

# SIMULACIÓN DE COEXTRUSIÓN DE CAUCHO POR ELEMENTOS FINITOS PARA EL DISEÑO DE MATRICES EN LA INDUSTRIA DEL NEUMÁTICO

## RUBBER COEXTRUSION SIMULATION BY FINITE ELEMENT METHOD FOR DIE DESIGN IN THE TYRE INDUSTRY

B. Toscano<sup>a</sup>, T. Arechaga<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Gerencia de Investigación y Desarrollo de la empresa Fate S.A.I.C.I, San Fernando, Buenos Aires  
Blanco Encalada 3003 - (B1644GPK) Victoria - Buenos Aires - Argentina

Recibido: 07/11/2014; aceptado: 14/06/2015

En la industria del neumático una de las áreas de trabajo principales es la de extrusión. Mediante este proceso se producen distintos tipos de semielaborados que luego van a conformar la cubierta cruda (rodados, costados, etc). Durante la extrusión, los compuestos de caucho se comportan como un fluido viscoelástico. Para realizar un análisis correcto del procesado de compuestos de caucho se requieren modelos de materiales especiales y herramientas de análisis por elementos finitos no lineales. En la literatura se ha demostrado que modelar flujos en tres dimensiones con los modelos viscoelásticos tradicionales sigue siendo un gran desafío que requiere excesivo recursos computacionales. En este trabajo se ha utilizado el Modelo Newtoniano Generalizado y un Modelo Viscoelástico Simplificado para simular el flujo de compuestos de cauchos a través de una matriz de extrusión con el objetivo de predecir el perfil coextrudado. Para ello, se ha caracterizado al material en base a ensayos de reometría capilar. Se pudo demostrar una buena correlación entre el perfil simulado y el real.

*Palabras clave: extrusión, método de elementos finitos, neumático.*

In the tyre industry one of the main processes is extrusion. By this process, different types of semielaborated materials are produced and are going to conform the raw tire (tread sidewall, etc). During extrusion process, rubber compounds behave like a viscoelastic fluid. A proper analysis of rubber compound processing requires special material models and nonlinear finite element analysis. It has been shown that modeling three dimensional flows with traditional viscoelastic models is still a great challenge that requires excessive computational resources. In this work it has been used Generalized Newtonian Model and Simplified Viscoelastic Model to simulate the flow of rubber compounds through an extrusion die to predict the coextruded profile. For this, capillary rheometry was used for material characterization. A good correlation between real and simulated profile was found.

*Keywords: extrusion, finite element method, tire.*

### 1. INTRODUCCIÓN

El diseño de matrices de extrusión para la producción de perfiles de compuestos de caucho está basado exclusivamente en el conocimiento empírico del comportamiento viscoelástico no lineal del flujo de elastómeros, especialmente en el llamado "hinchamiento de extrudado". Así, la geometría deseada de un perfil se logra por adaptación empírica de la matriz de extrusión.

Este proceso de adaptación es principalmente influenciado por el hinchamiento después de la extrusión del caucho y se lleva a cabo en varios pasos. Las desventajas del proceso de producción actual son que la tecnología del proceso no es reproducible a largo plazo y que el diseño de matrices tiene un largo tiempo de desarrollo. Este último hecho es el motivo de esta investigación.

#### *Simulación de matrices de extrusión*

La simulación del proceso de extrusión es considerada uno de los grandes desafíos en el procesamiento de polímeros. Sin embargo, el continuo y rápido desarrollo de la capacidad computacional y de las técnicas numéricas están haciendo posible simular, analizar y optimizar procesos de extrusión en tres dimensiones con geometrías complejas, así como el comportamiento no lineal y viscoelástico de los polímeros.

El objetivo de este estudio es simular el flujo de material a través de una matriz existente para contrastar el perfil extrudado simulado con el real con el fin de, a futuro, poder hallar por simulación la matriz necesaria según un producto especificado. Para ello, se utilizó el software de elementos finitos *Ansys Polyflow*.

El caso estudiado es un perfil de rodado de una cubierta de automóvil que consta de tres compuestos.

En la Figura 1 se observa un corte de una cubierta con sus componentes extrudados principales: el rodado, el costado y el relleno de talón. En la Figura 2 se diferencian los tres materiales que componen al rodado.

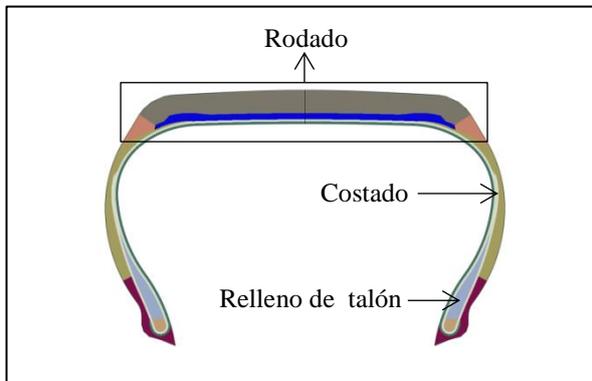


Figura 1. Corte transversal de una cubierta.

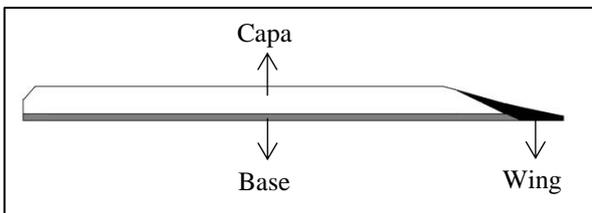


Figura 2. Rodado con sus tres materiales

## 2. MODELOS Y ECUACIONES CONSTITUTIVAS

Las ecuaciones básicas a ser resueltas son aquellas que expresan la conservación del momento (1) y de masa (2),

$$-\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{f} = \rho \cdot \mathbf{a} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

Donde  $p$  es la presión,  $\mathbf{T}$  es el tensor de tensiones extra,  $\mathbf{f}$  las fuerzas de volumen,  $\rho$  la densidad,  $\mathbf{a}$  la aceleración y  $\mathbf{v}$  la velocidad.

### 2.1. Modelo Newtoniano Generalizado.

Para un fluido newtoniano generalizado [1], el tensor de tensiones extra es

$$\mathbf{T} = 2\eta(\dot{\gamma})\mathbf{D} \quad (3)$$

Siendo  $\mathbf{D}$  el tensor velocidad de deformación. La velocidad de corte se define como,

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2\text{tr}(\mathbf{D}^2)} \quad (4)$$

En flujo de corte simple  $\dot{\gamma}$  (Figura 3) se reduce al gradiente de velocidad. En este trabajo la viscosidad de corte  $\eta(\dot{\gamma})$  está dada por la ley de Bird-Carreau [2],

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{\frac{(n-1)}{2}} \quad (5)$$

Dónde:  $\eta_0$  es la viscosidad a velocidad de corte cero,  $\eta_{\infty}$  es la viscosidad a velocidad de corte infinito,  $\lambda$  es el tiempo de relajación (es la inversa de la velocidad de corte en la cual el fluido cambia de un comportamiento Newtoniano a uno de ley de potencias), y  $n$  el exponente de ley de potencia.

### 2.2. Modelo Viscoelástico Simplificado.

En este trabajo se utilizó también el modelo viscoelástico simplificado del software *Ansys Polyflow* [2]. Este modelo permite la predicción del hinchamiento de extrudado que sería muy difícil para un caso tridimensional con los modelos reológicos sofisticados clásicos ya que son computacionalmente muy costosos.

Este modelo es una extensión del modelo newtoniano generalizado ya que se agrega una diferencia de tensiones normales al balance de fuerzas. La primera diferencia de tensiones normales es la responsable del hinchamiento de extrudado. En flujo de corte simple, en la dirección  $x_1$  con velocidad de corte  $\dot{\gamma}$ , el tensor de tensiones extra  $\mathbf{T}$  está dado por (6).

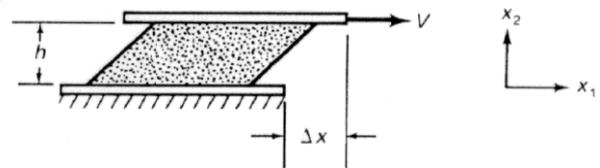


Figura 3. Flujo de corte simple entre placas paralelas.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \phi\mu(\dot{\chi})\dot{\chi} & \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma} & 0 \\ \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

La primer tensión normal está dada por  $\tau_{11} = \phi\mu(\dot{\chi})\dot{\chi}$ . El primer parámetro  $\phi$  es un coeficiente de peso y el segundo  $\mu(\dot{\chi})$  es la viscosidad normal. La variable viscoelástica  $\dot{\chi}$  obedece una ecuación de transporte que incluye un tiempo característico (o tiempo de relajación)  $\lambda(\dot{\gamma})$  dado por,

$$\lambda(\dot{\gamma})\frac{D\dot{\chi}}{Dt} + \dot{\chi} = \dot{\gamma} \quad (7)$$

Para flujo de corte simple en estado estacionario la ecuación de transporte se reduce a la solución,

$$\dot{\chi} = \dot{\gamma} \quad (8)$$

## 3. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.

Los distintos materiales que componen el rodado se caracterizaron con un viscosímetro capilar acoplado a una máquina de tracción Instron 3366. Se registraron las fuerzas de corte  $\sigma$ , en función de las velocidades de corte  $\dot{\gamma}$  a 85 °C. Se utilizó esta temperatura por ser similar a la usada en el proceso de extrusión. Luego, se calculó la viscosidad como  $\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}}$ . El método y las

condiciones de trabajo para la caracterización de los compuestos de caucho se describen en la norma ASTM D5099 [3]. En la Figura 4 se ven las viscosidades medidas y el ajuste con ley de Bird-Carreau para los tres compuestos. Los coeficientes del ajuste se muestran en la Tabla 1 con  $\eta_{\infty} = 0$  para los tres materiales.

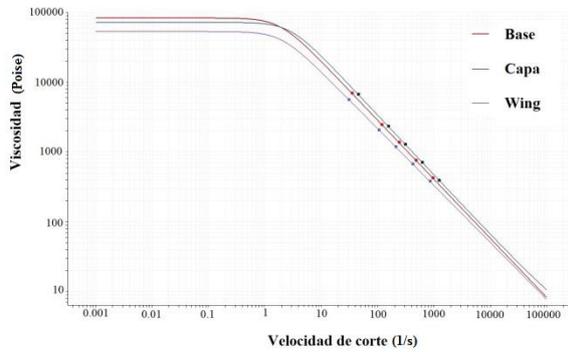


Figura 4. Comparación de la viscosidad medida y su ajuste en función de la velocidad de corte para los tres compuestos de caucho.

Material	$\eta_0$ (Poise)	$\lambda$ (1/s)	$n$
Capa	71984	0.35	0.14
Base	82951	0.54	0.15
Wing	53022	0.35	0.18

Tabla 1. Parámetros de ajuste de los compuestos de caucho de la ley de Bird-Carreau.

#### 4. EXTRUSIÓN DE PERFIL DE RODADO

En el presente trabajo se utilizó el rodado de una cubierta radial de pasajero de la medida 175/70TR13. En el modelo se calculan las características del flujo del material pasando a través de la matriz y también al salir de la misma formando el extrudado como una superficie libre. Por razones de simetría solo se estudia la mitad del rodado.

Las matrices de extrusión tienen en general socavados en la sección de entrada de las mismas. Los socavados son zonas más abiertas en distintas partes de la entrada de la matriz con el objetivo de uniformar las velocidades a la salida de esta. En la Figura 5 se puede ver el socavado de wing y de base de la matriz utilizada en este trabajo.

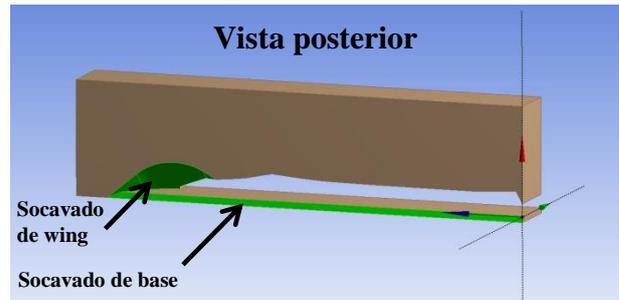


Figura 5. Socavados de la matriz utilizada.

#### Modelo por elementos finitos

El dominio modelado está compuesto por dos subdominios. Uno es la matriz y el otro es un flujo de superficie libre a la salida de la matriz (extrudado) donde se redistribuyen las velocidades y se relajan las tensiones.

Las condiciones de borde impuestas se ven en la Figura 6.

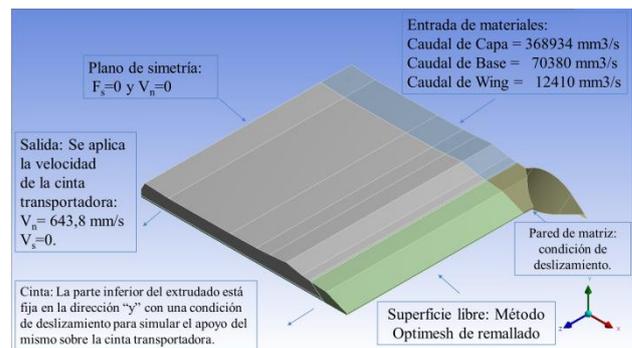


Figura 6. Condiciones de borde

#### 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 5.1. Modelo newtoniano generalizado.

En las Figuras 7 y 8 se ven distribuciones típicas de velocidades. La máxima velocidad es de 1089 mm/s y se encuentra en la zona de mayor espesor del rodado y la velocidad promedio en la salida de la matriz es de 568 mm/s. En la Figura 8 se ve que existe una diferencia de velocidades entre las zonas de mayor y menor espesor de la matriz, indicando que el socavado de wing podría mejorar para lograr un mejor balance de velocidades.

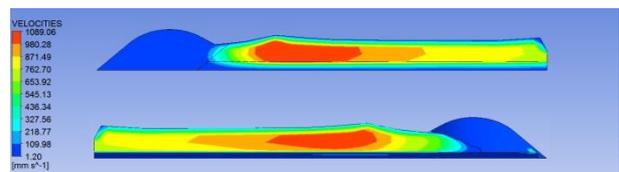


Figura 7. Distribución de velocidades en la entrada de la matriz (arriba) y en la salida (abajo).

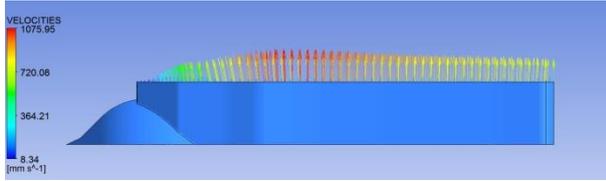


Figura 8. Distribución de velocidades del extrudado en la salida de la matriz.

La distribución de presiones muestra que estas disminuyen de forma regular hacia la salida de la matriz, Figura 9.

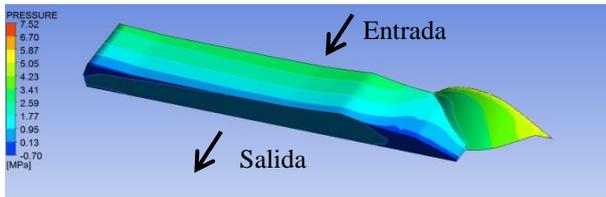


Figura 9. Distribución de presiones del semielaborado dentro de la matriz.

En la Figura 10 se observa como la interface entre base y capa disminuye al acercarse a la zona de wing y también como la interface de wing y capa/base deja de ser una recta y se curva. Ambos efectos se observan también experimentalmente en el material extrudado.



Figura 10. Interfaces entre los tres materiales.

Las dimensiones del perfil simulado con el modelo newtoniano generalizado comparado con el perfil extrudado muestran un muy buen acuerdo en el ancho total, con un error menor al 3%. En el espesor cerca del centro del rodado se observa una diferencia del 9% (Figura 11).



Figura 11. Comparación de perfil simulado (rojo) y perfil real (negro).

### 5.2. Modelo viscoelástico simplificado.

No se observaron diferencias utilizando el modelo viscoelástico simplificado comparado con el

modelo newtoniano generalizado aunque sí un mayor tiempo de computo (40% más alto).

## 6. CONCLUSIONES

Se comprobó que el uso del modelo newtoniano generalizado con el software Ansys Polyflow es adecuado a la hora de simular el comportamiento de distintos compuestos de caucho logrando así un ahorro de trabajo y tiempo en la etapa de diseño de matrices de coextrusión.

Los resultados obtenidos utilizando el modelo viscoelástico simplificado no muestran grandes diferencias con el modelo newtoniano generalizado. Si pudimos constatar un mayor tiempo de cálculo que fue del orden del 40%.

## Agradecimientos

Agradecemos a FATE S.A.I.C.I por la financiación de este trabajo y por el permiso para su publicación.

## Referencias

- [1] R. B. Bird, R. C. Armstrong, and O. Hassager. Dynamics of Polymeric Liquids. John Wiley, New York (1987).
- [2] Ansys Polyflow User's Guide, Version 15 (2013).
- [3] ASTM D5099-08(2013), Standard Test Methods for Rubber—Measurement of Processing Properties Using Capillary Rheometry, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, [www.astm.org](http://www.astm.org).