

Desarrollo de un molde prototipo de inyección de hule para bujes de suspensión

Ing. Pablo Calderón Carrasco¹, M.C. Eduardo Rodríguez López², M.C. J. Manuel Ávila Aguilar³, M.I. Raúl Lesso Arroyo⁴, M.C. Jaime Navarrete Damián⁵

Resumen—Como parte del desarrollo de nuevos bujes se requiere diseñar el producto y el molde con ayuda de la simulación del comportamiento mecánico del buje y del proceso de inyección. Adicionalmente, para validar el producto y el proceso, se fabrica un molde de una cavidad para obtener prototipos del buje que se emplean para comprobar las dimensiones de la pieza después de su contracción térmica, para realizar pruebas de ensamble y de las propiedades mecánicas del producto. En este artículo se presenta la simulación por MEF para predecir la contracción térmica de la goma, la simulación de llenado de la pieza moldeada por método de volumen finito y la simulación del ensamble del buje, así como las pruebas de validación de cada simulación, finalmente se discuten los resultados.

Palabras clave— Simulación, bujes de suspensión, molde, contracción térmica, inyección, ensamble.

Introducción

Los elastómeros se distinguen por su resiliencia y elasticidad bajo grandes grados de deformación, debido a estas propiedades es el material predilecto a usar para aislar vibraciones y reducir o aislar ruido en automóviles, así como mejorar el confort durante la conducción. El moldeo es la principal operación para dar forma a productos neumáticos y no neumáticos en la industria del hule, utilizando una amplia gama de equipos, materiales moldeables y métodos de moldeo, el moldeo está indicado para polímeros termofijos de alta viscosidad que actualmente son los elastómeros más usados.

En este documento nos referiremos a bujes de suspensión automotriz vistos como componentes anti vibratorios de hule-metal en los que el hule y el metal se fabrican por separado y posteriormente se ensamblan por medios mecánicos.

Se describe la metodología de diseño del molde prototipo para la goma de un buje de suspensión automotriz ensamblado, cuya intención de diseño es que tenga larga vida útil, por lo que debe tener excelentes propiedades en pruebas a fatiga.

La goma sigue un proceso de moldeo que por las características del hule requiere una cavidad casi cerrada que contenga el material mientras éste es sometido a temperatura de 160 a 170°C por 3 minutos la cual acelera la reacción química que lo convierte en un polímero termofijo. Como éste proceso se realiza a temperatura superior a la de uso de la goma, es correcto afirmar que la goma es siempre más pequeña que la cavidad que la produjo pues la goma se contrae al salir del molde.

Descripción del Método

Definir la forma de la pieza a moldear es el punto de partida para el diseño del molde, debido a que la goma que se fabrique se ensamblará entre dos tubos con interferencia para formar el buje; esta interferencia juega un papel muy importante en las propiedades mecánicas y estéticas del producto final. Se simula el ensamble del buje utilizando un paquete de simulación por método de elemento finito para definir la geometría y dimensiones de la goma, partiendo de que para obtener un buje con larga vida en pruebas de fatiga, los valores de interferencia empleados son 10% de interferencia del radio interior de la goma con el tubo interior y 25% con el exterior

Un fenómeno cotidiano por el que se ve afectado el moldeo en caliente de piezas es la contracción térmica, que ocurre cuando después de llenarse la cavidad del molde a una temperatura elevada, la pieza se expulsa y enfriá hasta alcanzar la temperatura ambiente, lo que la lleva a reducir sus dimensiones en función de su coeficiente de expansión térmica.

¹ Pablo Calderón Carrasco es estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica en el Instituto Tecnológico de Celaya, Guanajuato. pabloalan.pac@gmail.com (autor corresponsal)

² M.C. Eduardo Rodríguez López es diseñador de moldes en la empresa manufacturera de autopartes Rassini Bypasa en San Juan del Río, Querétaro erodriguez@rassini.com

³ M.C. J. Manuel Ávila Aguilar es ingeniero de producto en la división de elastómeros de Rassini Bypasa en San Juan del Río, Querétaro jmavila@rassini.com

⁴ M.I. Raúl Lesso Arroyo El M.I. Raúl Lesso Arroyo es Profesor de Ingeniería Mecánica en el Instituto Tecnológico de Celaya, Guanajuato raul.lesso@itcelaya.edu.mx

⁵ M.C. Jaime Navarrete Damián investigador en el Centro Regional de Optimización y Desarrollo de Equipo de Celaya jaime.navarrete@itcelaya.edu.mx

El coeficiente de expansión térmica lineal de los compuestos de hule natural es variable dependiendo de los materiales que lo integran y la proporción de estos en la mezcla, por lo que para este tipo de compuestos formulados a medida, el coeficiente de expansión térmica se obtiene de forma experimental.

Una vez definida la geometría de la pieza a moldear, se somete a una simulación de expansión térmica para conocer las dimensiones de la cavidad del molde, con el fin de asegurar que la pieza moldeada cuando se enfrie a temperatura ambiente tenga las dimensiones que se previeron para el ensamble.

El siguiente paso es diseñar el molde para prototipos, en éste se definen las líneas de partición de la pieza, la estrategia de inyección, el tamaño, cantidad y ubicación de los puntos para inyección del hule en la cavidad con el objetivo de reducir el volumen de las venas de inyección para minimizar la cantidad de hule que se pierde en el sistema de alimentación para que el material llegue hasta la cavidad del molde. El flujo de trabajo de las simulaciones a realizar se presenta en la figura 1.



Figura 1. Flujo de trabajo en el diseño de un molde prototípico para un buje ensamblado.

Simulación de ensamble

Se calculó la interferencia de la goma con los tubos exterior e interior con la fórmula siguiente:

$$\text{Interferencia} = \frac{1 + \% \text{ Compresión}}{1} \times (\text{Espacio libre})$$

Donde: Espacio libre es la resta del radio interior del tubo exterior y el radio exterior del tubo interior. %Compresión es el porcentaje del espacio libre que interfiere con cada uno de los tubos, como se muestra en la figura 2.

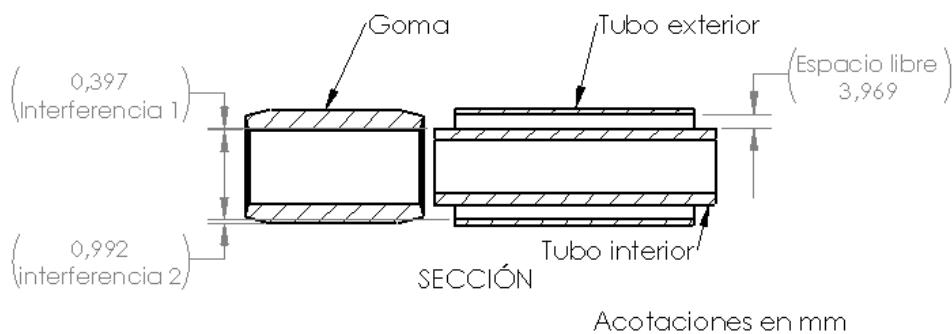


Figura 2. Vista de sección de la interferencia de la goma con cada uno de los tubos.

La figura 2 muestra que hay una interferencia de la goma de 25% con el tubo exterior y de 10% con el interior, con esto quedaron definidos los diámetros interior y exterior de la geometría de la goma para la simulación. Para definir la longitud se aprovechó que el hule es un material casi incompresible como lo refieren Horgan y Murphy [1] se idealizó como totalmente incompresible; para proponer el volumen total de la geometría a simular se obtuvo el volumen comprendido entre ambos tubos menos un milímetro de cada lado y se varió en el paquete CAD la longitud y forma de goma hasta ser de idéntico volumen. La forma de los extremos de la goma se mejoró con cada simulación hasta generar una cara plana y de ángulo lo más cercano al recto en ensamble.

Se simuló el ensamblaje de la goma y los tubos que forman el buje para observar la configuración final de la goma una vez ensamblada, para ello se utilizó el paquete de simulación por método de elementos finitos Abaqus, el hule se modeló como un material hiperelástico isotrópico con datos experimentales de pruebas uniaxial, biaxial y planar realizadas por González *et al.* [2] específicas del compuesto a utilizar, éstas se ajustaron al modelo Ogden de 5º orden las curvas se muestran en la figura 3. También se estableció el valor del módulo de Poisson (ν) en 0.4995.

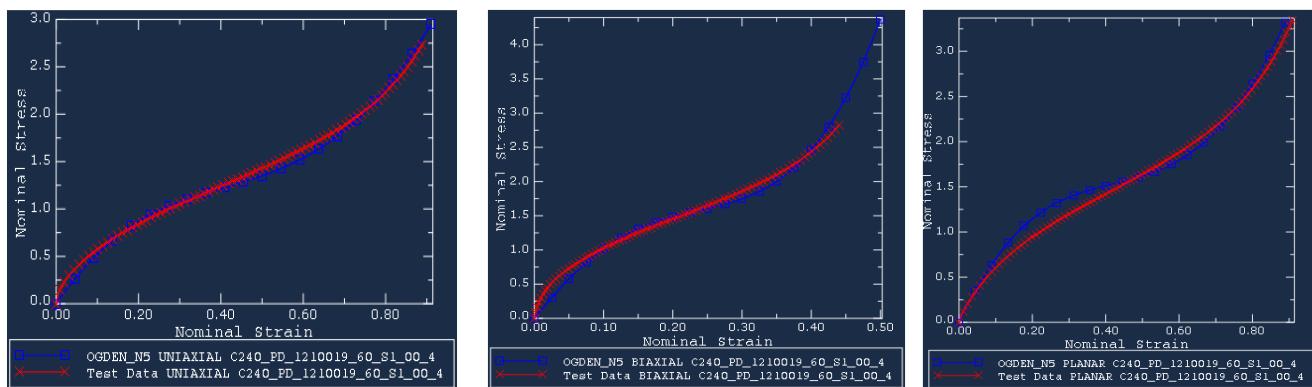


Figura 3. Ajuste de los datos experimentales con teoría Ogden de 5º orden.

Los tubos se consideraron superficies analíticas rígidas, y los contactos para la simulación se consideraron sin fricción, en virtud de que en el ensamble real de la pieza se tratará de minimizar la fricción utilizando lubricante. Una vista de sección del ensamble simulado se observa en la figura 4.

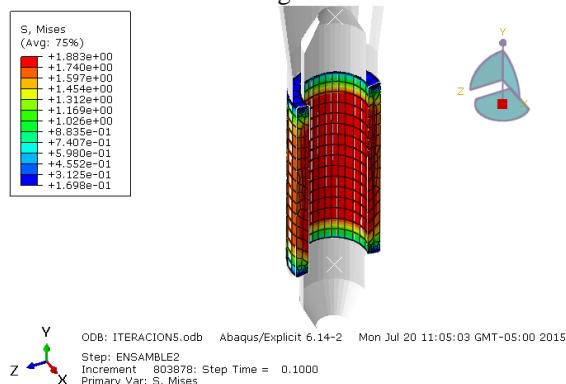


Figura 4. Configuración final del ensamble simulado del buje.

Expansiona térmica

Una vez definida la geometría de la goma, esta se sometió mediante simulación a expansión térmica desde la temperatura ambiente hasta su temperatura de moldeo aproximadamente con un $\Delta T = 160$. El coeficiente de expansión térmica longitudinal α utilizado fue de $1.1 \times 10^{-4}/^\circ C$, se consideró igual en todos los ejes y se obtuvo de forma experimental promediando la contracción de 10 gomas de hule de este compuesto medidas a temperatura ambiente y comparándolas con la cavidad por la que fueron moldeadas. La diferencia de las medidas principales de la goma antes y después de simular el gradiente térmico se observan en la figura 5.

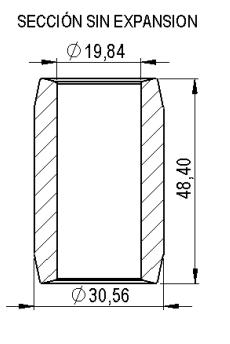


Figura 5. Diferencia en las principales medidas de la goma obtenidas en la simulación de expansión térmica.

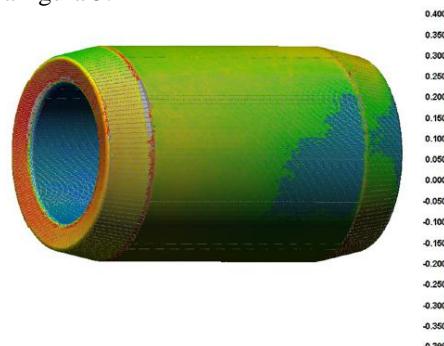


Figura 6. Mapa de desviación que muestra la diferencia entre el modelo CAD de la pieza esperada contra la real a temperatura ambiente de 24 °C.

Para comprobar se fabricaron prototipos de la goma con una cavidad de las dimensiones arrojadas por la simulación de expansión térmica y las gomas obtenidas se midieron con el scanner laser HandySCAN 3D que cuenta con resolución de 0.02 mm, se observaron variaciones de la goma de 0.36 mm que se aceptó por la tolerancia establecida para este buje, el mapa de desviación de colores de la figura 6 presenta la diferencia entre la pieza esperada y la real obtenida de la cavidad prototipo a temperatura ambiente.

Simulación de inyección

Para esta simulación se modelaron en un software CAD la pieza y la vena, posteriormente se importaron las geometrías al paquete SIGMASOFT Elastomer®. La sección transversal de la vena se modeló de forma de la sección transversal trapezoidal como lo refiere Jones [3]. Se simuló el flujo del hule a través de un pequeño sistema de vena conectado a la pieza por dos puntos de inyección como muestra la figura 7, con el objetivo de conocer las características del llenado de la cavidad, el curado del hule y revisar potenciales problemas de aire atrapado y líneas de soldadura, así como definir parámetros de proceso como la presión demandada para inyectar, tiempo de llenado, tiempo requerido para obtener un grado de curado de por lo menos 90% y la fuerza requerida para mantener el cierre del molde.

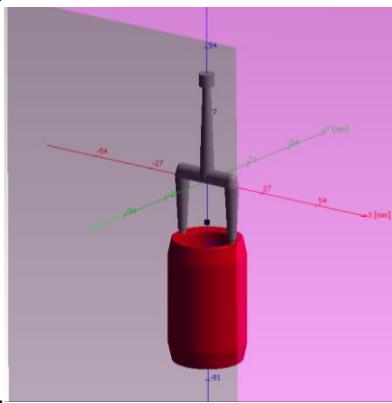


Figura 7. Geometrías para la simulación de inyección de hule.

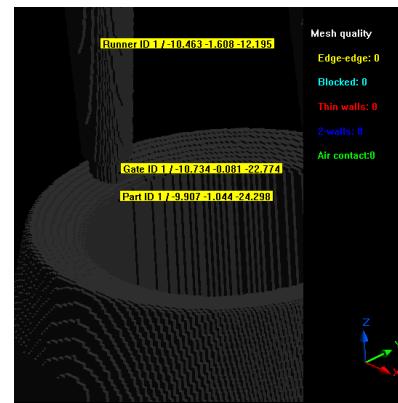


Figura 8. Reporte de la calidad del mallado.

La malla para la pieza se estableció con un ancho mínimo de elementos de 1 mm en todos los ejes, para los puntos de inyección el ancho mínimo de los elementos se estableció de 0.1 mm evitando así que los resultados de la simulación mostraren excesiva fricción con las paredes [4], esto ocurre cuando se malla una sección delgada con tres o menos elementos de extremo a extremo. El mallado para el molde en forma de prisma cuadrangular de por lo menos 3 mm de espesor en la dirección de cada eje coordenado, con esto se obtiene un mallado con el que el flujo de hule puede simularse efectivamente. El software incluye una herramienta para revisar la calidad del mallado y presenta los resultados como se muestra en la figura 8.

Las propiedades del material utilizadas se tomaron de la librería de SIGMASOFT y corresponden a un material de dureza 63 Shore A de base hule natural, el material para el molde se definió como un acero pre endurecido ISO 40CrMnMo7 conocido como H13. En la definición del proceso de moldeo se estableció una velocidad de inyección del material de $3,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ por 10 segundos.

Diseño del molde prototipo

El molde prototípico es un molde de transferencia, es decir en el que el hule se coloca sobre el molde en un cilindro y con un émbolo se fuerza a pasar por una serie de conductos hacia la cavidad del molde. El molde diseñado consta de las siguientes partes que están referidas a la figura 9.

1. Émbolo, su función es forzar el hule a pasar a través de los puntos de inyección barrenados en el inserto superior.
 2. Anillo superior, en él se ensambla el inserto superior y sus paredes además sirven para albergar el hule antes de ser inyectado.
 3. Inserto superior, contiene la parte superior de la cavidad del molde y los puntos de inyección por los que el hule llega a la cavidad.
 4. Anillo intermedio, contiene la parte central de la cavidad.
 5. Corazón, está en el centro de la cavidad y provoca que la pieza moldeada tenga un hueco.
 6. Inserto inferior, contiene un extremo de la cavidad y en él se fija el corazón.

7. Anillo inferior, sirve de base a todo el molde y en él está ensamblado el inserto inferior.

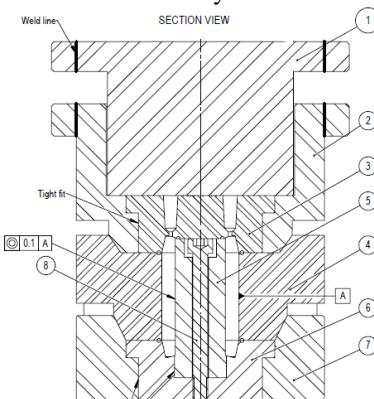


Figura 9. Vista de sección del molde prototípico diseñado.

Resultados de simulación de inyección

Con esta configuración la simulación arrojó que la cavidad y la vena se llena al 100% en 6.6 segundos desde el inicio de la inyección, la figura 10 muestra el porcentaje de aire atrapado que se disuelve en forma de pequeñas burbujas en el hule con un valor de hasta 15 unidades de volumen de aire por cada 100 de hule, lo que sugiere la necesidad de conductos para el escape de aire en la parte inferior de la pieza. La presión máxima alcanzada en el bebedero según la simulación es de 26.3 MPa (263.3 bar). La gráfica del comportamiento de la presión durante la inyección se muestra en la figura 11.

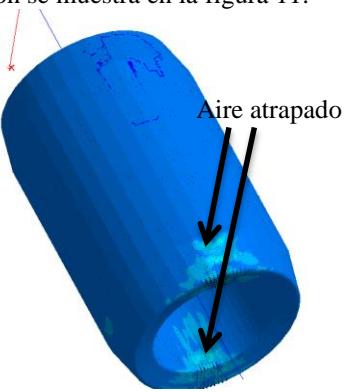


Figura 10. Mapa de colores mostrando el porcentaje de aire atrapado en las zonas de la pieza moldeada.

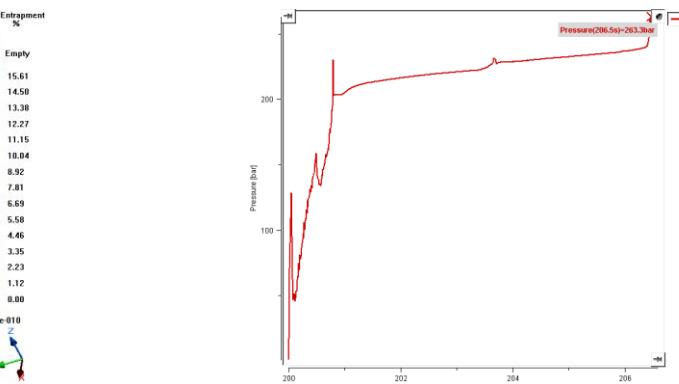


Figura 11. Presión máxima en el bebedero durante la inyección.

La figura 12 muestra en color naranja la posición de las líneas de soldadura en la pieza las cuales no representan un problema. La figura 13 es la gráfica obtenida de la simulación del proceso de inyección que muestra la fuerza en el vector Z (vertical) de 3.8 kN necesaria para mantener el molde cerrado durante la inyección, sin embargo la fuerza de cierre durante el curado asciende a 148 kN.

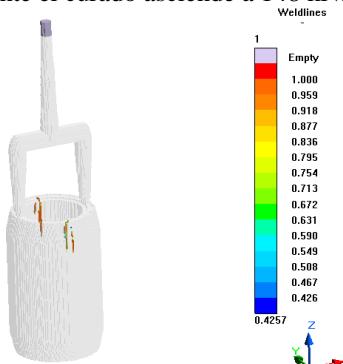


Figura 12. Líneas de soldadura del hule.

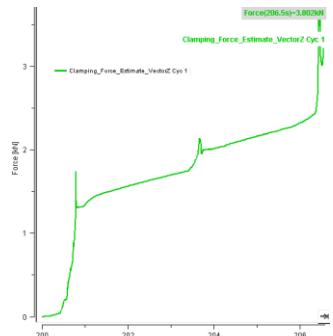


Figura 13. Gráfica de la fuerza de cierre del molde de prototipos.

La figura 14 muestra el grado de curado de la pieza en el rango óptimo de curado del 89% al 98% de vulcanizado, lo que ocurre a los 210 s después del inicio de la inyección según la simulación.

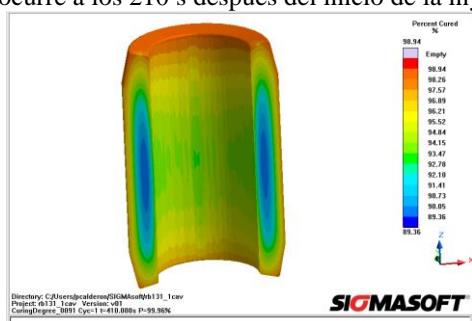


Figura 14. Corte de sección de la pieza mostrando el porcentaje de curado óptimo de la pieza.



Figura 10. Buje prototipo ensamblado.

Resultados de pruebas de ensamble

Se diseñó un dispositivo de ensamble para este buje y se observó que la goma llena completamente el espacio entre los dos tubos con tolerancia de +/- 0.5 mm sin sobrantes como lo muestra la figura 10.

La figura 11 presenta un mapa de desviación de la sección transversal del modelo CAD o ideal comparado con la pieza obtenida.

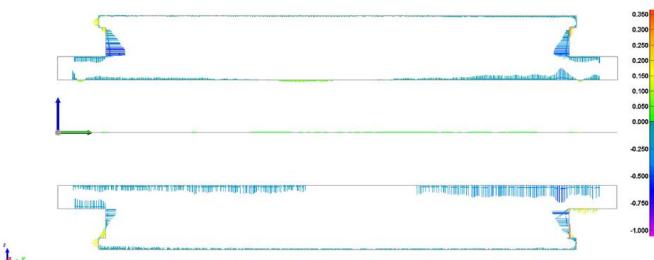


Figura 11. Mapa de desviación de la sección transversal del modelo CAD o ideal comparado con la pieza obtenida.

Conclusión

Las dimensiones de la cavidad son las correctas, se fabricaron insertos nuevos para el molde de prototipos pues se observó atascamiento de las gomas en el corazón del molde por lo que se cambiara la ubicación de las líneas de partición para evitar el problema a nivel de producción en masa.

Finalmente para comprobar el correcto funcionamiento del buje es hacer pruebas de desempeño mecánico y fatiga con los bujes prototípico, para lo cual se puede decir que están en proceso pruebas de funcionalidad y de manera inicial las pruebas básicas o prueba prototípico tienen un rendimiento correcto.

Referencias

- C. O. Horgan , J. G. Murphy. "Constitutive Models for Almost Incompressible Isotropic Elastic Rubber-like Materials," Journal of Elasticity, Volume 87, Issue 2. Julio de 2007.
Peter Jones, "Mould Design Guide" Smithers Rapra Technology Limited, United Kingdom, Primera edición 2008.
Sigma soft corporations, Manual Application training: Process & mold design, REP, 2015, France.
G. Liang, K. Chandrashekara, Neural network based constitutive model for elastomeric foams, Elsevier, Engineering Structures 30, 2008.
R. Jakel, Analysis of Hyperelastic Materials with Mechanical: Theory and Application Examples, Technische Universität Chemnitz, 27 April 2010.
R.S. Rivlin, "Large Elastic Deformations," Rheology: Theory & Applications - Vol. 1, ed. F.R. Eirich, Academic Press, Inc., New York, 1956, Chapter 10.
O.H. Yeoh, "Phenomenological Theory of Rubber Elasticity," Comprehensive Polymer Science, ed. G. Allen, Elsevier, Oxford, 1996, Chapter 12.