

Diseño y fabricación de cavidades de moldeo obtenidas mediante impresión 3D estereolitografía (SLA) para inyección de piezas plásticas

Karla Castillo-Carangui¹, Christian Cobos-Maldonado², Santiago Ferrándiz-Bou³, Luis López-López⁴

¹ Grupo de investigación Grupo de Investigación en Nuevos Materiales y Proceso de Transformación (GIMAT), Carrera de Mecánica, Universidad politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador. Email: kcastillo2@est.ups.edu.ec

² Grupo de investigación Grupo de Investigación en Nuevos Materiales y Proceso de Transformación (GIMAT), Carrera de Mecánica, Universidad politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador. Email: ccobos@ups.edu.ec

³ Demes, Instituto Universitario de Tecnología de Materiales (IUTM), Depto. Ingeniería Mecánica y Materiales Universitat Politècnica de Valencia, España. Email: sferrand@mcm.upv.es

⁴ Grupo de investigación Grupo de Investigación en Nuevos Materiales y Proceso de Transformación (GIMAT), Carrera de Mecánica, Universidad politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador. Email: llopez@ups.edu.ec

Resumen

En el presente trabajo, se diseñaron y fabricaron cavidades de moldeo utilizando impresión 3D, específicamente estereolitografía (SLA), para la inyección de piezas de polipropileno (PP). Se emplearon sistemas CAD/CAE para el modelado de los sólidos a obtener y, partiendo de estos, diseñar los postizos. Estos fueron producidos con VeroWhitePlus e integrados en un molde estándar con placas portapostizos para adaptarse a diferentes modelos. Para la determinación del punto de inyección y el diseño de los canales de distribución y estrangulamiento, se llevaron a cabo simulaciones y cálculos con el fin de optimizar el sistema de alimentación. El sistema de refrigeración fue dimensionado a partir del manual de diseño de moldes de la Bayer. Los mismos fueron validados por medio de una simulación térmica, analizando la propagación de la temperatura de inyección en el postizo y su respuesta durante el enfriamiento. El sistema de expulsión se calculó con base en modelos matemáticos de Shigley. Se analizó la resistencia mecánica de los postizos mediante una simulación de esfuerzo-deformación usando ANSYSTM, obteniendo una deformación máxima de 0.04 mm. Esta permitió verificar que los postizos impresos con 7 mm de pared pueden soportar las deformaciones durante el proceso de inyección.

Palabras clave: Análisis de Elementos Finitos; Cavidades de Moldeo; Estereolitografía (SLA); Polipropileno (PP); VeroWhitePlus.

Abstract

In the present work, molding cavities were designed and manufactured using 3D printing, specifically stereolithography (SLA), for the injection of polypropylene (PP) parts. CAD/CAE systems were used to model the solids to be obtained and based on these, to design the steel inserts. These were produced with VeroWhitePlus and integrated into a standard mold with insert holder plates to fit different models. To determine the injection point and the design of the distribution and choke channels, simulations and calculations were carried out to optimize the feeding system. The cooling system was sized based on the Bayer mold design manual. They were validated through a thermal simulation, analyzing the propagation of the injection temperature in the insert and its response during cooling. The expulsion system was calculated based on Shigley's mathematical models. The mechanical resistance of the inserts was analyzed through a stress-strain simulation using ANSYSTM, obtaining a maximum deformation of 0.04 mm. It allowed the verifying of the printed inserts, with a 7 mm wall, to withstand deformations during the injection process.

Keywords: Finite element analysis; Molding Cavities; Stereolithography (SLA); Polypropylene (PP); VeroWhitePlus.

1. Introducción

La industria manufacturera de los polímeros ha experimentado un desarrollo significativo en las décadas recientes, a causa de la creciente demanda de piezas plásticas producidas de manera eficiente y con alta calidad [1]. Siendo el moldeo por inyección el método número uno para el procesamiento de polímeros en producciones en masa, desde formas simples hasta las más complejas, debido a que logra una perfecta tolerancia dimensional [2].

En este contexto, los moldes de inyección juegan un rol fundamental en la fabricación de componentes mediante tecnología de moldeo y conformación no cortante [2]. Son ampliamente utilizados en varias industrias, tanto en sectores militares como civiles. Por ejemplo, en el área automotriz, alimenticia, de telecomunicaciones, y también en aparatos electrónicos, dispositivos inteligentes y elementos domésticos [3, 4].

El diseño de moldes de inyección es un proceso que consume una gran cantidad de tiempo, debido a que cada producto posee una forma y estructura específica. Es decir, que cada vez que se realice un nuevo producto se tendrá que generar un nuevo molde desde cero [5]. Aunque con el moldeo por inyección se producen cantidades exuberantes de piezas hasta el fallo del molde, la generación de este es excesivamente lenta y costosa [6], lo que no es conveniente para bajos volúmenes de producción o para pruebas de diseño de elementos plásticos, pues no se lograría amortizar el costo del molde [7].

Frente a la falta de rentabilidad en esta situación, lo más efectivo es cambiar los procesos de diseño y producción de los moldes, volviéndolos más eficientes y menos costosos. Por consiguiente, se recomienda aplicar nuevas tecnologías que agilicen estos procedimientos, como lo son las tecnologías CAD/CAE y la manufactura aditiva (AM) [1]. Los sistemas CAD/CAE son herramientas que facilitan el diseño y simulación de un producto, mejorando la concepción y materialización antes de elaborar un prototipo. Su uso permite la optimización del cálculo y predicción del comportamiento en condiciones reales del diseño. Gracias a los métodos numéricos empleados por CAE, se hacen afirmaciones precisas que ayudan a verificar circunstancias y escenarios individuales desde el inicio, es decir, realizan las iteraciones necesarias hasta que se satisfagan los requerimientos de diseño [8, 9].

La aplicación de los sistemas CAD/CAE en el diseño y fabricación de moldes potencian la eficiencia de su producción y la tasa de calificación de los productos plásticos. En consecuencia, se reduce el costo de

fabricación y el ciclo de desarrollo, adicionalmente se aumenta la confiabilidad [10]. Por otro lado, la manufactura aditiva es una nueva tecnología para producir de manera rápida objetos tridimensionales por medio de la impresión de capas consecutivas de material [11, 12]. Este material puede ser plástico, metal, concreto e inclusive tejido humano y este se podría suministrar en forma de alambre o polvo esparcido en una cámara de láser o haz de electrones, fundido y depositado selectivamente [13], [14]. La AM, junto con los sistemas CAD, ha permitido simplificar el proceso de diseño y fabricación de objetos, dado que las impresoras 3D pueden replicar formas y geometrías complejas con una alta precisión. Este proceso es accesible y asequible, lo que minimiza los costos de producción [15].

La AM aplicada en la producción de moldes de inyección rompe los límites en el diseño, ya que se construyen capa por capa, volviendo realidad cualquier exigencia [16]. Una de las técnicas más utilizadas para este tipo de propósito es la estereolitografía (SLA), que consiste en un proceso de fotopolimerización, convirtiendo un monómero plástico líquido en un polímero sólido mediante la exposición de luz ultravioleta, dando como resultado objetos con alta fidelidad dimensional al diseño y buenos acabados superficiales [14, 17]. Estos dos últimos puntos dependen mucho del material que se utilice para la impresión. Entre estos, se destaca la resina VeroWhitePlus, un material de tipo acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) poseedor de un color blanco opaco con fácil postprocesamiento y acabado, porque no necesita un tratamiento de curado [18].

Por lo tanto, este artículo presenta el proceso de diseño y fabricación de cavidades de moldeo para la inyección de bajos volúmenes de producción de piezas plásticas usando tecnología CAD/CAE e impresión 3D SLA.

2. Metodología

La metodología utilizada para el desarrollo de este trabajo de investigación se basa en etapas secuenciales para el diseño y la fabricación de postizos de inyección partiendo de los modelos físicos a obtener.

2.1. Modelado de las piezas a inyectar

Las piezas que se inyectarán empleando las cavidades impresas en 3D, son legos de puente. Estos se utilizan para pruebas de carga en laboratorio de ingeniería civil o arquitectura. Para ello, se modelaron en 3D dos piezas de distintas longitudes utilizando el software SolidWorksTM. En las Figuras 1 y 2 se especifican sus dimensiones en mm.

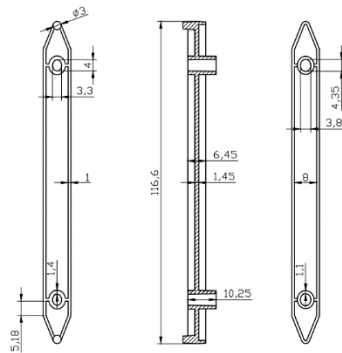


Figura 1. Dimensiones pieza 1. Fuente: elaboración propia.

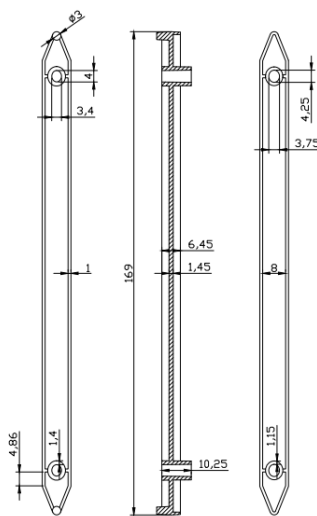


Figura 2. Dimensiones pieza 2. Fuente: elaboración propia.

2.2. Definición del material a inyectar e imprimir

2.2.1. Inyección

El material utilizado para la producción de las piezas es el PP homopolímero. En la tabla 1 se encuentran sus propiedades que son de interés para el proceso de inyección por moldeo.

Tabla 1. Propiedades del PP homopolímero.

Propiedades	
Variable	Valor
Temperatura de procesamiento	190 a 240 °C
Contracción de moldeo	1 a 3%
Calor específico	2.25 J/g · °C
Densidad	0.89 a 0.91 g/cm ³
Esfuerzo cortante máximo	0.25 MPa
Rango de temperatura del molde	20 a 80 °C
Melt Flow Index $\left(\frac{2.16 \text{ kg}}{230 \text{ °C}}\right)$	$\frac{35 \text{ g}}{10 \text{ min}}$
Diámetro recomendado para canales de distribución	4.7 a 9.5 mm
Conductividad térmica	0.2 W/m · K

Temperatura de expulsión	80 °C
--------------------------	-------

Fuente: [19].

2.2.2. Impresión 3D

El material usado para la obtención de los postizos mediante SLA fue la resina VeroWhitePlus, la cual es compatible con la impresora Object30 Prime. En la tabla 2 se muestran sus datos técnicos.

Tabla 2. Propiedades del VeroWhitePlus.

Propiedades	
Variable	Valor
Resistencia a la tracción	50 a 65 MPa
Módulo de elasticidad	2000 a 3000 MPa
Fuerza flexible	75 a 110 MPa
Módulo de flexión	2200 a 3200 MPa
Densidad polimerizada	1.17 a 1.18 g/cm ³
Conductividad térmica	0.178 W/m · K

Fuente: [18, 20].

2.3. Análisis del punto de inyección

La determinación del punto de inyección óptimo para la pieza propuesta se llevó a cabo utilizando el software Moldflow Adviser™, el cual permitió analizar la posición de entrada del material polimérico a la cavidad de moldeo, indicando dos resultados.

El primer resultado representa la resistencia al flujo en el frente de flujo mostrando esta resistencia mediante una escala de colores desde la más baja donde es azul con un valor de 0 hasta la más alta donde es roja con un valor de 1. El segundo es la idoneidad de las entradas que califica cada zona de la pieza por medio de un algoritmo localizador de entradas avanzado que minimiza la resistencia de flujo al definir la posición óptima de entrada. Estas áreas se representan en una escala de colores, donde la peor es rojo con un valor de 0 y la mejor es azul con un valor de 1.

Los datos de entrada para esta simulación fueron la temperatura del molde, temperatura de procesamiento, temperatura de expulsión y esfuerzo de cizalla máximo, para conocer cuánto se deforma el material cuando está pasando por el punto de inyección.

2.4. Dimensionamiento del sistema de alimentación

2.4.1. Canales de distribución

Una vez establecido el punto de inyección, se definieron los canales de distribución, teniendo en cuenta que se inyectará PP, cuyo rango de diámetros recomendados oscila entre 4.7 mm y 9.5 mm. En las ecuaciones (1) y (2) se indica el modelo matemático

utilizado, y en la Figura 3 se detalla el dimensionamiento para el canal.

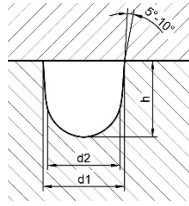


Figura 3. Dimensionamiento para el canal de distribución.
Fuente: [21].

$$d_2 = s_{max} + 1.5 = 0.7 \cdot d_1 \quad (1)$$

Donde, d_1 es el diámetro recomendado y d_2 es el diámetro menor del canal.

$$h = \frac{2}{3} \cdot d_2 \quad (2)$$

Donde h representa la altura de la sección.

2.4.2. Canales de estrangulamiento

Los canales de estrangulamiento dependen del tamaño y forma de la pieza, así como de la viscosidad del polímero a inyectar. En las ecuaciones (3), (4), (5) y (6) se indican los modelos matemáticos utilizados para el dimensionamiento de estos canales.

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (3)$$

$$f = 0.07 \cdot F \quad (4)$$

$$b = \sqrt{\frac{f}{3}} \quad (5)$$

$$a = 3 \cdot b \quad (6)$$

Donde F es la sección del canal de distribución, f es la sección del canal de estrangulamiento, b es la altura de este canal y a es el ancho.

2.5. Análisis de llenado y compactación

Con la definición de las dimensiones de los canales de alimentación, se analizó el llenado y compactación de las piezas a inyectar mediante el software Moldflow Adviser™ para conocer el comportamiento del PP durante el proceso. Teniendo en cuenta 3 puntos fundamentales.

2.5.1. Tiempo de llenado

El análisis del tiempo de llenado en Moldflow representa la posición del frente de flujo a intervalos

regulares a medida que se llenan las cavidades, por medio de un sistema de colores que muestran las regiones que se llenan primero en azul y las que se llenan al final en rojo.

2.5.2. Presión de inyección

Este resultado indica el valor de la presión de inyección máxima antes de que se produzca la conmutación de velocidad/presión mientras se da la fase de llenado.

La presión al iniciar el llenado es de cero. Únicamente cuando el frente de flujo alcanza una ubicación determinada, la presión comienza a aumentar en esa zona específica. A medida que el frente de la masa fundida avanza, la presión continúa incrementándose debido a la creciente longitud de flujo entre dicha ubicación y el frente de la masa fundida.

2.5.3. Contracción volumétrica

En este análisis se señala la reducción del volumen local desde el momento en que finaliza el proceso de refrigeración hasta que la pieza se haya enfriado a la temperatura ambiente. A partir de los resultados es posible identificar la presencia de rechupes o vacíos dentro de la pieza. Si se observan valores uniformes en toda la pieza, esto indica una correcta compactación; en caso de valores elevados, existe el riesgo de deformaciones; por otro lado, valores negativos sugieren la posibilidad de expansión en la zona.

Para contrarrestar esto, se debe sumar la contracción volumétrica a las dimensiones iniciales, con el fin de dimensionar las cavidades y obtener el producto con las dimensiones deseadas.

2.6. Análisis térmico de estado estacionario

El análisis de transferencia de calor ayudó a decidir la ubicación de los canales de refrigeración. Se realizó una simulación en el software ANSYS™ para identificar las zonas que absorben una mayor cantidad de calor al momento de inyectar el PP y comprobar si existirá o no una deformación volumétrica durante el proceso.

En esta simulación, la tasa de flujo de calor se aplicó en las superficies del postizo impreso con VeroWhitePlus que tendrán contacto con el PP fundido, teniendo en cuenta que su temperatura es de 200 °C. Adicionalmente, el tipo de condición térmica para esta situación es la convección se sigue el modelo matemático que se muestra en la ecuación (7).

$$q_c = hA(T_{superficie} - T_{ambiente}) \quad (7)$$

Donde q_c es la convección, h es el coeficiente de conductividad térmica, A es el área de superficie radiante, $T_{superficie}$ es temperatura de la superficie y

$T_{ambiente}$, la temperatura del ambiente, que, al estar en Cuenca, Ecuador es de 22 °C.

2.7. Dimensionamiento del sistema de refrigeración

2.7.1. Cálculo del tiempo de enfriamiento

Para el cálculo del tiempo de enfriamiento, se aplicó el modelo de Morton-Jones, teniendo en cuenta un campo de temperatura no estacionario y una conductividad térmica unidimensional. Se utilizó la ecuación de Fourier para flujo de calor no estacionario unidimensional [22].

2.7.2. Cálculo de calor requerido a transferir

Las ecuaciones (8) y (9) ayudan a determinar el calor removido durante la inyección del PP, así como la rapidez de transferencia de calor.

$$Q_{mold} = m_{mold} \cdot C_p \cdot (T_{plast} - T_{exp}) \quad (8)$$

Donde Q_{mold} es el calor removido, m_{mold} , la masa de la pieza a inyectar, C_p , el calor específico del material a inyectar, T_{plast} , la temperatura de elaboración, y T_{exp} , la temperatura de expulsión.

$$Q_{sist} = \frac{Q_{mold}}{t} \quad (9)$$

Donde Q_{sist} es la rapidez de transferencia de calor.

2.7.3. Cálculo del caudal del refrigerante

El refrigerante que se escogió para el enfriamiento del molde es el agua. Con este dato se especifican las características necesarias para aplicar la ecuación (10) que define el caudal del refrigerante.

$$Q = \frac{Q_{sist}}{\rho_{ref} \cdot C_{pref} \cdot \Delta T_{ref}} \quad (10)$$

Donde Q es el caudal del refrigerante, ρ_{ref} , la densidad del agua (1000 kg/m^3), C_{pref} , el calor específico del agua a 9 °C ($4175 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$) y ΔT_{ref} , la variación de temperatura del agua (2 K).

2.7.4. Determinación del diámetro de los canales de refrigeración

Según el manual de diseño de Bayer, el diámetro de los canales de refrigeración viene definido por el espesor más grande de las piezas a inyectar mediante pautas de espaciado de líneas de enfriamiento [23].

2.7.5. Alojamiento de o-ring

Para garantizar el flujo adecuado del refrigerante desde la placa de acero hacia el postizo y prevenir fugas, se instalarán anillos O-Ring de código 2-011 en los canales de refrigeración, según el diámetro definido.

El sellado se logra utilizando un o-ring mediante la deformación de su sección W, y esto se consigue con un diseño adecuado de su alojamiento. Según el catálogo de Parker, el aplastamiento para un uso estático varía entre el 12% y el 25% [24].

2.8. Análisis de refrigeración

Se realizó un análisis del sistema de refrigeración con el software Moldflow Adviser™ para conocer cómo este ayudará al enfriamiento óptimo de las piezas inyectadas.

2.8.1. Calidad de refrigeración

Este análisis indica cómo el calor tiende a acumularse en una pieza en función de su geometría y espesor. Se representa mediante una escala cromática: las áreas coloreadas en rojo denotan un nivel bajo de refrigeración, mientras que las zonas amarillas indican un nivel medio y las verdes, un nivel alto.

2.8.2. Varianza del tiempo de refrigeración

Este estudio expone la diferencia entre el tiempo requerido para que un polímero se solidifique en una determinada parte de la pieza y el tiempo medio de solidificación en la totalidad de esta. Esta variación está influenciada por la forma de la pieza y la disposición de los canales de refrigeración. Esta información se representa a través de una escala cromática, en la que las áreas rojas con valores positivos indican un enfriamiento más prolongado que el tiempo medio de solidificación. Por otro lado, las áreas azules con valores negativos se solidifican en un tiempo inferior al promedio de solidificación.

2.8.3. Varianza de temperatura

Este resultado revela cómo tanto la geometría de la pieza como el sistema de refrigeración influyen en la diferencia entre la temperatura superficial y la temperatura promedio de la pieza. Esta diferencia se evalúa al final del ciclo de inyección y se cuantifica utilizando una escala de colores. En esta escala, las áreas en rojo representan las secciones más cálidas que la temperatura promedio, con valores positivos, mientras que las áreas en azul representan regiones más frías que la temperatura promedio, con valores negativos.

2.9. Dimensionamiento del sistema de expulsión

2.9.1. Cálculo de expulsores y fuerza de expulsión

Se determinó la distancia entre el bloque de expulsión y cavidad de moldeo, que es de 84.266 mm. Para la determinación del área de contacto de los palillos (A) se aplica la ecuación (11).

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (11)$$

Donde D el diámetro estimado del expulsor. También la inercia (I) de estos palillos viene dada por el modelo que se muestra en la ecuación (12).

$$I = \frac{\pi \cdot D^4}{64} \quad (12)$$

La relación de esbeltez es necesaria para asegurar la resistencia y estabilidad de los palillos, la cual está definida por la ecuación (13).

$$\frac{l}{k} = \frac{l}{\frac{d}{4}} \quad (13)$$

Donde l es longitud de los palillos expulsores, k es factor de esbeltez y d , el diámetro del expulsor.

Luego se determinó la constante de las condiciones en los extremos (C) usando la relación de esbeltez, para este caso se utiliza la ecuación (14).

$$\left(\frac{l}{k}\right)_1 = \left(\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot C \cdot E}{S_y}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Donde E es el módulo de elasticidad y S_y , límite elástico. Con este resultado se realizó una comparativa con la ecuación (15) para el tipo de columna a la cual se asemejan los expulsores.

$$\frac{l}{k} < \left(\frac{l}{k}\right)_1 \quad (15)$$

Con base en la comparación, se determinó qué clase de carga se ejerce en la columna, en este caso, en los expulsores. Para definir esta carga generada por unidad de área se aplica la ecuación (16).

$$\frac{P}{A} = S_y - \left(\frac{S_y}{2\pi} \cdot \frac{l}{k}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{C \cdot E}\right) \quad (16)$$

Donde P es la carga y A , el área donde se aplica la carga. Despejando P se halla la carga que se necesita aplicar en un palillo, pero para conocer la carga total se multiplica por el número de palillos presentes en el molde.

2.10. Cálculo del tiempo de ciclo

El tiempo de ciclo de inyección (tT) viene dado por:

$$tT = tL + tR + tK \quad (17)$$

Donde, tL es el tiempo de llenado, tK es el de enfriamiento y tR es el de reinicio, siendo este último la suma de los tiempos de apertura, cierre y expulsión.

2.11. Definición de parámetros de impresión

Las cavidades de moldeo se fabricarán por el método de SLA con la resina VeroWhitePlus RGD835 en la impresora Objet30 Prime, la cual es compatible con este material.

Dentro de los parámetros más relevantes están el espesor de superficie y la densidad de relleno, puesto que de esto dependen la resistencia a la deformación de la cavidad al momento de la inyección.

2.12. Análisis estructural de las cavidades de moldeo

El análisis estructural estático realizado en ANSYSTM sobre el postizo de resina reveló los esfuerzos y deformaciones máximos y mínimos que soporta bajo la presión de inyección de 20.95 MPa aplicada en el centro de la placa, correspondiente a la zona del bebedero. Para la simulación, se consideraron las propiedades del material VeroWhitePlus, como el módulo de elasticidad y densidad.

3. Resultados

3.1. Modelado 3D de las piezas a inyectar

Utilizando SolidWorksTM se modelaron las piezas que serán inyectados, con base en las dimensiones presentadas anteriormente. A continuación, en la Figura 8 se muestra la pieza en 3D.

3.2. Análisis del punto de inyección

Los resultados del análisis del punto de inyección realizado en Moldflow AdviserTM se muestra en la Figuras 4.

Los lugares donde la resistencia al flujo del PP dentro de las cavidades es máxima con un valor de 0.9882, representada con rojo y es mínima con un valor de 0.0052, representada con azul.

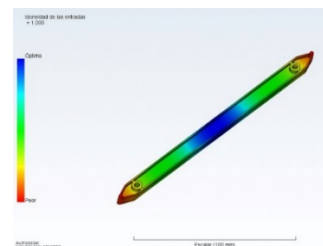


Figura 4. Idoneidad de entradas. Fuente: elaboración propia.

Los lugares donde la entrada del PP dentro de las cavidades de moldeo es óptima con un valor de 0.9952, representada con azul y donde la entrada es peor con un valor de 0.0028, representada con rojo. Por ende, el punto de inyección va a estar ubicado donde se muestra de color azul, en la zona central de la pieza.

3.3. Dimensionamiento del sistema de alimentación

El sistema de alimentación que se muestra en la Figura 11 está compuesto por el bebedero, el cual ya viene dimensionado debido a que los postizos se colocaran en un molde estándar; un canal de distribución semicircular con un diámetro recomendado de 4.7 mm, un diámetro menor de 3.3 mm y una altura de 2.2 mm; y por dos canales semicirculares de estrangulamiento de diferentes dimensiones. Para la pieza 1 la sección del canal de distribución es 8.67 mm², la sección del canal de estrangulamiento es 0.61 mm², la altura de este canal es 0.45 mm y el ancho 1.35 mm, mientras que para la pieza 2, F es 35.44 mm², f es 2.48 mm², b es 0.91 mm y a es 2.73 mm.

3.4. Análisis de llenado y compactación

El análisis de llenado y compactación entrego los resultados que se indican en las Figuras 5 y 6.

El tiempo de llenado es de 0.9272 s para las dos piezas. Las rutas de flujo no terminan simultáneamente porque la pieza 1 se llena a los 0.8508 s y la 2 a los 0.9272 s. Esta desigualdad no influye en la calidad de la inyección debido a que su diferencia es de 0.0764 s.

La presión de inyección es 20.95 MPa, donde la presión es mayor en la pieza 1 porque se llena primero, a pesar de que la variación es mínima.

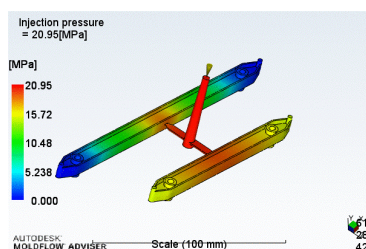


Figura 5. Presión de inyección. Fuente: elaboración propia.

La contracción volumétrica en las piezas es de aproximadamente 1.2%, coincidente con la bibliografía, que dice que la contracción del PP homopolímero es del 1 a 3%.

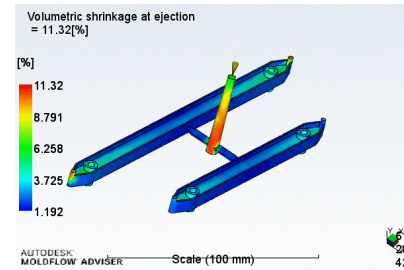


Figura 6. Contracción volumétrica. Fuente: elaboración propia.

Considerando las contracciones, las cavidades de las piezas poseen las siguientes dimensiones, altura de 117.9992 mm, largo de 8.096 mm y ancho de 6.5274 mm, en el caso de la pieza 2. Mientras que, para la pieza 1, las dimensiones son 171.028 mm de alto, 8.096 mm de largo y 6.5274 mm de ancho.

3.5. Análisis térmico de estado estacionario

La simulación reveló la distribución de temperatura, Figura 7, y la deformación volumétrica, Figura 8.

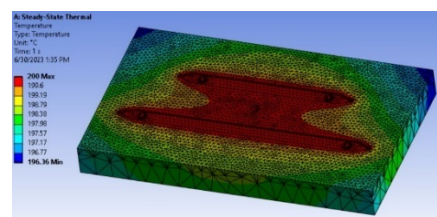


Figura 7. Distribución de temperatura. Fuente: elaboración propia.

Se observa que la temperatura máxima de 200 °C está ubicada en las cavidades, mientras que la mínima, 196.36 °C, se encuentra en los bordes del postizo.

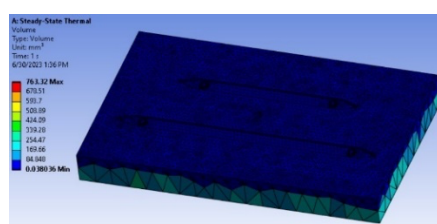


Figura 8. Deformación volumétrica. Fuente: elaboración propia.

Deformación volumétrica en toda la cavidad de moldeo es de 0.038 mm³.

Con base en esta información, se diseñó los canales de refrigeración, para que la ubicación de los canales sea lo más cercanos a las cavidades de moldeo, donde el refrigerante ingresará por la zona central y se conectará

por una manguera en U a los canales de los extremos para su salida.

3.6. Dimensionamiento del sistema de refrigeración

Los canales de refrigeración poseen un diámetro de 6 mm , por donde circula un caudal de $1.149 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$. El tiempo de enfriamiento de las dos piezas según la ecuación de Fourier es de 5.188 s . Por otro lado, el calor removido durante este proceso es de 2488.5 J , y la rapidez de transferencia de calor es de 479.66 W .

El alojamiento del o-ring 2-011 tiene una profundidad de 1.35 mm , un ancho de 2.5 mm , un radio de 0.4 mm , según el catálogo Parker.

3.7. Análisis de refrigeración

3.7.1. Calidad de refrigeración

En la Figura 9 se observa cómo el área central de las piezas tendrá un alto nivel de refrigeración, lo que significa que no habrá acumulación de calor. Por otro lado, las partes laterales tendrán un nivel intermedio, y la zona del bebedero presentará un bajo nivel de refrigeración. Esto se debe a que el bebedero es la entrada del material fundido y está hecho de acero, mientras que las cavidades están fabricadas con VeroWhitePlus.

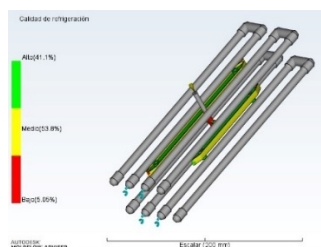


Figura 9. Calidad de refrigeración. Fuente: elaboración propia.

3.7.2. Varianza del tiempo de refrigeración

La Figura 10 señala que las piezas en su totalidad tardan menos tiempo en solidificarse que el tiempo medio de solidificación con un valor de -1.216 s , mientras que la zona del bebedero y trabacolas tarda más con un valor 18.10 s .

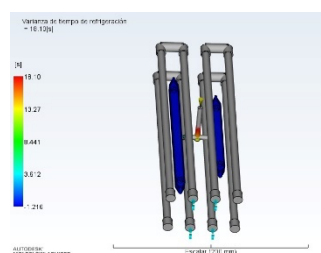


Figura 10. Varianza del tiempo de refrigeración. Fuente: elaboración propia.

3.7.3. Varianza de temperatura

La Figura 11 ilustra cómo los extremos de las piezas están más fríos que la temperatura media de la pieza, con un valor de $-2.089\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que en la zona central se encuentra cerca de la media, con un valor de $0.2315\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por otro lado, en la zona del bebedero la temperatura es más alta que la media, con un valor de $2.552\text{ }^{\circ}\text{C}$.

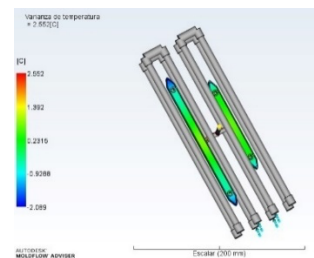


Figura 11. Varianza de temperatura. Fuente: elaboración propia.

3.8. Diseño del sistema de expulsión

Considerando que el diámetro estimado del expulsor es de 4 mm , su área es de 12.57 mm^2 y su inercia, de 12.57 mm^4 . Asimismo, su relación de esbeltez es 84.266 , la cual permitió determinar que los palillos poseen una constante de condición en los extremos igual a 2, porque cumple con las condiciones de este caso. A su vez, con la comparativa, $84.266 < 151.3$, se estableció que los expulsores son semejantes a una columna de longitud intermedia con carga centrada. En función de esto la carga total que se tendrá que aplicar los 14 palillos será de 51.24 kN .

3.9. Tiempo de ciclo

El tiempo de ciclo de inyección es de 12.1152 s , considerando que el tiempo de llenado es de 0.9272 s , el de enfriamiento es de 5.188 s , y el de reinicio de 6 s .

3.10. Modelado de las cavidades de moldeo

Tomando en cuenta que las cavidades no experimentan contracciones debido a las características del VeroWhitePlus, y con los canales de alimentación y refrigeración ya dimensionados, así como los agujeros para los expulsores y los alojamientos para los o-rings, se procedió a modelar los postizos en SolidWorksTM que se utilizarán para la impresión SLA, los cuales se insertarán en las placas portacavidades de acero y se sujetarán con tornillos Allen M6x12. En la Figura 12 se pueden apreciar los postizos con sus detalles.

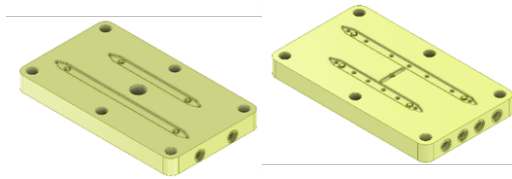


Figura 12. Cavity fija y móvil. Fuente: elaboración propia.

3.11. Parámetros de impresión

Los parámetros de impresión son: espesor de superficie de 7 mm y densidad de relleno media.

3.12. Análisis estructural de las cavidades de moldeo

El esfuerzo máximo que sufre la cavidad es de 121.96 MPa alrededor de los agujeros, mientras que en el resto de la cavidad es de 40.676 MPa, Figura 13.

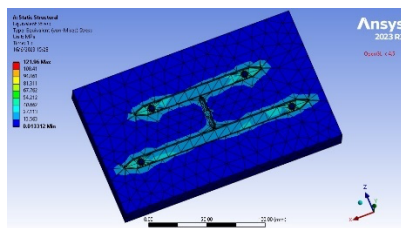


Figura 13. Esfuerzo equivalente de Von Mises. Fuente: elaboración propia.

La mayor deformación es de 0.0045404 mm alrededor de los agujeros, mientras que en el resto es de 0.0019213 mm, Figura 14.

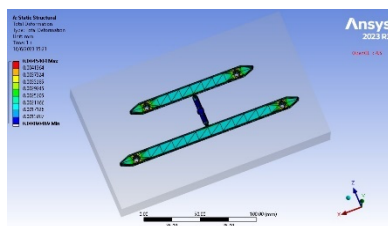


Figura 14. Deformación total. Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

En el diseño de los postizos se consideraron las propiedades del PP, como temperatura de inyección y expulsión, y el diámetro recomendado para los canales de distribución, al igual que las de la resina VeroWhitePlus, como el módulo de elasticidad y la conductividad térmica.

Dentro del sistema de alimentación se definieron los canales semicirculares de distribución con un diámetro

de 3.30 mm y una altura de 2.20 mm. Por otro lado, los canales de estrangulación también semicirculares poseen un diámetro de 1.35 mm y una altura de 0.45 mm para la pieza 1, mientras que, para la pieza 2, un diámetro de 2.73 mm y una altura de 0.91 mm, para lograr un llenado simultáneo.

El sistema de refrigeración está compuesto por 4 canales de 6 mm de diámetro. El refrigerante circulará a un caudal de $1.149 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

En cuanto al sistema de expulsión, se utilizarán 14 palillos de expulsión, 7 para la pieza 2, 6 para la pieza 1 y 1 para el trabacollado. Estos tendrán un diámetro de 4 mm y se requerirá una fuerza de 51.24 kN para asegurar una expulsión exitosa de las piezas. Se obtuvo un tiempo de ciclo de 12.11 s.

Por último, las cavidades se fabricaron utilizando la resina VeroWhitePlus en la impresora Objet30 Prime. Estas tienen un espesor de pared y/o superficie de 7 mm y una densidad de relleno media, lo que permitió obtener un excelente acabado superficial, sin presencia de contracciones y con una alta precisión dimensional.

5. Referencias

- [1] S. Arman y I. Lazoglu, «A comprehensive review of injection mold cooling by using conformal cooling channels and thermally enhanced molds», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 127, n.º 5, pp. 2035-2106, jul. 2023, doi: 10.1007/s00170-023-11593-w.
- [2] Z. Chen y L.-S. Tung, «A review of current developments in process and quality control for injection molding», *Adv. Polym. Technol.*, vol. 24, n.º 3, pp. 165-182, sep. 2005, doi: 10.1002/adv.20046.
- [3] M. R. Khosravani y S. Nasiri, «Injection molding manufacturing process: review of case-based reasoning applications», *J. Intell. Manuf.*, vol. 31, n.º 4, pp. 847-864, abr. 2020, doi: 10.1007/s10845-019-01481-0.
- [4] T. Duc Phuc y N. Anh Dung, «Study Optimization of Process Parameters in Overmolding of Multi Plastic Materials», en *The AUN/SEED-Net Joint Regional Conference in Transportation, Energy, and Mechanical Manufacturing Engineering*, Springer, Singapore, 2022, pp. 719-728. doi: 10.1007/978-981-19-1968-8_59.
- [5] T. D. Phuc y P. V. Hung, «Study the Design Automation of Two-Plate Plastic Injection Molds», en *Proceedings of the 3rd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development (MMMS2022)*, Springer, Cham, 2023, pp. 501-511. doi: 10.1007/978-3-031-31824-5_59.
- [6] S. Junk, S. Schrock, y N. Schmieder, «Review and Development of Design Guidelines for Additive Tooling of Injection Molds Using

- PolyJet Modelling», en *Industrializing Additive Manufacturing*, Springer, Cham, 2024, pp. 35-45. doi: 10.1007/978-3-031-42983-5_3.
- [7] B. Catoen y H. Rees, «7 - Product Cost Estimation», en *Injection Mold Design Handbook*, B. Catoen y H. Rees, Eds., Hanser, 2021, pp. 201-215. doi: 10.3139/9781569908167.007.
- [8] S. I. Antsiferov, Y. M. Fadin, V. S. Bogdanov, V. V. Tibeikin, y A. V. Karachevtseva, «Design of Two-Shaft Mixture Using the NX CAD/CAM/CAE System», *Russ. Eng. Res.*, vol. 42, n.º 5, pp. 530-533, may 2022, doi: 10.3103/S1068798X22050057.
- [9] R. Stark, «Major Technology 4: Computer Aided Engineering—CAE», en *Virtual Product Creation in Industry*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2022, pp. 185-221. doi: 10.1007/978-3-662-64301-3_10.
- [10] W. Luo, L. Tang, y F. Guo, «Mold design and forming process parameters optimization for passenger vehicle front wing plate», *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 36, n.º 1, pp. 187-196, ene. 2022, doi: 10.1007/s12206-021-1217-5.
- [11] M. N. O. Sadiku, A. J. Ajayi-Majebi, y P. O. Adebo, «Additive Manufacturing», en *Emerging Technologies in Manufacturing*, Springer, Cham, 2023, pp. 109-121. doi: 10.1007/978-3-031-23156-8_8.
- [12] S. Ferrandiz, C. M. Cobos Maldonado, H. De La Rosa, y T. Boronat, «Procesos de Extrusión de Material (MATEX/MEX)», en *Fabricación Aditiva*, Editorial UNED, 2023, pp. 1-24. Accedido: 18 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: http://portal.uned.es/portal/page?_pageid=93,23377989&_dad=portal&_schema=PORTAL&IdArticulo=2804007MR01A01
- [13] D. Narsimhachary y M. Kalyan Phani, «Additive Manufacturing: Environmental Impact, and Future Perspective», en *Practical Implementations of Additive Manufacturing Technologies*, Springer, Singapore, 2024, pp. 295-308. doi: 10.1007/978-981-99-5949-5_14.
- [14] S. Ferrandiz, C. M. Cobos Maldonado, M. D. Samper, y J. Ivorra, «Procesos de Fotopolimerización en Cuba (VAT)», en *Fabricación Aditiva*, Editorial UNED, 2023, pp. 1-17. Accedido: 18 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: http://portal.uned.es/portal/page?_pageid=93,23377989&_dad=portal&_schema=PORTAL&IdArticulo=2804007MR01A01
- [15] M. Attaran, «The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing», *Bus. Horiz.*, vol. 60, n.º 5, pp. 677-688, sep. 2017, doi: 10.1016/j.bushor.2017.05.011.
- [16] J. Sjöström, U. Fager, y G. Broberg, «Impact of New Design in a Plastic Injection Mold Made by Additive Manufacturing», *BHM Berg-Hüttenmänn. Monatshefte*, vol. 167, n.º 9, pp. 422-427, sep. 2022, doi: 10.1007/s00501-022-01265-9.
- [17] F. P. W. Melchels, J. Feijen, y D. W. Grijpma, «A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering», *Biomaterials*, vol. 31, n.º 24, pp. 6121-6130, ago. 2010, doi: 10.1016/j.biomaterials.2010.04.050.
- [18] «mds_pj_vero_for_j55_0320a.pdf». Accedido: 18 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.stratasys.com/siteassets/materials/materials-catalog/polyjet-materials/verovivid/mds_pj_vero_for_j55_0320a.pdf
- [19] «Repol_Data_summery.pdf». Accedido: 21 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://rilstaticasset.akamaized.net/sites/default/files/2023-01/Repol_Data_summery.pdf
- [20] M. Mischkot, *Advanced Process Chains for Prototyping and Pilot Production based on Direct Rapid Soft Tooling*. Kgs. Lyngby: Technical University of Denmark, 2018.
- [21] «Tesis I. M. 467 - Fonseca Muncha Antonio Fernando.pdf».
- [22] P. Zhingre y C. Antonio, «Validación del sistema de inyección de un biomaterial compuesto PP-GAK mediante modelamiento CAD-CAE», 2016.
- [23] Bayer, «Part and mold design», 2005.
- [24] Parker, «Catálogo o-ring». Accedido: 16 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/O-Ring-Division-Literature/ORD-5700.pdf>