

OPTIMIZACIÓN DE REFUERZO DE COSTILLA EN CAJAS PLANAS PLÁSTICAS MOLDEADAS POR INYECCIÓN

Edgar E. Romero Ramírez

Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey
romero.ed90@gmail.com

Ulises Figueroa López

Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey
ufiguero@itesm.mx

Andrea Guevara Morales

Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey
a.guevaram@itesm.mx

Marcelo Estrella Guayasamin

Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey
A01363369@itesm.mx

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño y optimización de una caja reforzada con costillas inyectada en polioximetileno. Utilizando un diseño experimental de Taguchi L27-35, se definió un perfil que permite evaluar el efecto de la geometría de las costillas en la deformación. La modelación de la inyección en Moldflow Adviser permitió establecer la geometría óptima para la inyección de una pieza con mínima deformación y mínima tendencia al rechupe. Se diseñó y fabricó un molde instrumentado en base a la geometría óptima y la geometría con mayor tendencia a presentar defectos. La deformación y rechupe de las partes inyectadas fueron medidos con un equipo de análisis dimensional de imágenes, mostrando que los datos obtenidos de la modelación con respecto a los medidos tienen un error del 2% para la deformación, 6% para los rechupes y 5% para la profundidad media de rechupe, siendo estos resultados satisfactorios.

Palabra(s) Clave: costillas, deformación, inyección de plásticos, molde de inyección, rechupes.

Abstract

In this paper, the design and optimization of a plastic box reinforced with ribs and injected with polyoxymethylene are presented. Using a Taguchi design of experiments, a geometric profile was defined. This profile allow us to evaluate the effect of the ribs geometry on the deformation of the component. Moldflow Adviser was used to simulate the injection molding process in order to establish the optimum geometry for obtaining products with minimum deformation and sink marks. Based on the optimum geometry, and also on the one that maximized deformation, injection molding cavities were design and manufactured. The deformation and sink marks of the injected components were measured and compared with simulation results. Excellent agreement was found with 2% of error for deformation results, 6% for sink marks, and 5% for sink marks depth.

Keywords: *deformation, injection mold, plastics injection molding, ribs, sink marks.*

1. Introducción

El moldeo por inyección es la tecnología de procesamiento de plásticos más utilizada a nivel mundial. En México existen aproximadamente 2,700 empresas dedicadas a la transformación del plástico, de las cuales el 55% moldea sus productos por inyección con un volumen de producción aproximado de 1.43 millones de toneladas [3].

El proceso de inyección consiste básicamente de tres etapas: llenado, compactación y enfriamiento. Primero, la materia prima es calentada hasta fundir el polímero (figura 1a), el cual es forzado por presión dentro de una cavidad (figura 1b). Posteriormente, cuando el llenado es casi completo una presión de compactación o sostenimiento se aplica para llenar el volumen restante y compensar por la contracción del material debido al enfriamiento (figura 1c). Al solidificar la entrada a la cavidad no se requiere más presión y el material se deja enfriar dentro del molde (figura 1d). Cuando la parte es lo suficientemente rígida el

molde se abre y la parte es expulsada (figura 1e). Al cerrar el molde el ciclo se repite.

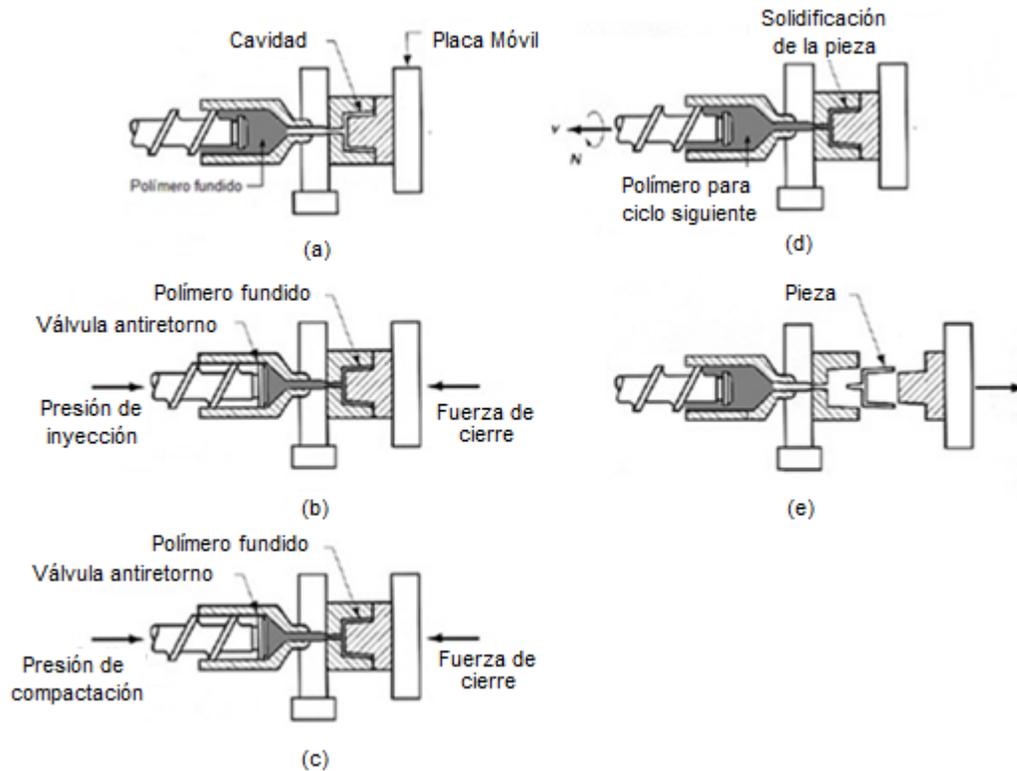


Figura 1 Etapas del ciclo de inyección.

La inyección de plásticos es un proceso extremadamente versátil y flexible para producir un amplio rango de componentes plásticos sencillos o complejos con gran precisión, buen acabado superficial y bajos costos de operación para producción en masa. Sin embargo, también ocurren defectos en las piezas inyectadas como son vacuolas, llenados incompletos, rechupes, rebabas, y muy comúnmente deformación. La mayoría de estos defectos se deben a condiciones de procesamiento no óptimas o el incorrecto diseño del molde. La deformación de las piezas después de ser expulsadas del molde es uno de los problemas más grandes en inyección de plásticos. Durante el ciclo de inyección el polímero fundido experimenta una deformación compleja al tener que fluir a través de secciones muy delgadas bajo altos esfuerzos de cizallamiento, así como historias de temperatura y presión que afectan las propiedades finales del componente.

Debido a la alta presión, los altos gradientes de temperatura y la relajación de las cadenas del polímero, se originan esfuerzos residuales. Estos esfuerzos son reales, y tienen el mismo efecto en el componente que aquellos esfuerzos originados por cargas o fuerzas externas. Su magnitud puede ser lo suficientemente alta para inducir severos cambios en la forma del componente. Esta deformación es compleja y varía en cada parte de la pieza como se puede apreciar en la figura 2.

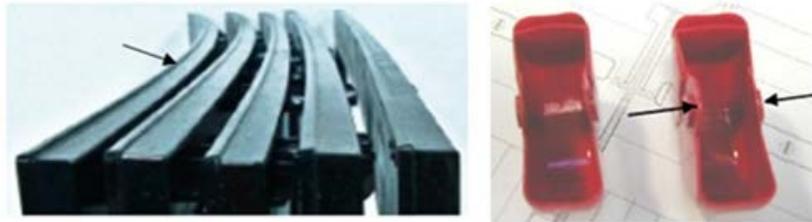


Figura 2 Deformación debido a esfuerzos residuales en componentes plásticos moldeados por inyección [7].

Las demandas actuales de altas tolerancias y estabilidad dimensional en piezas plásticas para sectores como el automotriz, hacen que sea necesario predecir y controlar los esfuerzos residuales generados durante la inyección del plástico y la subsecuente deformación de la pieza. A pesar de que los esfuerzos residuales, y por ende la deformación, son imposibles de eliminar, es posible diseñar componentes plásticos cuya deformación sea controlada.

El objetivo de este trabajo es optimizar el diseño de una caja tipo gabinete reforzada estructuralmente con costillas o enervaduras para su producción mediante la inyección de polioximetileno o acetal, considerando el criterio de deformación y contracción mínimas en la pieza producida y tomando como referencia las guías de diseño de diversos proveedores y las herramientas de diseño de experimentos de Taguchi.

Es importante mencionar que la mayor parte de los trabajos realizados respecto a esfuerzos y deformaciones residuales en piezas plásticas inyectadas se han enfocado en geometrías simples como placas y discos [5,6], mientras que otras geometrías como snap-fits o engarces, bosses o mamelones, costillas, ganchos,

entre otros requieren atención, especialmente aquellas partes que trabajan bajo ciertas cargas o esfuerzos.

2. Métodos

Material

El material utilizado en este trabajo es el polioximetileno (POM), un plástico ingenieril ampliamente utilizado en la industria automotriz para la elaboración de componentes de alta resistencia a la temperatura, gran estabilidad geométrica, y alta resistencia a químicos. En la tabla 1 se resumen las propiedades más importantes del POM Lupital F20-03, de la marca Mitsubishi. De acuerdo al proveedor el material tiene las siguientes características: grado estándar sin relleno, para uso en general, con índice de fluidez (MFI) de 9 g/10 min.

Tabla 1 Propiedades generales del POM Lupital F20-03.

Propiedad	
Color	Natural
Densidad	1.41 g/cm ³
Absorción de agua	0.22 %
Porcentaje de contracción	2.0 %
Temperatura de Fusión	166 °C
Conductividad térmica a 23° C	0.31 W/(K-m)
Dilatación térmica lineal entre 23 y 60° C	110 x 10 ⁻⁶ m/(m-K)
Temperatura máxima de servicio (20,000 h)	110 °C
Temperatura mínima de servicio	-50 °C

Es importante mencionar que, contrario a los plásticos commodities que son relativamente fáciles de procesar, los polímeros ingenieriles requieren un procesamiento más complejo, a mayores presiones y temperaturas, lo cual, aunado a una composición y estructura más complejas, tiene un efecto significativo en los esfuerzos y deformaciones residuales.

Diseño experimental

En general, la gran mayoría de las piezas de plástico moldeadas por inyección tienen grosores de pared que varían de 0.80 a 4.8 mm [2]. Para este estudio se seleccionó un grosor de pared de 2.5 mm. Se diseñó una caja de plástico de 100 x

60 x (12 ± 2) mm reforzada con costillas, como se muestra en la figura 3, siendo la altura de la caja una variable en el diseño experimental. El ancho y largo de la caja se determinó en base a las especificaciones de la máquina de inyección disponible.

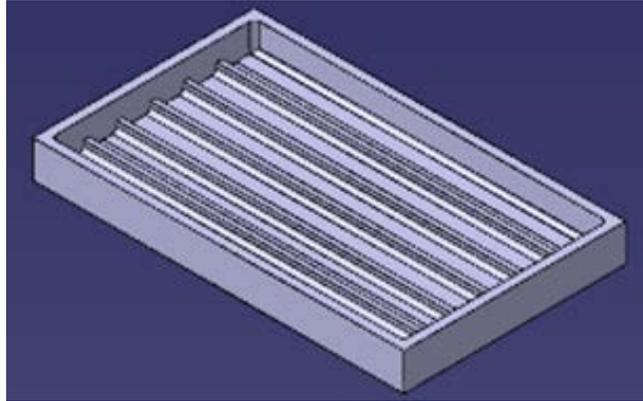


Figura 3 Caja rectangular reforzada con costillas.

Siguiendo las recomendaciones de diversas guías de diseño [2,4] se determinaron los siguientes parámetros geométricos para las costillas:

- Altura de costilla
- Ancho de la costilla
- Separación entre costillas

Para la selección de los niveles, se proponen valores en base a la ortogonalidad de Taguchi. En la figura 4 se muestran los 4 parámetros geométricos que serán parte del diseño experimental (altura de la caja, alto y ancho de las costillas y separación entre ellas), además de las dos constantes: grosor de pared (2.5 mm) y ángulo de desmoldeo (0.5°). Estos parámetros y sus niveles se resumen también en la tabla 2. Se observa que un factor adicional en el diseño experimental es la temperatura de inyección, siendo 200 °C la recomendada por el proveedor de POM, y asignando un nivel por arriba y por debajo de éste.

En la tabla 3 se muestran las 27 corridas generadas en base al diseño experimental Taguchi L27-3⁵.

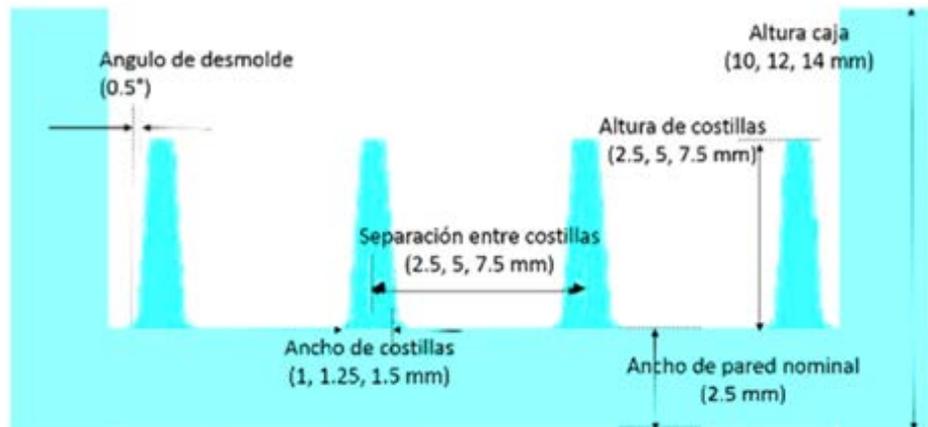


Figura 4 Parámetros geométricos de la caja reforzada con costillas que serán utilizados en el diseño de experimentos.

Tabla 2 Factores y niveles para el diseño experimental Taguchi L27-3⁵.

Temperatura de inyección [°C]	Altura de caja [mm]	Altura de costilla [mm]	Separación de costilla [mm]	Ancho de costilla [mm]
180	10	2.5	2.5	1
200	12	5	5	1.25
220	14	7.5	7.5	1.5

Tabla 3 Corridas desglosadas en base al diseño experimental.

Factores					Respuestas		
Temperatura inyección °C	Altura Caja [mm]	Altura Costilla [mm]	Separación Costilla [mm]	Ancho Costilla [mm]	Deformación [mm]	Rechupe %	PMR [mm]
180	10	2.5	2.5	1	1.04	3.76	0.02
180	10	2.5	2.5	1.25	1.06	3.4	0.02
180	10	2.5	2.5	1.5	1.2	4.07	0.04
180	12	5	5	1	1.01	3.08	0.03
180	12	5	5	1.25	1.04	1.67	0.02
180	12	5	5	1.5	1.14	1.89	0.03
180	14	7.5	7.5	1	1	2.24	0.01
180	14	7.5	7.5	1.25	1.05	2.73	0.02
180	14	7.5	7.5	1.5	1.09	3.59	0.03
200	14	2.5	5	1	1.11	7.32	0.01
200	14	2.5	5	1.25	1.13	2.57	0.02

Tabla 3 Corridas desglosadas en base al diseño experimental (Continuación).

Factores					Respuestas		
Temperatura inyección °C	Altura Caja [mm]	Altura Costilla [mm]	Separación Costilla [mm]	Ancho Costilla [mm]	Deformación [mm]	Rechupe %	PMR [mm]
200	14	2.5	5	1.5	1.16	2.19	0.03
200	10	5	7.5	1	1.06	2.57	0.02
200	10	5	7.5	1.25	1.09	1.36	0.04
200	10	5	7.5	1.5	1.14	1.02	0.03
200	12	7.5	2.5	1	0.93	5.57	0.02
200	12	7.5	2.5	1.25	0.99	8.52	0.02
200	12	7.5	2.5	1.5	1	10.08	0.02
220	12	2.5	7.5	1	1.15	2.06	0.02
220	12	2.5	7.5	1.25	1.16	1.32	0.03
220	12	2.5	7.5	1.5	1.18	0.97	0.03
220	14	5	2.5	1	0.93	6.43	0.01
220	14	5	2.5	1.25	0.99	7.26	0.02
220	14	5	2.5	1.5	1.05	7.72	0.03
220	10	7.5	5	1	0.95	3.1	0.03
220	10	7.5	5	1.25	1.01	1.3	0.03
220	10	7.5	5	1.5	1.04	6.05	0.03

Simulaciones para predecir deformación

Para realizar las 27 corridas mostradas en la tabla 3 se utilizó el software Autodesk Moldflow Adviser 2016. A continuación se describirá brevemente el proceso de simulación:

- Se generaron los archivos CAD para cada una de las 27 cajas diseñadas. Se utilizó el software CATIA V5R21.
- Se importó cada geometría en Moldflow y se malló considerando un criterio dual-domain (recomendado para grosores de pared muy delgados).
- Se diseñó el sistema de alimentación (bebedero, colada fría, compuerta) y refrigeración para el molde (figura 5), el cual será utilizado en la validación experimental. La boquilla de la máquina utilizada es de 2 mm y el grosor de pared de 2.5 mm, en base a ello se determinó un diámetro de entrada del bebedero de 3.5 mm y uno de salida de 4 mm.

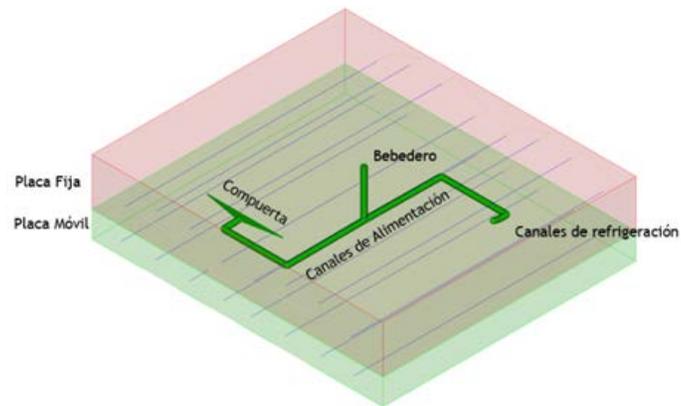


Figura 5 Sistema de alimentación y refrigeración para simulaciones en Moldflow (sólo se muestra la compuerta del lado de una cavidad).

Se utilizaron canales de alimentación de sección transversal circular con diámetro de 4 mm. En la figura 5 se observa que el sistema de canales es igual para ambas cavidades con el objetivo de mantener el flujo balanceado. Se utilizó un molde de dos cavidades para mantener un flujo balanceado y usar al máximo la capacidad de la máquina de inyección. La compuerta seleccionada es del tipo abanico, ya que permite un flujo uniforme de polímero fundido a través del ancho completo de la pieza. La orientación de las costillas será paralela al flujo. Los canales de refrigeración se diseñaron para generar un enfriamiento uniforme en la pieza. Se utilizaron canales de refrigeración de 10 mm de diámetro, así como 10 mm de separación entre canal y pared más próxima. La separación entre los canales se tomó de 20 a 48 mm, dependiendo de la posición y el balance de enfriamiento. Con estas consideraciones se mantiene un enfriamiento uniforme para tener un gasto de 10 L/min, tanto en la placa móvil del molde como en la fija.

Se realizaron las simulaciones de las 27 corridas experimentales. Para ello se definió una máquina de inyección de 50 toneladas con una presión de inyección máxima de 140 MPa. Se definió además una temperatura de molde de acero A36 de 50 °C. La presión de inyección fue de 80 MPa y la presión de sostenimiento de 65 MPa.

Los resultados de interés son:

- Deformación nominal máxima: Valor promedio de deformación fuera del plano con valor especificado. En mm.

- Rechupe: Porcentaje del modelo CAD con propensión a rechupes.
- Profundidad media de rechupe (PMR): Profundidad que se tiene en promedio del rechupe respecto a un plano de 0 deformación. En mm.

Los valores de estos tres resultados para las 27 corridas se muestran en las últimas columnas de la tabla 3.

Efectos de los factores en los resultados de deformación, porcentaje de rechupe y PMR

En la figura 6 se muestran los gráficos de residuales para prueba de normalidad, varianzas y correlación de datos para la deformación obtenidos con el software Minitab 17. Los datos muestran una distribución normal, además de varianza constante al no mostrar patrones en la gráfica “vs. ajustes”. Los datos no se correlacionan entre sí como se muestra en la gráfica de “vs. orden” y no se muestran valores atípicos. Los efectos principales, o impacto, que tiene cada variable sobre la respuesta de deformación son mostrados en la figura 7. Para las variables altura de costilla, separación de costilla y ancho de costilla, todos los niveles tienen impactos muy significativos por nivel en la deformación. Circulados en color rojo se muestran los niveles óptimos de cada factor para minimizar la deformación.

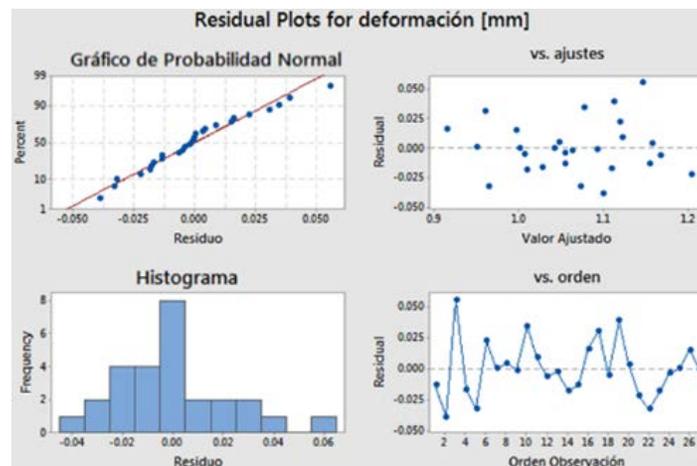


Figura 6 Residuales para prueba de normalidad, varianzas y correlación de datos para deformación.

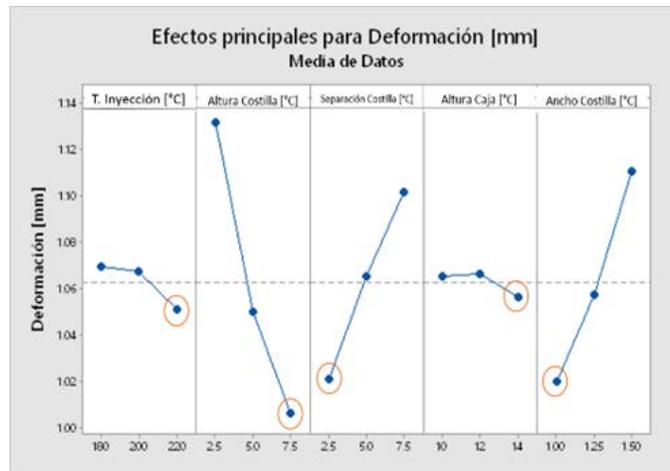


Figura 7 Gráfica de efectos principales para deformación.

Para los resultados de porcentaje de rechupe y PMR se analizaron de igual forma los gráficos de residuales para prueba de normalidad, varianzas y correlación de datos, observando también una distribución normal y varianza constante. Se obtuvieron también los niveles óptimos para cada factor que minimiza el porcentaje de rechupe y PMR. Estos niveles óptimos, junto con los de deformación (mostrados en rojo la figura 7), se resumen en la tabla 4. Una vez definidos estos valores óptimos, se procedió a simularlos en Moldflow. Los resultados de deformación, porcentaje de rechupe y PMR se muestran en la tabla 4.

Tabla 4 Corridas experimentales con niveles óptimos para deformación, porcentaje de rechupe y PMR.

	Temp. Inyección °C	Altura costilla [mm]	Separación costilla [mm]	Altura caja [mm]	Ancho costilla [mm]	Deformación n [mm]	% Rechupe	PMR [mm]
Óptimos deformación	220	7.5	2.5	14	1	0.94	5.6	0.02
Óptimos % Rechupes	180	2.5	7.5	10	1.25	1.18	1.6	0.03
Óptimos PMR	200	7.5	2.5	14	1	0.91	5.8	0.02
Máxima deformación	180	2.5	2.5	10	1.5	1.2	4.07	0.04

Para validar los resultados obtenidos mediante las simulaciones en Moldflow, se seleccionaron 2 corridas: la de niveles óptimos de deformación (tabla 4), y la

corrida de la tabla 3 que presentó la deformación máxima (también incluida en la tabla 4). Esto con la finalidad de comparar dos casos extremos. En la figura 8 se muestran gráficamente los resultados de deformación y PMR para el caso óptimo de deformación y deformación máxima. Se observa que en ambos casos la deformación máxima se encuentra en el extremo de la caja opuesto a la compuerta, mientras que los mínimos en el centro de la pieza. Esto puede explicarse con la presión de compactación o sostenimiento. Aunque la pieza fue compactada con una presión de 65 MPa, los puntos más alejados de la compuerta en realidad solidificaron con una presión menor y como resultado hay una mayor deformación. De igual forma, el hecho de que en las caras laterales de la caja se presenten deformaciones máximas, se puede atribuir al cambio en la dirección de flujo, lo cual generará una orientación de las cadenas del polímero. Al salir la pieza del molde estas zonas tenderán a relajarse más y por ello tendrán mayores deformaciones. En el caso de los rechupes, se observa que en la pieza con valores de deformación máxima presenta rechupes con mayor profundidad, aunque la distribución de los mismos es muy similar.

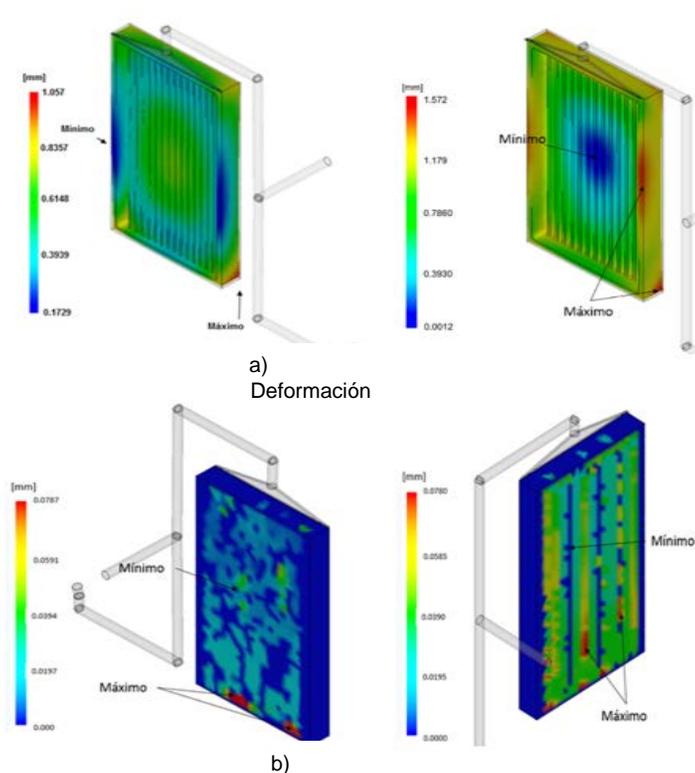


Figura 8 Resultados gráficos para PMR de casos óptimos y de deformación máxima

3. Resultados

Diseño y fabricación del molde

Se diseñó un molde del tipo porta-insertos, que permite el intercambio de insertos para inyectar cavidades con geometrías diversas. Las dimensiones generales del molde están definidas en gran manera por la máquina de inyección. El molde cuenta además con sensores para monitorear presión y temperatura dentro de las cavidades durante la inyección. La figura 9 muestra las placas fija y móvil del molde con sus elementos principales.

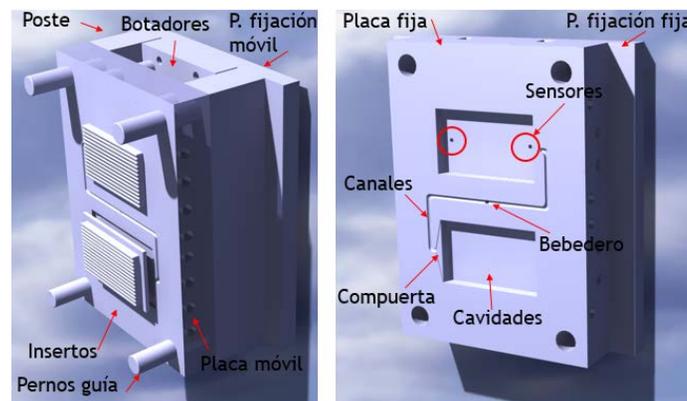


Figura 9 Placa móvil con los insertos con costillas y sistema de expulsión y placa fija con sensores de presión y temperatura.

Los insertos o cavidades para inyectar las cajas reforzadas con costillas, con las dimensiones óptimas de deformación y máxima deformación, se fabricaron en una máquina de hilo-electroerosión en aluminio 6063 debido a las tolerancias requeridas y la separación tan pequeña entre costillas. Los insertos terminados se muestran en la figura 10. Insertos con valores óptimos de deformación y la corrida experimental para deformación máxima.

El molde se instrumentó con sensores de presión y temperatura con el objetivo de monitorear dichas variables para poder validar los resultados de las modelaciones virtuales. Se utilizaron dos sensores de la marca Kistler, modelo 6190CA para moldes de inyección. Los sensores se ubicaron en la placa fija del molde, figura 9. Ambos se ubican en una misma cavidad para monitorear presión y temperatura en dos zonas de flujo distinto: 1) cerca de la compuerta, y 2) al final del flujo.



Figura 10 Insertos en aluminio fabricados por hilo-electroerosión.

Aprovechando la modularidad de las cavidades, éstas se intercambiaron de lugar para poder monitorear presión y temperatura durante la inyección de cada una. En la figura 11 se muestra la parte fija del molde montada en la máquina de inyección. En la parte superior se inyectará la parte de máxima deformación, mientras que en la inferior la de valores óptimos. Se observa la posición de los sensores en la cavidad. Debido a que el proveedor de POM recomienda inyectarlo en un molde a 50 °C (tal como se simuló), se usaron resistencias eléctricas.

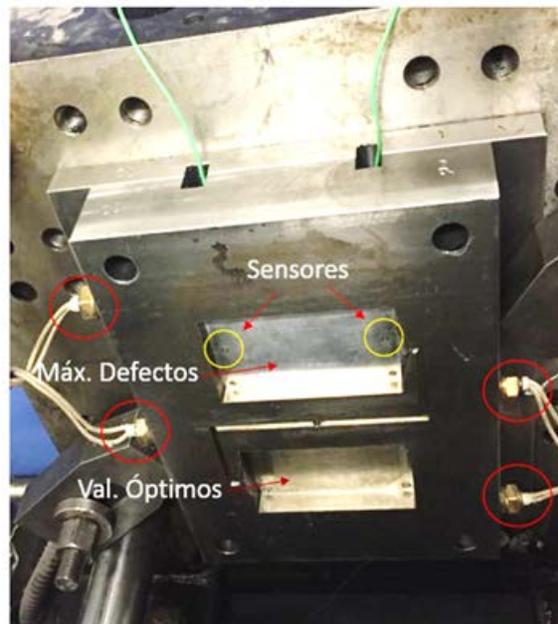


Figura 11 Lado fijo del molde de inyección instrumentado mostrando los sensores (amarillo) y el sistema de resistencias eléctricas (rojo).

Inyección (parámetros)

Una vez diseñado el molde y las cavidades de las cajas con las dimensiones correspondientes a los valores óptimos y de máxima deformación, se procedió a inyectar las piezas con los mismos parámetros de inyección con los que se realizó la simulación, variando únicamente la temperatura de inyección dependiendo del valor óptimo (220 °C) y máxima deformación (180 °C). La máquina que se utilizó fue una máquina Belken SSF500-k5 de 500 kN.

Medición de deformación y rechupes

Se utilizó un equipo con sistema de medición dimensional de imágenes de la marca Keyence Serie IM-6701 para obtener las dimensiones de las piezas inyectadas. Estas dimensiones se compararon con las dimensiones originales de los archivos CAD para así obtener los valores de deformación, porcentaje de rechupe y PMR. En la figura 12 se esquematiza el método de medición para deformación y rechupes. Para la medición de la deformación se declaró una caja, simulando una pieza ideal sobre el perímetro de la imagen de la pieza inyectada (pieza real). La diferencia entre la cara de la caja ideal y la cara de la pieza inyectada es la deformación que tuvo la pieza. Para los rechupes se pone un punto de referencia 0 (la platina del equipo de medición) y de este punto se mide hacia la superficie de la pieza, obteniendo una diferencia de altura respecto al CAD original.

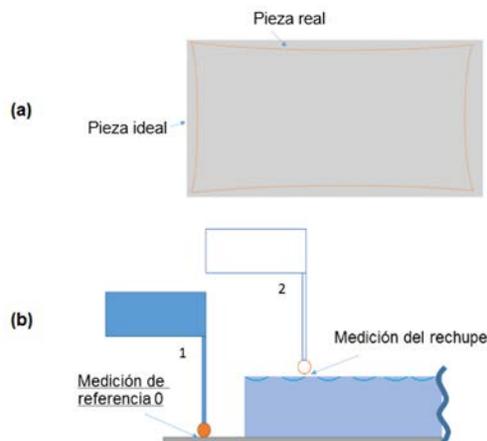


Figura 12 Método de medición de piezas inyectadas para (a) deformación y (b) rechupes.

Se inyectaron 10 piezas para cada corrida, es decir, 10 piezas con valores óptimos y 10 con valores críticos. De cada muestra se hizo la medición de los parámetros anteriormente descritos (deformación, porcentaje de rechupes y PMR). Cabe resaltar que el equipo hizo una muestra de 13 mediciones por pieza para entregar el promedio de dichas mediciones. Los resultados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5 Comparación de resultados de la simulación con pruebas experimentales.

	Simulación	Promedio Pruebas	Error [%]
Valores óptimos			
Deformación [mm]	0.94	0.92	2
Rechupes [%]	5.84	5.51	6
PMR [mm]	0.02	0.021	5
Valores máxima deformación			
Deformación [mm]	1.2	1.101	8
Rechupes [%]	4.07	4.68	15
PMR [mm]	0.04	0.041	3

Mediciones de presión y temperatura

En la figura 13 se muestran las gráficas de presión y temperatura registradas por los sensores durante la inyección de una de las piezas de valores óptimos. El Sensor 1 (S1) es el que se ubica cerca de la compuerta, mientras que el Sensor 2 (S2) se ubica al final del flujo. Cada sensor registra presión y temperatura. Analizando la gráfica de temperatura se observa que el valor máximo registrado es de aproximadamente 85°C, siendo que el plástico se inyectó a 220°C. Esto se explica con el hecho de que el sensor se ubica a ras del molde, y la temperatura que registra es la de la llamada “capa solidificada”, esto es, la capa delgada de polímero que entra en contacto directo con el molde al inicio de la inyección y solidifica inmediatamente. Es interesante apreciar el descenso de la temperatura durante el proceso, y la diferencia inicial de aproximadamente 20°C entre el sensor 1 y 2. Para el caso de la gráfica de presión, se observa que en efecto, la presión registrada de aproximadamente 80 MPa coincide con la presión de inyección programada en la máquina, y desciende durante la compactación. Con estas gráficas se corroboró que los sensores están adquiriendo información confiable, validando su montaje en el molde y posterior calibración. Este molde instrumentado se utilizará en futuros proyectos de investigación.

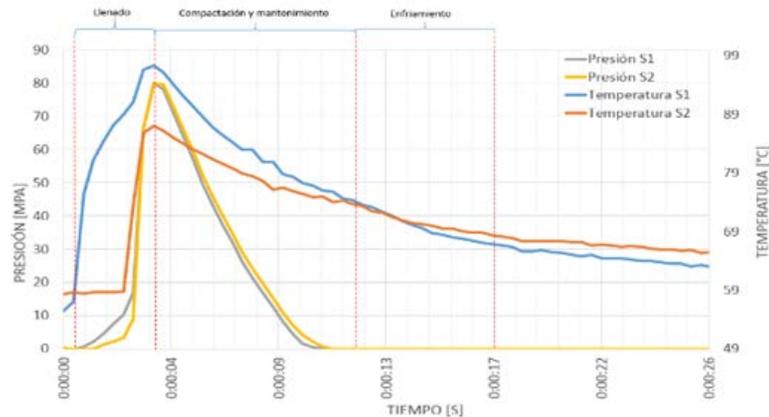


Figura 13 Gráficas de presión y temperatura registradas por sensor dentro de la cavidad.

4. Discusión

En este trabajo se determinaron los óptimos geométricos o dimensionales para producir una caja de POM reforzada con costillas mediante inyección, de tal forma que se minimice la deformación, porcentaje de rechupes y PMR. Mediante un análisis de diseño de experimentos de Taguchi se determinaron los niveles óptimos para altura de la costilla, ancho de la costilla y separación de la costilla, además de altura de la caja y temperatura de inyección. Las corridas del diseño de experimentos fueron realizadas con el software Moldflow Adviser y validadas experimentalmente mediante la medición de deformación y rechupes en piezas inyectadas para los casos más críticos. Los resultados fueron satisfactorios, con porcentajes de error pequeños. Además, como producto de este trabajo se comprobó la funcionalidad de un molde de inyección instrumentado que será de gran utilidad para proyectos futuros en esta área.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] BTC Company. Ultraform® (POM) Product Brochure, 2013.
- [2] Celanese. Designing with plastics, 2006.
- [3] Conde, M. Presente futuro de la industria del plástico en México, Centro Empresarial del Plástico, 2012.
- [4] DuPont. Delrin® Acetal resin molding guide, 2006.

- [5] Kovács, B.J. Test method development for deformation analysis of injection moulded plastic parts, *Polymer Testing* 30:543-547, 2011.
- [6] Shia-Chung, C. Calculations of the flow-induced residual stress development in the injection moulded plate, *Computers and Structures* 52:1043-1050, 1994.
- [7] Wang, X., Zhao, G. and Wang G. Research on the reduction of sink mark and warpage of the moulded part in rapid heat cycle moulding process, *Materials Design* 47: 779-792, 2013.