

SIMULACIÓN DEL LLENADO DE UN MOLDE DE 12 CAVIDADES PARA INYECCIÓN DE HULE

Pablo Calderón Carrasco^a, Eduardo Rodríguez López^b, Raúl Lesso Arroyo^a, José F. Louvier Hernández^d, Julio Rea Lugo^b, Jaime Navarrete Damián^c.

^aDepartamento de Ingeniería Mecánica, Instituto Tecnológico de Celaya, A. García Cubas 600, Celaya, Guanajuato, 38010, MÉXICO.

^bIngeniería de Elastómeros, Rassini Bypasa, Oriente seis 6, Nuevo Parque Industrial, San Juan de Río, Querétaro, 76806, MÉXICO.

^cDepartamento de Diseño y Desarrollo de Equipo, CRODE Celaya, Diego Arenas Guzmán 901, Celaya, Guanajuato, 38020, MÉXICO.

^dDepartamento de Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Celaya, A. García Cubas 600, Celaya, Guanajuato, 38010, MÉXICO.

Resumen

En este trabajo se describe el proceso de diseño de la vena de inyección de hule para un molde de 12 cavidades utilizando herramientas CAD y CAE para minimizar el tiempo de desarrollo. Las cavidades son intercambiables mediante el uso de insertos, para fabricar 6 números de parte diferentes. El reto es diseñar la vena de tal manera que permita el llenado con el mismo polímero de las diferentes cavidades de manera balanceada, al mismo tiempo se busca reducir la cantidad de material (volumen) utilizado en la vena, ya que se convierte en desperdicio (colada). Mediante simulación por volúmenes finitos se consiguió un diseño de vena capaz de llenar el molde de manera balanceada con las cavidades de la pieza de mayor tamaño. Posteriormente se simuló para una geometría diferente de goma y se manufacturaron los insertos de las cavidades del molde. Se obtuvo un resultado satisfactorio al comparar la simulación con las piezas inyectadas experimentalmente.

Introducción

El moldeo por inyección es un proceso de manufactura donde el compuesto de hule antes de entrecruzarse se encuentra a alrededor de 80 °C en la unidad de inyección y es forzado a fluir a través de un bebedero a alta presión hacia el molde [1], donde el conducto se ramifica en un sistema de distribución (vena de inyección) que tiene ramales o secciones primarias, secundarias, de tercer y cuarto nivel dependiendo del arreglo utilizado y puede también tener caídas; finalmente el hule pasa a través de los puntos de inyección para llenar las cavidades y formar las piezas [2] donde se vulcaniza a mayor temperatura como se muestra en la *Figura 1*. El diseño de la vena de inyección es complejo puesto que debe tomar en consideración el flujo del material viscoso, el incremento de viscosidad durante la inyección debido al entrecruzamiento del elastómero y la velocidad de inyección para conseguir que todas las cavidades se llenen de manera simultánea (balanceada) [8].



Figura 1. Partes de la vena de inyección.

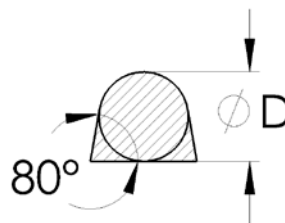


Figura 2. Sección transversal trapezoidal

Metodología

Caracterización de material. La reología del elastómero se determinó utilizando un reómetro de disco oscilante marca MONSANTO modelo Reomether ODR 2000, también se midió la dureza en botón del

compuesto vulcanizado de acuerdo a la norma ASTM D2240-05 utilizando un durómetro Tipo A marca REX modelo OS-2H. El elastómero utilizado es de formulación y fabricación propia.

Diseño de geometrías de venas. Se dibujaron varias opciones de venas en las que se mantuvo constante el área de sección transversal de todos los ramales en función de sus niveles, variando solamente la geometría del recorrido para llegar al punto de inyección, respetando las dimensiones máximas del molde y las restricciones de volumen máximo de inyección impuestas por la máquina de moldeo por inyección marca REP® modelo V47/160. Las geometrías se basaron en [4] y [5] quienes recomiendan trayectorias balanceadas geométricamente y la sección transversal trapezoidal mostrada en la *Figura 2*. El diámetro de la sección primaria es de 9 mm, en cada ramificación el diámetro de la sección se disminuyó tomando como referencia la Fórmula 1;

$$D = dN^{(1/3)} \quad \text{Fórmula 1}$$

Donde N es el número de ramas, D es el diámetro de la vena y d el diámetro de las ramas [5]. El diámetro final de la vena se decidió tomando en cuenta los cortadores milimétricos disponibles para el maquinado de la placa de molde.

Diferentes opciones del sistema de venas se modelaron en el paquete CAD SolidWorks®, estas se muestran en la *Tabla 1*, posteriormente se simularon para el llenado de la pieza RB-178 con un volumen de 59.51 cm³ y las dimensiones generales mostradas en la *Figura 3* por ser el número de parte que requiere mayor volumen de hule.

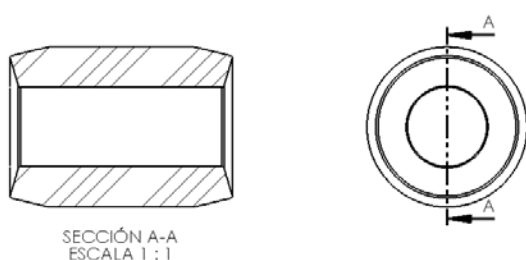


Figura 3. Dimensiones para la goma RB-178

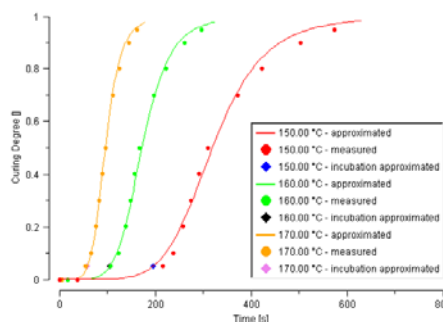


Figura 4. Tiempo de curado del compuesto

Modelado. El modelo del material se tomó de la base de datos del paquete de simulación de un material tipo con dureza 60 en escala Shore A, el esfuerzo cortante máximo admitido por el material quedó definido en el rango de 0.5 MPa a 1 MPa [7]. Las curvas de grado de curado en función del tiempo medidas a diferentes temperaturas consideradas se condensan en la gráfica mostrada en la *Figura 4*. La temperatura del compuesto al momento de ser inyectado se estableció en 80 °C.

El material para el molde se definió como un acero grado herramienta AISI H13 con una temperatura inicial de 180 °C. El caudal de inyección del material viscoso se estableció en 50 cm³ durante 20 s, todos los parámetros del proceso se establecieron dentro del rango de valores de los parámetros de inyección. El modelo del molde consta de un sólido cuadrangular que va desde la cara superior del bebedero hasta un sobre material más allá de la parte inferior de las cavidades, mediante operaciones booleanas a este sólido se le restó el modelo CAD de la vena de inyección y de las piezas a moldear con la expansión térmica considerada para dejar solamente el material requerido para el molde, como muestra la *Figura 5*. *Simulación.* La simulación de la inyección se realizó utilizando el software SIGMASOFT®; el cual tiene la capacidad de simular inyección de elastómeros mediante volúmenes finitos con el módulo ELASTOMER. Se simulon diferentes configuraciones de venas para obtener las características de llenado y aire atrapado en cada cavidad, curva de presión en el bebedero, tiempo de curado, fuerza de

cierre (clamp) requerida durante la inyección, así como la ubicación y severidad de las líneas de soldadura. 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 se realizó con elementos 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 y curado del hule puede simularse efectivamente

Evaluación. Se compararon los volúmenes de las diferentes opciones de venas calculándolos mediante el software CAD porque es deseable seleccionar la de menor volumen ya que reduce el desperdicio de hule (colada). La uniformidad en el llenado se comparó midiendo en el software de simulación la diferencia de tiempo que existe desde que se llena completamente por lo menos una cavidad hasta que ocurre el llenado completo de la cavidad más rezagada, este es uno de los criterios de diseño de mayor importancia además de la uniformidad de temperatura en el molde para obtener piezas con el mismo grado de curado. El aire atrapado se midió aislando cada cavidad en el software para revisar el porcentaje de aire atrapado máximo; este criterio está relacionado con la calidad de la pieza pues es un indicador de la aparición de huecos y burbujas en las piezas obtenidas [3]. Para determinar la opción de vena que requiere menor gasto energético para conducir el hule y llenar las cavidades se compararon las gráficas del comportamiento de la presión en el bebedero durante la simulación del proceso de inyección. También se obtiene un gráfico de la ubicación y severidad de las líneas de soldadura que se compararon revisando la extensión y grado de curado del hule al unirse los flujos que las originan.

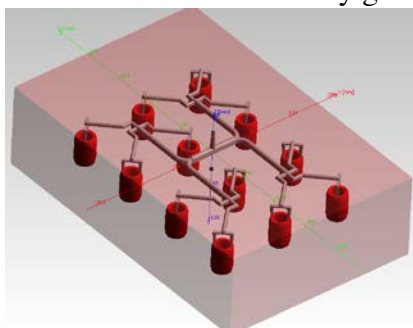


Figura 5. Modelo del molde de inyección.

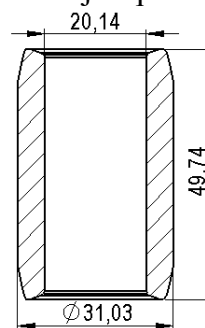


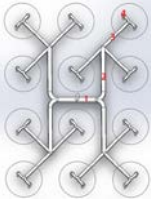

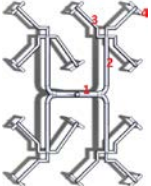
Figura 6. Vista de sección de la goma RB-131

Validación. A partir del diseño de vena con mejor desempeño, se maquinó un molde. Se probó con insertos para moldear la pieza RB-131 la cual se muestra en la Figura 6, por lo que la simulación de la opción de vena con mejor desempeño se repitió para esta pieza que tiene volumen 20.4 cm³, aproximadamente la mitad del volumen de la RB-178. En esta nueva simulación se revisaron además algunos otros parámetros para el proceso de inyección que se tomaron como base para establecer los parámetros de operación de la máquina inyectora. Para validar las simulaciones se hicieron inyecciones incompletas obteniendo la vena de inyección a diferentes porcentajes de llenado; las venas incompletas obtenidas se compararon visualmente con capturas de la simulación del llenado.

Resultados

La evaluación y simulación de diferentes opciones de venas de inyección para el llenado de la pieza RB-178 se muestran en la Tabla 1. Con estos datos se decidió que la geometría para la vena presentada en la opción 5 es la de mejor desempeño y cumple los criterios de diseño por lo que fue elegida para aplicarse al molde.

Tabla 1. Características de venas y conclusiones obtenidas de la simulación de llenado.

#	Diseño vena	Características de la geometría	Vol (cm ³)	P máx (bar)	% de aire	Conclusión
1		Ramales 1, 2, 3 y 4 de la vena son maquinados en placa de venas. Los puntos de inyección que conectan las cavidades con la vena de inyección se maquinaron en los insertos que también tienen la parte superior de la cavidad	59.49	972	21.47	Valores puntuales elevados del porcentaje de aire atrapado máximo en las cavidades 3 y 10 son fundamento para descartar el uso de esta vena.
3		Los ramales 1, 2 y 3 de la vena son maquinados en la placa de venas. El ramal 4 y los puntos de inyección se maquinan en los insertos intercambiables que también tienen la parte superior de la cavidad.	57.68	966	23.12	Valores puntuales elevados del porcentaje de aire atrapado máximo en las cavidades 3 y 10 son fundamento para descartar el uso de esta vena
5		Los ramales 1, 2 y 3 de la vena son maquinados en la placa de venas. El ramal 4 y los puntos de inyección se maquinan en los insertos intercambiables que también tienen la parte superior de la cavidad. El ramal de segundo nivel se separa en 3 ramas en ángulos rectos	62.1	831.2	4.42	Esta alternativa fue la seleccionada por tener el mejor desempeño

El modelo CAD de la placa de venas del molde manufacturado se muestra en la Figura 7.

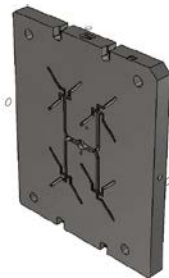


Figura 7. Vista isométrica de la placa de venas.

Simulación con RB_131 del modelo de vena seleccionado. La primera goma requerida para manufacturar en este molde no coincidió con la de mayor tamaño que se consideró en el diseño, por lo que se repitió la simulación de inyección para el llenado de la pieza RB-131 variando en el modelo solo la geometría de la goma a moldear. Los resultados se muestran a continuación.

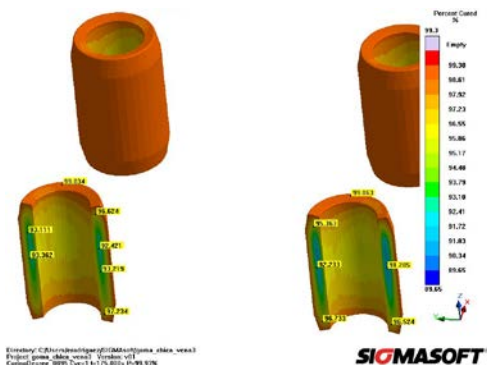


Figura 8. Grado de curado a los 145 segundos desde el inicio de la inyección.

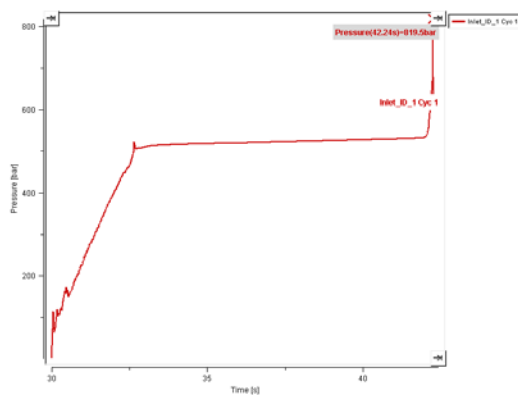


Figura 9. Presión en la boquilla durante la inyección para el llenado de la goma RB-131.

El grado de curado óptimo de las piezas según la simulación se alcanza a los 145 segundos después del inicio de la inyección. La *Figura 8* en su lado derecho muestra un corte de sección de la pieza indicando el grado de curado de una pieza que se vulcaniza en una de las esquinas del molde (Cavidad 10), a la izquierda el grado de curado de una de las piezas vulcanizadas en una de las cavidades de la parte central (Cavidad 8). Las cuales muestran que a pesar de existir una diferencia de 0.5 s en el llenado, no es significativa pues no produce una variación importante en el grado de curado que alcanzan.

La presión alcanzada durante la simulación del proceso de inyección en la boquilla del molde para la pieza RB-131 es de 819.5 bar como muestra la *Figura 9*, además en la gráfica se observa que la presión se mantiene constante por alrededor de 10 s lo cual corresponde al momento en el que las cavidades se llenan, al final la presión sube abruptamente para llenar la parte inferior de las cavidades donde se detectaron zonas con alto porcentaje de aire atrapado que se reporta en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Aire atrapado por cavidad

Cavidad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
% aire atrapado puntual máx.	13.09	0.15	9.91	0.21	0.15	0.19	0.18	0.15	0.18	13.71	0.16	7.03

Comparación entre simulación y resultados experimentales. De las inyecciones parciales realizadas se obtuvieron venas de inyección parcialmente llenas que se comparan visualmente en la *Figura 10*, que muestra fotografías de la vena obtenida experimentalmente y el resultado de la simulación a diferentes porcentajes de llenado. En general lo que se observa es que coincide bastante bien la predicción del llenado contra la realidad. En el caso (A), el llenado es solamente el 2% del volumen total. Considerando al volumen total como la suma del espacio de las doce cavidades más el espacio de la vena (primaria y ramales). Se desea un diseño de molde que genere una inyección balanceada, es decir, que se vaya llenando de manera simultánea cada cavidad. En los casos (B-D) se puede observar que la simulación representa fielmente a las diferentes coladas obtenidas en el molde prototipo. Además, se puede observar que el perfil del flujo del polímero es homogéneo para todas las cavidades.

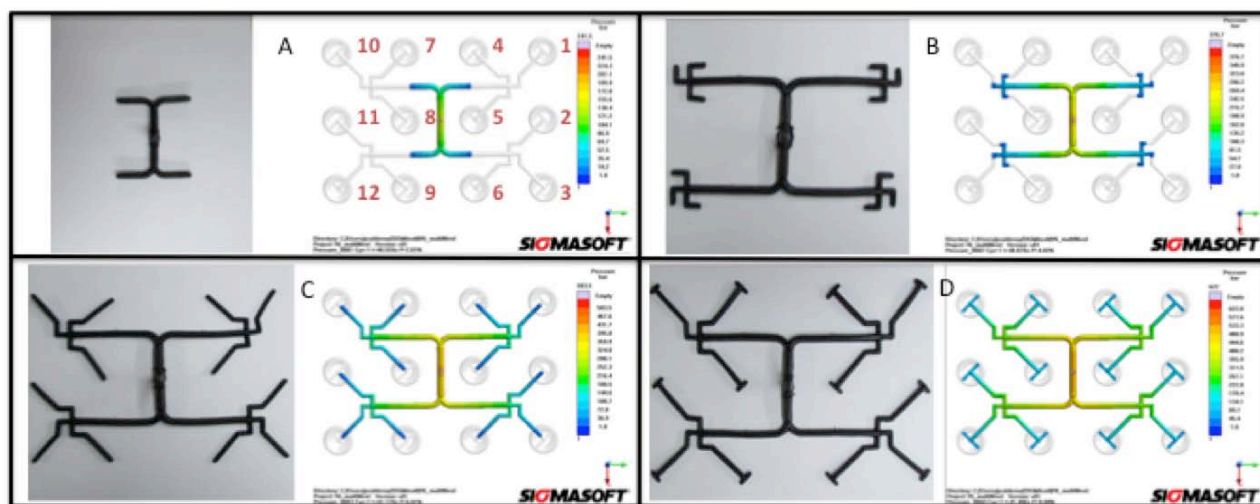


Figura 10. Comparación entre la colada obtenida en el molde prototipo y la simulación al inyectar aproximadamente el (A) 2%, (B) 4%, (C) 6% y (D) 8% del volumen total de hule.

Se montó el molde en la máquina inyectora V47 y se establecieron los parámetros de inyección que se muestran en la Tabla 3. Así se obtuvieron en un ciclo de inyección 12 piezas de las gomas RB-131 completas y la vena de inyección que se muestra en la *Figura 11*.



Figura 11. Gomas RB-131 y vena de inyección requerida para obtener piezas completas.

Tabla 3. Parámetros de la máquina inyectora para obtener piezas RB-131 sin defectos de llenado.

Parámetro	Valor inicial
Vo (Volumen de inyección)	335 cm ³
Ve (Velocidad de inyección)	30%
Pm (Presión de sostenimiento)	240 bar
Tm (Tiempo de sostenimiento)	41 s
Venteo ¹	Activado
Tc (Tiempo de curado)	240 s.
Thu (Temperatura del husillo)	60 °C
Tcam (Temperatura cámara)	60 °C
Tsup (Temperatura platina sup)	175 °C
Tinf (Temperatura platina inf)	170 °C

Conclusiones

Las herramientas CAD y CAE para el modelado de piezas de hule como del molde, así como la simulación del proceso de inyección, resultan ser de gran utilidad para evaluar diferentes escenarios como en este caso la propuesta de un molde atípico de 3 × 4 cavidades para diseñar una vena que utilice la menor cantidad de material (puesto que se convierte en desperdicio) pero que permita el flujo del fluido viscoso de manera que las cavidades se llenen equilibradamente para obtener piezas de la misma calidad con un tiempo de ciclo aceptable, para la goma RB-131 es de 3 minutos. El resultado de las simulaciones de inyección concuerda con los ensayos experimentales de manera satisfactoria pero sugiere la aplicación de un sistema de vacío para la parte inferior de las cavidades por el porcentaje de aire atrapado de hasta 13.7% en esa zona.

Referencias

1. James L. White, "Development of Rubber Molding Technology", *Rubber Processing*, Editorial Hanser, 586 p., 1995.
2. John G. Sommer, "Compound mixing and processing", *Engineered Rubber products*, Editorial Hanser, 181 p., 2009.
3. John Bozzelli, "Eliminate Bubbles, Voids, Sinks & Blisters", *Prospector*, disponible en; <http://knowledge.ulprospector.com/1462/eliminate-bubbles-voids-sinks-blisters/>, 2011.
4. Application training: Process & mold design, REP, 2015, France.
5. John Beaumont "Mold design", *Injection Molding Handbook*, Editorial Hanser, 784p., 2002.
6. SIGMA Engineering GmbH, "Virtual Molding changes the Game Rules in Mold Making" Press release, 3p., 2015
7. SIGMA Engineering GmbH "Material Data for Polymers", SIGMASOFT Version 5.0+ Manual, 2013.
8. Peter Jones, "Mould Design Guide" Smithers Rapra Technology Limited, United Kingdom, Primera edición 2008.

¹ Venteo. Es un subciclo en el que hay una pequeña apertura y cierre de las placas del molde, posterior a la inyección para favorecer el escape de aire.