

## SIMULACIÓN Y DISEÑO DE MATRICES DE EXTRUSIÓN DE CAUCHO

### SIMULATION AND DESIGN OF RUBBER EXTRUSION DIES

**Bruno A. Toscano<sup>a,b</sup>, Laura G. Di Gialleonardo<sup>a,c</sup> y Jorge Kuster<sup>a,d</sup>**

<sup>a</sup>Grupo de Investigación de Neumáticos FATE, Blanco Encalada 3003 B1644GPK Victoria -  
Provincia de Buenos Aires, <sup>b</sup>[btoscano@fate.com.ar](mailto:btoscano@fate.com.ar), <sup>c</sup>[ldigialleonardo@fate.com.ar](mailto:ldigialleonardo@fate.com.ar),  
<sup>d</sup>[jkuster@fate.com.ar](mailto:jkuster@fate.com.ar), <http://www.fate.com.ar>

**Palabras clave:** matriz de extrusión, uniformidad de flujo, diseño, goma, neumático, caucho

**Resumen.** El proceso de extrusión es una de las áreas clave en la industria del neumático ya que por medio de este proceso se producen distintos tipos de semielaborados que luego van a conformar la cubierta (rodados, costados, etc.). Durante la extrusión, los compuestos de caucho se comportan como un fluido viscoelástico y el diseño de las matrices se basa en la experiencia del diseñador. En este trabajo se utilizó simulación numérica para entender y mejorar el proceso de diseño de matrices. Para ello, primero se simuló el flujo de caucho a través de la matriz para lograr una distribución uniforme a la salida de ésta. Luego se modeló el flujo de material a la salida de la matriz permitiendo predecir el perfil del extrudado. Por último, se simuló y optimizó el inserto del canal de flujo a la salida de la extrusora. Las simulaciones se realizaron con el software ANSYS Polyflow.

**Keywords:** extrusion die, flow uniformity, design, tire, rubber.

**Abstract.** The extrusion process is one of the key areas in the tire industry because this process produces different types of semi-finished products that will later form the tire (tread, sidewall, etc.). During extrusion, the rubber compounds behave like a viscoelastic fluid and the design of the dies is based on the designer experience. In this work, simulation was used to understand and improve the die design process. Firstly the flow of rubber through the matrix was simulated to achieve a uniform distribution at the outlet of the die. Then the flow of material was modeled at the exit of the die allowing the prediction of the extrudate profile. Finally, the insert of the flow channel at the outlet of the extruder was simulated and optimized. The simulations were performed with the ANSYS Polyflow software.

## 1 INTRODUCCIÓN

En el proceso de extrusión, el principal objetivo del diseño de una matriz es lograr una distribución de velocidad uniforme en el compuesto extrudado. De esta manera se minimizan las variaciones dimensionales del producto extrudado (Michaeli, 2003).

En la industria del neumático se utilizan matrices de extrusión tipo placa para producir rodados, costados y rellenos de talón que formarán parte de la cubierta, como se ve en la Figura 1. Éstas son baratas de construir y modificar, y son ampliamente usadas en la producción de perfiles de caucho. Un aspecto clave en su diseño es asegurar el correcto caudal másico en todas las partes de la matriz para producir un perfil con las dimensiones correctas. El diseño de la matriz que logra el producto especificado depende de la experiencia del diseñador de matrices y es un proceso de prueba y error hasta alcanzar la matriz deseada.

La simulación computacional permite diseñar y probar virtualmente matrices de extrusión. De esta manera se diseñan matrices más rápido y es posible entender y eliminar problemas relacionados al flujo lo que ayuda al diseño del herramiental (Toscano et al., 2015).

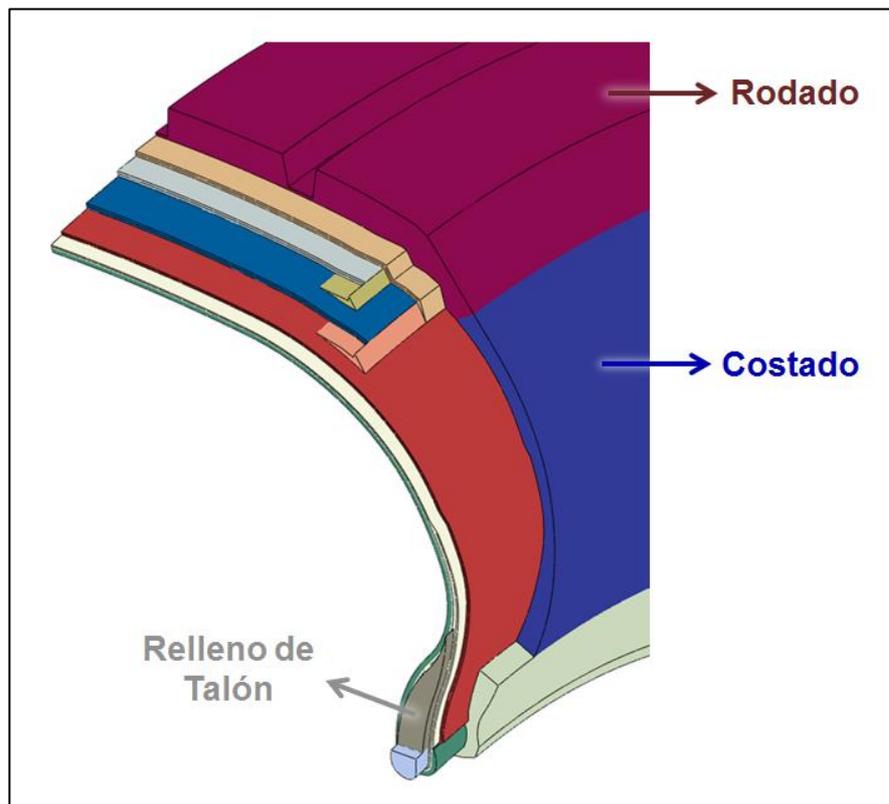


Figura 1. Componentes extrudados de un neumático radial.

### 1.1 Balanceo de flujo

La tarea principal del diseño de una matriz es llevar el caudal de masa correcto a todas las partes del perfil de salida de la matriz para que los espesores y las dimensiones deseadas sean obtenidos en el producto final. A esto se lo llama “balanceo de flujo” (Pittman, 2011), y permite obtener una velocidad promedio lo más similar posible en todas las secciones a la salida de la matriz.

## 1.2 Diseño de matrices de extrusión de compuestos de caucho

El diseño de matrices de caucho se puede dividir en dos pasos:

- Controlar el flujo dentro de la matriz para obtener un perfil de velocidades uniforme a la salida, es decir, balancear la matriz;
- Determinar las dimensiones de la matriz para obtener el producto deseado teniendo en cuenta el hinchamiento y el estiramiento a la salida de la matriz.

Respecto al primer paso existen dos maneras de equilibrar el flujo de una matriz, con un alivio trasero o un alivio delantero (Stevenson, 2003), Figura 2.

### Alivio Trasero (Back-Relief)

La práctica tradicional para aliviar una matriz es hacer un chaflán en la parte de atrás de la misma, es decir, por donde entra el material. Esta forma de socavado es muy efectiva en términos de establecer una velocidad uniforme a la salida de la matriz, pero tiene la tendencia indeseable de hacer fluir caucho desde secciones finas de la matriz, donde es más necesitado, hacia secciones adyacentes más grandes donde no lo es tanto.

### Alivio Delantero (Face-Relief)

Otra forma de equilibrar el flujo de una matriz es aliviar la parte delantera de la misma, es decir, por donde el material sale. Tiene la ventaja de ayudar a llenar bordes finos pero requiere más tiempo de mecanizado.

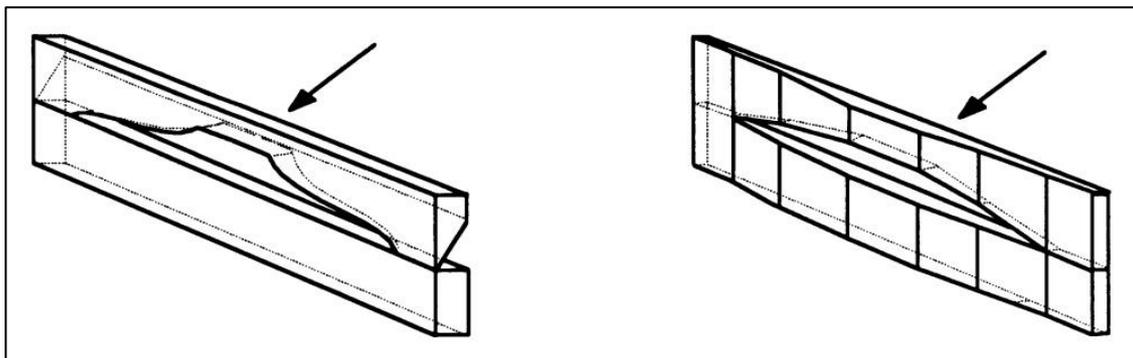


Figura 2. Matriz con alivio trasero (izquierda) y matriz con alivio delantero (derecha).

En el presente trabajo se estudia la extrusión del flujo de caucho a través de la matriz por una simulación de elementos finitos tridimensional para asistir al diseño del herramental.

## 2 SIMULACION DE EXTRUSIÓN

### 2.1 Modelo constitutivo

La simulación numérica se realizó con el software ANSYS Polyflow 19 y se basa en las siguientes suposiciones: (1) los fluidos son incompresibles e inmiscibles; (2) el flujo es estable (estado estacionario); (3) no se tiene en cuenta inercia, gravedad ni tensión superficial por la alta viscosidad de los fluidos poliméricos. El flujo en el dominio computacional es gobernado por las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$-\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} = 0 \quad (2)$$

Donde  $\mathbf{V}$  es el vector velocidad,  $p$  es la presión y  $\mathbf{T}$  es el tensor de tensiones extra.

Para flujos viscoelásticos, el tensor de tensiones extra se separa en una componente viscoelástica  $\mathbf{T}_1$  y en una componente puramente viscosa  $\mathbf{T}_2$ :

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2 \quad (3)$$

$\mathbf{T}_2$  se calcula como:

$$\mathbf{T}_2 = 2\eta_2 \mathbf{D} \quad (4)$$

Donde  $\eta_2$  es el factor viscosidad de la componente newtoniana (es decir, puramente viscosa) del tensor de tensiones extra y  $\mathbf{D}$  es el tensor velocidad de deformación. La relación viscosidad  $\eta_r$  se define como  $\eta_2/\eta$ . La relación de  $\eta_1$  y  $\eta_2$  a  $\eta$  se expresa como:

$$\eta_1 = (1 - \eta_r)\eta \quad (5)$$

$$\eta_2 = \eta_r \eta \quad (6)$$

$\mathbf{T}_1$  se calcula con el modelo viscolástico Phan, Thien & Tanner (PTT) (ANSYS, 2015) que se expresa como:

$$\mathbf{T}_1 = \sum_{i=1}^n \mathbf{T}_1^{(i)} \quad (7)$$

$$\exp\left[\frac{\varepsilon_i \lambda_i}{\eta_i} \text{tr}(\mathbf{T}_1^{(i)})\right] \mathbf{T}_1^{(i)} + \lambda_i \left[ \left(1 - \frac{\xi_i}{2}\right) \mathbf{T}_1^{(i)\nabla} + \frac{\xi_i}{2} \mathbf{T}_1^{(i)\Delta} \right] = 2\eta_1 \mathbf{D} \quad (8)$$

Donde  $\lambda_i$  es el tiempo de relajación,  $\eta_1$  es la viscosidad de corte en cero,  $\varepsilon_i$  y  $\xi_i$  son parámetros que controlan la viscosidad extensional y la segunda diferencia de tensiones normales.

## 2.2 Caracterización de la uniformidad de flujo

Para optimizar el flujo de una matriz o de cualquier canal de flujo por simulación es necesario caracterizar cuantitativamente la uniformidad del flujo. Para ello, se utilizó un parámetro de uniformidad de flujo ( $P$ ) propuesto en la literatura (Yao et al., 2009), que es independiente del caudal y de las dimensiones geométricas. Dicho parámetro se calcula como:

$$P = \frac{1}{A} \int \left( \frac{V_n}{V_{av}} - 1 \right)^2 dA \quad (9)$$

donde  $V_n$  es la velocidad normal en la apertura de salida,  $V_{av} = Q/A$  es la velocidad promedio sobre la sección de salida,  $A$  es el área de la sección de salida y  $Q$  es el caudal volumétrico. Para un flujo perfectamente uniforme, el valor de  $P$  se hace cero. En general, una

uniformidad de flujo óptimo se puede alcanzar minimizando el valor de  $P$ .

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se han llevado adelante las siguientes simulaciones:

1. Simulación de una matriz balanceada con alivio delantero
2. Predicción de un perfil extrudado
3. Optimización del canal de flujo

#### 3.1 Simulación de una matriz balanceada con alivio delantero

El relleno de talón es un perfil extrudado que se utiliza en el talón de la cubierta (ver Figura 1). En este estudio, se reemplazó la matriz de producción regular que tiene un socavado trasero por una con un alivio delantero. Para eso se simuló ambas matrices antes de la fabricación y se encontró que la matriz con alivio delantero presenta una uniformidad de flujo superior, como muestra la Figura 3. La prueba experimental mostró una extrusión estable y sin rotura de borde.

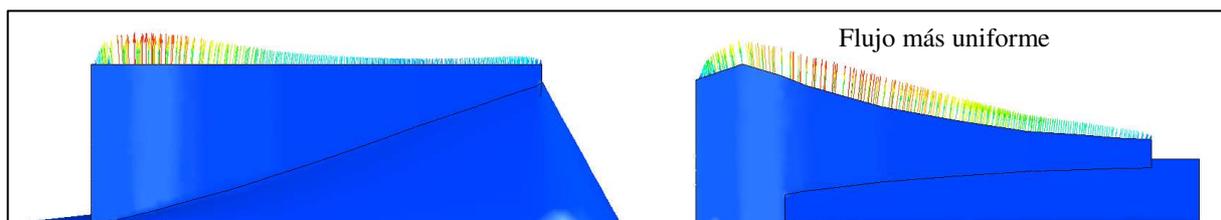


Figura 3. Distribución de velocidades a la salida de la matriz de relleno de talón de producción regular con alivio trasero (izquierda) y matriz con alivio delantero (derecha).

#### 3.2 Predicción de un perfil extrudado

Además de mostrar el comportamiento del flujo dentro de la matriz, la simulación permite ver cómo se va a comportar el material una vez que salga de la misma. A modo de ejemplo, a continuación se detalla un modelo de extrusión de rodado con su respectiva validación. Es importante destacar que se tuvo en cuenta la geometría que está detrás de la matriz (inserto de preforma e inserto de cabezal) ya que tiene mucha influencia en el desarrollo del flujo (Li et al, 2015).

En la simulación de extrusión de caucho existen cuatro parámetros principales que afectan al hinchamiento: el modelo de fluido, el deslizamiento del material sobre las paredes de la matriz, la velocidad de extrusión y el deslizamiento sobre la cinta transportadora. Dado que es difícil obtener todos los parámetros correctos, es necesario realizar varias pruebas hasta afinar los parámetros de la simulación. Respecto del deslizamiento lo mejor que se puede hacer es caracterizarlo ajustando una ley navier en las condiciones más cercanas posibles a los de la aplicación de extrusión propuesta (Pittman, 2011).

Las condiciones de borde para la mitad de la geometría debido a la simetría del sistema se pueden ver en la Figura 4. Se aplicó la condición de deslizamiento (ley de Navier) en las paredes de la matriz e insertos, superficie libre en las caras superiores del extrudado y deslizamiento en la cara inferior del extrudado ya que sale apoyado en una cinta transportadora. En la entrada se aplicó un perfil de velocidades totalmente desarrollado y, en la salida del extrudado, tensiones normales y tangenciales cero.

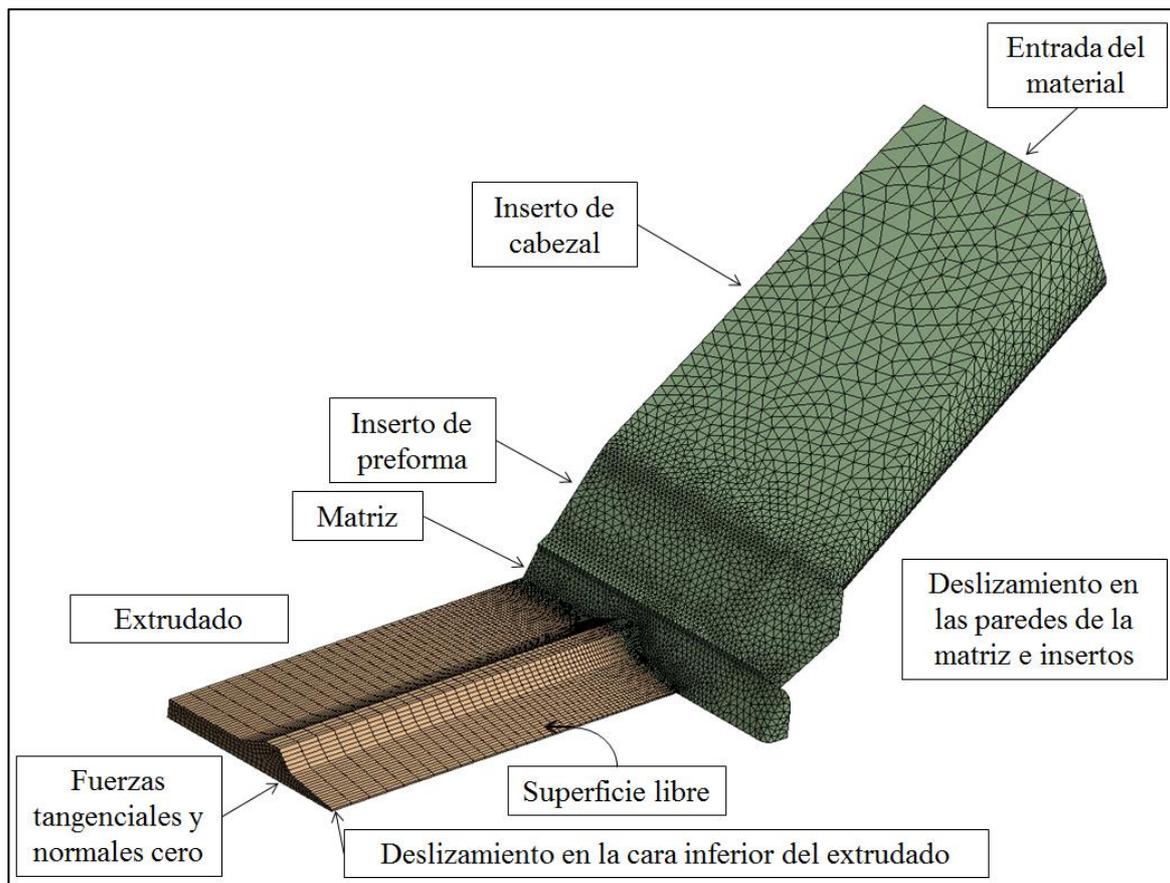


Figura 4. Condiciones de borde en los dominios de la simulación.

En la Figura 5 se puede ver la predicción del extrudado de un rodado con el modelo viscoelástico PTT.

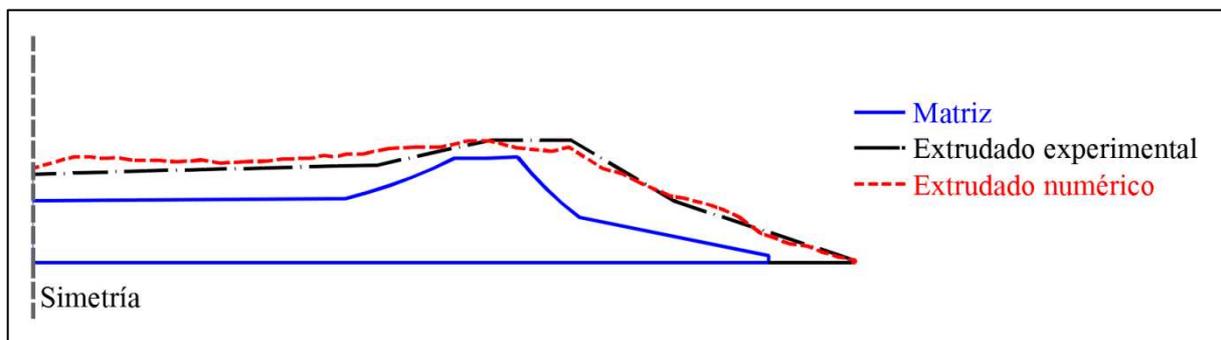


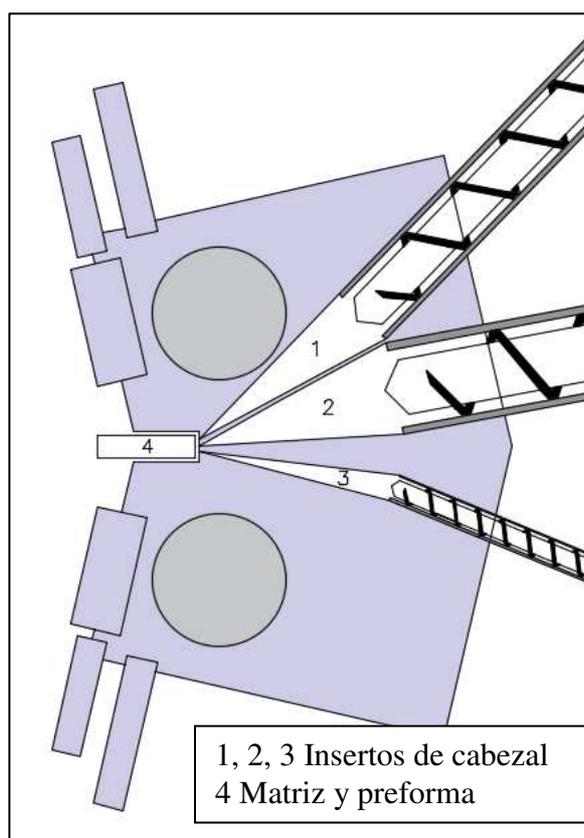
Figura 5. Comparación entre perfil extrudado experimental (línea de trazo y punto) y resultado numérico (línea de trazos).

Como se observa, el extrudado numérico presenta correlación con el experimental. A pesar de que es un perfil complejo, la simulación puede predecir cuantitativamente el hinchamiento total (Yang et al, 2016). Sin embargo, la simulación tiene un error similar al que se obtiene por prueba y error experimental.

Para mejorar la precisión de la simulación quizás sea necesario la utilización de un cluster para poder utilizar el modelo viscoelástico PTT con varios tiempos de relajación.

### 3.3 Optimización del canal de flujo

En un sistema de extrusión multicompuesto, cada extrusora tiene un canal de flujo con un inserto de cabezal que provee la transición de una sección circular en la boca de la extrusora hacia una sección rectangular antes del ensamble preforma-matriz como se muestra en la Figura 6. La función principal de este canal de flujo es distribuir y balancear el flujo. A diferencia del ensamble preforma-matriz, el inserto de cabezal es costoso de fabricar, tiene poco recambio y consume mucho tiempo en una producción. Una vez instalado, el inserto de cabezal afectará directamente la uniformidad y el rendimiento de todos los componentes extrudados. Por lo tanto, el diseño de un canal de flujo apropiado es muy importante.



**Figura 6. Diagrama de la sección transversal de un sistema de extrusión triple.**

El extrudado debe ser estable y satisfacer especificaciones dimensionales después del hinchamiento, estiramiento, enfriado y almacenamiento. Por este motivo, el diseño del inserto debe ser tal que la velocidad a la salida del canal sea uniforme a lo ancho de toda la sección. De esta manera no habrá ondulación del extrudado y el estiramiento puede ser reducido al mínimo necesario para tener suficiente tensión de línea en la extrusión. Además, la contracción del largo del extrudado causada por recuperación de la deformación será minimizada.

Para optimizar el diseño de un inserto de cabezal se buscó alcanzar una distribución de velocidad uniforme a la salida. Para ello, se simuló distintos diseños de insertos y se caracterizó la uniformidad de flujo con el parámetro  $P$ . Para hacer esta optimización se partió del inserto de cabezal de la Figura 7.

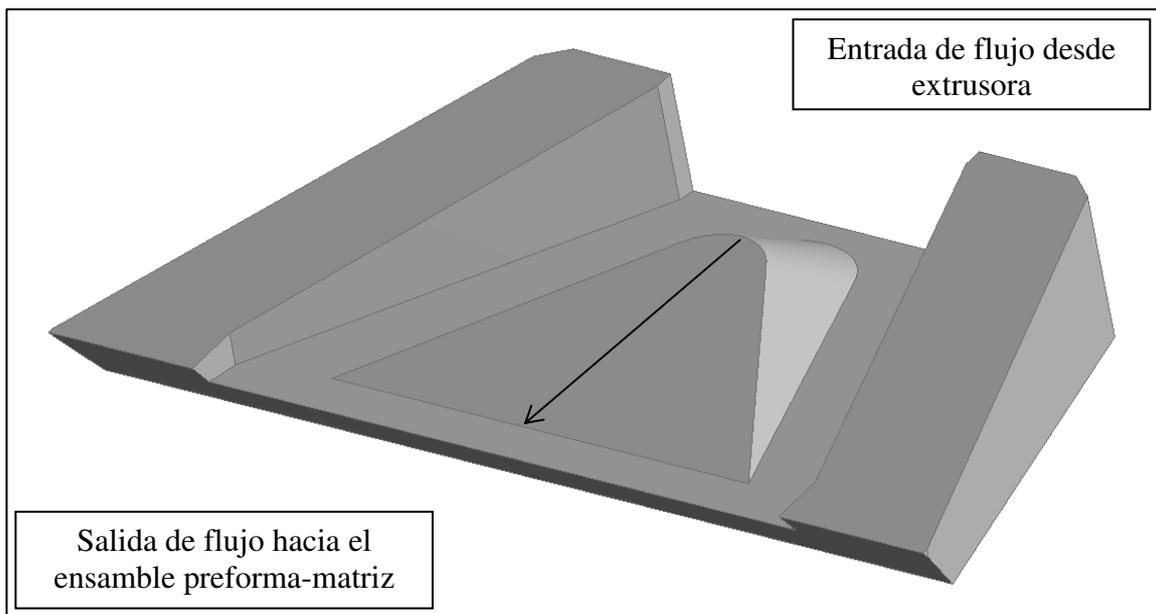


Figura 7. Canal de flujo con inserto de cabezal.

Para realizar la simulación del flujo a través del canal se ideó un inserto simplificado triangular como se muestra en la Figura 8. La geometría del inserto fue parametrizada con 4 variables de diseño que describen la forma de los posibles tetraedros: su base ( $W$ ), su largo ( $X_H$ ) y su altura ( $X_P$  e  $Y_P$ ).

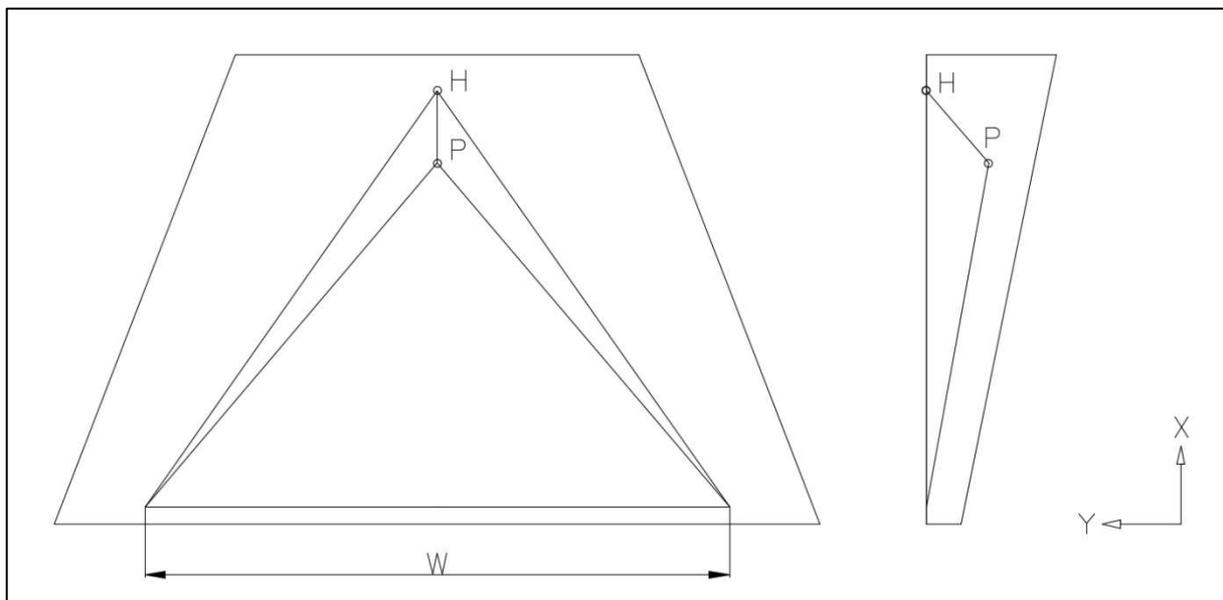


Figura 8. Parametrización geométrica de un inserto simplificado triangular usado en las simulaciones para la optimización.

A la salida del canal de flujo, el caucho es libre de hincharse y, por lo tanto, la condición de borde apropiada sería especificar una superficie libre. Sin embargo, esta condición de borde implica un costo computacional muy alto. Es por eso que se ha elegido la condición de borde de deslizamiento total (velocidad normal y tensión tangencial cero) ya que esta no introduce mucho error en la distribución de velocidad en la salida y reduce mucho el tiempo de cálculo.

Además, se realizó un estudio de sensibilidad de malla y se observó que el parámetro de uniformidad a la salida del canal de flujo se empieza a estabilizar con una malla de 30000 nodos, como muestra la Figura 9. En función de lo anterior se determina una malla de 30000 nodos para las corridas de optimización, como se ve en la Figura 10.

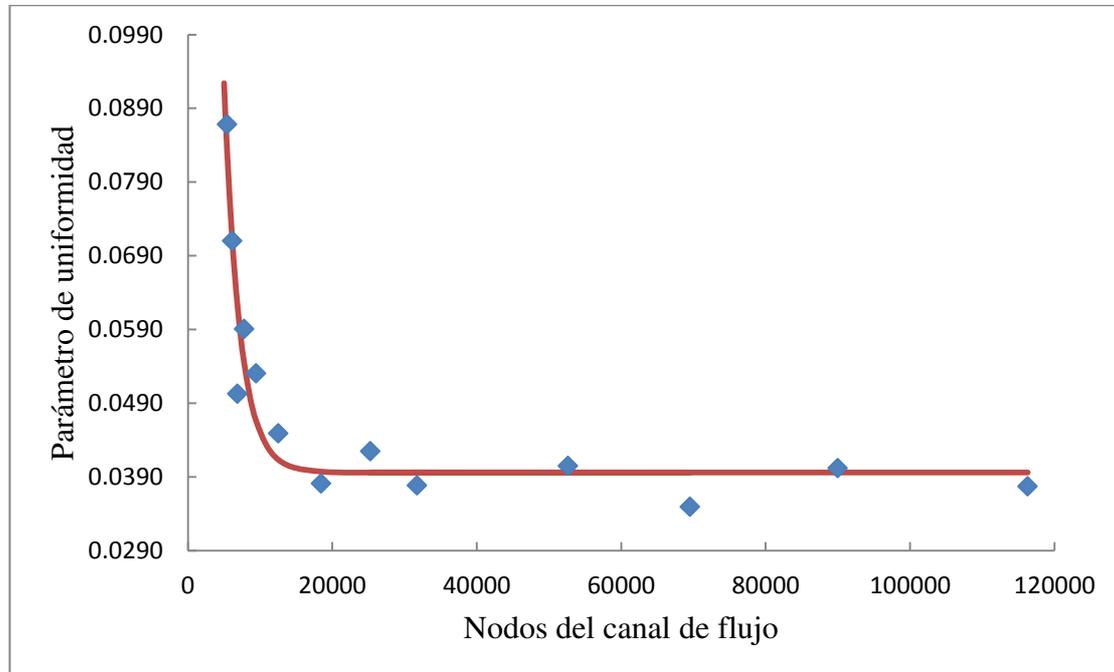


Figura 9. Sensibilidad de la malla del canal de flujo.

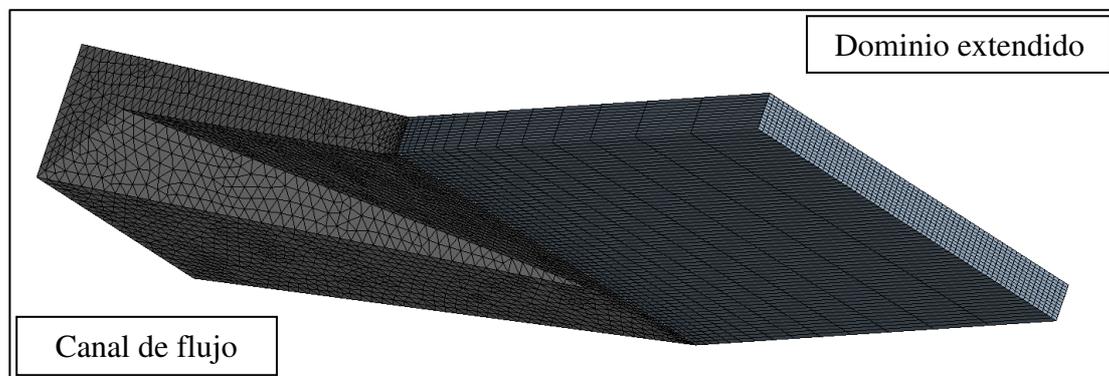


Figura 10. Malla de elementos finitos del modelo simétrico utilizado para la optimización del diseño del inserto.

El objetivo de la optimización del diseño geométrico del inserto es minimizar el parámetro de uniformidad  $P(W, X_H, X_P, Y_P)$ . Para ello, se realizó un diseño de experimentos de tipo hipercubo latino (Fang et al., 2006) con 200 muestras.

Una vez simulados todos los diseños se calculó el parámetro de uniformidad a la salida del canal de flujo mediante un script Python. Luego, se generó la función objetivo interpolando esos puntos con el método Support Vector Regression (Schölkopf et al., 2002) con un  $R^2 = 0.94$ . Esta función fue optimizada mediante recocido simulado (Corana et al., 1987) y se obtuvo un parámetro de uniformidad  $P = 0.0354$ , cercano al mínimo muestral ( $P = 0.0314$ ). El hecho de no poder encontrar un óptimo probablemente esté relacionado a la suma de los errores de la malla y propios de la interpolación.

Para mostrar el efecto del inserto optimizado en el balance de flujo, se graficó la velocidad de salida normalizada en función del ancho del canal de flujo, como se observa en la Figura 11. La velocidad de salida normalizada es la velocidad de salida dividida la velocidad promedio en el espesor de salida. Con fines de comparación, también se agregaron los perfiles de velocidades del inserto real y del canal de flujo sin inserto. Como es esperable, sin el inserto, la distribución del flujo es altamente no uniforme. En el caso del inserto real, la uniformidad mejora un 61% respecto al canal sin inserto. Finalmente, el inserto óptimo del muestreo mejora el balance de flujo un 22% respecto al inserto real.

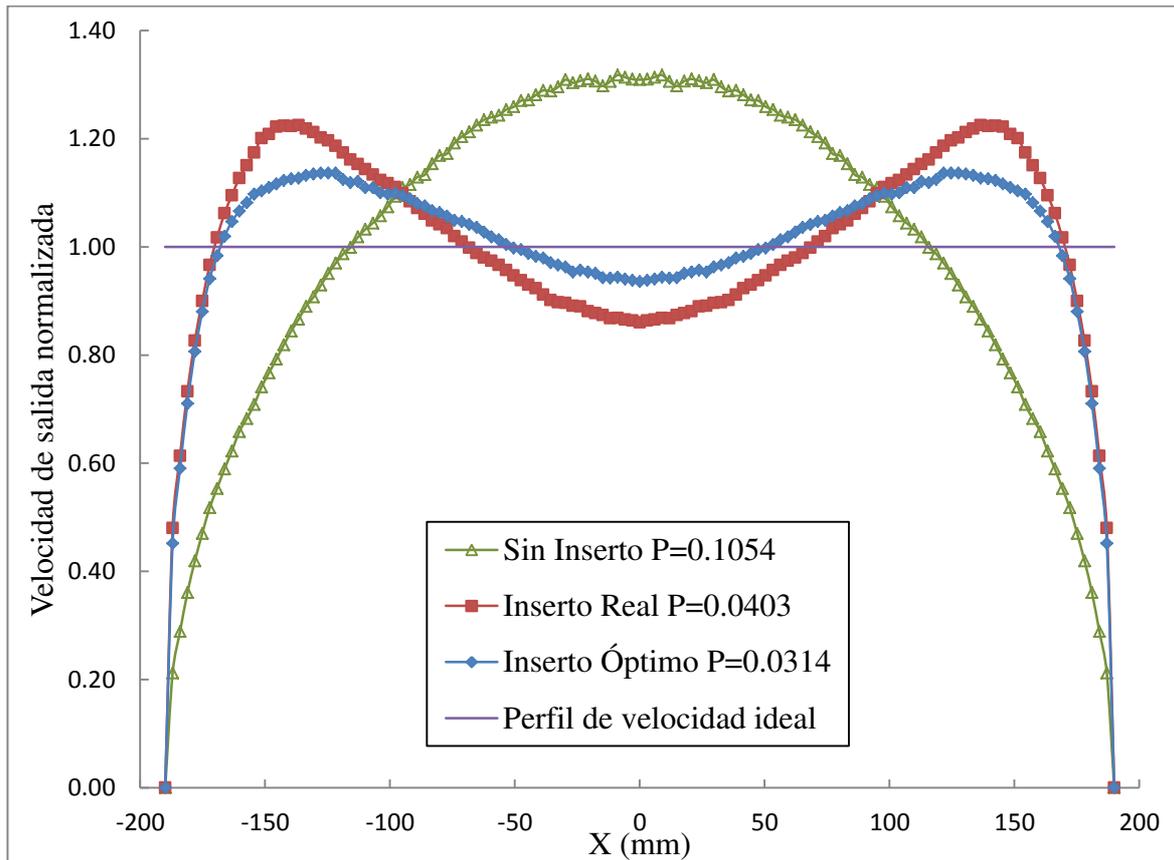


Figura 11. Velocidad de salida normalizada a lo largo del ancho de la sección de salida del canal de flujo.

#### 4 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha mostrado cómo la simulación numérica puede proporcionar información importante en el diseño de matrices de extrusión de caucho. Primero se modeló una matriz con alivio delantero que mostró un mejor balance de velocidades respecto al diseño original que poseía un alivio trasero tradicional. Luego se predijo el extrudado de una matriz de rodado utilizando el modelo viscoelástico diferencial Phan-Thien-Tanner (PTT) ya que este es capaz de modelar el efecto de hinchamiento de extrudado. Por último, se optimizó el inserto del canal de flujo a la entrada del sistema preforma-matriz mediante un diseño de experimentos logrando una mejora en la uniformidad de flujo de salida del 22%.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la empresa FATE SAICI por su permiso para publicar este trabajo y también agradecer por su colaboración en la realización de ensayos al personal de Ingeniería de procesos de la misma empresa.

**REFERENCIAS**

- ANSYS Inc.: ANSYS Polyflow User's guide, release 16.0, 2015, Canonsburg, PA, USA, ANSYS Inc.
- Corana A., Marchesi M., Martini C., Ridella S., "Minimizing Multimodal Functions of Continuous Variables with the Simulated Annealing Algorithm", *ACM Transactions on Mathematical Software*, Vol. 13, No. 3, 1987, pp. 262-280.
- Fang K., Li R., Sudjianto A. Design and modeling for computer experiments Computer science and data analysis series, Chapman & Hall/CRC, 2006.
- Li J. Liu Q. Liu L. Numerical simulation on the whole co-extrusion process of tread rubber, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, Vol 723, pp. 878-883
- Michaeli W. Extrusion dies for plastic and rubber, 2003 (Hanser Verlag)
- Pittman J. F. T. Computer-aided design and optimization of a profile extrusion dies for thermoplastic and rubber: a review, 2011, *Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol 225, Issue 4, pp. 280-321
- Schölkopf, B., Smola, A.J., "Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization and Beyond". MIT, Cambridge, 2002.
- Stevenson J. Die design for rubber extrusion, *Rubber World*, 2003, Vol 228, Issue 2, p23
- Toscano, B. y Arechaga, T. (2015). Simulación de coextrusión de caucho por elementos finitos para el diseño de matrices en la industria del neumático. *Anales (Asociación Física Argentina)*, 26(3), 135-138. Recuperado en 03 de julio de 2018, de [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1850-11682015000300006&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-11682015000300006&lng=es&tlng=es).
- Yang C. Li Z. An integrated numerical study of coextrusion flow inside and outside the die, *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, Vol 133, Issue 23
- Yao M. Lee C. C. Flow Uniformity Characterization and Its Application in Extruder Flow Channel Design Optimization, ASME 2009 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Vol 1, pp. 475-484