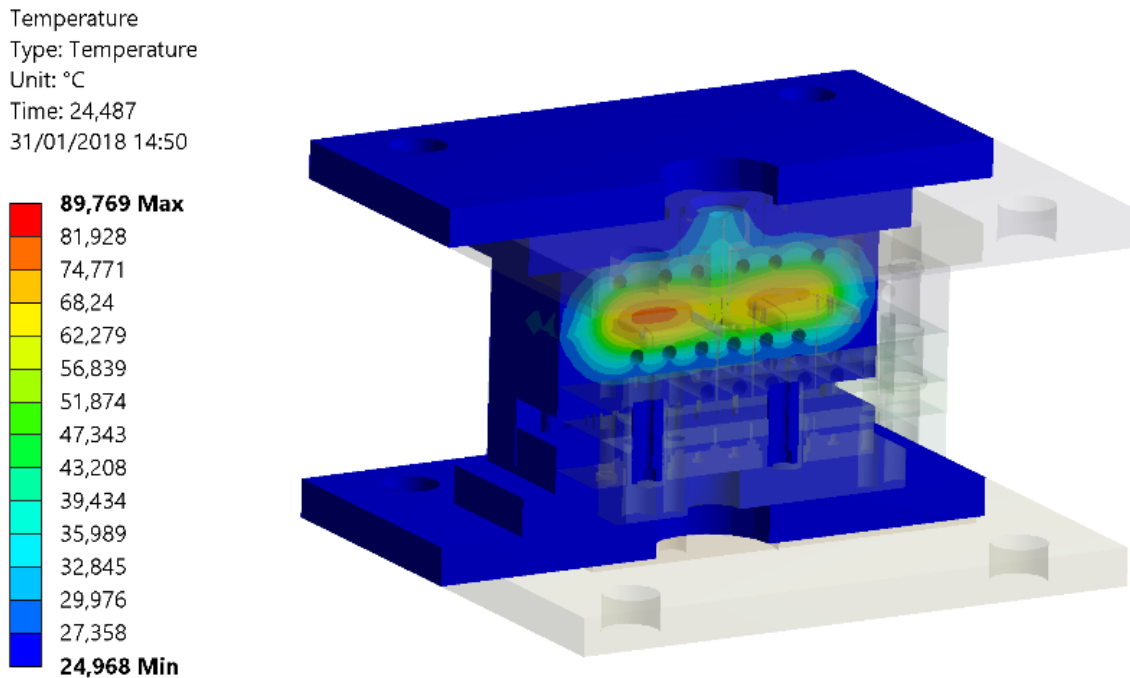


Figura 11. Distribución de la temperatura en el molde al alcanzar el tiempo de expulsión.

Otros resultados de interés son los valores del calor intercambiado por el molde durante el proceso, con la ayuda de este tipo de análisis se puede calcular en cada instante el calor acumulado y el cedido al exterior mediante los diferentes mecanismos de transferencia (conducción, convección y radiación).

Tabla 4. Valores del calor cedido y acumulado por el molde en cada instante de tiempo

Tiempo (s)	$\dot{Q}_{CD}$ (Sup) (W)	$\dot{Q}_W$ (cavidad) (W)	$\dot{Q}_W$ (núcleo) (W)	$\dot{Q}_{CV}$ (al aire) (W)	$\dot{Q}_R$ (W)	$\dot{Q}_A$ (W)
0,4	-0,88	0	0	-0,02	-0,94	19 417,16
0,8	-2,05	0	0	-0,05	-0,93	19 415,97
2	-7,18	0	0	-0,1	-0,93	19 410,79
3,7	-27,4	0	0	-0,2	-0,89	19 390,51
<b>7,7</b>	-140,9	0	0	-0,59	-0,87	19 276,64
11,7	-248,2	-236,1	-253,1	-0,55	-0,84	18 680,21
13	-279,5	-265,9	-281,6	-0,54	-0,85	18 590,61
14,4	-304,07	-292,7	-306,8	-0,54	-0,83	18 514,06
16,9	-324,83	-330,1	-341	-0,55	-0,86	18 421,66
20,4	-318,5	-361,2	-368,3	-0,59	-0,89	18 369,52
<b>24,4</b>	<b>-287,9</b>	<b>-377,8</b>	<b>-381,8</b>	<b>-0,66</b>	<b>-0,85</b>	<b>18 369,99</b>
28,4	-248,3	-382,8	-384,1	-0,75	-0,84	18 402,21
32,4	-208,2	-380,5	-379,7	-0,84	-0,85	18 448,91
36,4	-185,4	-373,7	-371,3	-0,9	-0,83	18 486,87
40	-181	-365,6	-362	-1	-0,79	18 508,61

La Tabla 4 relaciona los valores del calor para distintos instantes de tiempo, en la columna correspondiente al calor cedido mediante conducción solo se tomó en cuenta el calor transferido por la parte fija del molde hacia la máquina inyectora, debido a que el calor transferido por las placas inferiores de la parte móvil es muy pequeño. Según los resultados obtenidos el calor a eliminar una vez inyectada las piezas, para alcanzar la temperatura de expulsión, corresponde a la suma de todos los valores en 24,4 s, cuyo resultado es de 1 049 W, para un calor acumulado en el molde de 18 369,9 W.

## Conclusiones

El método de los elementos finitos puede ser implementado para el análisis térmico de moldes de inyección de plásticos. Mediante este método se calculó el tiempo de desmoldeo de las piezas analizadas. Dicho parámetro es de suma importancia debido a que define la eficiencia del ciclo de inyección y la calidad final de las piezas. También se obtuvo para cada instante de tiempo el comportamiento de las temperaturas y el calor en el interior de las cavidades. Todos estos cálculos son de suma importancia para la toma de decisiones a la hora del diseño de moldes de inyección. Se concluye que dicho método es una variante eficaz para analizar térmicamente moldes de inyección de plástico.

## Referencias bibliográficas

- BABILONIA, G.; SIMEÓN, R. & ARZOLA, J. A. 2012. Diseño del sistema de enfriamiento de un molde de inyección de tapas reusables de polietileno de baja densidad (PEBD). En: XVI Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. La Habana, Cuba.
- HONG, P. & XUAN, D. 2010. Optimization of conformal cooling channels with array of baffles for plastic injection mold. *International Journal of precision Engineering manufacturing* 11(6): 879-890.
- IVASCU, N.; FETEAU, C. & HILL, R. 2010. *Dynamic Temperature Control in Injection Molding with Conformal Heating/Cooling System*. The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. ISSN: 1221-4566.
- MARQUES, S.; FAGALIDE, A.; MIRANDA, J. & YADROITSAU, I. 2015. Design of conformal cooling for plastic injection moulding by heat transfer simulation. *Scientific Technical* 25(6): 564-574.
- SAIFULLAH, A. B. M. & MASOOD, S. H. 2007. Finite Element Thermal Analysis of conformal cooling channels in injection moulding. In: 5th Australian Congress on Applied Mechanics, ACAM 2007. Brisbane, Australia.
- SHOEMAKER, J. 2011. *Moldflow Design Guide*. First ed. Moldflow Corporation, Massachusetts, U.S.A.