

## Aplicación de ecuaciones reológicas para el equilibrado de canales en moldes de inyección de plástico

**Yuri H. Villalta Elejalde**

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

**Orestes Arias Rodríguez**

Especialidad: Ingeniería mecánica

Instituto Tecnológico de la Habana (CUJAE) (Cuba)

**Resumen:** Se desarrolló una metodología para equilibrar el llenado en moldes de inyección de plástico multicavidades utilizando ecuaciones reológicas. La metodología fue aplicada en el diseño del sistema de alimentación para el molde de dos piezas de un equipo médico, destinado a pacientes con padecimientos cardíacos. Ambas piezas, debido a su diferencia de volumen, suponían un problema durante el llenado del molde. Se propuso un sistema de alimentación simétrico, dimensionado, según recomendaciones empíricas generales. Se planteó la metodología para el equilibrado del sistema, variando el diámetro de uno de los canales de entrada. Las expresiones para el cálculo corresponden a un flujo no newtoniano, cuyo comportamiento es pseudoplástico y fueron obtenidas partiendo de la generalizada de Navier-Stokes, para luego aplicar el modelo matemático de Ostwald-De Waele (Ley de potencia). Mediante las expresiones obtenidas se calculó el diámetro necesario en el canal de llenado correspondiente a la cavidad de menor volumen, con el objetivo de igualar los tiempos de llenado en ambas cavidades. Los resultados obtenidos fueron comprobados mediante una simulación de llenado realizada en *Autodesk Moldflow Adviser*.

**Palabras clave:** canales; alimentación; simulación; plásticos; inyección; equilibrado.

## Application of rheological equations for channel balancing in plastic injection molds

**Abstract:** A methodology was developed to balance the filling in multi-cavity plastic injection molds, using rheological equations. This methodology was applied in the design of the feeding system for the mold of two pieces of a medical equipment, destined to patients with cardiac diseases. Both pieces due to their difference in volume posed a problem during the filling of the mold. Firstly, a symmetrical feeding system was proposed, sized according to general empirical recommendations. The methodology for balancing the system was plated by varying the diameter of one of the input channels. The expressions for the calculation correspond to a non-Newtonian flow whose behavior is pseudoplastic and were obtained starting from the generalized Navier-Stokes, to then apply the mathematical model of Ostwald-De Waele (Law of power). By means of the obtained expressions, the necessary diameter was calculated in the filling channel corresponding to the cavity of smaller volume, in order to match the filling times in both cavities. The results obtained were verified through a simulation of filling done in Autodesk Moldflow Adviser.

**Key words:** channels; feeding; simulation; plastics; injection; balanced.

## Introducción

La reología es una rama de la física que trata los problemas de deformación del flujo bajo esfuerzos. En particular se enfoca en las propiedades que determinan su comportamiento cuando una fuerza es aplicada sobre el fluido. En los últimos años el tema ha sido de gran interés debido a su variada aplicación en la industria, en particular en el diseño de los canales de alimentación en los moldes de inyección de plástico (Shoemaker, 2011). Un diseño de un sistema de alimentación se considera válido cuando está correctamente balanceado, es decir, cuando se garantiza que todas las cavidades del molde se llenan al mismo tiempo y la caída de presión en las cavidades son similares. Debido a que el plástico fundido no se corresponde con la ley de viscosidad de Newton se han propuesto muchos modelos matemáticos para describir su comportamiento. Los modelos más utilizados son: modelo para plásticos de Bingham, la ley de la potencia de Ostwald-De Waele, modelo de Cross-Carreau y modelo de Newton (Rao, 2013). Muchas investigaciones han sido realizadas en este campo, tal como se relaciona a continuación.

Sánchez, Vial y Moraga (2002) proponen, mediante los métodos de los volúmenes y de los elementos finitos, analizar el comportamiento pseudoplástico de algunos fluidos. Los autores, en el primer método, se basan en la resolución de la ecuación de momentum lineal y de continuidad; en el segundo se utiliza un código propio en lenguaje FORTRAN 90. Ambas soluciones están basadas en la ley de potencia de Ostwald-De Waele. En su investigación exponen la importancia del desarrollo de herramientas para el estudio de estos fluidos.

Mahantal, Dharmasaktu & Pattnayak (2007) determinan el comportamiento reológico del combustible (HTPB), el cual en su composición presenta un gran porcentaje de aglutinante polimérico. Para modelar el comportamiento del fluido se utilizó el modelo de la ley de potencia, mediante el cual se calculó el índice de comportamiento del material. La caracterización fue realizada mediante experimentos, en los cuales se midió la viscosidad para distintos valores de velocidad de deformación; los resultados de dichos experimentos arrojaron un comportamiento pseudoplástico del material.

Sadiku y demás investigadores (2011) realizaron una revisión bibliográfica acerca del tema, y resaltaron la importancia de las propiedades reológicas en la solución de problemas relacionados con polímeros fundidos y mezclas de polímeros. En 2012 Szucs

y Belina investigaron acerca del comportamiento reológico del material plástico TIPOLEN FA2210 en el interior de un molde de inyección diseñado específicamente para esta investigación; en el molde fueron colocados sensores para medir la presión en el interior de la cavidad. Para elaborar las curvas de viscosidad real para cada medición se utilizó el modelo de la ley de potencia. Señalar que el análisis se realizó durante una inyección directa a la cavidad donde las velocidades generan altas velocidades de deformación. El método no caracterizó el fluido en canales circulares y semicirculares que son los más comunes.

Li, Wang & An (2014) investigaron el comportamiento reológico de un combustible (CL-20/HTPB) similar al analizado por Mahantal, Dharmasaktu & Pattayak (2007). Centrarón su estudio en el comportamiento de dicho combustible cuando son agregados diferentes plastificantes (DOA, DOS y DBP). Para el análisis y cálculo de las propiedades reológicas fue utilizada la ley de potencia.

La revisión bibliográfica muestra que el modelo de la ley de potencia es uno de los métodos más adecuados para modelar el comportamiento de los fluidos pseudoplásticos dentro de capilares, debido a que el rango de velocidades de deformación que se presenta durante el proceso de inyección puede explicar el comportamiento newtoniano, dilatante y pseudoplástico. En este trabajo se utiliza este modelo como herramienta de cálculo para equilibrar canales en sistemas de alimentación en moldes de inyección. El método propuesto puede ser aplicado en casos de sistemas de alimentación de mediana complejidad, sin necesidad de recurrir a costosas herramientas CAE, de las que muchas veces no se dispone.

### **Descripción 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. Para su fabricación se propone un molde que contiene ambas cavidades interconectadas por el sistema de alimentación.



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

### Descripción general del polímero utilizado

El polímero utilizado en los cálculos es el Lustran ABS Elite HH 1827; este se caracteriza por su excelente fluidez y estabilidad durante el llenado. La temperatura recomendada para procesar dicho material es 260 °C para la masa fundida y 80 °C para el molde. De las propiedades reológicas mostradas en la siguiente tabla el MFI es la más importante para definir la calidad del polímero en cuanto a fluidez (Younes, 2015).

Tabla 1. Propiedades reológicas del Lustran ABS Elite HH 1827

Propiedad	Valores
Densidad (M.F)	0,93 g/cm <sup>3</sup>
Índice de fluidez (M.F.I)	13 g/10min
Esfuerzo de cizalla máx ( $\tau_{max}$ )	0,28 MPa
Velocidad de cizalla máx ( $\dot{\gamma}_{max}$ )	50 000 1/s
Índice de comportamiento (n)	0,2862

### Caracterización del sistema de alimentación

El sistema de alimentación estudiado consta de un bebedero, un distribuidor, dos canales de entradas y dos entradas. La masa de material fundido es suministrada a presión a través del bebedero hasta el distribuidor y transportada a cada cavidad por los canales de entrada. La alimentación inicialmente está concebida de forma simétrica de manera que el bebedero se encuentra ubicado en el centro de ambas cavidades (Figura 2). Esta forma de alimentación garantiza la misma cantidad de material para ambas piezas. En nuestro caso los volúmenes y la complejidad de las cavidades varían lo cual sugiere que la pieza de menor volumen tiene un tiempo de llenado inferior a la pieza que tiene mayor volumen.

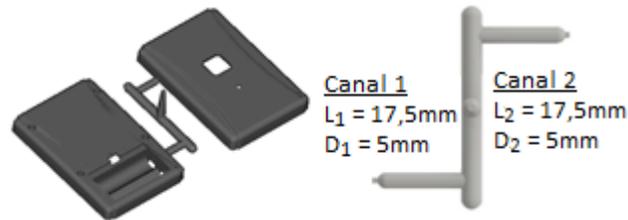


Figura 2. Sistema de alimentación simétrico conectado a las dos cavidades.

El tiempo de llenado es uno de los principales parámetros a controlar a la hora de equilibrar un sistema de alimentación, si se calcula por exceso expone a las piezas a posibles defectos y deformaciones, al igual que un tiempo de llenado bajo puede no ser suficiente para el llenado completo de la cavidad. Obtener un tiempo de llenado óptimo puede representar un pequeño ahorro de tiempo, pero contribuye a la obtención de piezas de buena calidad.

### **Procedimiento propuesto para equilibrar el sistema de alimentación**

Para lograr un sistema de alimentación equilibrado es necesario realizar modificaciones a la geometría de los conductos, con el objetivo de lograr un perfil de llenado similar en ambas cavidades; en este caso dichas modificaciones se realizan al canal de entrada, variando su diámetro y manteniendo constante la longitud de los mismos. Una vez realizada las modificaciones el sistema debe ser capaz de suministrar el flujo de plástico requerido para el llenado de cada cavidad con el mismo tiempo de llenado para ambas, minimizando así la sobrecompactación del material en una de las cavidades. Para lograr el equilibrio del flujo en el sistema se siguen los siguientes pasos:

1. Definir un sistema de alimentación simétrico.
2. Aplicar el modelo de Ostwald-De Waele en los canales de entrada para obtener la expresión del diámetro.
3. Estimar un tiempo de llenado para cada cavidad según el volumen a inyectar.
4. Calcular el flujo y la velocidad de cizalla según el tiempo estimado.
5. Igualar los tiempos de llenado.
6. Calcular el nuevo flujo.
7. Calcular el nuevo diámetro para el flujo calculado.

**Obtención de las ecuaciones**

Para describir el comportamiento de fluidos no newtonianos durante el proceso de inyección la ecuación constitutiva utilizada es el modelo de la ley de potencia (Joshi *et al.*, 2002), expresado por la siguiente ecuación:

$$\eta = K * \left( \frac{\partial V_z}{\partial z} \right)^{n-1} \tag{1}$$

Donde ( $\eta$ ) se refiere a la viscosidad del material fundido, ( $V_z$ ) es la velocidad lineal del fluido, ( $K$ ) el índice de consistencia del material y ( $n$ ) es el índice de comportamiento. En el caso que ( $n=1$ ) el modelo representa el comportamiento newtoniano, si ( $n>1$ ) se refiere a los fluidos dilatantes y si ( $n<1$ ) describe el comportamiento de los pseudoplásticos.

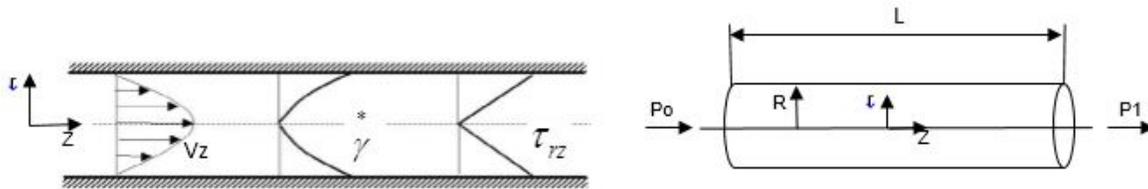


Figura 3. Esquema de comportamiento del fluido en el interior del canal de entrada.

La ecuación generalizada de Navier-Stokes del fluido en movimiento en la dirección del eje "z" puede ser escrita como [3,10]

$$\rho \left( \frac{\partial V_z}{\partial t} + u \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \eta \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) \tag{2}$$

Si se considera el flujo estacionario ( $\partial V_z / \partial t = 0$ ), completamente desarrollado ( $\partial V_z / \partial z = 0$ ,  $\partial^2 V_z / \partial z^2 = 0$ ) y la gravedad y el flujo en la dirección de "x" despreciable ( $\rho g_z = 0$ ,  $\partial^2 V_z / \partial x^2 = 0$ ), entonces la ecuación para los fluidos no newtonianos puede ser escrita de la siguiente forma:

$$0 = - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \eta \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) \tag{3}$$

Conociendo que la caída de presión a lo largo del canal será de forma lineal se puede plantear que  $(\partial P/\partial z = (P_0 - P_L)/L)$ . Para fluidos poliméricos a través de canales circulares el esfuerzo de corte ( $\tau$ ) varía linealmente desde cero en el centro del conducto hasta su valor máximo en la pared del mismo. La velocidad de cizalla ( $\gamma = \partial V_z/\partial r$ ) cambia de manera no lineal desde cero (en el centro del conducto) hasta su valor máximo en la pared del canal. El perfil de velocidad ( $V_z$ ) es aproximadamente parabólico con un máximo valor en el plano de simetría y aproximadamente 0 en la pared [9]. (Figura 3). La ecuación 3 puede ser resuelta con la apropiada condición de contorno, para definir el comportamiento del flujo. Basado en la relación existente entre ( $\tau$ ) y ( $\gamma$ ) para un fluido pseudoplástico se obtiene la siguiente expresión.

$$\tau = K \left( \frac{\partial V_z}{\partial r} \right)^n \tag{4}$$

Sustituyendo la expresión (1) en (3) se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = K * \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial V_z}{\partial r} \right)^n \tag{5}$$

Integrando la ecuación 5 con respecto a "r" y obteniendo la expresión de la constante de integración, para la velocidad del fluido se forma la expresión 6, que define el perfil de velocidades del fluido (Rodríguez *et al.*, 2009).

$$V_z = \left( \frac{\Delta P}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} * \frac{n}{n+1} * R^{\frac{n+1}{n}} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \tag{6}$$

Es conveniente realizar los cálculos con una velocidad promedio del fluido, definida en la siguiente ecuación:

$$\langle V_z \rangle = \frac{2\pi \int_0^R V_z dr}{2\pi \int_0^R r dr} = \left( \frac{\Delta P}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} * R^{\frac{n+1}{n}} \left[ 1 - \frac{2n}{3n+1} \right] \tag{7}$$

Una vez determinada la expresión de la velocidad media del fluido se puede precisar el flujo volumétrico multiplicando la expresión (7) por el área de la sección transversal, según plantea la ecuación (10).

$$Q = \left( \frac{\Delta P}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} * R^{\frac{n+1}{n}} \left[ 1 - \frac{2n}{3n+1} \right] * \pi R^2 \quad (8)$$

Si se expresan los términos de la ecuación (8) según el modelo de la ley de potencia se obtiene que:

$$\frac{R * \Delta P}{2 * L} = K \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^n \left( \frac{4 * Q}{\pi R^3} \right)^n \quad (9)$$

Al observar la ecuación 11 se aprecia que los términos que multiplican al índice de consistencia (K) corresponden a la velocidad de corte, por tanto:

$$\gamma = \left( \frac{3n+1}{4n} \right) \left( \frac{4 * Q}{\pi R^3} \right) \quad (10)$$

Para conocer el valor del diámetro necesario para que circule por los canales un determinado volumen del polímero fundido en un tiempo determinado se plantea que:

$$R = \sqrt[3]{\left( \frac{3n+1}{4n} \right) \left( \frac{4 * Q}{\pi * \gamma} \right)} \quad (11)$$

### **Cálculo analítico de los parámetros de flujo ( $Q$ , $\gamma$ )**

Con todas las expresiones antes planteadas se pueden calcular los parámetros para el sistema de alimentación simétrico propuesto inicialmente (  $R_1 = R_2 = 2,5 \text{ mm}$  ).

Para efectuar estos cálculos primero se debe conocer el gasto volumétrico en cada canal de alimentación de acuerdo con el tiempo de llenado deseado. Los tiempos de llenado en moldes de inyección se encuentran en un rango de (1,5 - 3 s) para piezas pequeñas. En la cavidad de mayor volumen se puede suponer un tiempo mínimo de 1,5 s. Para la cavidad de menor se sugiere un tiempo de 1,4 s debido a la relación existente entre los volúmenes de ambas, siendo así se plantea que:

$$Q_1 = \frac{Vol_1}{t_1} = \frac{18,5cm^3}{1,5s} = 12,3cm^3/s$$

$$Q_2 = \frac{Vol_2}{t_2} = \frac{17,4cm^3}{1,4s} = 12,4cm^3/s$$

$$\gamma_2 = \left( \frac{3n+1}{4n} \right) \left( \frac{4*Q_2}{\pi R_2^3} \right) = 1660,4 1/s$$

$$\gamma_1 = \left( \frac{3n+1}{4n} \right) \left( \frac{4*Q_1}{\pi R_1^3} \right) = 1629,5 1/s$$

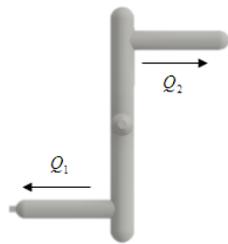


Figura 4. Esquema del sistema de alimentación simétrico.

### Equilibrado del sistema de alimentación.

Para lograr un sistema de alimentación equilibrado se igualan los tiempos de llenado de ambas cavidades. Se debe igualar el tiempo de llenado de la menor cavidad de menor volumen a la de cavidad de mayor volumen ( $t_2 = t_1 = 1,5segundos$ ). Con esta solución disminuye ( $R_2$ ).

Sustituyendo el nuevo tiempo de llenado ( $t_2 = 1,5segundos$ ) en la ecuación de flujo volumétrico se obtiene el nuevo gasto volumétrico que circula por el canal.

$$Q_2 = \frac{Vol_2}{t_2} = \frac{17,4cm^3}{1,5s} = 11,6cm^3/s$$

Al sustituir en la expresión (11) se consigue la nueva dimensión para el radio del canal.

$$R_2 = \sqrt[3]{\left( \frac{3n+1}{4n} \right) * \left( \frac{4*Q_2}{\pi * \gamma_2} \right)} = 0,0024 m$$

$$D_2 = 4,8mm$$

### Simulación computacional del llenado de las cavidades

Para que el sistema de alimentación sea válido es necesario que, con las modificaciones realizadas al canal de llenado correspondiente a la carcasa superior, se garantice el mismo tiempo de llenado para todas las cavidades. La comprobación de los resultados obtenidos fue realizada en el software CAE Autodesk Moldflow Adviser, donde se modeló el sistema de alimentación equilibrado (Figura 6) con el objetivo realizar una simulación del proceso de llenado. Para dicha simulación se fijaron los parámetros del proceso según las características del polímero procesado (Tabla 2).

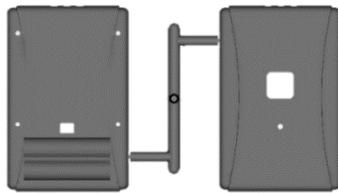


Figura 5. Esquema del modelo a simular.

Tabla 2. Parámetros para la simulación de llenado

Parámetros	Valores
Presión de inyección	70 MPa
Temp. del molde	80 °C
Temp. de inyección	260 °C

Tabla 3. Configuración nueva de los canales

Parámetros	Valores
Diámetro del canal 1 ( $D_1$ )	5 mm
Diámetro del canal 2 ( $D_2$ )	4,8 mm
Largo del canal 1 ( $L_1$ )	17,5 mm
Largo del canal 2 ( $L_2$ )	17,5 mm

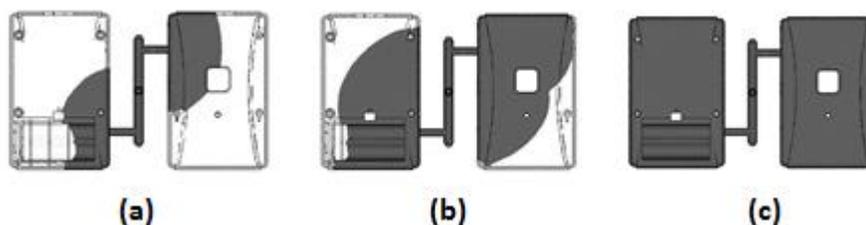


Figura 6. Perfil de llenado obtenido durante la simulación. a: Parcial, b: Medio, c: Completo.

Tabla 4. Resultados de la simulación de llenado

Parámetros	Valores
Tiempo de llenado (Cav. 1)	1,51 s
Tiempo de llenado (Cav. 2)	1,47 s
Caudal en el canal 1	12 $cm^3 / s$

Caudal en el canal 2	11,8 $cm^3/s$
Vel. de cizalla canal 1	1 600,7 1/s
Vel. de cizalla canal 2	1 573,4 1/s

## Resultados y discusión

La Figura 7 muestra el resultado del tiempo máximo de llenado para ambas cavidades; las áreas señaladas en rojo representan el último lugar donde llega el flujo de plástico fundido. Luego de las modificaciones realizadas para el equilibrado de los canales las dos cavidades presentaron un patrón de llenado similar y se obtuvo tiempos de llenado iguales para (1,51 s) en ambas piezas.

Tabla 5. Parámetros medidos en el canal 1

Parámetros	Valores
Temp. en el frente del flujo	259,9 °C
Pérdida de presión	12,33 MPa
Tiempo de llenado	0,1207 s
Esfuerzo de cizalla	0,2279 MPa
Vel. de cizalla	1 600,7 1/s

Tabla 6. Parámetros medidos en el canal 2

Parámetros	Valores
Temp. en el frente del flujo	259,8 °C
Pérdida de presión	13,08 MPa
Tiempo de llenado	0,1247 s
Esfuerzo de cizalla	0,2249 MPa
Vel. de cizalla	1 573,4 1/s

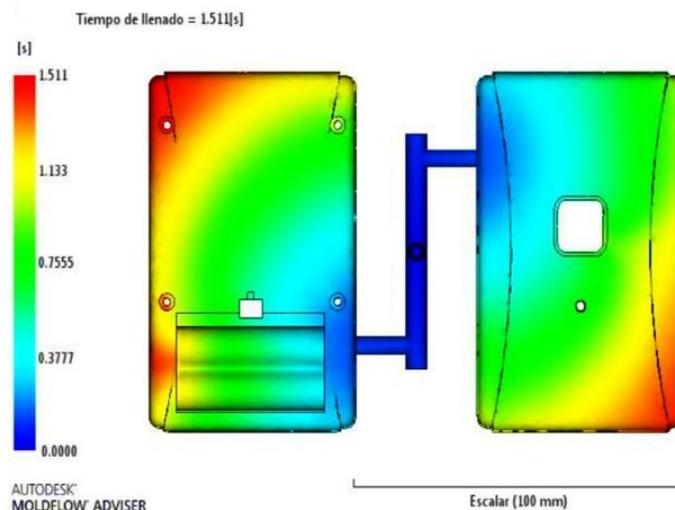


Figura 7. Resultados de la simulación de llenado (tiempo de inyección).

Mediante la simulación se obtuvieron los resultados del tiempo de inyección y velocidad de cizalla para ambas cavidades (Tabla 1 y 2), comprobándose que el llenado se realiza de forma equilibrada en ambas cavidades (Figura 7). Según se muestra en la

Tabla 7 las columnas de los parámetros simulados (columnas 2 y 4) corresponden a los resultados de la simulación y las columnas 3 y 5 a los cálculos realizados analíticamente. La diferencia entre los valores de los flujos simulados y calculados se obtiene en la columna 6; el flujo volumétrico obtenido mediante la simulación computacional fue calculado mediante la expresión (11). Luego de calcular el flujo se obtiene el valor real del tiempo de llenado para las cavidades durante la simulación y se valora si existe algún desfase durante el proceso de llenado. Mediante la comparación de ambos parámetros se puede comprobar cuán cerca se encuentra el método analítico del computacional, para así utilizar uno u otro indistintamente según se requiera.

Tabla 7. Comparación entre los parámetros calculados y obtenidos por simulación

Canal	Velocidad de cizalla (Simulación)	Velocidad de cizalla (Calculada)	Flujo Volumétrico (Simulación)	Flujo Volumétrico (Calculada)	Diferencia entre flujos
Canal 1	1 600,7 1/s	1 629,5 1/s	12 $cm^3 / s$	12,3 $cm^3 / s$	+0,3 s
Canal 2	1 573,4 1/s	1 660,4 1/s	11,8 $cm^3 / s$	11,6 $cm^3 / s$	- 0,2 s

La Tabla 7 muestra la comparación de los resultados obtenidos con los cálculos que emplearon las ecuaciones reológicas y los obtenidos mediante la simulación con Moldflow Adviser. La diferencia entre los flujos calculados con ecuaciones reológicas y los simulados a través del Moldflow Adviser es mínima. Sin embargo, la desviación entre la velocidad de cizalla calculada y la simulada para ambos canales es un poco mayor; esta diferencia es la responsable de la desviación existente entre los tiempos de llenado (calculado y simulado). Las desviaciones de los tiempos están referidas a 1,5 s, ya que fue el tiempo prefijado para ambas cavidades en los cálculos analíticos. La cavidad 2, al llenarse durante la simulación en un tiempo de 1,47 s, presenta una desviación de -0,03 s y la cavidad 1, al hacerlo en 1,51 s, tiene como desviación +0,01 s.

## Conclusiones

Para equilibrar sistemas de alimentación en moldes multicavidades con volúmenes diferentes se pueden implementar modelos matemáticos basados en ecuaciones reológicas. Con la utilización del modelo matemático de la ley de potencia se obtienen parámetros de flujos similares a los conseguidos mediante la simulación de llenado realizada con *Autodesk Moldflow Adviser*. Esta similitud de resultados se comprueba mediante la comparación entre los flujos volumétricos. Se concluye que el modelo de

la ley de potencia y las ecuaciones reológicas pueden ser una solución eficaz para el equilibrado de canales.

### Referencias bibliográficas

- JOSHI, S. C.; LAM, Y. C.; BOEY, F. Y. C. & TOK, A. I. Y. 2002. Power law fluids and Bingham plastics flow models for ceramic tape casting. *Journal of Materials Processing Technology* 120(1): 215-225.
- LI, H. X.; WANG, J. Y. & AN, C. W. 2014. Study on the rheological properties of CL-20/HTPB casting explosives. *Central European Journal of Energetic Materials* 11(2): 237-255.
- MAHANTA, A. K.; DHARMAKTU, I. & PATTNAYAK, P. K. 2007. Rheological Behaviour of HTPB-based Composite Propellant: Effect of Temperature and Pot Life on Casting Rate. *Defence Science Journal* 57(4): 435-442.
- RAO, M. A. 2013. *Rheology of fluid, semisolid and solid foods, food engineering series*. 3 ed. Springer Science & Business Media, NY, 461 p. ISBN: 978-1-4614-9229-0.
- RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, F.; PÉREZ-GONZÁLEZ, J.; MARÍN-SANTIBÁÑEZ, B. M. & DE VARGAS, L. 2009. Kinematics of the stick-slip capillary flow of high-density polyethylene. *Chemical Engineering Science* 64(22): 4675-4683. Consultado: 3 julio 2017. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/ces>.
- SADIKU-AGBOOLA, O.; SADIKU, R. E.; ADEGBOLA, A. T. & BIOTIDARA, O. F. 2011. Rheological properties of polymers: structure and morphology of molten polymer blends. *Materials Sciences and Applications* 2: 30-41. Consultado: 9 oct 2017. Disponible en: <http://www.SciRP.org/journal/msa>.
- SÁNCHEZ, G.; VIAL, C. & MORAGA, N. 2002. Estudio de fluidos no newtonianos con los métodos de volúmenes y elementos finitos. *Revista Facultad de Ingeniería-Universidad de Tarapacá* 10: 23-34.
- SHOEMAKER, J. 2011. *Moldflow Design Guide*. First ed. Moldflow Corporation, Framingham, Massachusetts, U.S.A.

SZUCS, A. & BELINA, K. 2012. *Rheological and thermal analysis of the filling stage of injection molding*. *EXPRESS Polymer Letters* 6: 672-679. Consultado: 11 agosto 2017.

YOUNES, B. 2015. Simple Rheological Analysis Method of Spinnable-Polymer Flow Properties Using MFI Tester. *Indian Journal of Materials Science* 2015: 1-8.