

Mejora para la guía de diseño de perfil de corredor Tipo Z

Julio Cesar López Preciado

Instituto Tecnológico de Celaya.

joules.mx@gmail.com

Martin Caudillo Ramírez

Instituto Tecnológico de Celaya.

martin.caudillo@itcelaya.edu.mx

José Luis Moreno Vicencio

Mabe Centro de Tecnología y Proyectos

joseluis.morenovicencio@mabe.com.mx

Resumen

Se propone una mejora en la recomendación de diseño para perfil de corredor de forma Z, para disminuir los esfuerzos de corte y las pérdidas de presión de inyección ocasionadas por los cambios de dirección. Con ayuda de un software de simulación especializado, se realizó un diseño de experimentos (DOE) que muestra la influencia de las variables de diseño de molde: diámetro en cambio de dirección y ángulo de aproximación ha dicho diámetro, en un sistema de corredores de inyección de colada fría. La selección de variables de control se realiza a partir del estudio de los modelos de inyección y las formas de degradación de material durante la etapa de inyección.

Palabra(s) Clave(s): Corredores de inyección, diseño de experimentos, molde de inyección, simulación de inyección.

1. Introducción

La industria del plástico ha sido un sector productivo de crecimiento constante desde 1976 a la fecha, de acuerdo con J. Góngora [1] la industria del plástico cuadruplicó su producción mundial entre el periodo de 1976 y el 2012. Siendo los sectores de mayor producción de plástico: el empaque y almacenaje con 39.4%, artículos del hogar con 22.4%, la construcción con 20.3% y las autopartes con 8.2%. En la industria automotriz la revista American Chemistry Council [2] publicó que los plásticos son cada vez más utilizados en este sector, debido a su durabilidad, resistencia, flexibilidad, su capacidad de aislar el calor y la electricidad, pero sobre todo, a su ligereza. En esta misma publicación, American Chemistry Council también señala que en los últimos 40 años el peso que corresponde a plástico en los automóviles ha aumentado de 27 kg a 150 kg y que en el 2007 más del 50% del volumen del vehículo era plástico. La gran variedad y uso de los plásticos en el mercado, han creado la necesidad de asegurar la repetibilidad y reproducibilidad de la calidad en su manufactura, lo que ha influenciado en la creación de estándares y guías de diseño para la fabricación y medición de piezas plásticas y herramientas de manufactura. La Sociedad americana para la prueba de materiales (ASTM por sus siglas en inglés), por ejemplo: creó los estándares ASTM D668, que establece los lineamientos para llevar a cabo pruebas de tensión en materiales plásticos y el ASTM D3641, que propone guías de diseño para fabricar un molde de inyección con el fin de producir especímenes para pruebas de tensión que aseguren repetibilidad en las pruebas.

Las primeras guías de diseño para la fabricación de moldes de inyección fueron propuestas a partir de la experiencia empírica de los diseñadores y empresas, siendo ejemplos de esto: P. Unger [3] con su libro 130 diseños probados y los manuales con guías de diseño de LANXESS Energizing Chemistry [4] y EASTMAN Polymers [5]. Por este motivo, se realizan investigaciones que prueban y crean nuevas guías de diseño, como las de N. Zombad y D. Kazmer [6], que evalúan una guía de diseño empírica que calcula un espesor de corredor mínimo y su tiempo de enfriamiento y la compara contra los resultados de un método de optimización propuesto. Demostrando que con la guía

empírica para el tamaño de corredor con ramificaciones, se obtiene un volumen total 9% mayor al encontrado con el método de optimización y que las dimensiones obtenidas por el método empírico necesitan de un 50% a 70% mayor tiempo de enfriamiento, cuando se prueban usando bajas y altas presiones de inyección. Por otro lado, autores que proponen nuevas guías y las comparan contra métodos empíricos son C. Lee y J.F. Stevenson [7], que definen un método matemático para minimizar el uso de material en el diseño de un sistema de corredores, mediante la reducción del diámetro de corredor y la longitud total del mismo, obteniendo hasta un 33% de ahorro en el volumen total de un sistema de corredores, que es comparado contra el diseño de un molde fabricado con reglas empíricas.

Las tecnologías de simulación juegan un papel fundamental en la optimización y el entendimiento del fenómeno de inyección de moldes, además de ser una herramienta para el diseño de moldes de inyección y la toma de decisiones durante el diseño de las piezas plásticas [8]. Las simulaciones de inyección también son usadas para generar nuevas guías de diseño y entender el comportamiento de las variables del proceso de inyección de una manera más económica. K. KYAS y M. STANEK [9], utilizan simulaciones con software comercial para entender la influencia de la forma transversal del corredor y la longitud del mismo sobre el tiempo de enfriamiento de una pieza plástica. Demostrando que al aumentar el volumen total del sistema de corredores, los tiempos de enfriamiento crecen de manera paralela. Otra aplicación en la generación de recomendaciones de diseño para moldes de inyección utilizando simulación, es el trabajo de Y. Chang y S. T. Huang [10] quienes proponen el método de control de espesor tridimensional (3DTCM por sus singlas en inglés) en el que se demuestra que cuanto más grandes sean los cambios de espesor en el diseño de una pieza plástica, mayor será el pandeo que está presente; y que dichos pandeos podrán ser controlados manteniendo las temperatura de la cavidad y el corazón del molde lo más uniformes posibles por medio de un adecuado sistema de enfriamiento.

Como se puede ver, el diseño del sistema de corredores tiene un impacto importante sobre el tiempo de ciclo y la calidad de las piezas plásticas. Si se mejorara la guía de diseño de corredores de inyección tipo Z existente buscando la disminución de pérdidas de presión y esfuerzos de corte, se podría mejorar la calidad de las piezas plásticas. Utilizando como base el diseño de un molde de inyección bajo la norma ASTM D3641, se estudiará el efecto de los diámetros en cambios de dirección y ángulos de aproximación del sistema de corredores, para encontrar las magnitudes de dichos parámetros que generen la mayor reducción de esfuerzos de corte y pérdidas de presión de inyección.

2. Metodología de desarrollo

2.1. Proceso de moldeo por inyección

El proceso de moldeo por inyección, es un método de manufactura semicontinuo que consiste en inyectar un polímero fundido en un molde cerrado a presión, a través de un orificio conocido como compuerta o bebedero. Dentro del molde el polímero se solidifica, conservando la forma de la cavidad en su interior. Este proceso se lleva cabo en un ciclo de 4 etapas, la cuales son:

- **Etapa de inyección:** que comprende el lapso de tiempo en el cual la masa fundida es inyectada en el molde.
- **Etapa de compactación:** donde la masa fundida es forzada por medio de presión a mantenerse dentro del molde de inyección. Esta etapa termina cuando la masa fundida en el bebedero se solidifica.
- **Etapa de enfriamiento o curado:** es el tiempo que se da a la masa fundida para que solidifique completamente.
- **Etapa de apertura y cierre del molde:** donde la pieza plástica, es extraída del molde de manera manual o automática.

A lo largo de cada etapa del ciclo de inyección, existen diferentes variables que modifican la calidad de la pieza y el tiempo de ciclo del proceso. Estas variables se encuentran en el diseño de la pieza plástica, el diseño del molde de inyección, las condiciones de proceso empleadas y las propiedades reológicas del material inyectado.

2.2. Flujo descendente de la etapa de llenado

Durante la etapa de llenado, la forma en que el diseño de la pieza plástica, el diseño del molde de inyección, las condiciones de proceso y las propiedades reológicas del material afectan la calidad y el tiempo de inyección, se puede describir de la siguiente manera [11, 12]:

- **Propiedades del material:** definen parte del comportamiento del fluido durante la inyección y de ellas dependen los esfuerzos de corte, velocidades de corte y temperaturas máximas admisibles antes de que el material se degrade y pierda las propiedades mecánicas que son requeridas para su función.
- **Condiciones del proceso:** la presión, velocidad y temperatura a la cual el material fundido es inyectado, definen las temperaturas, esfuerzos de corte y velocidades de corte máximas que se alcanzarán duran el proceso.
- **Diseño de pieza:** la forma y el volumen total de la pieza, tienen un efecto geométrico sobre las fuerzas y la energía en la masa fundida. Las geometrías pueden hacer que se incremente la presión de inyección requerida para el llenado del molde, si las paredes son diseñadas estrechas y provocar concentraciones de temperatura por la separación entre los diferentes elementos del diseño.
- **Diseño de molde de inyección:** al igual que en el diseño de la pieza plástica, el diseño de molde tiene un efecto geométrico sobre la masa fundida, agregando además, variaciones en la temperatura por efecto del sistema de enfriamiento y el material del molde.

Como ya se mencionó, las variables que afectan calidad y tiempo durante la etapa llenado, se encuentran dentro de los diseños de pieza y molde de inyección, las condiciones del proceso y las propiedades de material, por lo que el diagrama en la Fig. 1. se propone para mostrar el grupo completo de variables de influencia sobre la etapa de llenado.

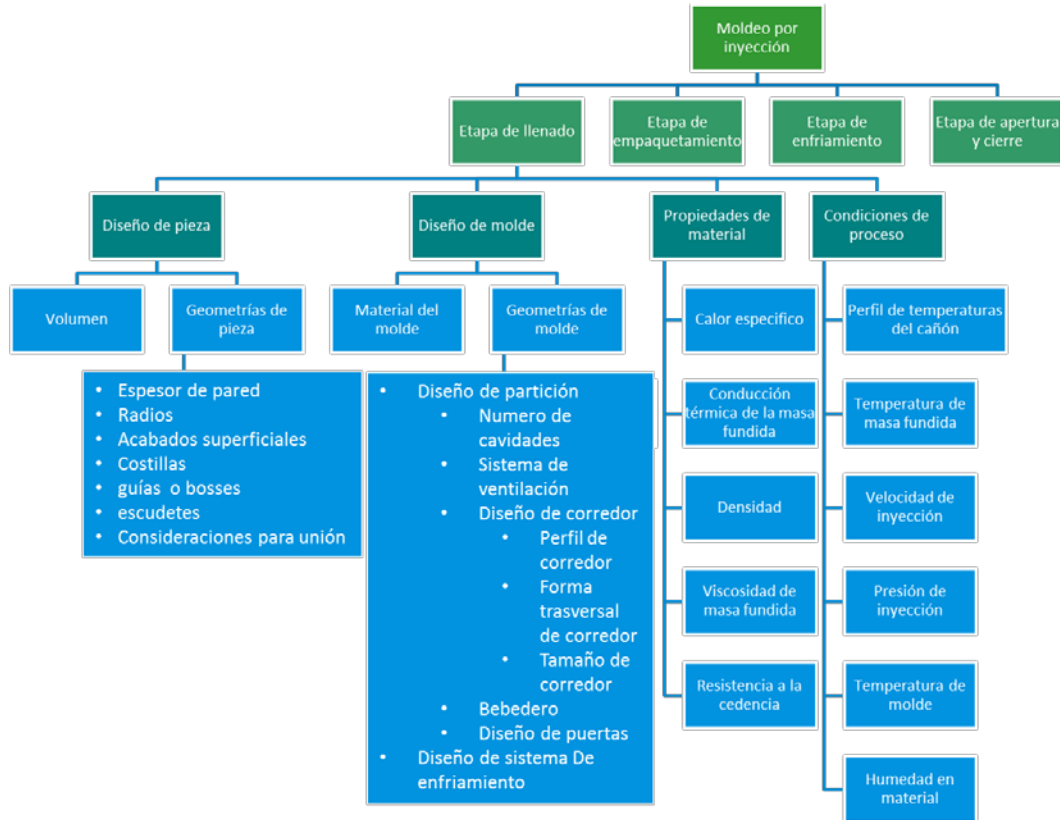


Fig. 1. Diagrama de flujo descendente de variables que afectan calidad de pieza y tiempo de inyección durante la etapa de llenado.

2.3. Modelación y simulación de la etapa de llenado:

Los modelos matemáticos que explican el comportamiento de la masa fundida en la cavidad y los corredores del molde de inyección son: la ecuación de la conservación de

la energía, la masa y el movimiento. U. G. Rojas [11] explica que la variación de la energía que ocurre por la convección de la masa fundida a lo largo del molde, es consecuencia del trabajo realizado por la disipación viscosa durante el avance de flujo, más el trabajo de la masa fundida al expandirse y contraerse por efecto de las presiones de inyección y las pérdidas de calor por conducción con el molde de inyección. Por otra parte también explica que el movimiento de la masa fundida es consecuencia de las fuerzas en el gradiente de presión por la profundidad en el molde, las fuerzas viscosas e inerciales de la masa fundida en movimiento y las fuerzas gravitacionales.

U. G. Rojas [11] hace ver que las formas generales de dichas ecuaciones de la conservación, son muy complejas de resolver. Por lo que propone, que, para facilitar su resolución y poderlas utilizar en la simulación de inyección es necesario simplificarlas por medio de análisis de reducción de términos de valor insignificante, limitaciones geométricas y preconsideraciones sobre el material, como: ver a la masa fundida como un material incompresible y con el comportamiento de un fluido newtoniano. El resultado de dichas reducciones son la ecuación de la energía para la cavidad (ver Ecu. 1), que permite ver los cambios de temperatura de la masa fundida durante la etapa de inyección y la ecuación de presión para la cavidad (ver Ecu. 2) usada para encontrar los cambios de presión durante la inyección. Estos modelos utilizan como parámetros de entrada las condiciones del proceso de inyección: temperatura de masa fundida, temperatura de molde de inyección, presión de inyección y velocidad de inyección; además de las propiedades de material: densidad de material (ρ), capacidad calorífica (C_p), conductividad térmica (k) y viscosidad de masa fundida (η).

$$\rho C_p \left(\frac{\delta T}{\delta t} + v_x \frac{\delta T}{\delta x} + v_y \frac{\delta T}{\delta y} \right) = \eta \gamma^2 + k \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \quad \text{Ecu. 1}$$

Dónde:

(ρ) Es la densidad del material, (C_p) es la capacidad calorífica, (T) temperatura, (t) tiempo; (x), (y) y (z) los vectores coordenados, (v_n) vector de velocidad en su respectivo eje, (η) viscosidad de masa fundida, (γ) velocidad de cortante y (k) conductividad térmica de masa fundida.

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(S_2 \frac{\delta P}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(S_2 \frac{\delta P}{\delta y} \right) = 0 \quad \text{Ecu. 2}$$

Dónde:

$$S_2 = \int_0^h \frac{z'^2}{\eta} dz' \quad \text{Ecu. 3}$$

(P) son campos de presión, (x), (y) y (z) los vectores coordenados y (η) viscosidad de masa fundida.

2.4. Guía de diseño para corredor tipo Z

Como se mencionó con anterioridad, este estudio se enfoca en proponer una mejora a la guía de diseño de molde, perfil de corredor tipo Z. Este diseño es utilizado principalmente en moldes de 2 cavidades iguales para mantener un sistema balanceado, dar oportunidad de colocar sumideros de colada fría y reducir turbulencias durante la inyección, favoreciendo un flujo uniforme en combinación con puertas tipo abanico y de rectángulo [5]. La Norma ASTM D3641 recomienda este tipo de corredor para fabricar especímenes de tensión (ver Fig. 2).

En mecánica de fluidos newtonianos, las pérdidas de presión generadas por singularidades como los cambios de dirección son ocasionadas por turbulencias. Estas

pérdidas son consideradas como menores y pueden ser encontradas en función de una altura cinética corregida mediante un coeficiente que solo puede ser obtenido experimentalmente, llamado coeficiente de resistencia o pérdida [13]. En un sistema de tuberías, los cambios de dirección que se hacen a 90 grados presentan mayores pérdidas de presión que los que se tienen con diámetros amplios y a ángulos de 45 grados, por lo que manuales de diseño como LANXESS Energizing chemistry [4] y EASTMAN Polymers [5] recomiendan evitar ángulos de 90 grados en cambios de dirección como se muestran en la Fig. 2. y en su lugar recomiendan utilizar diámetros generosos que disminuyan la presión durante la inyección del material. Dichas recomendaciones no establecen límites sobre qué tan grandes pueden ser los diámetros y que influencia pueden tener los ángulos de aproximación a dichos diámetros (ver Fig. 3), por lo que se estudian los cambios de presión y esfuerzos de corte que se pueden obtener al modificar los diámetros en cambios de dirección (D) y ángulos de aproximación (Θ) con ayuda de un diseño de experimentos (DOE).

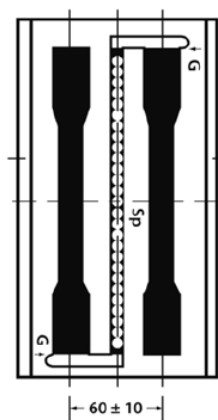


Fig. 2. Corte en línea de partición según la norma ASMT D3641.

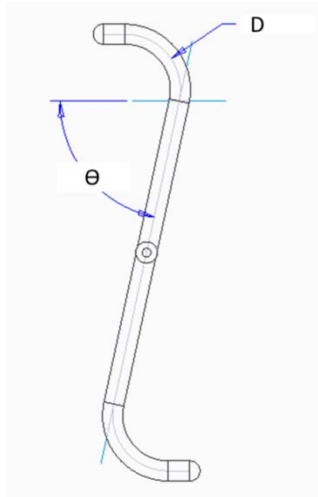


Fig. 3. Diseño tipo Z mejorado. D = Diámetro de cambio de dirección. θ = Ángulo de aproximación.

2.5. Simulación de la etapa de llenado

El desarrollo de un DOE requiere de la fabricación de distintos modelos experimentales, debido al costo que conlleva la fabricación de estos modelos, resulta más conveniente utilizar las herramientas de simulación de inyección de plásticos para realizar los experimentos requeridos.

El software de simulación utilizado para el desarrollo del DOE es Moldex3D. Este software utiliza modelos similares a los presentados anteriormente para describir el comportamiento de la masa fundida durante la etapa de llenado. Las variables de entrada requeridas en el software son:

- **Diseño de pieza:** en forma de malla 3D hecha a partir de la paquetería del software de simulación: Moldex3D Designer.
- **Diseño de molde parcial o completo:** en forma de malla 3D, también hecho con la paquetería del software: Moldex3D Designer.
- **Propiedades de material:**

- **Densidad:** introducida como constante o como las variables de un modelo que describa el comportamiento de la densidad en función de la presión, el volumen y la temperatura.
- **Capacidad calorífica:** admisible como una constante o como una tabla que contenga la capacidad calorífica a determinadas temperaturas.
- **Conductividad térmica:** admisible también como una constante o como una tabla que contenga la conductividad térmica a determinadas temperaturas.
- **Viscosidad de masa fundida:** admisible como constante o como las variables de un modelo que representa el comportamiento de dicha variable en función de la velocidad de corte y temperatura.
- **Condiciones de proceso:** temperatura de masa fundida, temperatura de molde de inyección, presión y velocidad de inyección.

Para observar la aproximación de los resultados de simulación a la realidad, se utilizó una máquina inyectora Demag Ergotech Viva 50 – 270 con 55 toneladas de capacidad de cierre y un molde de inyección construido a partir de la norma ASMT D3641; con las recomendaciones de diseño del manual LANXESS Energizing chemistry [4] para el corredor tipo Z.

Se procesan 3 resinas (Acrilonitrilo butadieno estireno - ABS, Poliestireno - PS y Polipropileno - PP), con el objetivo de comparar los resultados del proceso de inyección: tiempo de inyección, presión de inyección y peso de colada, contra los resultados calculados por el software de simulación. Los resultados del experimento se muestran en la tabla 1. La Fig. 4. muestra como el software de simulación reproduce el comportamiento del flujo de material fundido.

material		ABS – Cicolac MG47		PP – profax PL734		PS – styron 478		Correlación promedio (%)
		real	simulación	real	simulación	real	simulación	
	peso (g)	25.4	23.44	20.5	20.06	24.4	24.21	96.45%
inyección	Tiempo de inyección (s)	1.14	1.162	0.92	0.938	0.75	0.766	98.03%
	presión (Mpa)	120	98.81	46.36	48	71.81	57.02	86.11%

Tabla 1. Resultado de las variables peso de colada, tiempo y presión de inyección.

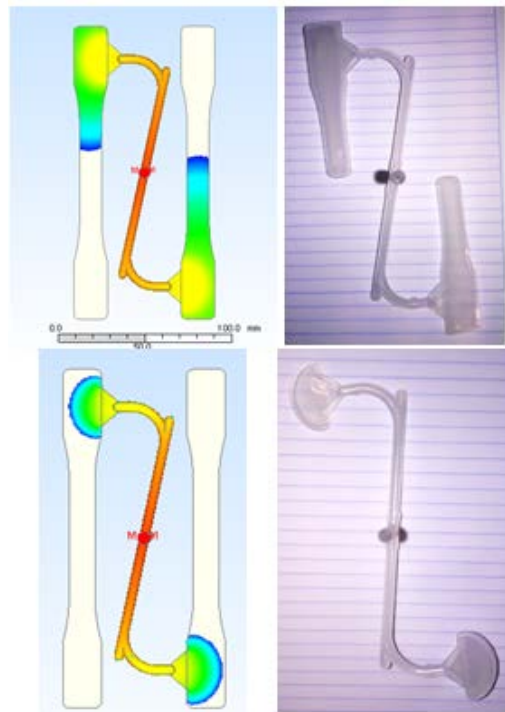


Fig. 4. Resultados del comportamiento del flujo de inyección.

De los resultados mostrados en la tabla 1, se puede observar que el nivel de correlación más bajo se presenta en la presión de inyección en el material Styrol478 con 79.4%, mientras que el material Profax PL734 muestra el mejor resultado de correlación en esta categoría con un 96.58%. Cabe señalar que las propiedades de material: capacidad calorífica y conductividad térmica, fueron cargadas en el software de simulación como valores constantes en el material Styrol478, mientras que en el Profax PL734 estas

mismas propiedades fueron cargadas como tablas en función de la temperatura de la masa fundida.

Con estos resultados se concluye que el DOE representa la realidad del proceso en un 86% y que el material recomendable para las simulaciones de inyección es el Profax PL734.

2.6. Diseño de experimentos

Como ya se mencionó, el DOE presentado en este trabajo busca observar la influencia de las variables de entrada diámetro de corredor y ángulo de aproximación, sobre las variables de salida: presión de inyección y esfuerzos de corte durante la etapa de llenado. El modelo de experimento considera 3 niveles para cada variable, por lo que de acuerdo a la teoría de H. Gutiérrez y R. de la Vara [14] se está hablando de un diseño de experimentos factorial 3^2 . Los niveles para cada factor y el diagrama de parámetros seguido por el DOE se muestran en la Fig. 5.

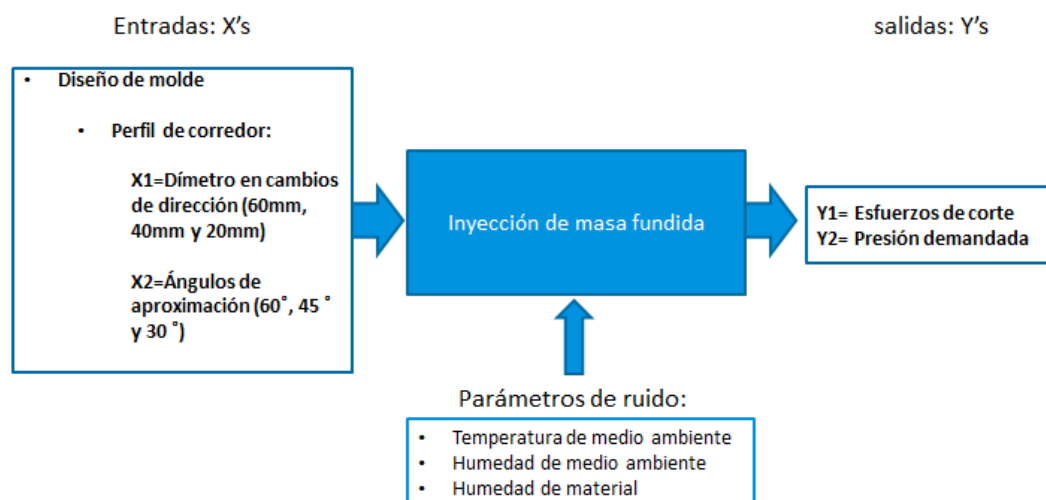


Fig. 5. Diagrama de parámetros del DOE.

3. Resultados

Los resultados de los experimentos se muestran en la tabla 2.

Iteración	Diámetro en cambio de dirección (mm)	Angulo de aproximación (°)	Tiempo de inyección(s)	Presión de inyección máxima(Mpa)	Esfuerzo de corte (Mpa)
1	20	30	0.764	46.37	1.022
2	20	60	0.765	46.91	1.009
3	60	30	0.765	46.25	0.984
4	60	60	0.765	46.41	1.070
5	40	30	0.765	46.33	0.999
6	40	60	0.764	46.64	0.930
7	20	45	0.766	46.79	0.958
8	60	45	0.765	46.37	1.075
9	40	45	0.765	46.69	0.946

Tabla 2. Organización de corridas y resultados de experimentación.

Utilizando los resultados de la tabla 2 y la teoría de H. Gutiérrez y R. de la Vara [14] se calculan los valores de significancia observada o valor-P mostrados en la tabla 3 y las gráficas de efectos principales de la Fig. 6.

La magnitud del valor-P es utilizada para revelar la significancia entre las magnitudes obtenidas como salidas del proceso. La teoría dice que si el valor-P es menor a 0.05, significa que la diferencia entre los resultados obtenidos de los experimentos es significativa, por lo que se puede concluir que existe una influencia de la variable de entrada X, sobre la de salida Y. Las gráficas de efectos principales de la Fig. 6 muestran el cambio de las variables de salida Y, con respecto a las de entrada X. Parte de su interpretación consiste en observar la pendiente de dichas gráficas, cuando la pendiente es nula, revela que no existe relación entre variables y en su contraparte, una pendiente pronunciada, la existencia de relación entre variables.

Variables		Significancia observada Valor-p
Variabes de entrada X	Variable de salida Y	
Diámetro de corredor	Presión de inyección	0.055
Diámetro de corredor	Esfuerzos de corte	0.006
Ángulo de aproximación	Presión de inyección	0.023
Ángulo de aproximación	Esfuerzos de corte	0.451

Tabla 3. Relación de variables con su respectivo calor de significancia observada.

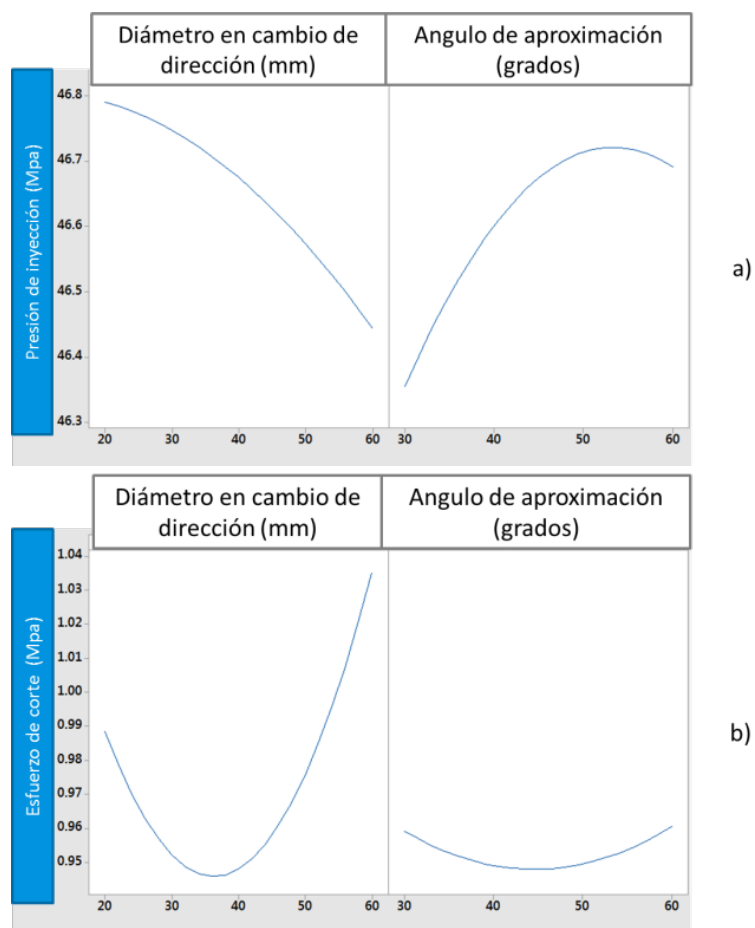


Fig. 6. Gráficas de efectos principales.

4. Discusión y conclusiones

En la tabla 2 se puede observar que la diferencia entre el mínimo y máximo valor de presión es de 0.66 MPa, mientras que en los esfuerzos de corte, la diferencia entre los valores máximo y mínimo es de 0.14 MPa. La reducción en pérdidas de presión por efecto del conjunto de variables de entrada observadas equivale al 1.1% de la presión total de inyección, lo que lleva a concluir que esta disminución en pérdidas de presión solo impactara sobre piezas pequeñas que requieran presiones de inyección muy bajas. Por otro lado, la reducción en los esfuerzos de corte se puede considerar significativamente mayor si tenemos en mente que los esfuerzos de corte en el material, deben permanecer por debajo del 1% de la resistencia a la cedencia del material [11]. Para el caso del PP su resistencia a la cedencia se encuentra en 28 MPa, siendo el 1%, 0.28 MPa, lo que significa que la variación entre máximo y mínimo esfuerzo de corte es el 50% del valor máximo admisible.

En la tabla 3 se puede observar que el diámetro de corredor presenta un valor-P menor a 0.05 en su relación con las variables de salida esfuerzos de corte y presión de inyección, lo que se interpreta como una relación significativa entre dichas variables. Esto se corrobora en las gráficas de efectos principales, con la inclinación presentada por las gráficas de la Fig. 6. en la relación diámetro de corredor/esfuerzo de corte y diámetro de corredor/presión de inyección. Por otro lado, la variable de entrada ángulo aproximación, presenta un valor-P de 0.45 en relación con la variable de salida esfuerzos de corte, demostrando que no existe influencia significativa entre dicha variable y los esfuerzos de corte. De igual manera esto se puede corroborar con las gráficas de efectos principales, donde la gráfica esfuerzos de corte/ángulos de aproximación, presenta una pendiente nula. Al analizar las gráficas de la Fig. 6. se observa que al aumentar el diámetro de corredor la presión de inyección disminuye, pero como condición contraria los esfuerzos de corte aumentan. También se ve que el único efecto del ángulo de aproximación es que al crecer la presión de inyección aumenta.

Con el objetivo de mantener los esfuerzos de corte al mínimo y reducir las pérdidas de presión por efecto de los cambios de dirección. La recomendación de diseño definida a

partir de los resultados es mantener los ángulos de aproximación lo más cercanos a 30 grados, y el radio en cambio de dirección en 40mm.

Por último, la relación que presenta la variable ángulo de aproximación con las variables esfuerzos de corte y presión de inyección observados en la Fig. 6. Crea incertidumbre sobre su uso. Ya que al no presentar una influencia significativa sobre los esfuerzos de corte y observar que la presión de inyección disminuye conforme el ángulo de aproximación se acerca a 0, sugeriría que la condición con menores pérdidas de presión y esfuerzos de corte se presentaría con un ángulo de aproximación nulo y usando solo el diámetro en cambio de dirección para obtener los mejores resultados del diseño de perfil de corredor. Para validar esta teoría, es necesario realizar un nuevo DOE con un rango entre niveles más amplio, que involucre los resultados del ángulo de aproximación a 0 grados.

6. Referencias

- [1] J. P. Góngora Pérez. “La industria del plástico en México y el mundo”. Comercio exterior. Volumen 64, No. 5, septiembre y octubre del 2014. Páginas 6 a 9.
- [2] American Chemistry Council. Plastics division, “Plastic in automotive markets technology roadmap”. Marzo 2009. Páginas 3,4.
- [3] P. Unger. “Gastrow injection molds 130 proven designs”. 4ta edición. 2006. HANSER. Ohio, USA.
- [4] Part and mold design. LANXESS Energizing chemistry. U.S.A. 2007. Página 139.
- [5] Processing and Mold design guidelines. EASTMAN Polymers. U.S.A. 2011. Página 14.

- [6] N. Zombad y D. Kazmer. "Analysis and validation of mold design guidelines for cooling time and runner sizing", Society of Plastics Engineers Annual Technical Conference, 2007.
- [7] C. Lee y J.F. Stevenson. "Runner design with minimum volume for multicavity injection molds. Parte 1 y 2". SPE/ANTEC 1997. Vol. 1, Abril 27 – Mayo 2 de 1997. Páginas 376 a 387.
- [8] J. Fuh y Y. Zhang; "Computer-aided injection mold design and manufacture" - 2.3-mold design methodology. 2004. Marcel Dekker, New York, USA.
- [9] K. KYAS y M. STANEK. "Influence of runner system design on molding process" 22nd International DAAAM Symposium. Vol. 22, No. 1. 2011.
- [10] Y. Chang y S. T. Huang. "Warpage management using three dimensional thickness control method in injection molding" ANTEC Plastic: Annual Technical Conference Proceeding. 2009
- [11] U. G. Rojas. "Simulación del llenado de moldes de inyección de plástico", Tesis Facultad de Ingeniería UNAM. 2001.
- [12] E. A. Campo. "The Complete Part Design Handbook for injection molding of thermoplastics". 2006. Hanser Gardner Publications, Ohio. USA. Páginas 546,549.
- [13] Y. Çengel; J. Cimbala; "Mecánica de fluido fundamentos y aplicaciones". 1ra edición eBook, 2006, Mc Graw Hill/ interamericana de México, México. Página 347.
- [14] H. Gutiérrez; R. de la vara; "Análisis y diseño de experimentos", 2006, Mc Graw Hill/ interamericana de México, México. Páginas 38, 238 a 248.