

# Calibración de un análisis térmico para el proceso de fabricación de piezas plásticas usando diferencias finitas

Mauricio Lendizabal Néstor<sup>1</sup>, Irma Martínez Carrillo<sup>2</sup>, Carlos Juárez Toledo<sup>2</sup>

[lendizabalnestor@hotmail.com](mailto:lendizabalnestor@hotmail.com)<sup>1</sup>, [imartinezca@uaemex.mx](mailto:imartinezca@uaemex.mx), [cjuarez@uaemex.mx](mailto:cjuarez@uaemex.mx)

Alumno del Posgrado Maestría en Manufactura Avanzada CIATEQ A.C. (Autor correspondiente)<sup>1</sup>

Centro de Investigación en Plásticos, CIATEQ<sup>1</sup>, Unidad Académica de Tianguistenco<sup>2</sup>,

Universidad Autónoma del Estado de México<sup>2</sup>

Lerma de Villada, Estado de México.<sup>1</sup>, Tianguistenco, Estado de México<sup>2</sup>.

## Resumen

El comportamiento dinámico de la temperatura en un proceso de fabricación de piezas plásticas es descrito por ecuaciones diferenciales parciales. Entre las herramientas convencionales para conocer la evolución su sistema en el tiempo, se utiliza la implementación numérica que sólo proporciona información sobre la señal de entrada y salida. En este trabajo, se propone una metodología de calibración para realizar el análisis térmico en operaciones de moldeo por inyección de plástico usando la técnica de diferencias finitas por conducción en estado estable con incrementos en  $\Delta x$  y  $\Delta y$ ; es decir, cómo se modifica el mallado, en las partes involucradas del proceso, con la intención de predecir la deformación y contracción. Para conocer la confiabilidad de los incrementos seleccionados, se valida la respuesta térmica en un molde de inyección mediante el *software Ansys Fluent* que muestra la evolución de los contornos de velocidad y fase.

**Palabras claves:** Estado estable, Moldeo inyección de plástico, Transferencia de calor, Diferencias Finitas

## Abstract

*The dynamic behavior of the temperature in plastic parts manufacturing process is described by partial differential equations, numerical implementation is a conventional tool for system evolution analysis over time, this technique only provides information about the input and output signal. In this paper a calibration methodology is proposed to perform the thermal analysis in plastic injection molding operations using the finite-difference technique for steady state conduction by increments in  $\Delta x$  and  $\Delta y$ , that is, modifying the mesh parameters of the process for predicting the deformation and contraction. An injection mold is validated using Ansys Fluent software to know the reliability of the selected increments, the phase contour and the velocity contour are shown.*

**Keywords:** Stable state, plastic injection molding, Heat transfer, Finite Differences.

---

### Artículo arbitrado

Recibido:  
30 de abril de 2019

aceptado:  
21 de julio de 2019

---

## Introducción

Actualmente, el análisis del proceso de inyección de plástico y sus fases se provee un conjunto de herramientas disponible que permite determinar las condiciones idóneas para el procesado de materiales polimérico, y, además, correlacionar el resultado final. La inyección resulta ser uno de los procesos que más se utilizan al manufacturar piezas plásticas: toma lugar en el interior del molde de inyección, el cual se compone de varios sistemas, como el atemperamiento que es uno de los más importantes Ivascu, Fetecau & Hill (2010).

El tema ha sido abordado en investigaciones que refieren metodologías para el enfriamiento de moldes de inyección, con la finalidad de obtener piezas plásticas en el margen de las especificaciones del producto, tal como se mencionan a continuación:

\* Sainfullah & Masood (2007) compararon diferentes canales de enfriamiento para 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 la duración del enfriamiento de la pieza fundida.

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

\* Hong & 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, para crear un algoritmo que calcula 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; con ello, se evitarían, las deformaciones en las piezas plásticas.

\* Fonseca, Pelliccioni, Osswald & Aquite (2014) analizaron la simulación del llenado del molde con el uso de OpenFOAM®, que les permitió evaluar el desempeño en problemas de moldeo por inyección. La simulación se realizó en la etapa de llenado de un molde de una sola cavidad (en 2D), bajo el régimen laminar y utilizando la ecuación *Cross-Exponencial* para estimar el comportamiento de la viscosidad de un polímero termoplástico.

Los problemas prácticos de análisis térmico con frecuencia son muy complicados y no se pueden resolver mediante métodos analíticos. Sus modelos matemáticos pueden incluir ecuaciones diferenciales no lineales con condiciones de frontera complejas. No obstante, estos problemas se pueden resolver mediante métodos numéricos computacionales que incluyen, entre otros, métodos de diferencias finitas, de elementos finitos y de elementos de frontera. El análisis numérico es más eficiente en términos del tiempo total necesario para encontrar la solución (Kreith, 2012).

Se tiene conocimiento que la aproximación a un problema físico resuelto por diferencias finitas se podrá mejorar si se hacen más pequeños los incrementos en  $\Delta x$  y  $\Delta y$ . Lo anterior, nos permite suponer que si utilizamos una herramienta computacional basada en mallado como lo es *Ansys Fluent* ayuda a mejorar la aproximación del modelo de estudio (Kern, 1999). Mediante este método, nos permite realizar ajustes iterativos de los componentes del sistema a través de la variación de las condiciones para su funcionamiento. Con lo anterior, se evalúa, el comportamiento de estas variaciones en el alabeo, la contracción lineal y volumétrica diferencial de la pieza.

En este trabajo, se utilizó el método de diferencias finitas para el análisis térmico del molde de inyección estudiado, con el objetivo de evaluar los

parámetros de operación y calibración que permita realizar el análisis térmico en el molde y calcular el tiempo y velocidades de llenado necesario para las piezas fabricadas. Para el caso de estudio, se utiliza un mallado del tipo transitorio, el cual permite manejar hasta 30,000 nodos, cuyo resultado es una alta precisión de sus parámetros de acuerdo con su secuencia de solución.

Varios problemas térmicos no son susceptibles de una solución analítica, ya que son representados por ecuaciones algebraicas y diferencias complejas; por ejemplo, en el caso de las diferencias finitas, estas se resuelven reemplazando las derivadas por diferencias (Cengel, 2015). Durante el análisis térmico, se describen con precisión las condiciones de frontera responsables de las tensiones térmicas inducidas en las piezas, con esto es posible reproducir la deformación de la pieza (Kreith, 2012).

Las propiedades de los termoplásticos cambian en función de la temperatura. Conocer la manera en cómo ocurren estos cambios nos permite: (Askeland, 2017).

- Diseñar menores componentes y,
- Guiar el tipo de técnicas de procesamiento que deben aplicarse.

Entre los diferentes procesos de transformación (inyección, extrusión, soplado y vacío, principalmente) destaca el proceso de inyección, gracias a ciclos rápidos de producción y obtención de productos terminados a la salida de la máquina. Lo anterior permite que los materiales poliméricos estén reemplazando a otros materiales como metales, maderas y vidrios; también; resolver algunas necesidades tecnológicas de los materiales utilizados durante el proceso (Askeland, 2017).

El diseño de moldes de inyección de plástico requiere un conocimiento preciso de la forma en que opera el equipo, las propiedades del fluido y sobre todo una suficiente experiencia para definir la configuración del molde y condiciones de operación. Gracias a la experiencia adquirida por los diseñadores, se obtiene un gran porcentaje del éxito. La pieza plástica de este trabajo está hecha con un material tomado como ilustrativo que cumple con las características

necesarias para simular el proceso; por lo anterior, no se ha realizado una simulación con otros polímeros. Este material es el termoplástico *Lustran ABS Elite HH 1827* que se analiza como un fluido no newtoniano con fijaciones de ajuste rápido y, se utiliza un canal caliente en el proceso. Se realiza la calibración de un análisis de simulación basado en la metodología de *Ansys Fluent*, el canal y la pieza son simulados suponiendo un estado transitorio.

Con el fin de precisar el concepto de fluido que se utilizará, es importante destacar que, al definir los fluidos newtonianos generalizados, estos involucran tanto los que son de viscosidad constante (newtonianos), como aquellos cuya viscosidad depende de la tasa de cizalladura (no newtonianos) (Rohrig, 2019).

## Método

Un diseño basado en simulación numérica ha demostrado ser una buena alternativa que permite reducir costos generados por un mal diseño, mala elección del material o variables de operación mal consideradas. Las técnicas de prueba y error ya no están siendo utilizados debido a los altos costos y el tiempo excesivo requerido.

Para aumentar la capacidad de una empresa para desarrollar piezas más sofisticadas, se usa el diseño y simulación por computadora. De esta manera, se toman mejores decisiones, se invierte más tiempo en diseño y menos tiempo en el proceso para generar ahorros al evitar los costos de la fabricación física de moldes y piezas (Miranda, 2018).

## Descripción general del polímero

En este trabajo, se utiliza el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (*Lustran ABS Elite HH 1827*) el cual se caracteriza por ser:

- Un polímero termoplástico opaco y amorfo.
- Tiene una excelente fluidez y estabilidad durante el llenado.
- Tiene una transición vítrea a cierta temperatura (225-245°C) que puede calentarse hasta la temperatura

recomendada de 260° C para la masa fundida y 80°C para el molde de enfriamiento.

Además, como puede volver a calentarse sin degradación, permite ser moldeado fácilmente por inyección y, debido a que es un material termoplástico, puede ser fácilmente reciclado. Esto significa que una forma común de producir plástico ABS es por medio de otro plástico ABS (Styrolution, 2015). En esencia, el plástico ABS es estructuralmente robusto, por lo que se utiliza en artículos que requieren resistencia al impacto (ver Tablas 1 y 2).

| Característica                               | Valor típico                           |
|--|--|
| Nombre técnico                               | Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) |
| Formula química                              | (C8H8)x (C4H6)y (C3H3N)z               |
| Temperatura típica de moldeo por inyección   | 204 – 238oC                            |
| Temperatura de deflexión de calor (HDT) 980C | 0.46MPa                                |
| Resistencia a la tracción                    | 46 MPa                                 |
| Fuerza flexible                              | 74 MPa                                 |
| Gravedad específica                          | 1.06                                   |
| Tasa de reducción                            | 0.5 – 0.7%                             |

**Tabla 1.** Plástico ABS estándar (Styrolution, 2015).

| Propiedad                    | Valor              |
|------------------------------|--------------------|
| Densidad (M,F)               | 0.93 g/cm3         |
| Índice de Fluidez (MFI)      | 13 g/10min         |
| Esfuerzo cizalla máx (τmax)  | 0.28 MPa           |
| Velocidad cizalla máx (γmáx) | 50 000 1/s         |
| Índice de comportamiento (n) | 0.8298314+03kg/m-s |

**Tabla 2.** Propiedades reológicas del Lustran ABS Elite HH 1827 (Tomas José Acosta, 2017).

Desde un punto de vista teórico, el flujo del polímero fundido en el moldeo por inyección resulta un problema reológico complejo ya que se trata del flujo no newtoniano, compresible y que recorre canales de geometría complicada. A continuación, se describe las etapas por las que pasa el material desde que abandona la cámara de plastificación hasta que

se extrae la pieza del molde, así como el efecto de las principales variables sobre las propiedades de la pieza moldeada. Estas toman en cuenta las variables que rigen el comportamiento del material dentro del molde (temperatura, velocidad, presión y tiempo).

*A) Calibración de un escenario de simulación para inyección de plástico ABS*

El proceso de simulación numérica requiere normalmente una etapa preliminar llamada “calibración”, que permite al analista determinar los parámetros apropiados que garanticen la convergencia de la solución, algunos de estos parámetros son:

1. Geometría: determinar algún tipo de simplificación geométrica: 2D, 3D, planos de simetría, etc.
2. Malla: determinar el tipo y calidad de elementos para discretizar el dominio.
3. Régimen de la solución: elección del régimen estacionario o transitorio según el requerimiento.
4. Modelos: elección de modelos matemáticos que gobiernen el fenómeno en cuestión.
5. Materiales: elección del material con sus propiedades (constantes o dependientes).
6. Variables de monitoreo (temperatura, presión, viscosidad, fases, turbulencias, etc.).

*B) Metodología para calibrar parámetros de simulación*

La Figura 1 muestra el ensamble del molde, en función de la ubicación y orientación de la cavidad (dominio del fluido); además, se determinan las simplificaciones geométricas mencionadas.

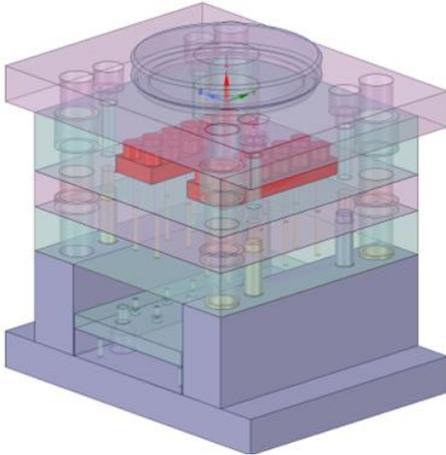


Figura 1. Molde de inyección de pieza de análisis.

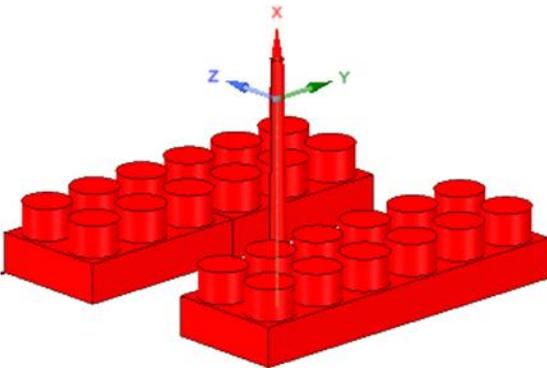


Figura 2. Dominio 3D de la pieza de análisis destinado a un análisis CFD.

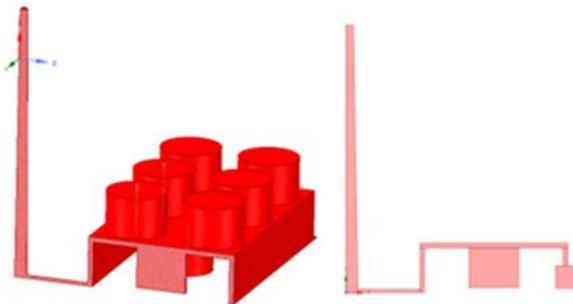


Figura 3. Dominio 2D de la pieza de análisis.

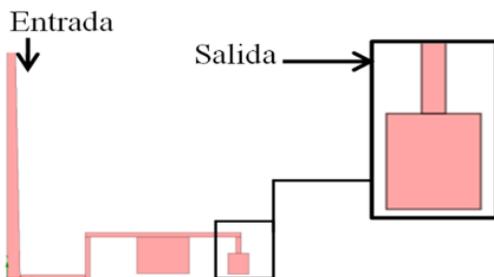


Figura 4. Condiciones de frontera del dominio 2D

Como se muestra en la Figura 2, para análisis de inyección de plástico ABS, la cavidad de la pieza debe convertirse en un sólido que posteriormente se discretizará para generar la malla. Se trata de un proceso de calibración donde se puede simplificar el dominio del fluido. Se observa en la Figura 3, que la geometría es simétrica y puede emplearse para generarse el dominio en 2D, con el cual se realiza el análisis. En términos generales, dicho dominio se usa con las condiciones de operación mostradas en la Figura 4; por otro lado, sus bordes son descritos como una condición de pared adiabática y sin rugosidad específica en un dominio 2D.

### C) Mallado

Para simulación del fluido plástico, se recomienda utilizar cuadriláteros para dominios 2D o hexaedros para dominios 3D; esto con el propósito de evitar difusión numérica, lo que resulta de gran utilidad para precisar el mallado en el caso de escenarios multifásicos y específicamente cuando el movimiento del fluido se alinea ortogonalmente con dichos elementos.

En algunas, ocasiones es necesario dividir el dominio para generar geometrías regulares que ayuden al software a crear cuadriláteros o hexaedros. En la Figura 5, se observa el dominio 2D mallado con cuadriláteros y algunos detalles de la división del dominio. Para el estudio, es necesario dividir la Figura 4 en una geometría regular que ayude al *software* a crear el mallado apropiado considerando los nodos y elementos adecuados.

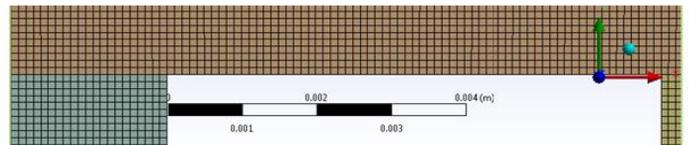


Figura 5. Cuadriláteros como elementos de mallado.

La discretización del dominio resultó en 25,855 elementos con una calidad mínima de 1 en la escala de ortogonalidad, donde el valor de 1 es el máximo valor de calidad y 0.15 como el mínimo requerido.

D) Preparación de la simulación

Para realizar la simulación, se utilizaron las siguientes propiedades para el fluido de inyección:

- Fluido adiabático: debido a que se pretende calibrar la dependencia de la viscosidad en función del esfuerzo al corte. Se consideran 2 fluidos segregados (aire y plástico ABS).
- Viscosidad laminar: debido a la naturaleza de un fluido no newtoniano
- Densidad de  $\rho = 930 \text{ kg/m}^3$

Modelos de viscosidad

El modelo de Carreau (ec. 2 y 3) representa un fluido que a baja velocidad de deformación sigue la Ley de Newton de la viscosidad, y a alta velocidad de deformación obedece la ley de la potencia.

$$\tau_{yx} = \left\{ \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) [1 + (\lambda \dot{\gamma})]^{\frac{n-1}{2}} \right\} \dot{\gamma} \quad (1)$$

$$\eta = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) [1 + (\lambda \dot{\gamma})]^{\frac{n-1}{2}} \quad (2)$$

Donde  $\mu_0$  es la viscosidad a baja velocidad,  $\mu_{\infty}$  es la viscosidad a alta velocidad,  $\lambda$  tiempo de relajación y  $\eta$  índice de comportamiento de la viscosidad

Modelo de viscosidad de Cross. La ecuación de la forma (ec. 3):

$$\frac{\mu_0 - \mu_s}{\mu_s - \mu_{\infty}} = [C_c \dot{\gamma}]^h \quad (3)$$

Donde;  $\mu_s$  es la viscosidad,  $C_c$  es una constante con unidades de tiempo y  $h$  una constante adimensional. Se puede observar que la ecuación asume que se debe conocer los valores de la viscosidad a baja y alta cizalladura  $\mu_0$  y  $\mu_{\infty}$  además de los parámetros  $C_c$  y  $h$ .

El modelo matemático de Cross/Carreau describe un comportamiento logarítmico que indica el descenso de la viscosidad ( $\mu$ ) cuando la velocidad de corte ( $\eta$ ) aumenta y (ec. 4) es gobernado por 3 parámetros que permanecerán constantes para un determinado tipo de polímero y que obedece al valor de la viscosidad del fluido ( $n < 1$ ):

$$\mu = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda * \dot{\gamma})^m} \quad (4)$$

donde:

$\mu$  = viscosidad dinámica del fluido (Pa.s).

$\eta_0$  = viscosidad a un valor de velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) de cero.

$\lambda$  = tiempo natural (inverso de la velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) donde el fluido cambia de newtoniano a no newtoniano).

$\dot{\gamma}$  = velocidad de corte del fluido

$m$  = índice de potencia =  $n - 1$ .

$n$  = índice de flujo (o comportamiento) de la ley de potencia donde tenemos los siguientes casos:

$n < 1$  fluido pseudoplastico

$n = 1$  fluido newtoniano

$n > 1$  fluido dilatante

Los 3 parámetros ( $\eta_0$ ,  $\lambda$ ,  $m$ ) se obtuvieron mediante la ayuda de la herramienta de simulación PolyMat que realiza un ajuste de curvas para fluidos no newtonianos.

La Tabla 3 muestra los datos experimentales utilizados para el polímero ABS.

| Tasa de corte (1/s) | Viscosidad (Pa.s) |
|---------------------|-------------------|
| 10000               | 15                |
| 2000                | 70                |
| 500                 | 210               |
| 100                 | 500               |

Tabla 3. Datos experimentales de polímero ABS.

Los valores encontrados para los parámetros son:

$$\eta_0 = 0.8298314 \text{ E}+03 \text{ kg/m-s}$$

$$\lambda = 0.1421445 \text{ E}-01 \text{ s}$$

$$m = 0.7222778 \text{ E}+00$$

Considerando que  $m = \text{índice de potencia} = n - 1$ , entonces  $n = 0.277777$

### Ventajas y desventajas de la aplicación del modelo Cross/Carreau

Representa un fluido que a baja velocidad de deformación sigue la Ley de Newton de la viscosidad, y a alta velocidad de deformación obedece la Ley de la potencia que tiene una limitada capacidad de predicción de la viscosidad en las cercanías de las regiones newtonianas a baja y alta tasa de cizalladura. La estructura de la ecuación (3) asume que se debe conocer los valores de las viscosidades newtonianas a baja y alta tasa de cizalladura, además de los parámetros  $C_c$  y  $h$ , los cuales deben ser determinados experimentalmente.

### Desventajas

Este modelo asume que la viscosidad varía siendo un fluido no newtoniano. Se tiene que obtener valores experimentales de  $\mu_\infty$ ,  $\mu_0$ ,  $\lambda$  y  $n$ . El método de diferencias finitas implica inherentemente la existencia de cifras residuales en cada iteración, las cuales pueden comportarse de diferente manera: aumentar o reducir de forma drástica o atenuada, todo depende del fenómeno simulado. En este caso los cambios entre cada iteración fueron drásticos debido a la variación de la densidad respecto a la velocidad de corte y de los cambios geométricos súbitos.

La Tabla 4 muestra los valores de relajación numérica ajustados para lograr que el caso convergiera en cada iteración y paso de tiempo (debido a que es un caso transitorio).

| Factores                | Valor |
|-------------------------|-------|
| Presión (Pa)            | 0.2   |
| Densidad                | 0.5   |
| Fuerzas sobre el cuerpo | 0.5   |
| Momento                 | 0.3   |
| Volumen fraccional      | 0.5   |

Tabla 4. Controles para el caso multifásico.

### Análisis de resultados

Los primeros intentos de simulación presentaron divergencias significativas, debido a que la primera fase (plástico ABS) presenta viscosidades grandes en comparación con la segunda (aire) y los gradientes

de velocidad varían significativamente debido a los cambios geométricos. Con el ajuste de los métodos de solución y controladores, se lograron convergencias aceptables en cada etapa del periodo simulado; es decir, a medida que el flujo avanzaba (tendencia a un sistema estable), los residuales bajaban aún más.

La Figura 6 muestra la escala residual donde puede verificarse que aproximadamente a las 125,000 iteraciones, la ecuación de continuidad baja debido a que el plástico ABS ha salido por la frontera y el balance de masa se equilibra; por el contrario, las ecuaciones de momento y turbulencia (laminar) aumentan un poco sin dejar de estar dentro del criterio establecido para la convergencia, esto debido a la interacción de las dos fases en la salida.

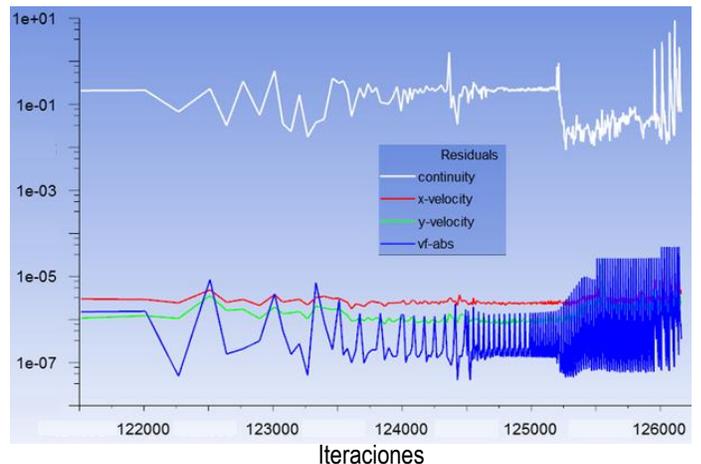


Figura 6. Escala de residuales.

### Tiempo transcurrido

El caso del análisis es una simulación en estado transitorio, por ello se definió un paso de tiempo y número de pasos a ejecutar:

1. Tiempo de paso promedio (tsp): 0.000545
2. Número de pasos promedio (N ts): 6309
3. Tiempo total transcurrido (t): 3.53254 segundos.

Se presentan los resultados de los contornos de velocidad en Figuras 10, 11 y 12.

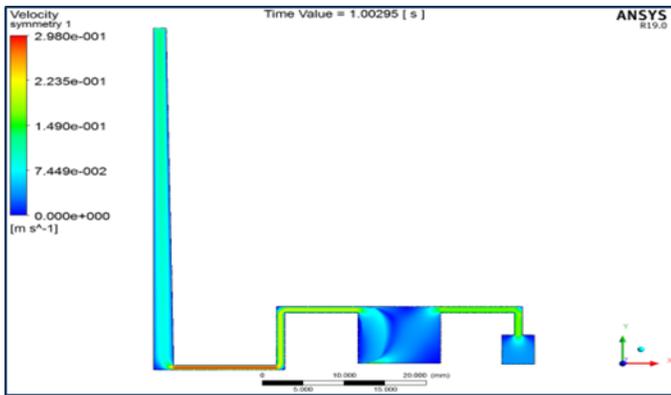


Figura 10. Contorno de velocidad a 1.0s.

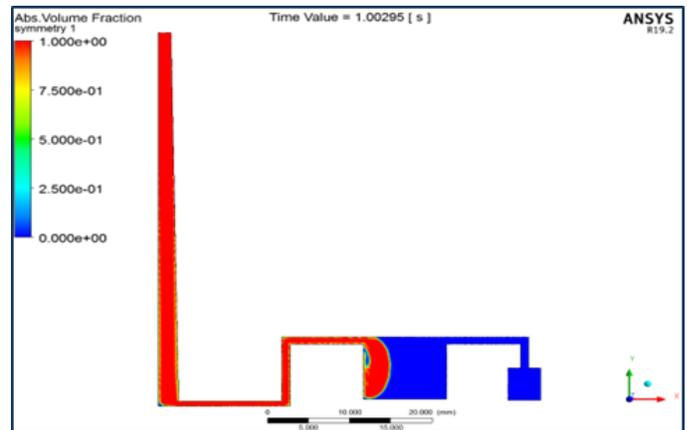


Figura 13. Contorno de fase 1.0 s.

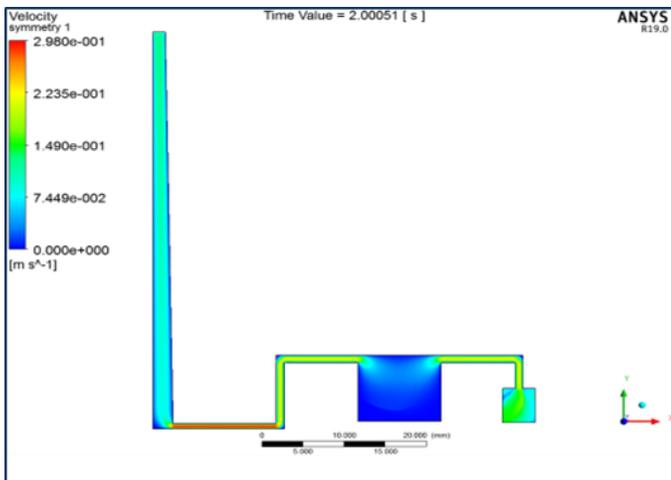


Figura 11. Contorno de velocidad a 2.0 s.

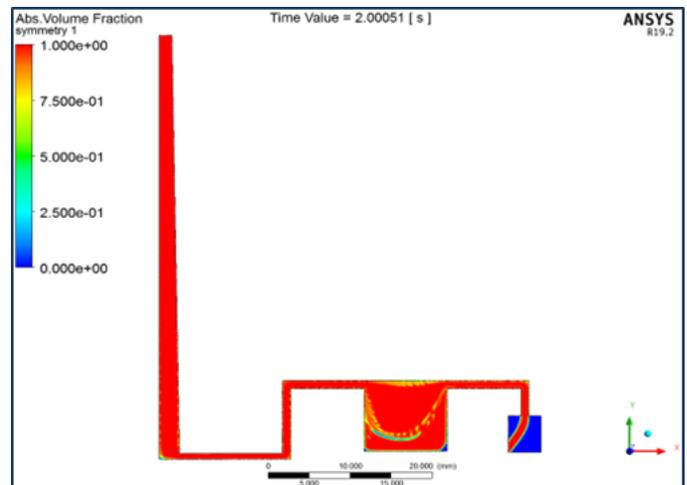


Figura 14. Contorno de fase 2.0 s.

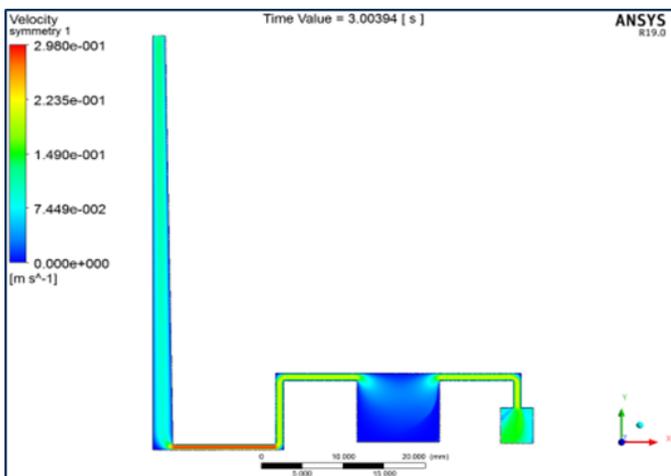


Figura 12. Contorno de velocidad a 3.0 s.

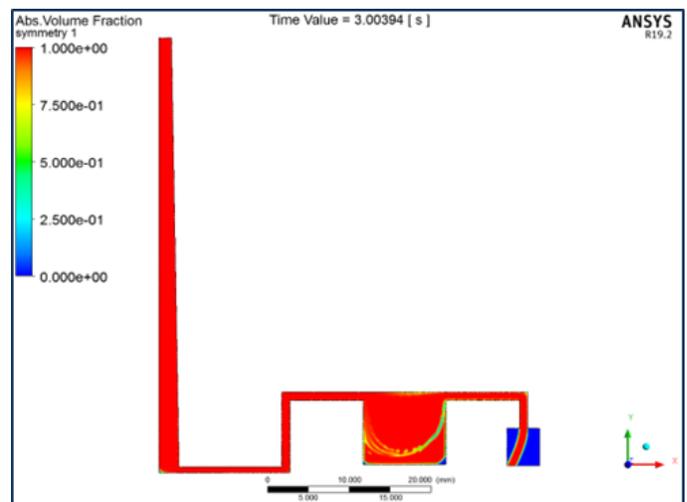


Figura 15. Contorno de fase 3.0 s

Mientras que las Figuras (13, 14 y 15) muestran los contornos de fase (plástico ABS y aire).

La fase de color rojo muestra que la cavidad del molde contiene el 100% de plástico ABS, mientras que el contorno indicado en azul muestra que en la cavidad existen algunas trazas de aire. De las Figuras 10 a la 15, se observa lo siguiente:

- La cavidad se llena a los 2 segundos presentando solo algunas trazas de aire atrapado que paulatinamente va saliendo.
- A partir de estos 2 segundos, se observa una estabilidad del sistema ya que el balance de masa es alcanzado casi al 100% (aproximadamente 125,000 iteraciones)

| Tiempo (s) | Contorno de velocidad   | Contorno de fase  |
|------------|---|---|
| 1          | Turbulencia significativa del aire (azul claro) en la cavidad del molde | Inicio de la inyección del fluido en forma laminar                    |
| 2          | Reducción de la turbulencia   | Desplazamiento del aire con pequeñas trazas                           |
| 3          | Sin cambios significativos respecto a la turbulencia del aire           | Reducción la turbulencia, cavidad llena y preparada para la expulsión |

**Tabla 5.** Cambios del desplazamiento del polímero

## Conclusión

Del artículo, se puede observar que la simulación numérica es una herramienta poderosa para predecir el comportamiento de un sistema antes de construir el prototipo; sin embargo, existe la premisa de que el usuario debe atender con particular cuidado dos aspectos: la veracidad de la información que ingresa al simulador y la robustez de los modelos matemáticos.

Respecto a la veracidad de la información, podemos argumentar que los parámetros que cualifican al material plástico ABS determinado en PolyMat ( $\eta_0$ ,  $\lambda$ ,  $m$ ), están calculados con base en datos experimentales y que el ajuste de la curva (para determinar dichos parámetros) es preciso.

Sobre la robustez de los modelos matemáticos, se concluye que los parámetros ajustados para el algoritmo de *Fluent* fueron adecuados y el caso se

solucionó con los criterios de convergencia estándar (masa, momento y fases convergidos a  $\times 10^{-3}$ ).

Finalmente, con los datos ajustados se podrá proceder a un análisis del llenado de un molde completo para fabricar la pieza plástica y, dependiendo del método de solución, podrían requerirse el ajuste de otros parámetros. Es importante mencionar que los resultados que se han obtenido corresponden a la calibración del proceso; en una segunda etapa, se realizará la impresión y comparación con lo que predice el modelo utilizado. Cabe aclarar que la malla fue elaborada con hexaedros (recomendado) y es responsabilidad del analista ajustar un tamaño adecuado para los datos de simulación.

## Referencias

- Askeland, D. R. (2017). *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Mexico: Cengage.
- Babilonia, G., Simeón, R. & Arzola, J. (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.
- Cengel, Y. A. (2015). *Transferencia de Calor y Masa*. México: Mc Graw Hill.
- Fonseca, E., Pelliccioni, O., Osswald, T. & Aquite, W. (2014). Simulación del llenado de moldes con el uso de OpenFOAM. *Jornadas de Investigación. Encuentro Académico Industrial (Jifi)*.
- 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), pp. 879-890.
- Ivascu, N., Fetecau, C. & Hill, R. (2010). Dynamic Temperature Control in Injection Molding with Conformal Heating/Cooling System. *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati Fascicle IX. Metallurgy and Materials Science*.
- Jack Philip, H. (2002). *Transferencia de Calor*. En H. Jack Philip (ed), *Transferencia de Calor*. New York: Mc Graw Hill.

- Kern, D. Q. (1999). Procesos de Transferencia de Calor. En D. Q. Kern (ed), *Procesos de Transferencia de Calor*. Mexico: Continental.
- Kreith, F. (2012). *Principios de Transferencia de Calor*. México: Cengage.
- Miranda, D. A. (2018). Influencia de la geometría de malla y el refinamiento de malla en modelos matemáticos de herramientas de simulación de inyección termoplástica. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 15.
- Network, A. (2019). *Azo Materials*. Obtenido de Azo Materiales: Obtenido de <https://www.azom.com/articles.aspx>
- Rohrig, B. (2019). *Chemical matters*. Obtenido de [www.acs.org/chemmatters](http://www.acs.org/chemmatters)
- Saifullah, A. & Masood, S. (2007). Finite Element Thermal Analysis of conformal cooling channels in injection moulding. 5th Australian Congress on Applied Mechanics, ACAM 2007. Brisbane, Australia.
- Simulación, U.I. (2012). *UX Ingeniería de simulación*. Obtenido de <https://uxcfid.com/2012/11/16/número-de-courant-cfl-e-condicao-cfl/>
- Styrolution, I. (2015). Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS). Propiedades Típicas Generales. *Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)*, pp.30-34.
- Tello, F. (2011). Introducción a la Mecánica de Fluidos. Obtenido de <http://mecanicadefluidosft.blogspot.com/2011/09/>
- Tomas José Acosta, C. (2017). *Metacrilatos*. México: Net.