DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI
ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 12 No. Especial 5 (2024) 233-240

Cálculo de parámetros básicos en el proceso de inyección de plásticos
Basic parameters calculation in the plastic injection molding process

S. de la luz - Merino, [a] J. V. Sandoval - Ramos [a]

[a]*División de procesos industriales, Universidad Tecnológica de Puebla, 72300, Heroica Puebla de Zaragoza, México.*

Resumen

El moldeo por inyección es un proceso en el que se producen dispositivos plásticos. Sin embargo, al fabricar estos productos se pueden observar defectos tales como: disparos cortos, marcas de flujo, de hundimiento, de quemaduras, rebabas, líneas de soldadura, deformaciones o pieza incompleta, etc. Para evitar estos defectos se deben considerar todos los parámetros y cantidades físicas asociadas al proceso, así como la fenomenología llevada a cabo como: la generación del polímero fundido, flujo y transporte del mismo hasta la conformación del producto que toma lugar en la cavidad del molde. En este trabajo se obtuvieron vasos de polipropileno (PP) utilizando un molde de colada fría en una máquina de inyección Krauss-Maffei (KM) modelo CX 80-380. Los parámetros de inyección se ajustaron de acuerdo a la posibilidad de lograr altos índices de reproducibilidad con la menor cantidad de defectos, haciendo cálculos en parámetros fundamentales como fuerza de cierre, temperatura, así como el tiempo total en la inyección.

Palabras Clave: Inyección, plásticos, parámetros.

Abstract

Injection molding is a process where plastic devices are produced. However, the products manufactured by this process usually have defects, such as short shot, jetting, sink mark, flow mark, burn mark, flash, warping, weld lines etc. These defects could be eliminated taking into account all the parameters and physical quantities associated with the process. To achieve the above, it is necessary a fundamental understanding of phenomena which are carried out in the plasticizing unit of the molding machine such as melt generation, solids transport, flow as well as the product shaping which takes place in the mold cavity. In this work experimental tests were made by using a Krauss Maffei (KM) injection molding machine CX 80-380, polypropylene (PP) cups were obtained using a cold runner mold. The injection parameters were adjusted according to the possibility of high production rates and the manufacture of articles with high quality standards, doing calculations on fundamental parameters such as closing force, temperature as well as the total injection time.

Keywords: Injection, plastics, parameters.

1. Introducción

El moldeo por inyección (MI) es uno de los métodos más usados para la obtención de dispositivos plásticos (Singh *et al*, 2017). Tuvo un rápido desarrollo debido a que se comenzó a ocupar en diversas industrias, tales como: automotriz, computo, aparatos médicos y ensambles (Rabbi *et al*, 2021) (Zhou *et al*, 2024). Al ser un proceso que involucra diversas variables, se requiere una comprensión del material durante sus etapas fundamentales así como los fenómenos físicos que ocurren en conexión con las propiedades de la pieza que se busca obtener (Fernandes *et al*, 2018). También es fundamental el conocimiento técnico de la máquina de inyección que se ocupa durante el desarrollo de la producción. El MI puede realizarse con una amplia gama de materiales polímeros como los elastómeros, termoplásticos y termoendurecibles (Mohan *et al*, 2017).

En este trabajo se utilizó PP como materia prima un polímero, de acuerdo a su acomodo y ordenamiento atómico, se considera semicristalino (estructura cristalina ortorrómbica, en algunas zonas) y termoplástico, de acuerdo a su comportamiento evaluado en función de la temperatura (Park *et al*, 1988) (Askeland *et al*, 2010) (Callister Jr. *et al*, 2014). El polímero en forma de *pellets* (del inglés: bolitas) se coloca en la tolva y se dirige a la zona de plastificación (en la máquina de inyección), posteriormente se inyecta mediante el desplazamiento rotativo del husillo en una cavidad cerrada

*Autor para la correspondencia: samuel.delaluz@utpuebla.edu.mx
Correo electrónico: samuel.delaluz@utpuebla.edu.mx (Samuel de la Luz Merino), jose.sandoval@utpuebla.edu.mx (José Víctor Sandoval Ramos)

Historial del manuscrito: recibido el 25/09/2024, última versión-revisada recibida el 11/11/2024, aceptado el 25/11/2024, publicado el 12/12/2024. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecia5.13807

llamada molde. El molde presenta la forma del artículo que queremos conseguir. Durante el proceso, el PP modifica su estado de agregación al pasar de sólido a líquido (visco-elástico), en este contexto, la reología como ciencia que estudia la deformación y flujo de ese material en dicho estado de agregación, es importante para entender esta naturaleza dual (sólido – fluido) en el cálculo de los parámetros de inyección (Vlachopoulos *et al*, 2003) (Osswald, *et al*, 2015).

En este trabajo se presenta la fabricación de vasos para gelatina (típicamente denominados así). Al ser un producto comercial, con varios años de fabricación en la industria de los polímeros, muchas de las variables del proceso se han estandarizado. Nuestro punto de partida será desde la experiencia empírica que se tiene en la inyección y procedimiento de esta pieza, planteando cálculos de parámetros básicos desde la perspectiva científica.

2. Experimental

Los elementos y el orden que constituye una línea de producción para un producto plástico son: material – molde – máquina. Los parámetros que en general se programan en un proceso de inyección en el mando de control MC5 de nuestra máquina son: temperatura de fusión del polímero, temperatura del molde, presión de inyección, velocidad de inyección, tiempo de inyección, tiempo de sostenimiento, presión de sostenimiento y tiempo de enfriamiento (Farooque *et al*, 2021).

Se ocupó polímero comercial de la marca SABIC® 579S, que es un PP homopolímero. De acuerdo a su hoja de seguridad posee las características mostradas en la tabla 1:

Tabla 1 Datos de la materia prima ocupada (SABIC®)

PROPIEDADES DE LA RESINA	***Valores***	***Métodos de prueba***
Tasa de flujo de fundido a 230 ºC y carga de 2.16 kg	47 gr/10 min	ASTM D1238
Densidad a 23 ºC	905 kg/m3	ASTM D792
PROPIEDADES MECÁNICAS		
Resistencia a la tracción al límite elástico	35 MPa	ASTM D638
Elongación por tracción en el límite elástico	11%	ASTM D638
Módulo de flexión (1%Secante)	1900 MPa	ASTM D790
Resistencia al impacto izod con muescas a 23 ºC	20 J/m	ASTM D256
Dureza Rockwell, escala R	104	ASTM D785
PROPIEDADES TÉRMICAS		
Punto de reblandecimiento Vicat	152 ºC	ASTM D1525
Temperatura de deflexión del calor a 455 kPa	98 ºC	ASTM D648

En general, los polímeros consistentes de monómeros idénticos son llamados homopolímeros mientras que los compuestos poliméricos con más de un tipo de monómero en sus cadenas son conocidos como copolimeros. Se pueden ocupar 3 diferentes tipos de PP. El primero, contiene solo un monómero de PP en forma de sólido semicristalino; es un homopolímero (HPP). El segundo, contiene etileno en forma de co-monómero adherido a las cadenas de PP en niveles que van del 1 – 8 %, se conoce como un copolímero aleatorio (RCP). El tercero, contiene una mezcla entre la fase RCP con un contenido de etileno del 45 – 65 %, es llamado copolímero de impacto (ICP). El HPP es el material más ocupado en la industria, entre un 65-75% comparado con ICP que se usa entre un 20 – 30 % y el RCP entre un 5 – 10 %. (Maddah, 2016).

La máquina de inyección con la que se trabajó es de la marca Krauss-Maffei modelo CX 80-380, de acuerdo a su hoja de datos tiene las siguientes características: fuerza de cierre 800 kN, fuerza de apertura del molde 55.3 kN, unidad de plastificación/magnitud de inyección SP 380, superficie efectiva 103.869 cm^2, diámetro del husillo 35 mm, presión máxima de inyección 2429 bar y tasa de inyección de 96 cm^3/s (ver figura 1). Se usó un molde de colada fría con una cavidad. El diseño del molde permitió que el material en estado visco – elástico llene la cavidad en cada disparo de manera homogénea.

Figura 1. Máquina Krauss CX 80-380 usada en el proceso

Una vez que se han colocado en la tolva de la máquina de inyección los pellets de PP y dado las instrucciones y datos en el mando de control de la máquina (MC5); el proceso de inyección consistió en las siguientes etapas

- Cierre de molde.
- Generación de fuerza de cierre.
- Avance de la unidad de plastificación.
- Inyección. Llenado del molde con el polímero.
- Contrapresión (presión del PP ante el husillo).
- Enfriamiento (cambio de temperatura generado en el molde).
- Plastificación (cambio de estado de agregación dentro del molde).

- Retroceso de la unidad de plastificación.
- Reducción de la fuerza de cierre.
- Apertura de molde.
- Expulsión de la pieza.
- Pausa.
- Ciclo completo.

Una vez que se concluyó la secuencia de etapas descritas anteriormente, el proceso continuó hasta que se logró el número de piezas establecidas.

3. Resultados y discusión

El proceso de producción de piezas comenzó colocando en la tolva el PP en forma de pellets, éste continuó interactuando con el husillo, hasta lograr la temperatura requerida para que llegué al estado visco – elástico (fundido del plástico), posteriormente se puede generar la inyección, como se muestra en la figura 2.

El plástico fundido es inyectado hacia el molde, iniciando desde el punto de introducción de la masa plastificada (bebedero del molde) hasta la entrada de las cavidades del molde. Para la dosificación de material, se reinicia el husillo y se llena con material, esto se denomina cojín de masa, que es el material polimérico que permanece en la zona delantera del husillo al finalizar la fase de inyección y compactación, es decir, este material se mantiene en la cavidad del molde después de que se haya inyectado la cantidad necesaria de material para formar la pieza. La rotación del husillo genera un flujo de alimentación. El PP se calienta, compacta, se le aplica esfuerzo de cizallamiento y se genera una homogeneización en la zona del cañón de la inyectora, calentado alrededor del husillo. El PP se conduce entonces hasta la boquilla de inyección.

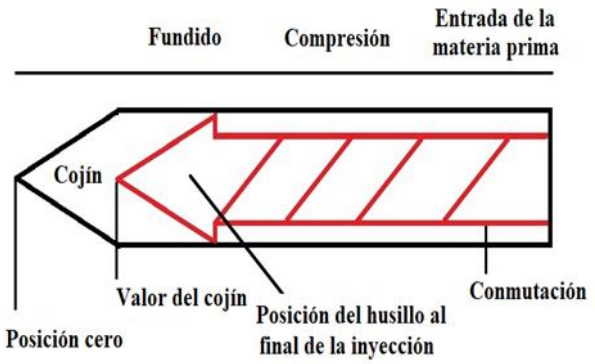

Figura 2. Configuración de la entrada del PP a la unidad de inyección (elaboración propia)

3.1 Cálculo de parámetros de inyección

Los cálculos de parámetros de inyección para nuestro producto partieron de variables conocidas de piezas previamente fabricadas, así como de información reportada por otros autores (Fischer *et al*, 2012).

Temperatura. Para lograr el cambio del estado sólido del PP al estado visco-elástico es necesario aplicar un aumento de temperatura. En la unidad de inyección se funde el plástico y se inyecta. Las propiedades mecánicas del PP presentan un cambio con respecto a alcanzar la temperatura de fusión. En general disminuye el esfuerzo que se tendría que aplicar para lograr una deformación plástica en el material, conforme aumenta la temperatura. Por otra parte, la viscosidad del PP aumenta en fluidez con el aumento de temperatura. Se debe establecer un compromiso entre las variables térmicas y mecánicas para generar correctamente la transición entre estados de agregación de la materia: sólido – visco-elástico – sólido.

Algunos parámetros generales propuestos para temperatura y presión para procesos de inyección de PP se muestran en la siguiente tabla (Farotti, *et al*, 2018).

Tabla 2: Parámetros generales de procesamiento del PP

Parámetros del proceso	Valor
Temperatura de fusión	230 - 260 ºC
Presión de sostenimiento	200 - 500 bar
Temperatura de molde	10 - 30 ºC
Temperatura de brida	20 - 30 ºC

Masa. La masa es la cantidad física que se asocia a la composición (materia), y en el moldeo por inyección, el material define el tipo de máquina a usarse, el molde, la regulación de temperatura, la forma y el ajuste del proceso (Malinowski, 2015).

De una línea de producción de piezas inyectadas correctamente, se tomaron 50 vasos aleatoriamente. Se midió y se calculó el valor promedio de masa (m) en un vaso. Se consideró este valor como la cantidad de masa requerida para producir una pieza, $m = 20.05 \pm 0.03$ gr. En la siguiente figura se observa el histograma generado por los datos de la masa:

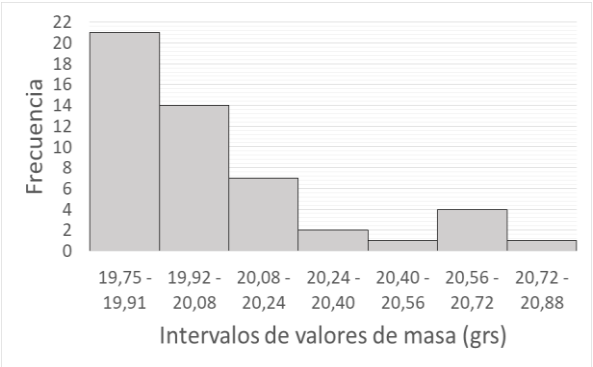

Figura 3: Histograma para la masa del vaso con media muestral = 20.04 gr y desviación estándar = 0.25, coeficiente de variación = 1.27, Rango = 20.82 gr – 19.75 gr = 1.07gr

Una parte sustancial de las mediciones se localiza entre los valores de masa de 19.75 – 20.08 gr (70% de los datos está en este rango), por otra parte la discrepancia máxima que existió entre las masas de las piezas (rango) en este lote, está acorde a las tolerancias permitidas para este tipo de piezas. El coeficiente de variación para los datos de masa fue del 1.27%,

lo que en la práctica se considera relativamente bajo. El histograma se aprecia con una distribución sesgada, en términos generales, un sesgo en una variable de salida refleja el desplazamiento paulatino de un proceso debido a desgastes o desajustes (Gutiérrez, *et al*, 2009), cabe aclarar que el molde que se usó en este trabajo lleva ya un tiempo prolongado inyectando este tipo de piezas.

Consideraciones geométricas de la pieza. Del lote de vasos mencionado anteriormente, se hicieron las mediciones y cálculos de la pieza, los resultados que se muestran en la siguiente tabla, son los valores promedio:

Tabla 3: Datos del vaso para gelatina (mm)

Diámetro	Altura	Espesor de pared
75.43 ± 0.07	82.79 ± 0.03	1.24 ± 0.01

Área proyectada. Es el área que proyecta una forma tridimensional. Se calcula considerando el diámetro promedio de la pieza a inyectar

$$A = \pi r^2 \tag{1}$$

Donde *A* es el área proyectada y *r* es el radio de la pieza, sustituyendo y usando el dato de la tabla 3, se obtiene un valor de $A = 44.65$ cm^2.

Fuerza de cierre. Las máquinas de inyección se clasifican dependiendo del tamaño de la fuerza de cierre, que incluye, entre otras tareas, la aplicación de fuerza que permita mantener el molde cerrado. De acuerdo al tipo de polímero que ocupamos, considerando su viscosidad y el efecto que la temperatura tiene sobre sus cambios de estado sólido a visco-elástico, en la práctica diaria se ha sugerido un valor de presión interna entre 600 – 700 bares. Se usó la siguiente ecuación:

$$F = (P)(A) \tag{2}$$

Donde *F* es la fuerza de cierre, *P* es la presión interna recomendada y *A* es el área proyectada. Se obtuvo un valor de fuerza de cierre entre 267.90 kN – 312.55 kN, acorde al intervalo de presión interna sugerido.

Presión de inyección. El valor de presión específica de inyección, ejercida por el husillo sobre el material fundido, varía según la resistencia que el husillo encuentra en el movimiento de traslación durante la fase de inyección (Bodini et al, 1992). La presión de inyección conducirá al PP dentro del molde, a su vez, el polímero ejercerá una fuerza opuesta a la conformación dentro del molde. Las fuerzas y presiones que se generan, se deben tomar en cuenta, como se observa en la figura 4.

La razón de compresión (pistón/husillo) que ocupa el modelo de nuestra máquina se calculó en función de las áreas de superficie efectiva (A_1) y área del husillo ($\pi\ r^2$) (A_2), P_2 es la presión máxima de inyección, usando el principio de Pascal:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{A_1}{A_2} = R_i = \frac{103.869 cm^2}{9.62 cm^2} = 10.79 \tag{3}$$

Donde R_i es la relación de intensificación, que nos permite calcular la presión hidráulica máxima que podría ocurrir (la ventaja mecánica):

$$P_1 = \frac{2429\ bar}{10.79} = 225.11\ bar\ (Hidráulico) \tag{4}$$

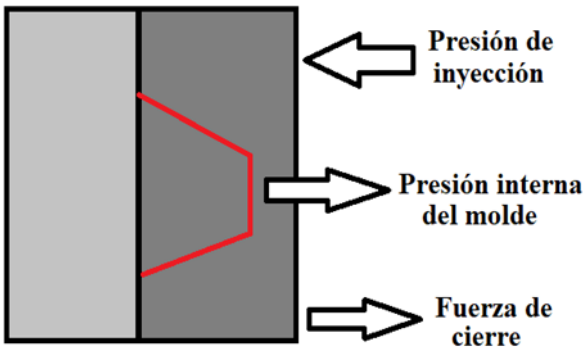

Figura 4. Representación de las fuerzas y presiones en el molde (elaboración propia)

Carga del material. Respecto a la cantidad de material requerido para lograr una pieza, consideramos la cantidad de masa, así como datos técnicos del PP reportados en la literatura. La expresión que relaciona la densidad con la masa y volumen es:

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{5}$$

Donde ρ es la densidad del PP (0.905 gr/cm^3), *m* es la masa del vaso (20.05 gr) y *V* el volumen, asociado a la carga del material a usarse en el proceso de inyección. De la expresión anterior, obtenemos un valor para $V = 22.15$ cm^3, que se considera la carga del material a usar en el proceso.

El volumen de inyección necesario debe considerar el volumen de la pieza moldeada más el volumen de la colada (excedente que consiste en el bebedero, el canal de distribución y el punto de inyección), por lo que se debe compensar la diferencia de densidad entre el material fundido y la pieza solidificada, respecto al cálculo de *V* previamente resuelto.

Distancia de plastificación. Usamos el valor de carga del material, para determinar cuánta distancia tendrá que recorrer la unidad de plastificación. Relacionamos el volumen en la unidad y la modelamos como cilindro:

$$V = (\pi r^2)(d) \tag{6}$$

Donde *V* es el volumen asociado a la carga de material, en esta expresión, *r* es el radio del husillo que se ocupó en la unidad de inyección y *d* es el recorrido de plastificación. Al resolver para *d* la ecuación anterior, se obtiene un valor de 23.02 mm.

Se recomienda, de acuerdo a la práctica empírica y también en lo reportado en la literatura (Palutkiewicz, *et al*, 2021) (Injection molding glossary, 2024), que se aumente la cantidad de carga, con respecto al cálculo hecho. Como se mencionó anteriormente, esto se conoce como cojín de masa, que

permitirá compensar la contracción, evitará posibles marcas de hundimiento en la pieza moldeada, y garantizará que el husillo no toque fondo contra la parte delantera del barril. Es fundamental para que en la mayoría de las piezas se garantice un llenado correcto en el molde (Volke, *et al*, 2023) En este trabajo se consideró un aumento del 20 %.

$$V_{Total} = (22.15\ cm^3)(1.2) = 26.58\ cm^3 \quad (7)$$
$$d_{total} = (23.02\ mm)(1.2) = 27.62\ mm \quad (8)$$

Tiempo. El ciclo de inyección, desde una perspectiva temporal, comienza en el cierre del molde, continuando con la inyección, llenado, sostenimiento, enfriamiento, plastificación, apertura del molde y finalmente la expulsión. Algunas variables temporales ocupadas en este trabajo, se muestran en la tabla 4. En el caso de obtener un valor estimado de tiempo de enfriamiento, ocupamos la siguiente expresión, la cual se usa en casos cuando la temperatura del molde es menor o igual a 60 ºC (Fischer, *et al*, 2012):

$$T_E = s(1 + 2s) \quad (9)$$

Donde T_E es el tiempo total de enfriamiento (en segundos) y s es el espesor de pared de la pieza moldeada (en mm). Se graficó la T_E en función del espesor de pared, como se observa en la figura 5.

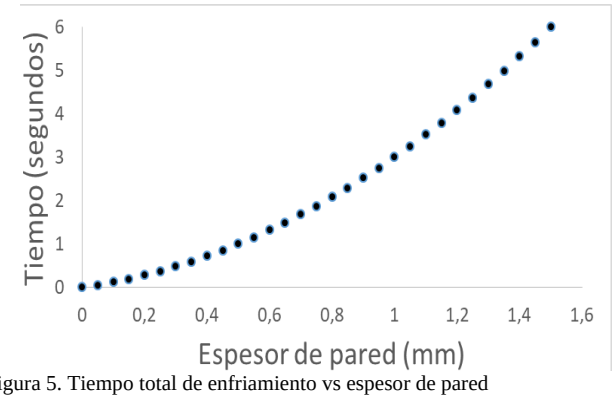

Figura 5. Tiempo total de enfriamiento vs espesor de pared

En nuestra pieza, el espesor promedio de pared es de 1.24 mm, por lo que, se estimó un tiempo de enfriamiento de 4.3 segundos, es decir, el tiempo aproximado que tardaría en plastificar la pieza.

Velocidad de inyección. De acuerdo al volumen de pieza moldeada (22.15 cm^3) y a la viscosidad, se tiene una relación empírica temporal que nos propone el tiempo de inyección, el cual va de 0.75 a 1 segundos, para esas condiciones (Malinowski, 2015). Usamos la siguiente expresión:

$$V = \frac{d}{t} \quad (10)$$

Donde V es la razón entre el recorrido de plastificación *(d)* y el tiempo de inyección *(t)*, que en este trabajo resultó en un intervalo que puede ir de 36.82 mm/s a 27.62 mm/s según el valor de tiempo que se determine.

Contracción. La contracción es el cambio en el volumen de la pieza, causado por la diferencia de temperatura entre el molde y el ambiente. Se ha reportado que durante el enfriamiento de polímeros semicristalinos se forma una estructura ordenada, lo que resulta en un cambio del volumen del material en el molde (Kosciuszko, *et al*, 2020), es decir, el reacomodo atómico (recristalización) del material plástico. La contracción ocurrida durante el procesamiento depende de muchos factores, tipo de polímero, geometría de la pieza moldeada, diseño de la cavidad del molde, así como de los parámetros de procesamiento (Postawa, *et al*, 2005) (De Santis, *et al*, 2008) (Pomerleau, *et al*, 2006). El cambio en las dimensiones de las piezas moldeadas por inyección puede realizarse hasta incluso 1000 horas después de su expulsión del molde (Kosciuszko, *et al*, 2022). Se ha reportado que la contracción de productos de PP moldeados alcanzaron un valor mayor después de 48 horas desde su expulsión del molde, en comparación con la medición realizada inmediatamente después que fue expulsada. (Revilla – Díaz, *et al*, 2007).

Una expresión propuesta en la literatura (Mukras, *et al*, 2019) para estimar la contracción volumétrica es:

$$V_c = V_{esperado} - \frac{m}{\rho} \quad (11)$$

Donde V_c es la contracción volumétrica, $V_{esperado}$ es el volumen calculado y esperado en la pieza, m es la masa de la pieza y ρ es la densidad del polímero. Al estar el cambio de volumen en función de la masa, se ocupó una pieza recién procesada y expulsada del molde, se pesó durante 6 segundos (ver figura 6) y llegó al límite de contracción, ya que su masa calculada fue de 19.70 gr. Tal aseveración se comprobó al pesarla después de varios días, obteniendo el mismo valor de masa para esa pieza.

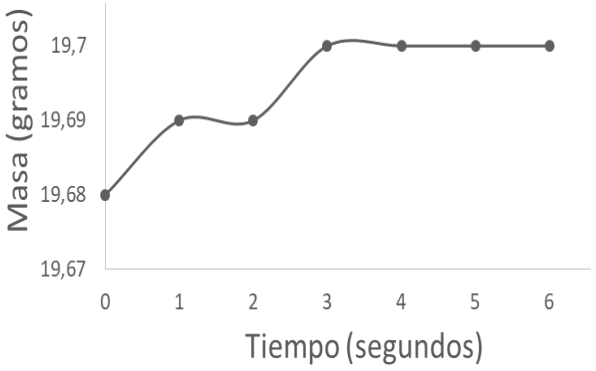

Figura 6. Masa medida en función del tiempo de una pieza recién expulsada

3.2 Efecto de la masa en el proceso

Aunado a los cálculos presentados previamente, se deben considerar otras variables que se establecen en el controlador de la máquina de inyección, y que influyen de manera significativa en nuestro proceso. En la tabla 4 se muestran los parámetros ocupados en este proceso de inyección y en la tabla 5 se observan los datos estadísticos de tales parámetros.

Al incorporar todas las variables del proceso de inyección se espera la obtención de piezas con características similares, sin embargo, en algunas piezas se observan defectos. En este

trabajo también se agregaron pellets colorantes para obtener piezas de diferentes colores, como se muestra en la figura 7. Consideramos que la masa es una cantidad que brinda información contundente respecto a los defectos, ya que está en función de la pieza, molde, máquina así como la definición del proceso.

Figura 7. Diversas muestras de vasos de PP

Una forma de revisar de manera sencilla que se cumplen los parámetros de la pieza es comparando de forma visual. Posteriormente se procede a medir y calcular las dimensiones, masa y volumen de los productos (entre otros parámetros), de manera aleatoria, con el propósito de que estén acorde a lo solicitado. En la figura 8 se comparan los distintos valores de masa para 2 piezas que de acuerdo a los parámetros de calidad básicos, presentan defectos claramente observados. Cabe hacer mención que en la producción de piezas se observaron más defectos, sin embargo, en este trabajo solo consideramos el efecto de la masa (exceso o falta) en dichos defectos.

De acuerdo a nuestro análisis estadístico, una pieza correcta debe tener una masa de 20.05 ± 0.03 gr, comparamos con piezas defectuosas mostradas en la figura 8. En la figura 8 A), una pieza con rebabas (defecto asociado al exceso de plástico), mostró un valor de masa igual a 21.20 gr (1.15 gr más en comparación al valor de masa promedio). Por otra parte, cuando la pieza sale incompleta (ver figura 8 B), la masa es de 18.65 gr (1.40 gr menor en comparación al valor de masa promedio).

Tabla 4 Parámetros de tiempo, presión y temperatura en el proceso de inyección

Ciclo	TC (s)	TI (s)	TP (s)	CP (mm)	TE (s)	PM (bar)	PC (bar)	D (s)
1	25.73	1.02	5.67	79.9	9	2048	920	0
2	22.77	1.19	7.18	82.5	9	2025	1626	2.62
3	23	1.38	5.85	81	9	2128	1295	2.62
4	31.81	1.55	6.5	81.9	9	2136	1329	2.65
5	23.2	1.53	6.29	82.3	9	2140	1099	11.26
6	22.7	1.13	6.59	82.7	9	2022	1136	2.64
7	28.66	0.93	6.05	82.2	9	1889	1106	2.65
8	22.49	0.93	6.02	82.1	9	1752	1325	8.79
9	22.51	0.92	6.08	82.2	9	1795	1072	2.64
10	22.53	0.93	6.13	83.5	9	1849	1225	2.65

TC: Tiempo ciclo; TI: Tiempo de inyección; TP: Tiempo de plastificación; CP: Carrera plastificante; TE: Tiempo de enfriamiento; PM: Presión máxima; PC: Presión de conmutación; D: Desmoldeo; TB: Temperatura de brida

Tabla 5 Datos estadísticos de las variables de proceso

	Límite inferior	Límite superior	Media Aritmética	Desviación estándar
Tiempo ciclo (s)	22.49	31.81	24.36	3.23
Tiempo de inyección (s)	0.92	1.55	1.12	0.25
Tiempo de plastificación (s)	5.67	7.18	6.22	0.43
Carrera plastificante (mm)	79.9	83.5	82.02	0.97
Tiempo de enfriamiento (s)	9	9	9	0
Presión máxima (bar)	1752	2140	1973.46	146.01
Presión de conmutación (bar)	920	1626	1199.88	194.23
Desmoldeo (s)	0	11.26	3.54	3.4
Temperatura de brida (ºC)	39	40	39.89	0.31

Respecto a las diferencias de masa en las piezas observadas en la figura 8, se pueden analizar observando los valores del tiempo de ciclo (T_C). El T_C está constituido por los tiempos de inyección, llenado, sostenimiento, enfriamiento y plastificación, hasta la apertura del molde (Menges, *et al*, 2001).

Se hizo un cálculo de correlación con los datos de la tabla 4 entre el tiempo de inyección (T_I) y la presión máxima (P_M). En ambas cantidades físicas está presente el efecto de la masa. El T_I es el tiempo necesario para realizar la inyección del polímero hasta llenar el molde, depende del tipo de polímero, su densidad, su fluidez, su temperatura, dimensiones del molde, así como la velocidad de avance del husillo. Por otro lado, la P_M está en función de la cantidad de fuerza ejercida por unidad de área, a su vez la fuerza está en función de la masa.

La P_M es también dependiente de otras variables como la viscosidad del material, la velocidad de inyección, así como las temperaturas del material y del molde (Farotti, *et al*, 2018). Se calculó un valor de coeficiente de relación de Pearson igual a 0.8764, que muestra una correlación directa, el coeficiente de determinación es igual 0.7680. De acuerdo al cálculo de los coeficientes, se muestra una fuerte correlación lineal entre T_I y P_M. A mayor T_I, mayor P_M (mayor cantidad de masa) y a menor T_I, menor P_M (menor cantidad de masa). Atribuimos el exceso o falta de masa en la pieza resultante al observar la variación del tiempo de inyección, lo que generó que la presión se ajustara respecto a la cantidad de polímero en el molde.

A

B

Figura 8. Piezas defectuosas A) Pieza con “rebabas”, B) Pieza incompleta

Proponiendo otra explicación al cambio de masa, de acuerdo a lo observado en la tabla 5, P_M y P_C muestran valores altos de desviación estándar, es decir, tenemos una alta variación en la P_M promedio que se aplica en el proceso, al variar la P_M, variará la fuerza y por ende, la cantidad de masa. Si observamos también en la tabla 5, el T_C y el tiempo de desmolde (D), son en los que se observa la mayor variación respecto al promedio, comparados con los otros parámetros de tiempo. Es decir, hay alta variación de tiempo durante el llenado de la cavidad del molde y del sistema de distribución del polímero en general, así como el tiempo en que la pieza es expulsada del molde. Los parámetros de tiempo han mostrado que, además de las otras variables del proceso, éstos influyen en las propiedades del material (masa) y en la precisión de la máquina (Knoll, *et al*, 2024). Inferimos, de acuerdo a la experiencia, que al generarse fluctuaciones provocadas por un cambio en la cantidad de polímero, la máquina de inyección las intentó compensar variando los parámetros de tiempo T_C y D.

4. Conclusión

En este proceso de fabricación se mostraron diversos cálculos relacionados a cantidades físicas y cantidades físicas derivadas que se tomaron en cuenta para la producción de vasos hechos a base de PP.

Se ocupó el valor de masa como referencia ya que está presente de manera implícita en diversos cálculos de las cantidades físicas asociados al proceso. De acuerdo a nuestra caracterización básica, una pieza inyectada correctamente tiene una masa igual a 20.05 ± 0.03 gr. Se observó en 2 casos particulares, que 1.15 gr más en la pieza genera el defecto de rebabas y 1.40 gr menos en la pieza genera el defecto de ser pieza incompleta.

Se observó una fuerte correlación lineal entre T_I y P_M dos parámetros que el controlador de la máquina nos proporciona en cada ciclo de inyección y en donde aparece inherente a ellos la cantidad de masa. La máquina ajustó el tiempo de inyección acorde a la presión máxima que a su vez fue determinada por la cantidad de masa que iba a ser inyectada.

Si bien haría falta un análisis de otros parámetros para llegar a una evaluación de la independencia e interdependencia entre ellos, consideramos que el propósito de este trabajo fue mostrar el aspecto básico en un proceso de inyección para una pieza comúnmente fabricada con un material polimérico ampliamente usado, resaltando el uso general del método científico combinado con el conocimiento empírico para llevar a cabo un mejor proceso.

5. Referencias

Askeland D. R., Fulay P. P., Wright W. J., (2010), Engineering and materials science (6 edition), Cengage Learning, USA

Bodini G., Pessani F. C., (1992), Moldes y máquinas de inyección para la transsformación de plásticos, Tomo II Mc GrawHill, México.

Callister Jr. W. D., Rethwisch D. G., (2014), Materials science and engineering (an introduction), (9 edition), Wiley, USA

De Santis, F.; Pantani, R.; Speranza, V.; Titomanlio, G. (2008), As-molded shrinkage on industrial polypropylene injection molded parts: Experiments and analysis. Int. J. Mater. Form, 1, 719–722.

Farooque R., Mohammad A., Rizvi S.J.A., (2021) A current state of art applied to injection moulding manufacturing process – A review, Materials Today: Proceedings, Volume 43, Part 1, Pages 441-446, ISSN 2214-7853, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.967.

Farotti E., Natalini M., (2018) Injection molding. Influence of process parameters on mechanical properties of polypropylene polymer. A first study., Procedia Structural Integrity, Volume 8, Pages 256-264, https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.12.027.

Fernandes, C., Pontes, A.J., Viana, J.C., Gaspar-Cunha, A. (2018), Modeling and Optimization of the Injection-Molding Process: A Review. Adv. Polym. Technol., 37: 429-449. https://doi.org/10.1002/adv.21683

Fischer U., Gomeringer R., Heinzler M., Kilgus R., Näher F., Oesterle S., Paetzold H., Stephan A. (2012), Mechanical and Metal Trades Handbook, Editor Ulrich Fischer, Verlag Europa Lehrmitel, Alemania

Gutiérrez Pulido H., de la Vara Salazar R., (2009), Control estadístico de calidad y seis sigma, Mc Graw – Hill, México

Injection Molding Glossary, https://www.beaumontinc.com/ injection-molding-glossary/ (Accesso: 07.11.2024)

Knoll J., Heim H-P., (2024) Analysis of the Machine-Specific Behavior of Injection Molding Machines. *Polymers*.; 16(1):54. https://doi.org/10.3390/polym16010054

Kosciuszko, A.; Rojewski, M.; Nowinka, B.; Patalas, F. (2022) Post-Molding Shrinkage, Structure and Properties of Cellular Injection-Molded Polypropylene. Materials, 15, 7079. https:// doi.org/10.3390/ma15207079

Maddah H. A., (2016) Polypropylene as a promising plastic: A review, American Journal of Polymer Science, 6(1): 1-11 doi: 10.5923/j.ajps.20160601.01,

Menges G., Walter M. How to make injection molds, 2001, Hanser, Cincinnati.

Malinowski, H. (2015). The APC of Injection Molding APC Adaptive Process Control. *KraussMaffei Technologies: München, Germany*.

Mohan, M., Ansari, M. N. M., Shanks, R. A. (2016). Review on the Effects of Process Parameters on Strength, Shrinkage, and Warpage of Injection Molding Plastic Component. Polymer-Plastics Technology and Engineering, *56*(1), 1–12 https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1132466

Mukras S. M. S., Omar H. M., Al-Mufadi F. A., (2019), Experimental - based multi-objective optimization of injection molding process parameters, Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 44, no. 9, pp. 7653–7665. https://doi.org/10.1007/s13369-019-03855-1

Osswald, T. Rudolph, N. (2015) Polymer Rheology: Fundamentals and Applications; Hanser Publishers: Munich,Germany.

Palutkiewicz P., Postawa P., Wawrzyniak J. (2021) The Impact of Selected Injection Conditions on the Properties and Structure of Molded Parts Made of HDPE with Chemical Blowing Agent, Archives of Metallurgy and Materials; vol. 66; No 2; 497-502, doi: 10.24425/amm.2021.135884

Park J. S., Lynch C. T. (1988) CRC Handbook of Materials Science, Vol. 3, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1975 and Engineered Materials Handbook, Vol.2, Engineering Plastics, ASM International, Metals Park, Ohio.

Postawa, P. (2005), Shrinkge of moldings and injection molding conditions. Polimery, 50, 201–207.

Pomerleau, J.; Sanschargin, B. (2006), Injection Molding Shrinkage of PP: Experimental Progress. Polym. Eng. Sci., 46, 1275–1283

Rabbi, M.S., Islam, T. & Islam, G.M.S. (2021) Injection-molded natural fiber-reinforced polymer composites–a review. *Int J Mech Mater Eng* **16**, 15 https://doi.org/10.1186/s40712-021-00139-1

Revilla-Diaz, R.; Sanchez-Valdes, S.; Lopez-Campos, F.; Medelin-Rodriguez, F.J.; Lopez-Quintanilla, M.L. (2007) Comparative characterization of PIP nano-and microcomposites by in-mold shrinkage measurements and structural characteristics. Macromol. Mater. Eng., 292, 762–768.

Sabic, Hoja de seguridad del Polipropileno (PP) 579S

Singh, G., Verma A. (2017) A Brief Review on injection moulding manufacturing process, Materials Today: Proceedings Volume 4, Issue 2, Part A, Pages 1423-1433, ISSN 2214-7853, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.01.164.

Vlachopoulos J., Strutt D. (2003), Polymer processing. Materials Science and Technology, 19(9), 1161 – 1169. https://doi.org/10.1179/026708303225004738

Volke, J.; Heim, H-P. (2023) Evaluation of the injection molding process behavior during start-up and after parameter changes using dynamic time warping correspondences. J. Manuf. Process, 95, 183–203. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.03.076

Zhou S., Hrymak A.N., (2024) Injection Molding of Polymers and Polymer Composites. Polymers (Basel). Jun 25;16 (13):1796 doi: 10.3390/polym16131796.