



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evaluación del moldeo científico
aplicado a diferentes moldes para
inyección de plásticos**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Julio César González Sánchez

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Magdalena Trujillo Barragán



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

Índice

1. ANTECEDENTES.....	3
1.1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 ALCANCES DEL TRABAJO.....	3
1.4 HIPÓTESIS.....	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 CARACTERÍSTICAS DEL POLÍMERO A INYECTAR	5
2.2 DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA DE INYECCIÓN Y DEL PROCESO DE INYECCIÓN.....	9
2.3 EL MOLDE DE INYECCIÓN	15
2.4 CALIDAD DE LA PIEZA.....	16
2.5 MÉTODOS PARA MOLDEO POR INYECCIÓN DE PLÁSTICOS	16
2.5.1 Moldeo científico.....	16
2.5.2 Inyección breve y sucinta	23
3. EL MOLDEO CIENTÍFICO PARA 4 MOLDES DIFERENTES	26
3.1 DESCRIPTIVA GEOMÉTRICA DE LOS MOLDES A UTILIZAR	26
3.2 MOLDE DE COLADA FRÍA 1	32
3.3 MOLDE DE COLADA FRÍA 2.....	40
3.4 MOLDE DE COLADA FRÍA 3	55
3.5 MOLDE DE COLADA FRÍA 4	64
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	73
4.1 CURVA DE VISCOSIDAD	73
4.2 BALANCEO DE CAVIDADES	74
4.3 CAÍDA DE PRESIÓN	74
4.4 VENTANA COSMÉTICA DE PROCESO.....	75
4.5 SELLO DE COMPUERTAS	77
4.6 TIEMPO DE ENFRIAMIENTO.....	77
5. CONCLUSIONES.....	79
6. REFERENCIAS	81
ANEXOS	83
ÍNDICE DE IMÁGENES.....	98
ÍNDICE DE TABLAS	100
ÍNDICE DE GRÁFICAS	102

1. ANTECEDENTES

1.1 Introducción

Debido a la necesidad de contribuir en el conocimiento de los alumnos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, el Laboratorio de Procesamiento de Plásticos diseñó moldes prototipos para el proceso de moldeo por inyección. A través de los profesores y alumnos que han sido parte de él, además de empresas patrocinadoras del laboratorio, se desarrollaron los diseños de distintos moldes, siendo cuatro los más importantes (probetas, perillas, dosificador y nodos) debido a su uso y al diseño que se implementó en cada uno. Por otro lado, es sabido que para fabricar una pieza de plástico por inyección, los moldes son fabricados de acuerdo con el tipo de material y a la máquina a emplear, sin embargo, durante el proceso de inyección de plásticos, se requiere de minimizar el tiempo necesario para poner a punto óptimo el proceso durante la formación de una pieza específica. Por ello en este trabajo, se ha llevado a cabo un estudio de las variantes involucradas en el proceso, la metodología del moldeo científico aplicada a diferentes moldes, en relación con la geometría, el tipo de molde y el tipo de máquina a usar.

1.2 Objetivos

Evaluar la influencia que tienen las variantes de operación, el molde y la máquina en la formación de una pieza de plástico utilizando el material ácido poli láctico, a través de la metodología del moldeo científico.

Teóricamente, se compararán la serie de pasos a seguir del punto anterior haciendo una crítica constructiva de los manuales de operación de las máquinas que se tienen en los laboratorios de procesamiento de plástico en la Facultad de Ingeniería; con la finalidad de ver semejanzas y diferencias exclusivamente.

Se evaluará, en términos de los resultados obtenidos, las ventajas y desventajas de aplicar el moldeo científico para las condiciones presentadas.

1.3 Alcances del trabajo

Como resultado de este proyecto se verificará si existe una relación entre la geometría del molde, las características de la máquina usada y los equipos periféricos del molde mismo con base en la aplicación del método de moldeo científico.

1.4 Hipótesis

Se considera que el comportamiento del políácido láctico (PLA) dentro de diferentes geometrías, aunado a diferente maquinaria influirán en la calidad de las piezas como ya se ha constatado en otro tipo de materiales; es decir, el aplicar el moldeo científico como herramienta metodológica se ha probado y ha sido dirigido a materiales de fácil procesamiento y/o de uso frecuente en la industria manufacturera; de acuerdo a lo encontrado con la literatura; mas no se han encontrado evidencias de la funcionalidad del moldeo científico en materiales de uso no tan frecuente y/o de difícil procesabilidad.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Características del polímero a inyectar

Los polímeros son materiales de alto peso molecular de cadenas moleculares muy grandes formadas por meros, los cuales se pueden obtener de dos formas en general, por el método de adición y por el método de condensación.

Se tienen tres clasificaciones de polímeros, termo fijo, termoplástico y elastómero. Los termoplásticos son los polímeros más utilizados en el moldeo por inyección por lo que serán entonces de mayor interés en este trabajo.

Los polímeros termoplásticos tienen dos tipos de morfología, amorfos y semicristalinos, cada uno con ciertas propiedades que se verán a continuación.

Amorfos

Los polímeros amorfos no cuentan con un arreglo en su estructura atómica, lo que propicia que tengan una baja temperatura de fusión en comparación con los semicristalinos y en general, se considera que las propiedades mecánicas de estos materiales son también bajas con respecto a las de los semicristalinos, sin embargo, con ayuda de aditivos los materiales amorfos pueden igualar las propiedades de los semicristalinos (Askeland, 1998).

Semicristalinos

Estos polímeros se caracterizan por tener regiones en donde sus moléculas tienen un ordenamiento estricto, sin embargo, sigue teniendo zonas en las cuales no existe orden alguno(Askeland, 1998). Debido a estas zonas de cristalinidad en estos materiales, en general, aumentan su resistencia y elongación, además de ser capaces de tener una mayor facilidad para procesarlos en comparación con los materiales amorfos; aunque algunos semicristalinos por sus características químicas, llegan a ser difíciles de procesar. En la *Imagen 1* se presenta un modelo esquemático de la morfología de ambos tipos de polímeros.

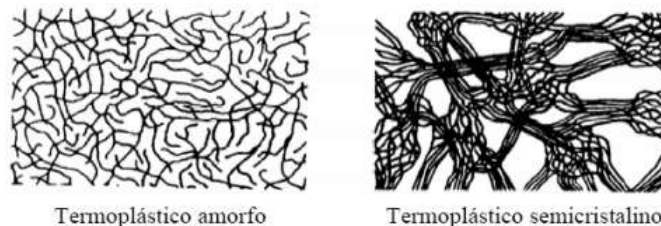


Imagen 1. Morfología de materiales termoplásticos¹

¹ Tomado de [https://upco\[mm\]jons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/4182/AnexoB.pdf?sequence=3](https://upco[mm]jons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/4182/AnexoB.pdf?sequence=3) 18/09/2019

Por la experiencia adquirida en el Laboratorio de Procesamiento de Plásticos, de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se ha observado que el ácido poli láctico, también llamado PLA (por su acrónimo en inglés) del fabricante Nature Works®, ha presentado dificultad para ser inyectado, por lo que este éste será el material a considerar durante el estudio de este trabajo, no sin antes dar a conocer las características que lo distinguen.

El poliácido láctico (PLA) es un material perteneciente al grupo de los poliésteres, biodegradable, hidrolizable, alifático, producido a través de la reacción de condensación directa de su monómero ácido láctico (Tin, Lee; Razak, Abdul; Wan Abdul, 2013) y con morfología semicristalino, muy utilizado para aplicaciones de la industria de la medicina y los alimentos; que debido a su capacidad de fácil degradación bajo composta, su producción ha aumentado en los últimos años; siendo considerado con buenas propiedades que pueden ser comparadas con otros polímeros (poliestireno (PS), polietileno de alta densidad (HDPE), tereftalato de polietileno (PET)), el PLA tiene un sinnúmero de aplicaciones en la industria (Lim, Auras, & Rubino, 2008), algunas mostradas en la *Imagen 2*.



Imagen 2. Aplicaciones del PLA²

Existen distintos tipos de PLA, que se distinguen por su forma de producción, se tienen los producidos por fermentación de carbohidratos o por síntesis química, se puede decir que la tendencia en la producción de este material es por fermentación. Cabe destacar que existen diversas técnicas de producción como lo son, condensación deshidratante azeotrópica, polimerización por condensación directa y polimerización a través de la apertura de anillo de lactida. El PLA comercial de alto peso molecular está producido por este último. (Ren, 2010). En la *Imagen 3* se muestran, de manera esquemática, las formas de obtención del PLA:

² Tomado de https://www.dovepress.com/cr_data/article_submission_image/s63000/63437/figure_190.jpg y <http://alico-sa.com/wp-content/uploads/2016/12/biocompost.jpg> respectivamente. 18/09/2019

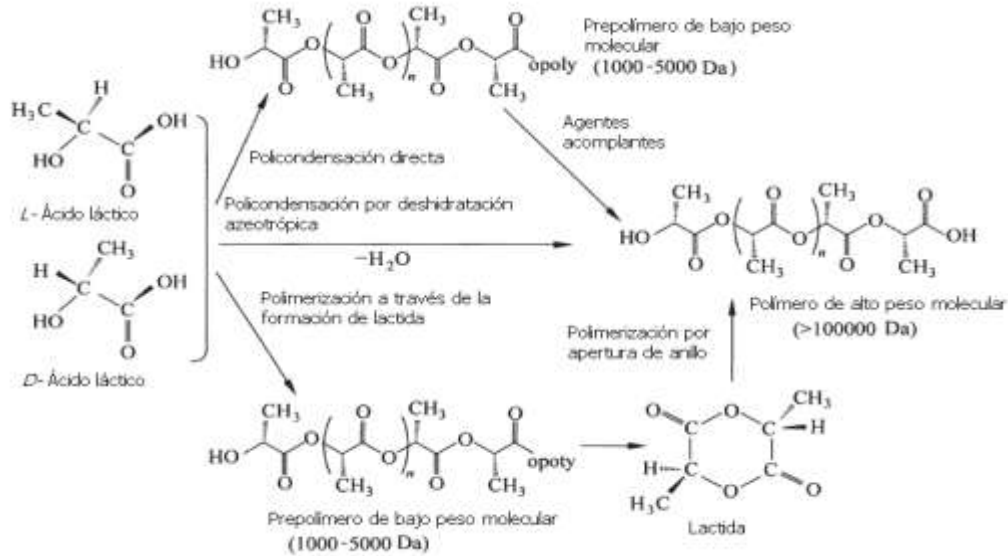


Imagen 3. Formas de obtención del PLA³

Dependiendo de la aplicación final, el PLA puede ser de bajo o alto peso molecular, amorfo o semicristalino dependiendo de su pureza óptica (porcentaje de enantiómero que provoca la rotación de la luz) y de su historial térmico, así como de su proceso de producción. El PLA comercial es un copolímero de poli(ácido L-láctico) (PLLA) y poli(ácido D,L-láctico) (PDLLA), la cristalinidad depende de la cantidad que tenga el copolímero del L- y D,L-enantiómero, se tienen 3 tipos de cristalinidad (α , β y γ) siendo la α la más estable (Lim et al., 2008).

El material que se utiliza en este trabajo *Imagen 4*, es del proveedor Nature Works®, Ingeo™ 3251D cuyas propiedades se encuentran en los anexos de esta tesis, es un material producido para procesamiento en máquina de inyección y aplicaciones en temperaturas menores a 49[°C] (NatureWorks, 2018). Cabe mencionar que este material fue creado a través de un proceso de fermentación y separación, usando el carbono almacenado en las plantas por fotosíntesis en forma de azúcar dextrosa, de esta manera el carbono y otros elementos de los azúcares se aprovechan para formar la macromolécula PLA (Tin, Lee; Razak, Abdul; Wan Abdul, 2013). Según (Kawai et al., 2011) el PLLA es el material que más se ha estudiado en términos de biodegradabilidad y la marca Ingeo (según Wikipedia⁴) ha sido la que utiliza este tipo de polímero para aplicaciones comerciales. De acuerdo con la ficha técnica del proveedor Nature Works este material lo cataloga como material semicristalino. La cristalinidad de un material tendrá una influencia significativa en los parámetros del proceso del material.

³ Tomada de (Ren, 2010) 18/09/2019

⁴ <https://en.wikipedia.org/wiki/Ingeo> 23/01/2020



Imagen 4. Pellets a utilizar de PLA

Procesamiento del PLA en inyección

Debido a sus propiedades el PLA se puede procesar por medio del moldeo por inyección, cabe destacar que las piezas producidas típicamente presentan una morfología altamente amorfa, debido a que es común utilizar una velocidad de enfriamiento alta, con ello se evita la formación de cristalitas. (Auras, R; Lim, L.-T.; Selke, S.E.M.; Tsuji, 2010)

Por lo anterior, se debe asegurar que el proceso se lleve a cabo con la mejor homogenización del fundido polimérico, estando en las temperaturas de proceso entre 40-50[°C] por encima de la temperatura de fundido, pero evitando llegar a la degradación del material. Como estas temperaturas dependerán de la composición del material, algunas de ellas se muestran en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Principales temperaturas de transición de copolímeros de PLA seleccionados.⁵

Relación de copolímero	Temperatura de transición vítrea [°C]	Temperatura de fusión [°C]
100/0 (L/D,L)-PLA	63	178
95/5 (L/D,L)-PLA	59	164
90/10 (L/D,L)-PLA	56	150
85/15 (L/D,L)-PLA	56	140
80/20 (L/D,L)-PLA	56	125

*L: enantiómero L, D,L: enantiómero D,L.

Debido a que el material es higroscópico, solo se permite que para el proceso de moldeo por inyección se tenga por lo menos 225ppm o bien 0.025% de contenido de humedad ya que el alto contenido de humedad propicia que se pierdan propiedades mecánicas en la pieza final y dificulte el proceso de inyección, además de obtener piezas de mala apariencia, por lo que es imprescindible el pre secado del material (Auras, R; Lim, L.-T.; Selke, S.E.M.; Tsuji, 2010).

⁵ Extraído de (Auras, R; Lim, L.-T.; Selke, S.E.M.; Tsuji, 2010)

El tiempo de secado depende de la temperatura a la cual se haga el proceso y de qué tipo de morfología tenga el material, ya sea, amorfo o semicristalino, así como la velocidad del flujo de aire. A continuación, se muestra la *Tabla 2* con las distintas condiciones para el pre secado.

Tabla 2. Tiempos medios de secado para pellets de PLA bajo el punto de rocío de -40[°C] y flujo de aire de 0.016m³/min/kg⁶.

Morfología	Temperatura de secado [°C]	Tiempo medio de secado [h]
Amorfo	40	4.0
Semicristalino	40	4.3
Semicristalino	50	3.9
Semicristalino	60	3.3
Semicristalino	70	2.1
Semicristalino	80	1.3
Semicristalino	100	0.6

Otra de las condiciones con las que se debe de cumplir para el procesamiento de PLA por moldeo de inyección es el husillo; el PLA puede ser procesado en husillos convencionales, especialmente en aquellos fabricados para poliolefinas (polímeros solo con átomos de carbono e hidrógeno (Kulkarni, 2016): polietileno, polipropileno, polietileno de baja o de alta densidad, etc.), este debe de tener una relación de compresión que va desde 2 hasta 3.

Debido a la condensación de láctida en superficies frías y su repercusión en el acabado superficial al igual que en el peso de la pieza, las temperaturas del molde deben oscilar entre 25 y 30[°C], aunado a ello, superficies pulidas en el molde y un incremento en la velocidad de llenado pueden llevar a reducir la deposición de capas de lactida (Auras, R; Lim, L.-T.;Selke, S.E.M.;Tsuji, 2010).

Cabe mencionar que la temperatura del molde es un parámetro importante en el procesamiento de materiales semicristalinos, ya que esta temperatura debe de ser la que necesita el polímero para poder formar cristalitas de no ser así, al tener un tiempo de enfriamiento más corto las propiedades del material cambian, incluso en algún momento pueden llegar a ser amorfos.

2.2 Descripción de la máquina de inyección y del proceso de inyección

La máquina de inyección fue patentada en 1872 por John Hayatt, las primeras máquinas funcionaban con aire comprimido, el sistema de apertura de molde y la extracción de la pieza eran realizados manualmente, los controles eran válvulas manuales, sin pantallas digitales y no tenían ningún sistema de seguridad.(Kulkarni, 2016)

En la actualidad la mayoría del proceso de inyección es automatizado, que hasta incluye pantallas de control de proceso, estadísticas de este y son digitales, donde se pueden inyectar artículos con formas complejas y entre los equipos de procesamiento de plásticos, ha sido de las que más desarrollo tecnológico ha tenido.

⁶ Extraído de (Auras, R; Lim, L.-T.;Selke, S.E.M.;Tsuji, 2010)

Una máquina de inyección tiene distintos componentes, los cuales se reúnen en unidades: unidad de inyección, unidad de cierre y unidad de control además de la bancada como se aprecia en la *Imagen 5*, en la primera se puede encontrar la tolva, el cañón, el husillo, la boquilla y dependiendo de la máquina, sistemas de válvulas.

En la segunda el molde, el sistema de cierre de molde, las platinas fija y móvil, los mecanismos para desplazar el molde y el sistema de botado. La unidad de control es aquella en donde se pueden modificar los parámetros del proceso además de configuraciones del molde, de la unidad de inyección y de la misma máquina. La bancada es aquel soporte que garantiza que no existan vibraciones en la máquina durante su funcionamiento. (Sakai & Kikugawa, 2009a).



Imagen 5. Componentes de la máquina de inyección DEMAG 50/270 del Laboratorio de Procesamiento de plásticos, Facultad de Ingeniería UNAM.

El tipo de máquina que se utiliza considera el molde que se va a emplear, los equipos periféricos que requiera el mismo, así como el espacio entre platinas, la altura del molde, la presión de inyección, la fuerza de cierre necesaria y la cantidad de material a utilizar.

En la industria del moldeo por inyección existen distintos tipos de máquinas, las cuales se clasifican por: la dirección del flujo de inyección o la dirección de montaje ya sea horizontal o vertical, y por la capacidad para cerrar las platinas, “fuerza de cierre” y la carrera de las unidades de inyección de estas. (Kulkarni, 2016)

También algunas de sus clasificaciones recaen en la forma que se tiene para aplicar la fuerza de cierre, es decir, por medio de rodilleras, pistones o eléctrica, teniendo cada una de ellas sus ventajas y desventajas. (Sakai & Kikugawa, 2009b)

En esta tesis se trabajó con dos máquinas de inyección, cuyas especificaciones se mencionan en las *Tablas 3 y 4*, y se muestran en *Imagen 6 e Imagen 7*; ambas máquinas que se encuentran en instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.



Imagen 6. Máquina de inyección marca DEMAG Ergotech 50/270⁷ con capacidad de fuerza de cierre de 50 ton.

DEMAG Ergotech 50/270	
Unidad de Cierre	
Fuerza de cierre [Ton]	50
Carrera de abertura [mm]	400
Dimensiones de las platinas [mm]	540x540
Sistema de cierre	Pistón
Unidad de Inyección	
Diámetro del husillo [mm]	35
Volumen de inyección [cm ³]	144
Capacidad de disparo [g de PS]	128
Presión máxima de inyección [bar]	1890

Tabla 3. Características máquina DEMAG Ergotech 50/270

⁷ Cortesía del Laboratorio de Procesamiento de Plásticos de la Facultad de Ingeniería, UNAM



Imagen 7. Máquina de inyección Sumitomo DEMAG Systec 210/580-840⁸ con capacidad de fuerza de cierre de 210 ton.

Sumitomo DEMAG Systec 210/840	
Unidad de Cierre	
Fuerza de cierre [Ton]	210
Carrera de abertura [mm]	575
Dimensiones de las platinas [mm]	860X860
Sistema de cierre	Rodillera
Unidad de Inyección	
Diámetro del husillo [mm]	50
Volumen de inyección [cm ³]	442
Capacidad de disparo [g de PS]	402
Presión máxima de inyección [bar]	1946

Tabla 4. Características máquina Sumitomo DEMAG Systec 210/580-840

En el proceso de inyección, se alimenta el barril con los pellets del material a utilizar, al girar el husillo por medio de la fricción y con ayuda de resistencias a lo largo del barril, estos se funden hasta que estén listos para ser expulsados en estado fundido viscoso a partir de la boquilla; además mientras el husillo rota, éste empuja la cantidad de plástico requerida para el desplazamiento (disparo) al frente del barril. Este plástico es entonces inyectado en el molde por el movimiento del husillo hacia adelante. Por otro lado, el molde, que recibe al flujo polimérico posee canales internos donde se encuentra un refrigerante fluyendo a través de él que ayuda a mantener su temperatura. Al final, una vez que la pieza es enfriada por debajo de la temperatura

⁸ Cortesía de la Unidad de Alta Tecnología de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

de expulsión, está lista para ser expulsada del molde(Kulkarni, 2016). En la *Figura 1* se muestran las fases del proceso de inyección convencional.

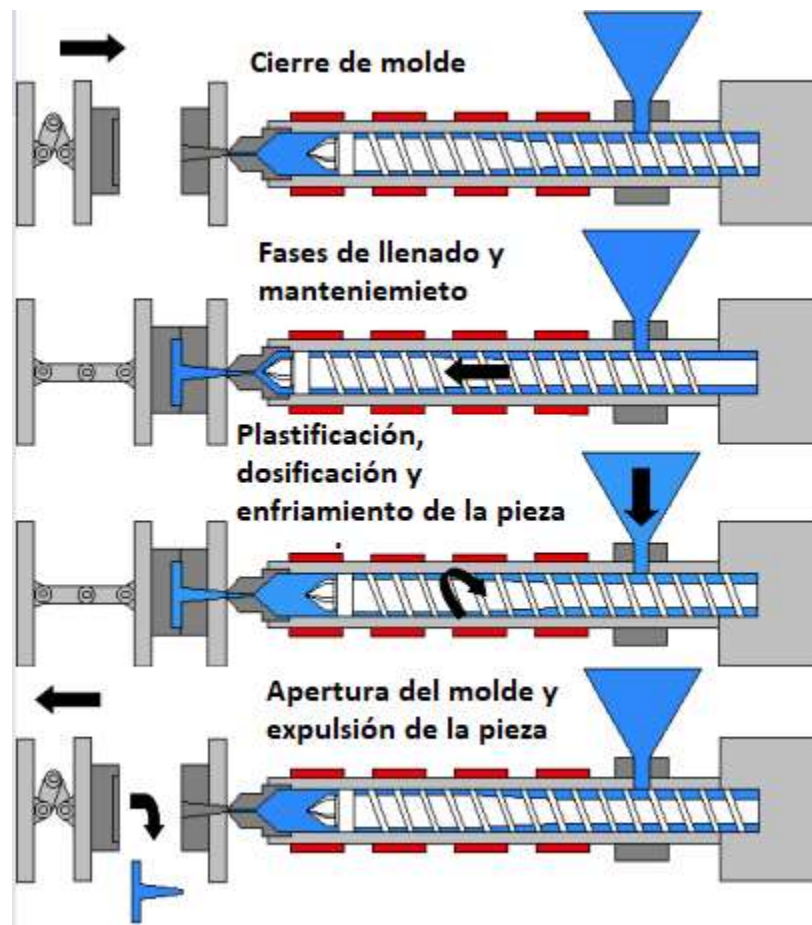


Figura 1. Esquema representativo de un proceso de inyección de plásticos.⁹

Durante el proceso de inyección existen tres fases de presión dentro del molde (presión plástica), fase de inyección, fase de compresión y fase de remanencia. Se conoce como fase de inyección al momento en que el material es inyectado en el molde, la fase de compresión y la fase de remanencia suelen ser confundidas, la primera es la fase en la cual se aplica la presión de sostenimiento y la fase de remanencia es la presión que se aplica para que el material no regrese a la boquilla (Demag Plastic Group, 2004).

La máquina de inyección tiene parámetros importantes, los cuales determinan la calidad de la pieza a inyectar y la capacidad de la máquina. Estos parámetros son:

- Temperatura del barril y de la masa: la primera, es la temperatura de las resistencias a lo largo del husillo, en las distintas zonas. Por lo general el perfil de temperaturas va en

⁹ Extraído de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/inyeccion-de-materiales-plasticos-ii.html> 12/10/19

aumento para los materiales amorfos y para materiales cristalinos al final, en la parte de la boquilla existe una disminución. La temperatura de la masa se refiere a la temperatura directamente de la masa fundida al salir de la boquilla.

- Temperatura del molde: esta temperatura es importante para los materiales cristalinos ya que la cristalización depende en gran medida de este parámetro, además mantener una temperatura en el molde evita problemas con la pieza en el momento de la expulsión.
- Velocidad de inyección: la velocidad de inyección se refiere a la velocidad con la que avanza el husillo en el momento de inyectar, este parámetro determina ciertas propiedades del material, tales como, la viscosidad además de ciertos defectos en la pieza como las ráfagas.
- Punto de conmutación: es el punto en el cual la máquina deja de inyectar y comienza a aplicar la presión de sostenimiento.
- Tiempo de sostenimiento: es el tiempo en el cual se aplica la presión de sostenimiento y depende del cierre de compuertas.
- Presión de sostenimiento: la presión de sostenimiento se refiere a la presión que se ejerce en el material al final de la fase de inyección para que en el momento de la contracción del material se inyecte más material y se evite que la pieza no se llene.
- Tiempo de enfriamiento: es el tiempo necesario para que la pieza alcance la temperatura de expulsión además de que a partir de este tiempo las dimensiones de la pieza no se verán alteradas.
- Revoluciones del husillo: es la velocidad rotacional del husillo, la cual depende del tipo de material que se utilice e influye mayormente en la fundición del mismo. Esta velocidad arrastra a los pellets desde la tolva hasta llegar a la cámara de reserva que se prepara para el siguiente ciclo de inyección.
- Contrapresión: La contrapresión es aquella presión en la cámara, contra la que tiene que plastificar el husillo durante la plastificación (Demag Plastic Group, 2004) y se usa para evitar que el husillo se mueva hacia atrás con facilidad, además de evitar que exista algún goteo en la nariz mientras el molde está abierto.

De lo anterior resulta importante mencionar que existen aspectos de calidad relacionados con cada fase, mismos que se muestran a continuación:

En la fase de inyección los aspectos son: superficie (aspereza, brillo, color), alabeo, orientación en los fillos y cristalinidad de la pieza.

Fase de compresión: formación del contorno de la pieza, rebabas, dimensiones y peso.

Por último, en la fase de remanencia: peso, dimensión, contracción, alabeo, burbujas, rechupes y tensiones interna de la pieza.

2.3 El molde de inyección

Cabe destacar que para el proceso de inyección se tienen distintos tipos de moldes y que, dependiendo de la pieza a inyectar, el molde debe tener configuraciones adecuadas para poder realizar la forma deseada.

Un molde de inyección básico consiste en dos placas, dos piezas o dos mitades como se aprecia en la *Imagen 8*, la mitad de expulsión y la mitad de inyección, cada una tiene componentes que se mencionan a continuación.

Mitad de inyección.

Cuenta con el anillo centrador, casquillo o buje de salida (sprue bushing), placa de sujeción, placa del molde, pernos guía, parte de las cavidades, y su sistema de enfriamiento.

Mitad de expulsión

Esta mitad del molde cuenta con, perno botador, placa de sujeción, placa botadora, barras de soporte, pernos botadores, placa intermedia, placa del molde, cavidades (Pruner & Nesch, 2013).



Imagen 8. Molde de inyección¹⁰

Dentro del molde se tiene la conexión entre el molde y la boquilla de inyección, esta sección se llama bebedero, para moldes multicavidad de colada y bebedero frío, las cavidades están unidas al bebedero por los canales, por último se tiene una constricción que ayuda a separar a la pieza del bebedero y de los canales llamada compuerta (Crawford, 1998) .

¹⁰ Obtenido de https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-564745178-moldes-de-inyeccion-de-plastico-diseno-y-fabricacion-_JM?quantity=1 10/10/19

Compuerta

La función principal de la compuerta es conectar los canales con la cavidad de tal forma que el polímero fundido fluya a través de ella para formar la pieza.

Una compuerta con dimensiones pequeñas, tales que tengan una caída de presión excesiva (más de 6 [MPa]), puede llevar a ciertos defectos causados por exceso de velocidad de deformación y de caídas de presión, los cuales incluyen: degradación del material, flujo no laminar, ráfagas y otros defectos visuales, tiempos de llenado extensos y tiros cortos (Kazmer, 2007).

2.4 Calidad de la pieza

La calidad se define como la propiedad o conjunto de propiedades inherentes a una cosa, que permiten apreciarla como igual, mejor o peor a las restantes de su especie según la RAE

En este trabajo se toma como calidad de la pieza a la calidad en la superficie, es decir, a que en la superficie de la pieza no se presenten defectos tales como, rechupes, rebabas, ráfagas, alabeo, quemaduras, etc. También la calidad de la pieza, toma en cuenta que la pieza este dentro de las dimensiones para las que fue diseñada, además del peso y de la textura de la misma.

2.5 Métodos para moldeo por inyección de plásticos

2.5.1 Moldeo científico

El moldeo científico se desarrolló hace más de 10 años por los ingenieros John Bozzelli y Rod Groleau (Kulkarni, 2016) y hoy se considera la manera más adecuada de encontrar los parámetros de inyección en una máquina, según varios comentarios de usuarios del método, además de que agiliza el proceso, lo cual disminuye costos y previene averías en la máquina debido a un uso inadecuado.

El moldeo científico según (Kulkarni, 2016) se divide básicamente en 6 pasos a seguir, de los cuales se obtienen los parámetros o lineamientos para el proceso de inyección, si bien el moldeo científico es eficiente para encontrar esos parámetros, con frecuencia la metodología se desarrolla en base a cada material, cada máquina y/o cada molde (Schiller, 2018). A continuación, se describen dichos pasos.

1. *Curva de viscosidad*

El estudio de la curva de viscosidad, consiste en encontrar un punto en el que el comportamiento del flujo sea newtoniano, es decir, donde la viscosidad aparente sea constante en un rango de velocidades de inyección, por lo general, este rango se encuentra a velocidades de inyección altas (Kulkarni, 2016). El parámetro que se obtiene de este paso es la velocidad de inyección.

En un inicio las temperaturas del barril se ajustan a las sugeridas por el proveedor, por lo general en el punto medio del rango que se indica, en este primer paso se inyecta la pieza al 95% de su volumen total, sin presión de sostenimiento, con un tiempo de enfriamiento que asegure que la colada haya solidificado, se debe programar la presión de inyección máxima que puede ejercer la máquina y variar la velocidad de inyección de la máxima a la mínima.

Hacer tres disparos por cada velocidad y registrar la presión de inyección, aunque cabe destacar que en un proceso completo el número de disparos es de 10 según (Kulkarni, 2016), sin embargo, es un factor común que a causa de falta de material y/o ahorro de material, solo se toman cuatro disparos, el primero de ellos se descarta y de los siguientes tres se registran, el tiempo de inyección y la presión de inyección, para posteriormente obtener una media estadística de los datos.

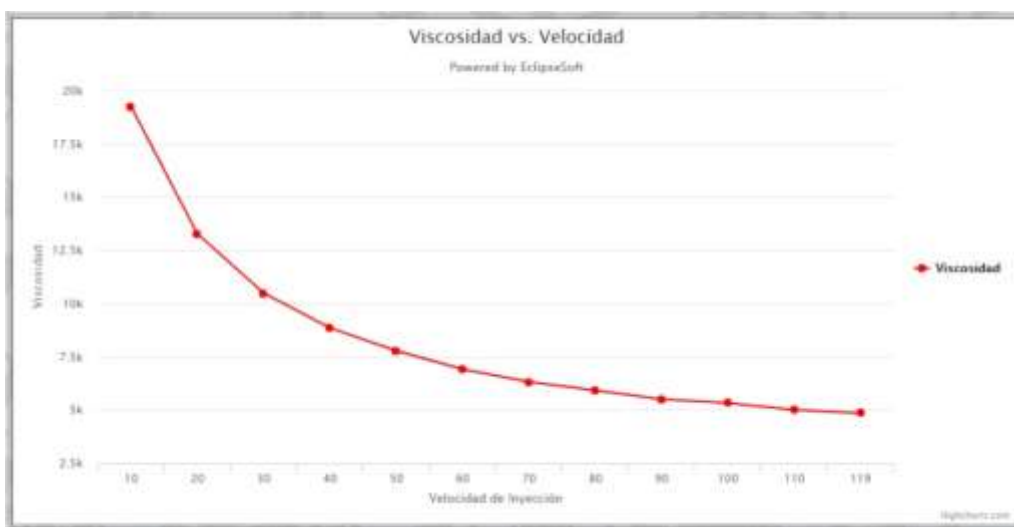


Imagen 9. Curva de Viscosidad polipropileno¹¹

Con los datos anteriores y conociendo la razón de intensificación de la máquina, se obtiene la viscosidad aparente realizando la multiplicación de la presión de inyección, el tiempo de inyección y la razón de intensificación. La razón de intensificación es la relación que existe entre la presión hidráulica y la presión plástica, si no se conociera se puede determinar o bien tomar 10 como un valor cercano. (Kulkarni, 2016).

Posteriormente se grafica la viscosidad contra la velocidad de inyección para determinar el rango donde la viscosidad aparente se considera constante. La *Imagen 9* muestra un rango desde 80 hasta 119 [mm/s] con una tendencia en la viscosidad aparente relativamente constante. Dependiendo del criterio del usuario, es común ver que el valor a utilizar puede ser de 80, 100 o incluso 119[mm/s]. En este trabajo la variación que se tomó como máxima permisible fue de 10%.

¹¹ Cortesía SciMoldTool

Los valores seleccionados muchas veces se basan en observar la apariencia de las muestras obtenidas, ya que será una medida cualitativa de la eficiencia del proceso al momento de seleccionar la velocidad de inyección.

2. *Balanceo de cavidades*

Para comenzar con el balanceo de cavidades es necesario hacer una inspección al molde y verificar las dimensiones de los canales, compuertas, venteos, además de la correcta conexión del sistema de enfriamiento, para descartar o identificar la causa del desbalanceo si existiese. (Kerkstra, Bra[mm]er, Kerkstra, & Bra[mm]er, 2018).

Una vez realizada la inspección anterior se procede a colocar la velocidad de inyección que se determinó en el paso anterior, la presión de mantenimiento se mantiene en cero, y el tiempo de enfriamiento en el valor indicado anteriormente. El balanceo de cavidades consiste en modificar la cantidad de material que entra a la cavidad para obtener el 10%, 25%, 50%, 75% y 100% del volumen de la pieza, asignar un número o nombre a las cavidades y registrar el peso de cada una, de esta forma determinar si en alguna cavidad se tiene más material. Cabe destacar que si se observó un desbalanceo en el molde en primera instancia, la actividad se tiene que realizar en el momento en el que la cavidad que se llenó primero esté al 98% del volumen total. La variación máxima permisible para los datos con respecto al que sea mayor o esté más cercano al valor de diseño, es de 5% según (Kulkarni, 2016).

Al final de este paso se obtiene un gráfico como el que se muestra a continuación, *Imagen 10*, donde se observa el peso para cada pieza de las distintas cavidades y para cada porcentaje determinado. En la *Imagen 10* se muestra que hay un desbalanceo en el molde analizado ya que existe una pendiente entre ambos puntos en todas las secciones de la pieza, la pendiente depende de cada sección, por ejemplo, en la línea del 100% no se percibe tanto el desbalanceo debido a que la cavidad que llena primero, al tener un buen ajuste el molde, no permite que entre más material y el flujo se dirige a la cavidad que llena menos, a diferencia de la línea del 75% que tiene una pendiente más pronunciada porque la cavidad que llena primero aún no está llena y el flujo tiene más facilidad de entrar a esa cavidad.

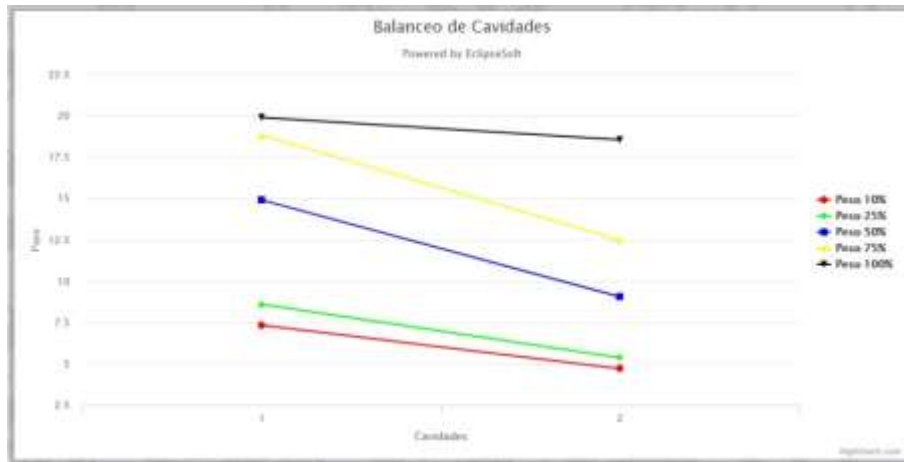


Imagen 10. Balanceo de cavidades en un molde de dos cavidades¹²

3. Caída de presión

Este tercer paso del moldeo científico compete a la presión de inyección, es decir, con este paso se obtiene la presión máxima que se va a ocupar para la pieza inyectada y se indicará si la máquina es capaz de moldear la pieza; una vez obtenida la presión máxima, se ajustará en la máquina para el posterior procesamiento continuo.

En el caso que la presión de inyección se altere, la máquina lo advertirá y se verificarán las probables alteraciones como algún cambio en los parámetros de la máquina preestablecidos, ya sea las temperaturas del barril, de la boquilla o también del sistema de refrigeración o incluso alguna perturbación en el molde.

Los parámetros que se ocuparon en el paso anterior, velocidad de inyección, presión de mantenimiento y tiempo de refrigeración, así como las temperaturas del barril, permanecerán iguales.

Para iniciar con este paso se hará una inyección al aire o también conocida como una purga, registrando el valor de la presión de inyección, al igual que en el balanceo de cavidades, se modifica la cantidad de material que entra en cada disparo a obtener, primero solo la parte de la colada o canales secundarios, después el 25%, 50%, 75% y 98 o 100% de pieza completa, registrando la presión de inyección para obtener un gráfico en el que se muestre la presión alcanzada en cada etapa y la máxima presión que puede ejercer la máquina como se muestra en la Imagen 11. (Kulkarni, 2016).

¹² Cortesía SciMoldTool

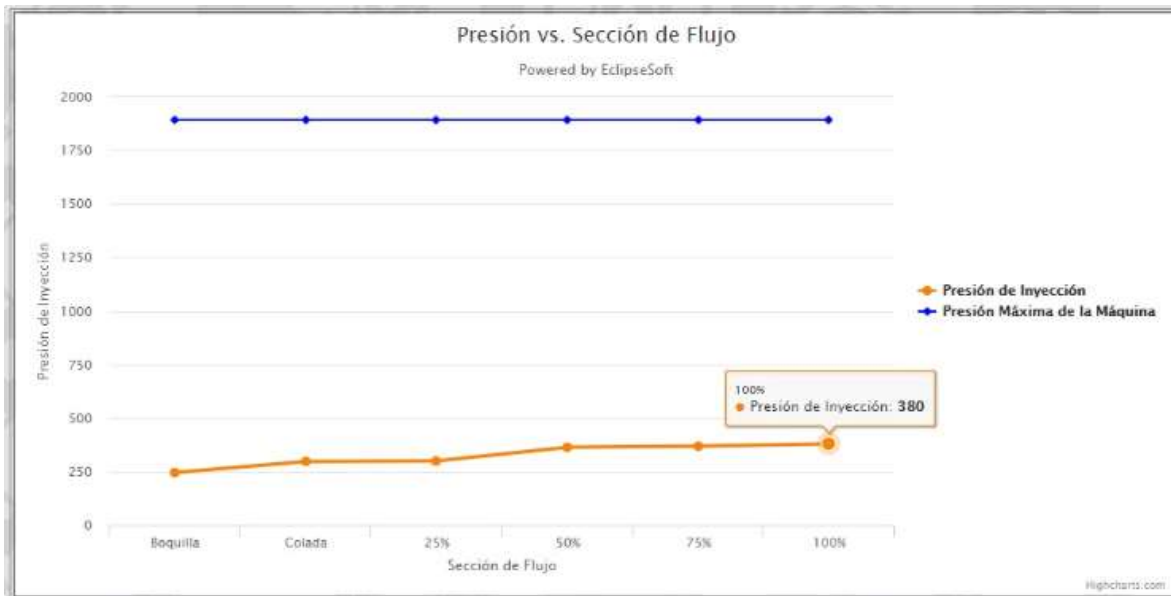


Imagen 11. Caída de presión molde de colada fría¹³

4. Ventana cosmética de proceso

La ventana cosmética de proceso se refiere al rango en el cual una pieza se obtiene sin defectos en su apariencia, por ejemplo, rechupes o rebabas. En este caso las variables importantes son la presión de mantenimiento y la temperatura de masa fundida o del molde según la morfología del material a emplear, en sus diferentes intervalos.

Cabe destacar que este paso del moldeo científico es diferente para cada familia de polímero pues, en el caso de materiales amorfos, la temperatura del molde no influye en la calidad de la pieza; sin embargo, para materiales semicristalinos, la temperatura del molde es importante para la calidad de las piezas obtenidas y la formación de las cristalitas, por ello, la ventana cosmética de proceso toma en cuenta las temperaturas según la familia del polímero en estudio. (Kulkarni, 2016).

Para iniciar con este paso se necesita mantener los parámetros obtenidos con los pasos anteriores como son, la velocidad de inyección y la presión de inyección, así como el tiempo de enfriamiento seleccionado.

Para materiales amorfos, se coloca el perfil de temperaturas del barril en las más bajas del rango que indica el proveedor y la presión de mantenimiento se varía desde un valor mínimo en donde ya no se presenten rechupes, encontrando el punto de temperatura mínima, y presión mínima.

Se aumenta la presión de mantenimiento en intervalos que dependen de la cantidad de material a inyectar, hasta que se presenten rebabas, encontrando el punto de temperatura mínima y presión

¹³ Cortesía SciMolTool

máxima. De la misma forma se obtienen los puntos para temperatura máxima-presión mínima y temperatura máxima-presión máxima dando como resultado la *Tabla 5*.

[Temperatura baja, presión baja] [T.B.,P.B.]	[Temperatura baja, presión alta] [T.B.,P.A.]	[Temperatura alta, presión baja] [T.A.,P.B.]	[Temperatura alta, presión alta] [T.A.,P.A.]
---	---	---	---

Tabla 5. Puntos de la ventana cosmética de proceso

Para materiales cristalinos el procedimiento es el mismo solo que la temperatura que se varía es la del molde.

Una vez obtenidos los cuatro puntos, se gráfica y se obtiene el centro de área del paralelepípedo formado, teniendo como resultado el punto óptimo de temperatura del barril o del molde y presión de mantenimiento, como se muestra en la *Imagen 12*.

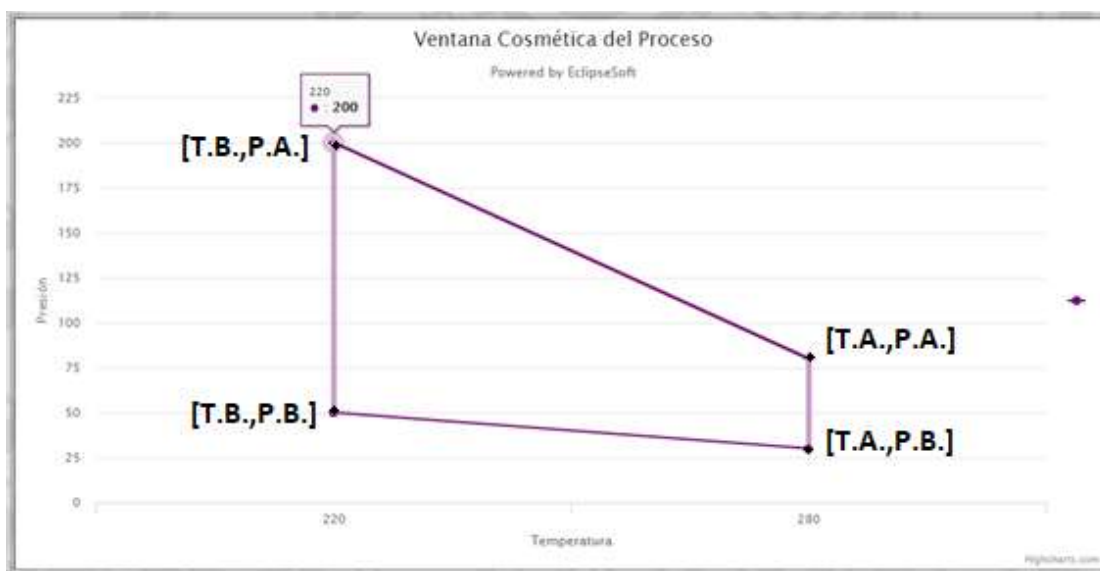


Imagen 12. Ventana cosmética de proceso¹⁴

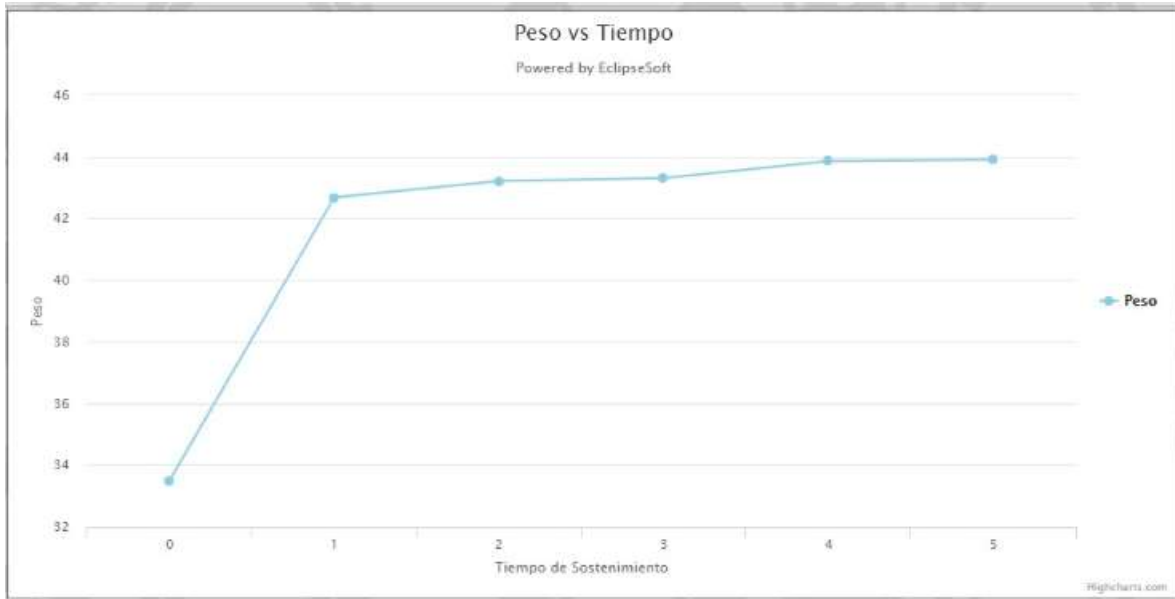
5. Cierre de compuertas

El cierre de compuertas en el moldeo científico hace referencia al momento en el cual la compuerta o el punto de inyección solidifica e impide que entre más material a la cavidad.

Se comienza por mantener todos los parámetros que ya se determinaron antes, velocidad de inyección, presión de inyección, temperatura del barril o del molde y la presión de mantenimiento; el tiempo de enfriamiento también se mantiene constante. Al igual que en pasos anteriores es necesario que la pieza a inyectar tenga el 95% o hasta el 98% de su volumen total. (Kerkstra et al., 2018).

¹⁴ Cortesía SciMoldTool

Una vez ajustados los parámetros anteriores, se procede a variar el tiempo de sostenimiento desde cero, con incrementos que dependen del tamaño de la pieza, y se registra el peso de la pieza hasta que el peso de las piezas no varíe, como se muestra en la *Imagen 13*. Para este procedimiento se recomienda realizar al menos 10 disparos por cada modificación en el tiempo de sostenimiento (Kulkarni, 2016).



*Imagen 13. Tiempo de sostenimiento*¹⁵

6. *Tiempo de enfriamiento*

El último paso del moldeo científico, el tiempo de enfriamiento, se refiere a cuánto tiempo se mantendrá la pieza enfriándose a partir del primer contacto con el molde. Se determina el tiempo de enfriamiento tomando como referencia una dimensión crítica, se busca que esta dimensión no varíe.

Para determinar el tiempo de enfriamiento, se introduce el tiempo de sostenimiento obtenido del paso anterior, en el panel de control, así como los demás parámetros ya obtenidos.

Se varía el tiempo de enfriamiento a partir de que alcance la temperatura de expulsión y se incrementa hasta que la dimensión seleccionada no varíe. Para cada tiempo de enfriamiento se necesitan al menos tres disparos y se obtiene una gráfica como la de la *Imagen 14*.

¹⁵ Cortesía SciMoldTool

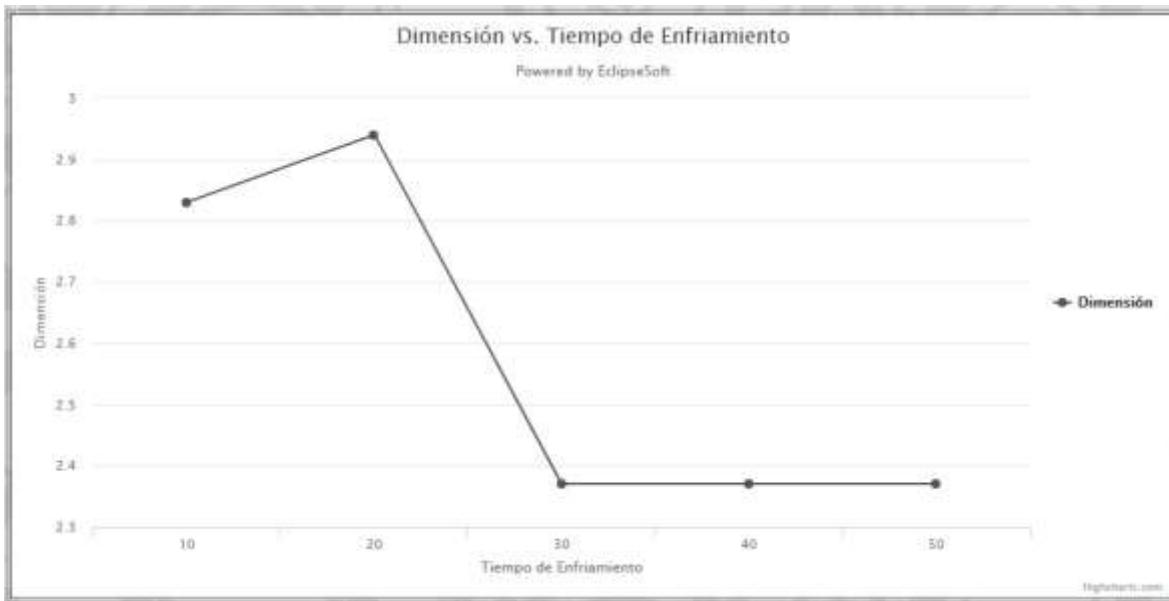


Imagen 14. Tiempo de enfriamiento¹⁶

2.5.2 Inyección breve y sucinta

Esta metodología, fue proporcionada por el proveedor de las máquinas Sumitmo-DEMAG y su procedimiento se centra sobre todo en la optimización generalizada de la máquina de moldeo por inyección y la eliminación de los defectos en la superficie de la pieza.

Los parámetros importantes que se toman en cuenta en esta metodología son 10, los cuales serán presentados por separado.

1.- Temperatura del cilindro y de la masa

Se ajustan las temperaturas a las recomendadas, siguiendo un perfil ascendente, si el volumen utilizado es escaso, se recomienda ajustar las dos primeras zonas en el límite inferior, para gran volumen de ocupación, ajustarlas en el límite superior.

2.- Temperatura de molde

La temperatura de molde es uno de los parámetros más importantes, tiene que mantenerse en unos límites de tolerancia muy estrechos, en piezas muy exigentes, se recomienda utilizar equipos integrados que permiten el almacenaje y la vigilancia correspondiente de los parámetros desde el panel de control. Se ajusta a las temperaturas recomendadas para cada material.

¹⁶ Cortesía SciMoldTool

3.- Velocidad de inyección

Para optimizar la velocidad de inyección, ajustar primero la presión de inyección al máximo, principalmente, se debe elegir la velocidad más alta posible y si se tienen paredes de espesor diferente, un perfil de velocidad escalonado sería el conveniente, dependiendo todo del material y de la pieza a inyectar.

4.- Punto de conmutación

El punto de conmutación es aquel en el que termina la fase de inyección y comienza la fase de remanencia, el momento ideal para la conmutación está en el momento del llenado de la cavidad. Esta conmutación puede efectuarse en función de la carrera, del tiempo, de la presión hidráulica y de la presión interior del molde, aunque es más conveniente en función de la carrera debido a que, el tiempo y la presión hidráulica pueden tener variaciones y la carrera es un parámetro más constante. Dependiendo del tamaño de la pieza, se recomienda un punto de conmutación una vez que el molde este lleno al 90-95% incluso al 98% tratándose de piezas de paredes finas.

En moldes de varias cavidades, el estudio de llenado volumétrico indica el grado de llenado de cada una de las cavidades. Las diferencias de llenado no deberían superar 5-10%, teniendo en cuenta los requerimientos de la pieza.

5.- Tiempo de presión remanente o tiempo de sostenimiento

El tiempo óptimo de remanencia se obtiene aumentando continuamente el valor del tiempo de sostenimiento hasta que el peso neto de la pieza no muestre variación alguna como se muestra en la *Imagen 15*.

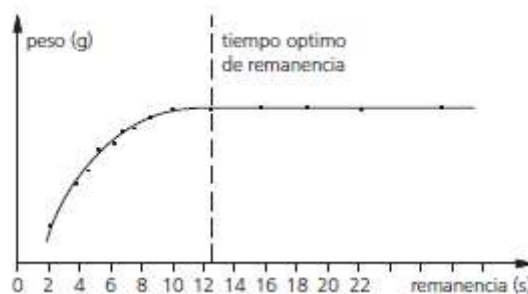


Imagen 15. Ejemplo de obtención de tiempo de remanencia

6.- La presión remanente o presión de sostenimiento

La presión remanente es aquella presión hidráulica que se ejerce en la fase de remanencia con el fin de compensar zonas de contracciones. La presión remanente suele ser del 30 al 60% de la presión de inyección resultante y en casos específicos dependiendo del material a utilizar, y de la pieza la presión varía.

7.- Tiempo de enfriamiento

El cálculo del tiempo de enfriamiento se hace aplicando la siguiente ecuación:

$$t_k = \frac{S^2}{\pi^2 * \alpha_{eff}} * \ln\left(\frac{8}{\pi^2} * \frac{\theta_M - \theta_{WZ}}{\theta_E - \theta_{WZ}}\right)$$

Siendo:

t_k : tiempo de enfriamiento

S : espesor de pared (de la pieza)

α_{eff} : difusividad térmica del material

θ_M : temperatura media de desmoldeo

θ_{WZ} : temperatura media de la pared de molde

8.- Revoluciones de husillo

El límite superior para las revoluciones de husillo es la velocidad máxima del husillo para cada tipo de material. El tiempo de dosificación resultante debería ser más corto que el tiempo de enfriamiento para plastificar de la forma más adecuada posible, es decir, sin agregar energía innecesaria por fricción al material.

9.- Contrapresión

La contrapresión es aquella presión en la cámara, contra la que tiene que plastificar el husillo durante la plastificación.

10.- Descompresión

La descompresión sirve para reducir la presión en la masa fundida dentro de la cámara después de plastificar. Se sugiere que sea del 5-10% del volumen dosificado o al menos el 10% del diámetro del husillo (Demag Plastic Group, 2004).

3. EL MOLDEO CIENTÍFICO PARA 4 MOLDES DIFERENTES

3.1 Descriptiva geométrica de los moldes a utilizar

El primer molde que se analizó fue el de probetas de tracción y de flexión *Imagen 16*, el cual será el molde de colada fría 1, está diseñado en una placa de acero inoxidable y consta de 4 cavidades, un par probetas de tracción, y un par más de probetas de flexión, cada una de las cavidades con una compuerta. Cuenta con un bebedero de 9.53 [mm] de diámetro con forma circular y frío. El canal es rectangular con un ancho de 5 [mm] y un espesor de 3 [mm] y un total de 236.54 [mm] de longitud, la compuerta de cada cavidad también es rectangular con 5.8 [mm] de ancho y 2.90 [mm] de espesor y las medidas de las cavidades respetando la norma ASTM D638 y ASTM D790 como se muestra en la *Figura 2*.

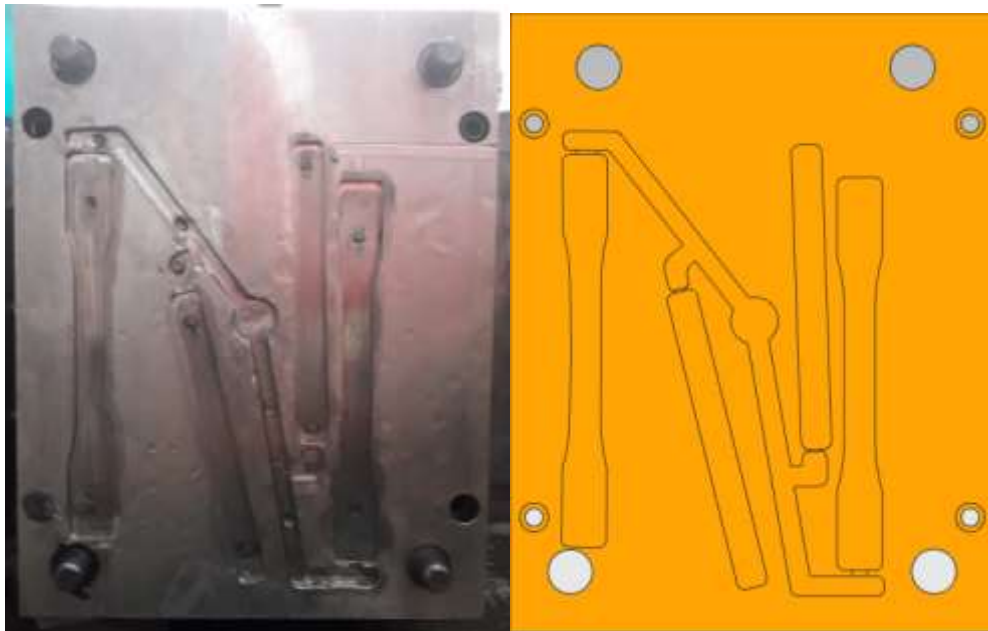


Imagen 16. Molde de colada fría 1, Probetas.

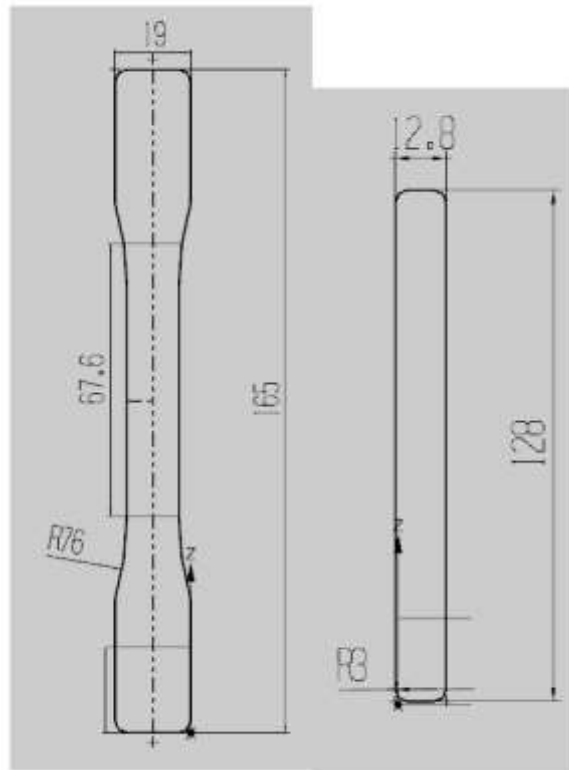


Figura 2. Medidas de las cavidades del molde de probetas en [mm].¹⁷

El segundo molde por describir es el de perillas o molde de colada fría 2 *Imagen 17*. Este consta de 2 cavidades, un bebedero caliente de 6.10 [mm] de diámetro, de forma cilíndrica y cuya temperatura es controlada con un termostato, su canal es de forma circular de 7.45 [mm] de longitud y frío. Las compuertas en este caso son distintas la de la cavidad A es de 2.64 [mm] de radio y B es de 1.31 [mm] de radio, siendo de forma semi circular, además la compuerta B, tiene una añadidura en forma rectangular de 3 [mm] por 4 [mm], tal como se ve en la *Figura 3* y *Figura 4*, las dimensiones de las cavidades se muestran en la *Figura 5*.

¹⁷ Obtenido del Laboratorio de procesamiento de plásticos de la Facultad de Ingeniería

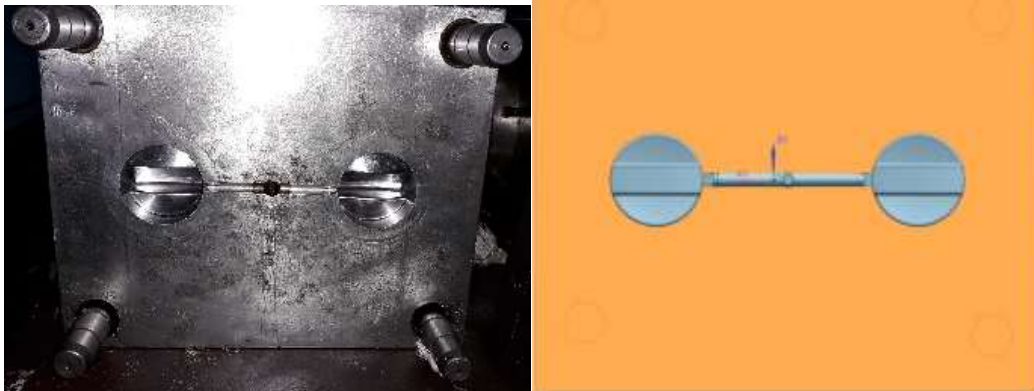


Imagen 17. Molde de colada fría 2, Perillas.

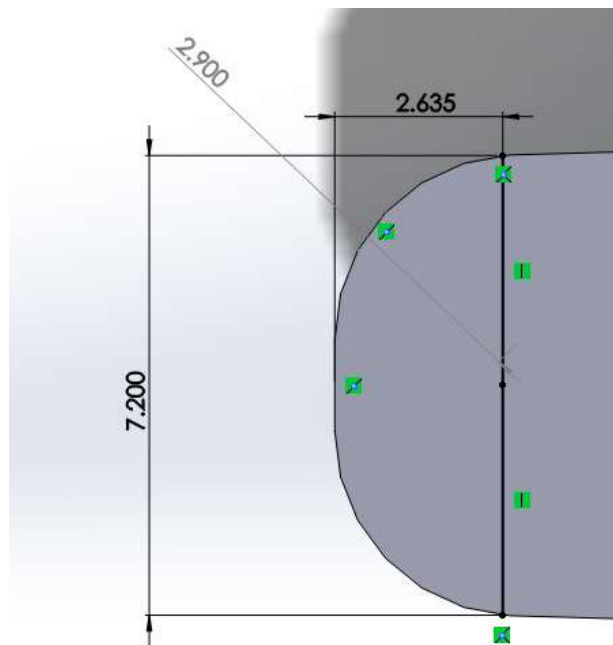


Figura 3. Dimensiones de compuerta de cavidad A en [mm]

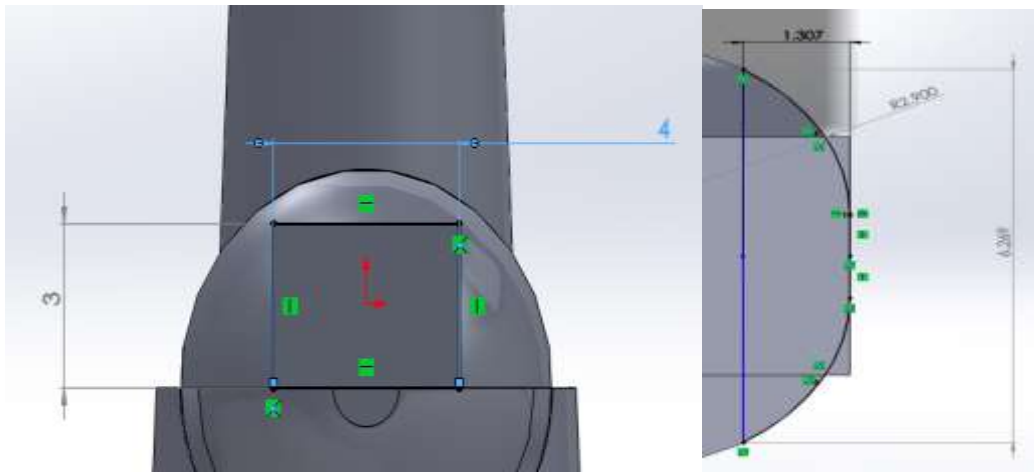


Figura 4. Dimensiones compuerta cavidad B en [mm]

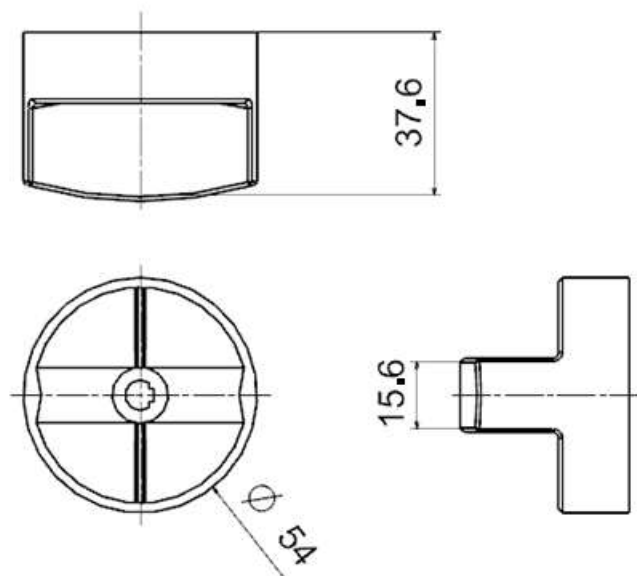


Figura 5. Dimensiones de las perillas [mm]¹⁸

El molde que se analizó fue el de las paletas, al que se llamará molde de colada fría 3 *Imagen 18*, este consta de 4 cavidades, dos de ellas de la paleta 'X' y dos más de la paleta 'Y', el bebedero es frío y de forma cónica, con un diámetro de 6 [mm], los canales primario y secundario semi

¹⁸ Obtenido del Laboratorio de procesamiento de plásticos de la Facultad de Ingeniería

cilíndricos, con un radio de 4 [mm] y con compuertas semi circulares de 1.0 [mm] de radio. Las dimensiones de la pieza están mostradas en la *Figura 6*.

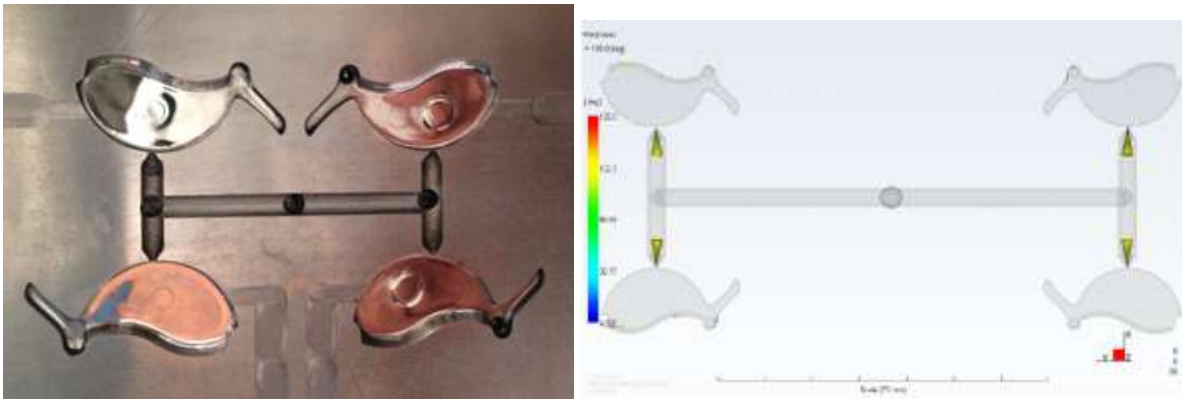


Imagen 18. Molde de colada fría 2, Paletas.

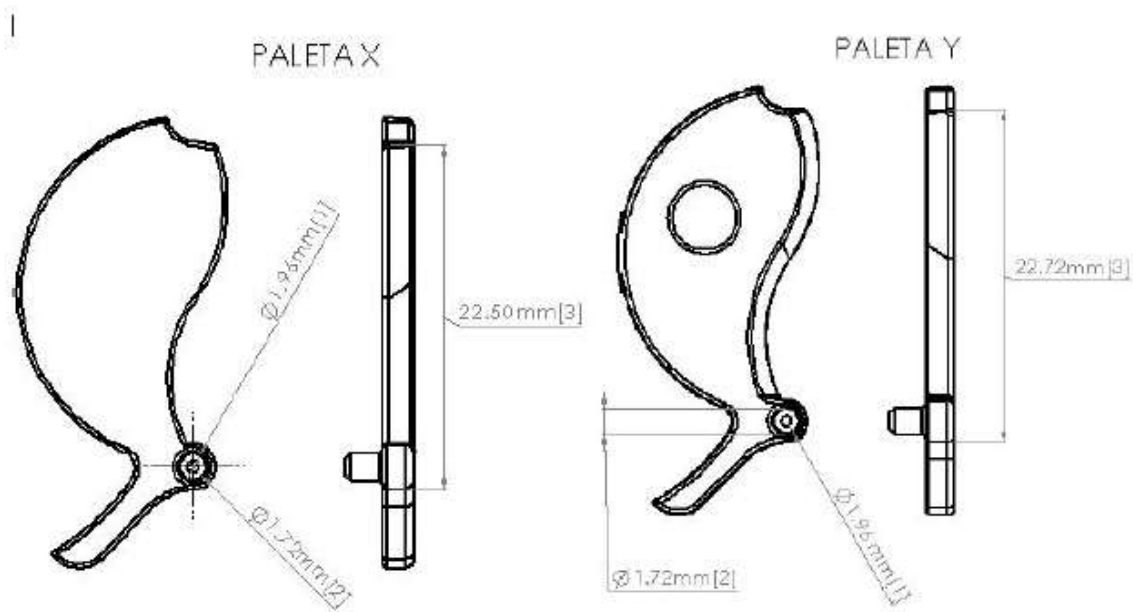


Figura 6. Dimensiones de molde de paletas.¹⁹

El molde de nodo es el molde de colada fría 4 *Imagen 19*, cuenta con dos cavidades simétricas, cada una con dos compuertas de 1.5 [mm] de diámetro, circulares, el canal primario es cilíndrico de 4.7 [mm] de diámetro, los canales secundarios de 3.1 [mm] de diámetro también cilíndricos. Las dimensiones de la pieza se muestran en la *Figura 7*.

¹⁹ Extraído de (Hernández A, 2015)

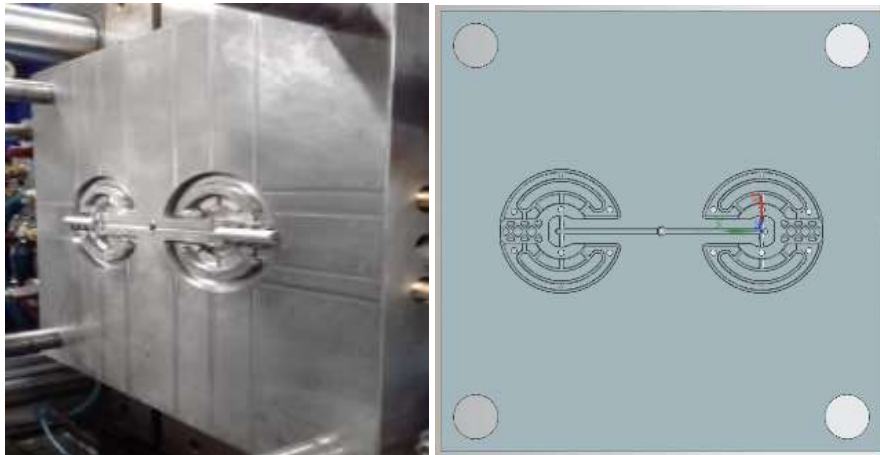


Imagen 19. Molde de colada fría 4, Nodo.

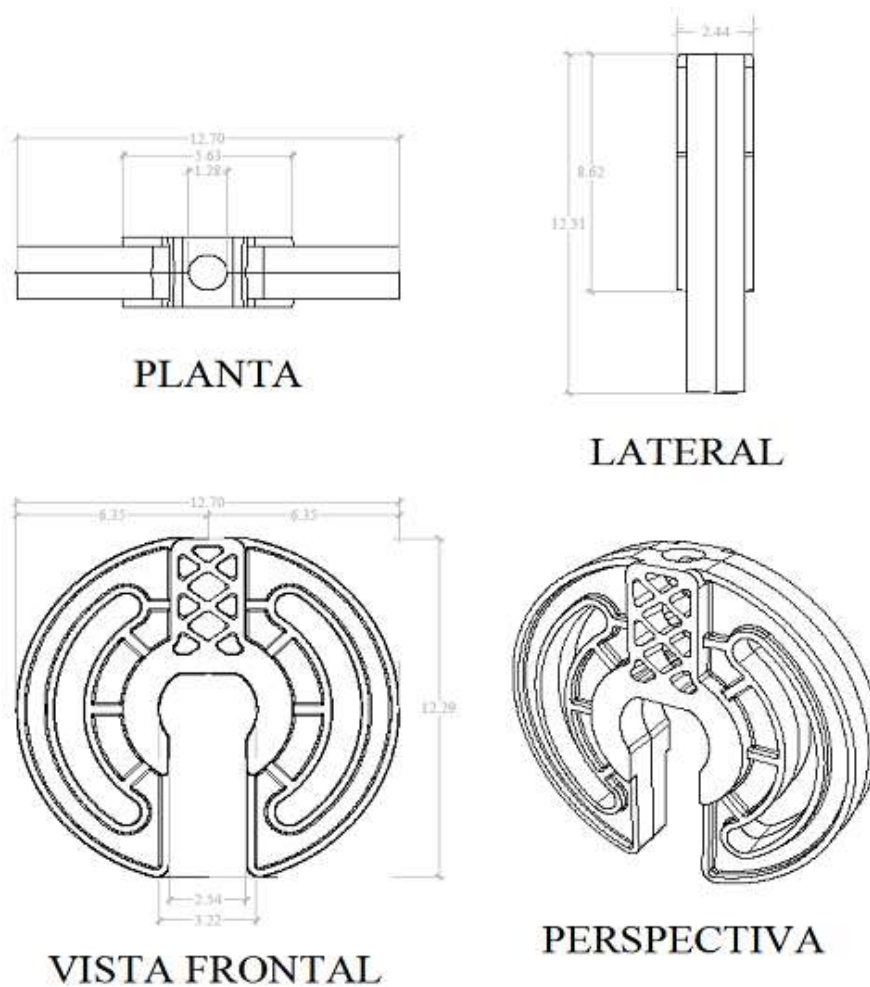


Figura 7. Dimensiones del molde de nodos²⁰ [mm].

3.2 Molde de colada fría 1

Lo primero que se hizo con este molde fue rectificarlo y pulirlo de tal manera que las piezas que se obtuvieran no se quedarán atascadas en el molde o que el bebedero se quedara en la parte fija del molde.

Se procedió con el secado del material, el cual se secó por 15 horas en la estufa de cultivo marca Riossa, a una temperatura de 100[°C], esto se determinó por experiencia y basándose en los cálculos hechos en tesis anteriores (Hernández A & Chávez A, 2013) además sabiendo que la temperatura de ebullición del agua es de 100[°C] a nivel del mar.

²⁰ Obtenido de (Flores D, 2019)

Se colocaron las temperaturas medias en el barril sugeridas por el proveedor para verificar que el material tuviera un comportamiento ideal para su inyección *Tabla 6*, sin embargo, el material no tenía la consistencia deseada y modificando el perfil se tuvo el siguiente.

Sección	Temperatura [°C]
Tolva	46
MH1	150
MH2	165
MH3	175
Boquilla	185

Tabla 6. Perfil de temperaturas



Imagen 20. Temperatura de masa fundida

La máquina que se utilizó con este molde es, la DEMAG Ergotech 50/270. El volumen que se inyectará será de 44 [cm³], el tiempo de enfriamiento y las velocidades de avance y retiro de los botadores, así como del molde, se determinó de tal forma que se tuviera una mejor expulsión de la pieza.

Curva de viscosidad

Para comenzar con este paso del moldeo científico, se inició obteniendo piezas a una velocidad media de 60 [mm/s] para verificar que la pieza saliera sin ningún problema con el molde, así fue y se comenzó con esa misma velocidad a hacer la curva de viscosidad.

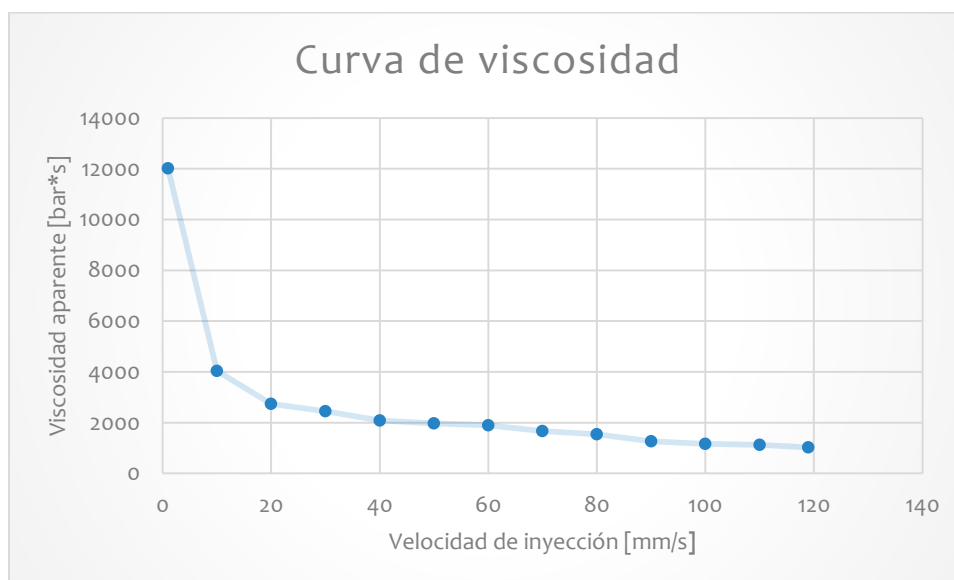
La temperatura del molde se trató de mantener lo más constante posible, sin superar los 25[°C], dejando enfriar el molde, ya que después de esta temperatura la pieza comenzaba a atorarse y a fragilizarse.

El experimento se realizó con una velocidad máxima de inyección de 119 [mm/s] hasta 1 [mm/s] y todos los datos de este y de los demás pasos del molde científico estarán en los *Anexos* de esta tesis, los datos relevantes se encuentran en la *Tabla 7*, y la curva de viscosidad se muestra en la *Gráfica 1*.

Tabla 7. Datos relevantes de curva de viscosidad molde 1

VI [mm/s]	P1	P2	P3	PP [bar]	TI1	TI2	TI3	TIP [bar]	VA [bar*s]	Diferencia %
119	416	417	425	419.33	0.31	0.31	0.31	0.31	1024.35	
50	349	364	364	359.00	0.69	0.7	0.7	0.70	1970.81	4.18
40	330	309	304	314.33	0.85	0.84	0.84	0.84	2088.89	5.99
1	174	202	205	193.66	7.93	7.85	7.84	7.87	12015.44	197.34

*VI: velocidad de inyección, P: presión de inyección, PP: presión de inyección promedio, TI: tiempo de inyección, TIP: tiempo de inyección promedio, VA: viscosidad aparente.²¹



Gráfica 1. Curva de viscosidad molde de colada fría 1

Con la curva de viscosidad y con los datos obtenidos en la *Tabla 7*, se aprecia que los puntos donde la viscosidad permanece constante están en el rango de 100 a 110 [mm/s] sin embargo la calidad de las piezas (había ráfagas en las piezas de éste rango) indica que las velocidades más convenientes son las que están en el rango de 40 a 60 [mm/s], por ende, se eligió la velocidad de 50 [mm/s]. Se muestran las piezas obtenidas durante este estudio en la *Imagen 21*.



Imagen 21. Piezas obtenidas durante el estudio de curva de viscosidad

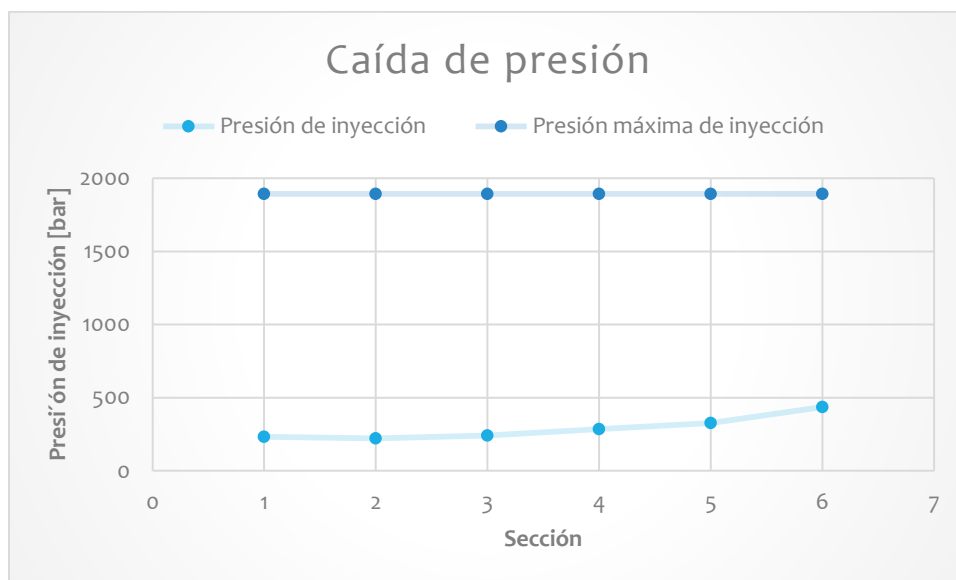
²¹ Todas las tablas de curva de viscosidad tienen las mismas acotaciones.

Balanceo de cavidades

En el caso de este molde, no se realizó el balanceo de cavidades, debido principalmente a que no es simétrico y que obviamente está desbalanceado, ya que el flujo entra primero a las cavidades más cercanas al bebedero y por último en las más lejanas.

Caída de presión

En este paso del moldeo científico se tomó como referencia la cantidad de volumen que se inyecta siendo $44 [cm^3]$ el 100% en volumen. Se muestran los datos en la *Gráfica 2* y las piezas obtenidas en la *Imagen 22*.



Gráfica 2. Caída de presión molde 1

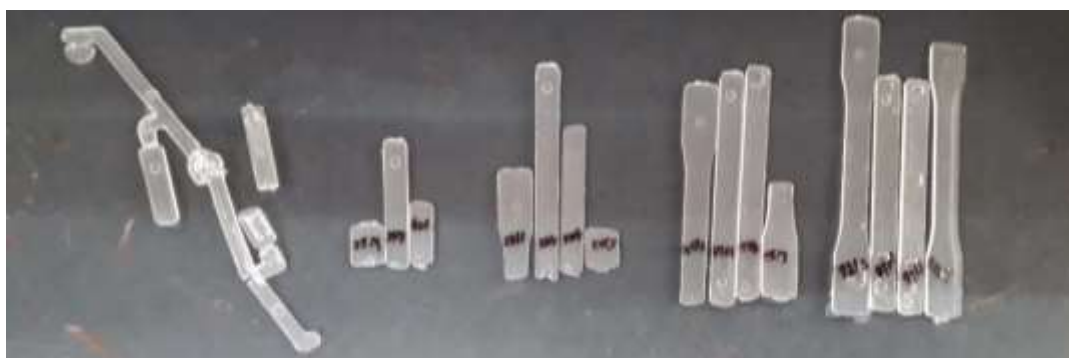


Imagen 22. Piezas obtenidas en caída de presión molde 1

Con los datos obtenidos se aprecia que, para este molde, la máxima presión de inyección que se requiere es de $436.3 [bar]$ siendo un 23.6 % de la capacidad de la máquina *Tabla 8*, por ende, adecuada para este molde y este material.

Tabla 8. Dato relevante de la caída de presión en el molde 2.

Sección	PIP [bar]	PIM [bar]
98%	436.33	1892

*PI: presión de inyección, PIP: presión de inyección promedio, PIM: presión de inyección máxima. ²²

Ventana cosmética de proceso

Cabe destacar que para el paso de ventana cosmética de proceso, al ser semicristalino el material (Nature Works, 2016), se tendría que tomar como temperatura de proceso la temperatura del molde, sin embargo, este molde no tiene control de temperatura, por ello y suponiendo que el material después de su procesamiento y de que la temperatura del molde se mantendrá por debajo de los 25[°C] será muy poco semicristalino, se tomará como temperatura de proceso a la de masa fundida.

Se comenzó con el perfil de baja temperatura, teniendo una temperatura de masa fundida de 169[°C], posteriormente se ajustó para el perfil de alta temperatura obteniendo una temperatura de masa fundida de 178[°C] con los perfiles de temperatura mostrados en la *Tabla 9*.

Tabla 9 Perfiles de temperatura de la ventana cosmética de proceso

Sección	PBT [°C]	PAT [°C]
MH1	150	160
MH2	160	170
MH3	170	180
Boquilla	180	190

En este rango de temperaturas, se encontraron los siguientes puntos y la ventana cosmética de proceso mostrados en la *Tabla 10* y *Gráfica 3* respectivamente.

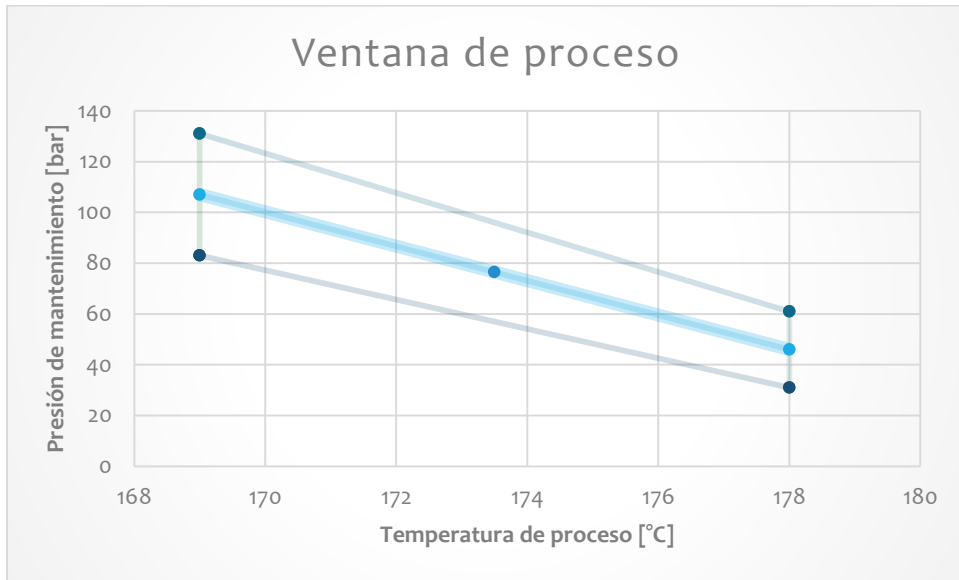
Tabla 10. Datos ventana cosmética de proceso molde 1

[TB [°C], PB[bar]]	[TB [°C], PA[bar]]	[TA [°C], PB[bar]]	[TA [°C], PA[bar]]
[169, 83]	[169, 131]	[178, 31]	[178, 61]

*TB: temperatura baja, PB: presión baja, TA: temperatura alta, PA: presión alta. ²³

²² Acotaciones para todas las tablas de caída de presión.

²³ Acotaciones para todas las tablas de ventana cosmética de proceso.



Gráfica 3. Ventana cosmética de proceso molde 1

Las piezas obtenidas se muestran en la *Imagen 23*.



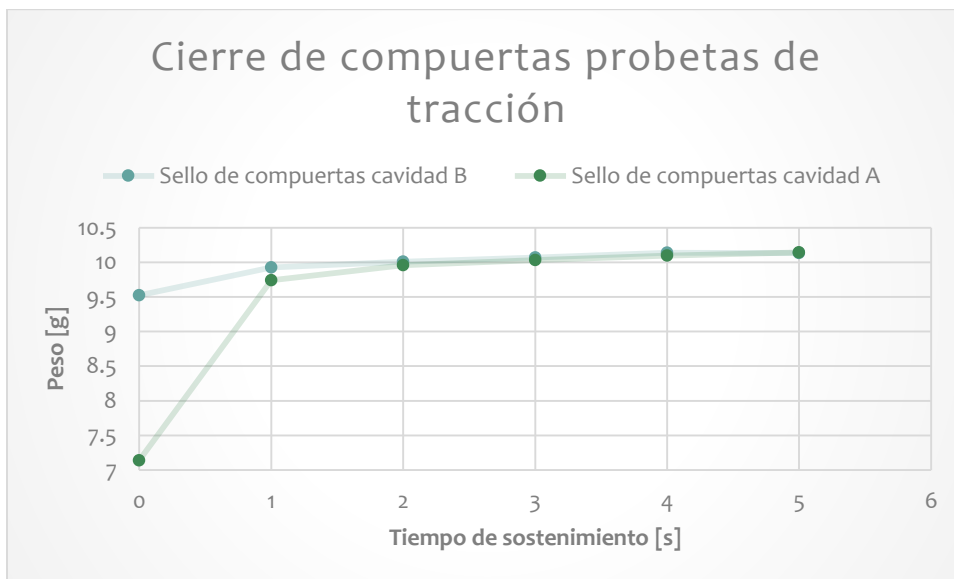
Imagen 23. Piezas obtenidas en ventana cosmética de proceso

Cabe destacar que en ningún momento de la ventana cosmética de proceso dejo de haber rechupes, esto aun modificando el volumen inyectado, la presión de sostenimiento y la temperatura de masa fundida. Sin embargo, estos se redujeron en lo más posible y se llegó al siguiente punto

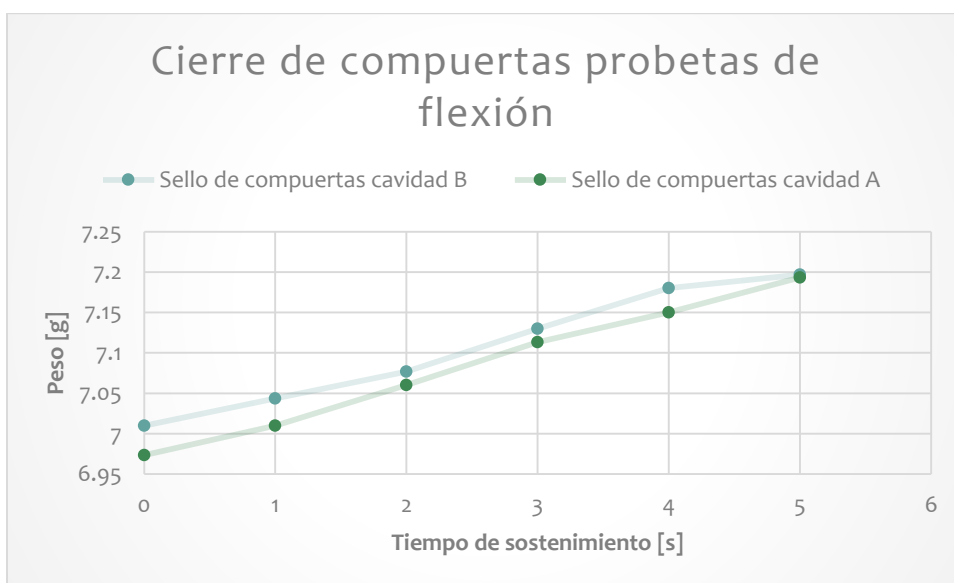
[173.5 [°C], 76.45 [bar]]

Sello de compuertas

En el caso de sello de compuertas, se clasificaron las cavidades como A y B tanto de las probetas de tracción, como de las probetas de flexión. Se hicieron incrementos de 1 [s] de tiempo de mantenimiento y se midió la masa de las cavidades, encontrando los datos mostrados en las Gráficas 4 y 5. Las piezas obtenidas se muestran en la *Imagen 24*.



Gráfica 4 .Sello de compuertas molde 1. Probetas de tracción.



Gráfica 5 .Sello de compuertas molde 1. Probetas de flexión



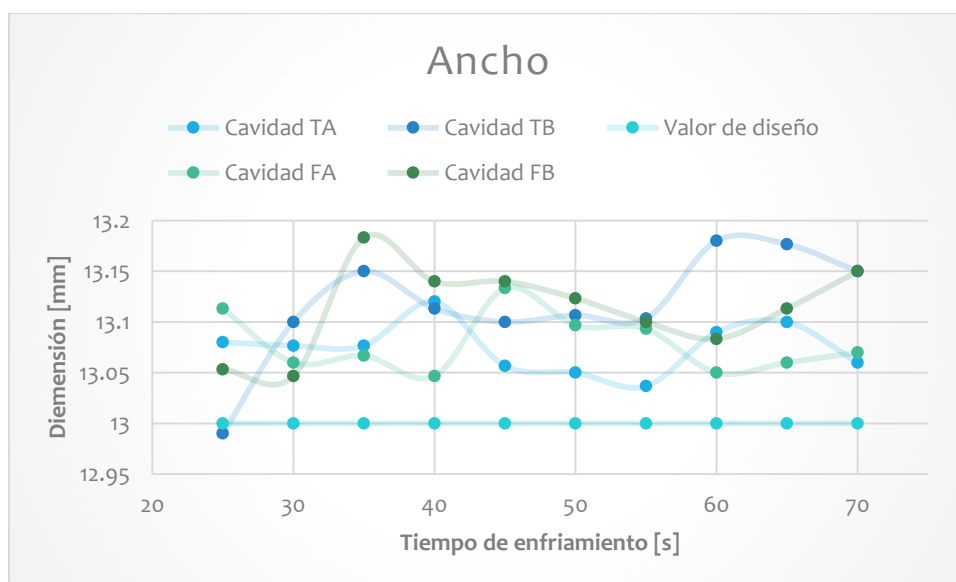
Imagen 24. Piezas obtenidas en sello de compuertas molde 1

Con estos datos se observa que el tiempo de sostenimiento de las probetas de tracción es de 2 [s] y que para las probetas de flexión el peso sigue aumentando, lo que podría provocar sobre empaquetamiento en esas piezas, sin embargo, el aumento está alrededor del 0.5%, por lo que se puede despreciar.

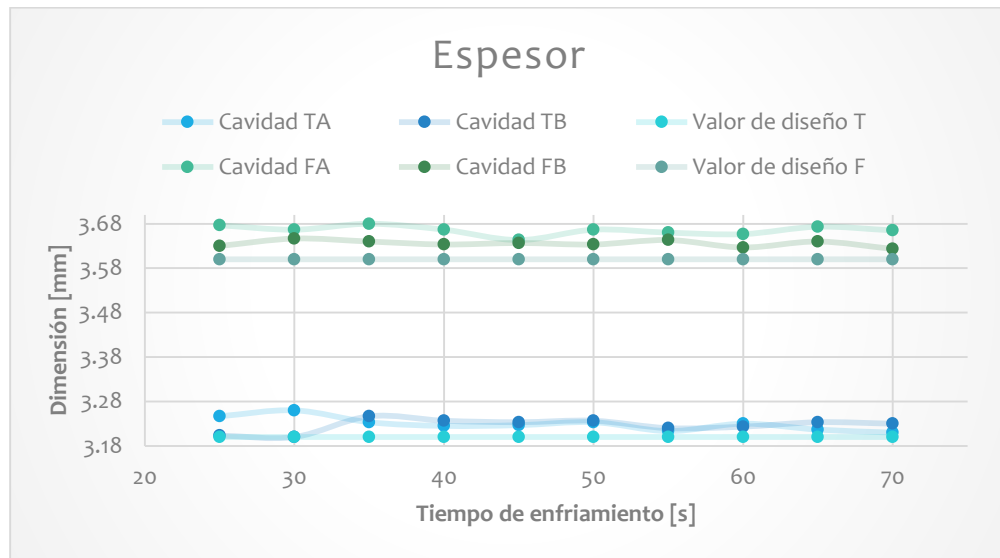
Por lo tanto, el tiempo de sostenimiento es **3 [s]**.

Tiempo de enfriamiento.

En el último paso, se midieron las áreas transversales de cada una de las probetas, ya que estas piezas fueron diseñadas bajo la norma ASTM D638 para las probetas de tracción y para las probetas de flexión ASTM D790, los datos se muestran en las *Gráficas 6 y 7*.



Gráfica 6. Tiempo de enfriamiento probetas de tracción



Gráfica 7. Tiempo de enfriamiento probetas de tracción

Las variaciones que se tuvieron durante el proceso fueron del 0.73% en promedio para el ancho de las probetas y del 1.21% promedio para el espesor. Cabe destacar que la norma bajo la que están diseñadas estas piezas, tiene tolerancias de $\pm 0.5[mm]$ para los cuales, todas las piezas cumplen, por ello y por hacer un promedio, el tiempo de enfriamiento es de 50 [s]. Se muestran las piezas obtenidas en la *Imagen 25*.



Imagen 25. Piezas obtenidas tiempo de enfriamiento molde 1

3.3 Molde de colada fría 2

El proceso comenzó con el secado del material, al igual que en el molde anterior, se determinó el tiempo y temperatura de secado con base en la tesis citada.(Hernández A & Chávez A, 2013).

Se encontró el perfil de temperaturas para comenzar el moldeo basándose en el perfil sugerido por el proveedor, como se muestra en la *Tabla 11*.

Tabla 11. Temperaturas a las cuales se tuvo una purga ideal

Sección	Temperatura [°C]
Tolva	45
MH1	150
MH2	160
MH3	175
Boquilla	185

Con este molde se ocupó la máquina DEMAG Ergotech 50/270 configurando los parámetros del molde para que la pieza se obtuviera de la mejor forma.

Una vez realizadas las configuraciones se continuó con la inyección de una primera pieza con los parámetros de proceso de la *Tabla 12* y con una velocidad de inyección de 70 [mm/s] obteniendo una pieza *Imagen 26*, la cual se mostraba completa y con algunos defectos como ráfagas en la región del punto de inyección de la cavidad B.

Tabla 12. Parámetros de proceso.

Parámetro		Parámetro	
Presión de inyección [bar]	1892	Tiempo de enfriamiento [s]	40
Velocidad de inyección [mm/s]	119	Velocidad del husillo [U/min]	100
Tiempo de sostenimiento [s]	1	Parada de dosificación [cm ³]	75
Presión de sostenimiento [bar]	0	Punto de conmutación [cm ³]	25

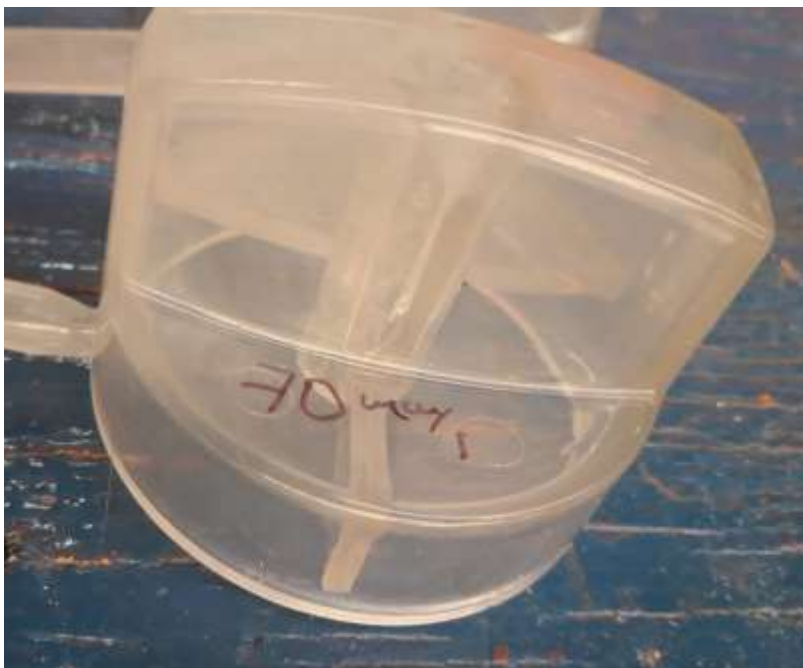


Imagen 26 .Defectos en piezas obtenidas.

Curva de viscosidad

Para la curva de viscosidad se comenzó colocando los parámetros de sostenimiento en cero y eligiendo un tiempo de enfriamiento de 55 [s] junto con los parámetros de proceso de la *Tabla 13*. Con una temperatura del molde de 25[°C] y una temperatura de masa fundida de 181[°C] *Imagen 27*. Se obtuvieron los datos vertidos en la *Tabla 15*.

Tabla 13. Parámetros de proceso

Parámetro		Parámetro	
Presión de inyección [bar]	1892	Tiempo de enfriamiento [s]	55
Velocidad de inyección [mm/s]	119	Velocidad del husillo [U/min]	100
Tiempo de sostenimiento [s]	1	Parada de dosificación [cm ³]	90
Presión de sostenimiento [bar]	0	Punto de conmutación [cm ³]	34



Imagen 27. Temperatura de masa fundida.

Sección	Temperatura [°C]
Tolva	45
MH1	150
MH2	160
MH3	175
Boquilla	185

Tabla 14. Perfil de temperaturas molde 2.

En este paso del moldeo científico se encontró con distintos problemas con las piezas obtenidas, la mayoría de ellas con ráfagas cerca del punto de inyección tanto de la cavidad A como la B, e incluso hubo ocasiones en que el punto de inyección de la cavidad B se solidificaba y no permitía que el material fluyera y se fuera todo a la otra cavidad *Imagen 29*.



Imagen 28. Defecto de ráfagas en velocidad de inyección 40 [mm/s]

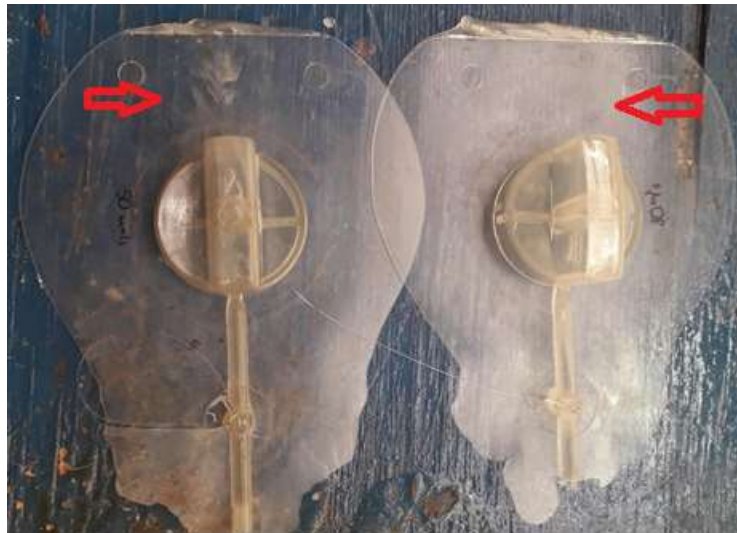


Imagen 29. Defectos debidos a la solidificación del punto de inyección.

Tabla 15. Datos de curva de viscosidad molde 2

VI [mm/s]	PP [bar]	TIP [bar]	VA [bar *s]	Diferencia %
119	726.33	0.47	2709.13	
50	408.33	0.99	3174.76	8.55
1	194.33	11.29	17288.90	130.47

Con los datos obtenidos, se muestra que la menor diferencia de viscosidades se encuentra entre los rangos de 110 y 100 [mm/s], sin embargo, la calidad de la pieza físicamente no era la idónea. Lo mismo ocurría con las velocidades de 90, 80 y 70 [mm/s], en el caso del rango entre 50 y 60 [mm/s], la calidad de la pieza visualmente era mejor (con menos vacuolas que se aprecian en la *Imagen 30*, por ello se decidió que la velocidad de inyección en este caso fuera de 55 [mm/s].

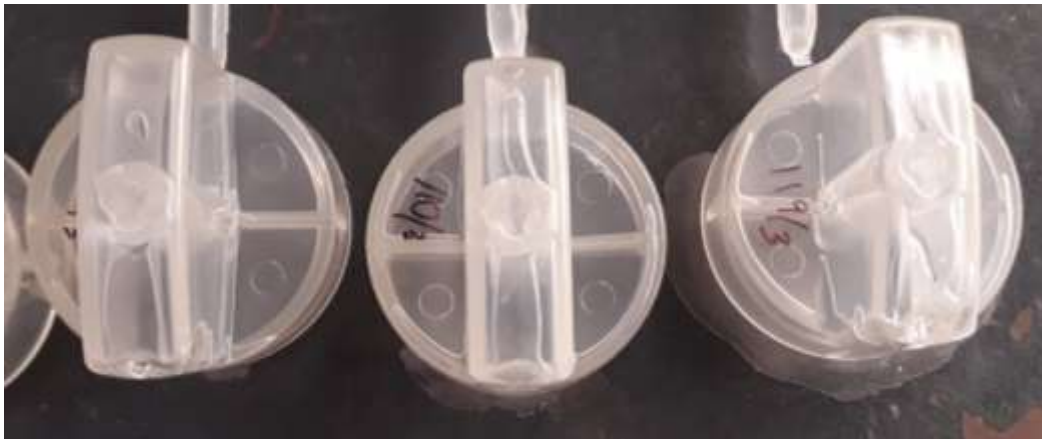
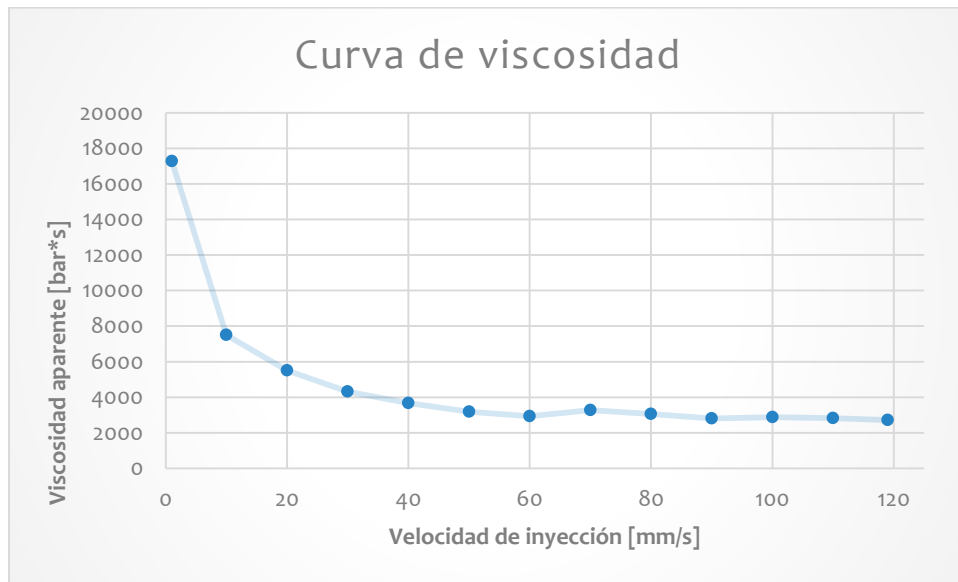


Imagen 30. Calidad de las piezas a velocidades altas

Se presenta la curva de viscosidad y las piezas obtenidas en la *Gráfica 8* y la *Imagen 31*.



Gráfica 8. Curva de viscosidad molde 2

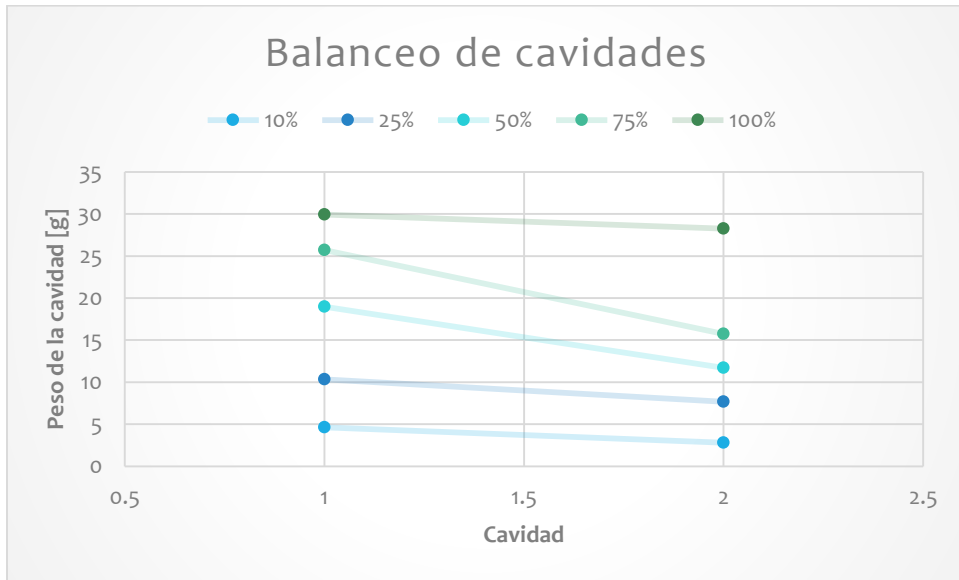


Imagen 31. Piezas obtenidas para la curva de viscosidad del molde 2

Balanceo de cavidades

Se procedió a realizar una inspección del molde, encontrando en primera instancia que las dimensiones de ambas cavidades son iguales, el sistema de refrigeración y los venteos son los mismos para ambas, sin embargo, el punto de inyección de la cavidad A es más grande que el de la cavidad B. Esto se debe a que el molde fue manufacturado de esta forma para verificar el paso de balanceo de cavidades del moldeo científico en prácticas que se llevan a cabo en el laboratorio.

Con la información recabada, se procedió a realizar el experimento de balanceo de cavidades, sabiendo de ante mano que el molde está desbalanceado. El desbalanceo dicho anteriormente se refleja en la Gráfica 9 e Imagen 32 teniendo al 98% del volumen de la pieza un desbalance del 5% con respecto a la cavidad A y conforme a las normas de calidad aprobado.



Gráfica 9. Balanceo de cavidades del molde 2



Imagen 32. Piezas obtenidas en el balanceo de cavidades

Caída de presión

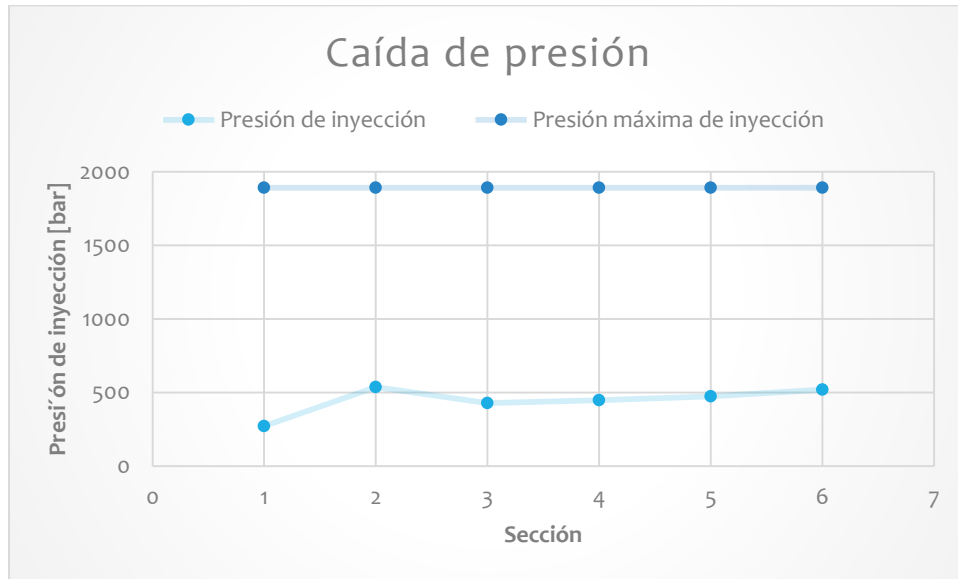
El paso de caída de presión se realizó a la par que el balanceo de cavidades, ya que ambas requieren del 25%, 50%, 75% y 98 o 100% del volumen de la pieza, solo se añadió la parte de la colada y la boquilla.

Los datos relevantes que arrojó el experimento se muestran a continuación en la *Tabla 16*.

Tabla 16. Datos obtenidos para la caída de presión

Sección	PIP [bar]	PIM [bar]
98%	520.33	1892

Se muestra en la *Gráfica 10* que, la sección donde existe una mayor presión es en la colada, por ello la máquina se ajustará a una presión máxima de 550 [bar], así la máquina solo estará ocupando un 29% de su capacidad total de presión de inyección. Las piezas obtenidas de este paso se muestran en la *Imagen 33*.



Gráfica 10. Caída de presión molde 2



Imagen 33. Piezas obtenidas en caída de presión molde 2.

Ventana cosmética de proceso

Aunque este molde cuenta con un sistema de refrigeración, no se tiene un equipo de enfriamiento y no se puede controlar la temperatura del molde, solo se mantiene constante dejando enfriar el molde. Por lo tanto, no es posible tomar como temperatura de proceso a la temperatura del molde

y se tomará la temperatura de masa fundida. La temperatura del molde se mantuvo constante en 19[°C] *Imagen 34*.



Imagen 34. Temperatura de molde

La temperatura a la que se podía inyectar era de 174[°C] sin que se mostraran infundidos en la purga. Y la temperatura mayor fue de 190[°C].

Se comenzó con la temperatura baja y se procedió a inyectar la primera pieza con una presión de mantenimiento de 60 [bar], se seleccionó el tiempo de mantenimiento de 5[s] y se inyectó una pieza *Imagen 35*.



Imagen 35. Pieza inyectada con 5[s] de tiempo de mantenimiento y 59 [cm³]

Se muestra que la pieza no se llena y que tiene vacuolas importantes al final de la cavidad. Por lo tanto, se procede tanto a cambiar el volumen que se está inyectando y a aumentar el tiempo de mantenimiento *Imagen 36*.

Se inyectó ahora con 6 [s] y con 58 [cm³] mostrando una mejoría y llenando perfectamente la cavidad A, sin embargo, la cavidad B aún no llenaba. Se decidió que la ventana cosmética de proceso solo se basara en la cavidad que llena, ya que el punto de inyección de esa cavidad es más grande y adecuado para el material en uso. Con estas adecuaciones se encontraron los puntos de temperatura baja presión-baja y temperatura baja-presión alta.



Imagen 36. Pieza obtenida con 6 [s] de tiempo de mantenimiento, 58 [cm³] de volumen y 90 [bar] de presión de mantenimiento

Para la siguiente parte de este paso, se procedió a aumentar el perfil de temperaturas del barril y de la boquilla. Se comenzó con incrementos en la presión de mantenimiento y conservando los 6[s] de tiempo de sostenimiento. Se encontró el rango de presiones en el que la cavidad A no tenía ningún defecto visual y la temperatura de masa fundida mostrada en la *Imagen 37*.

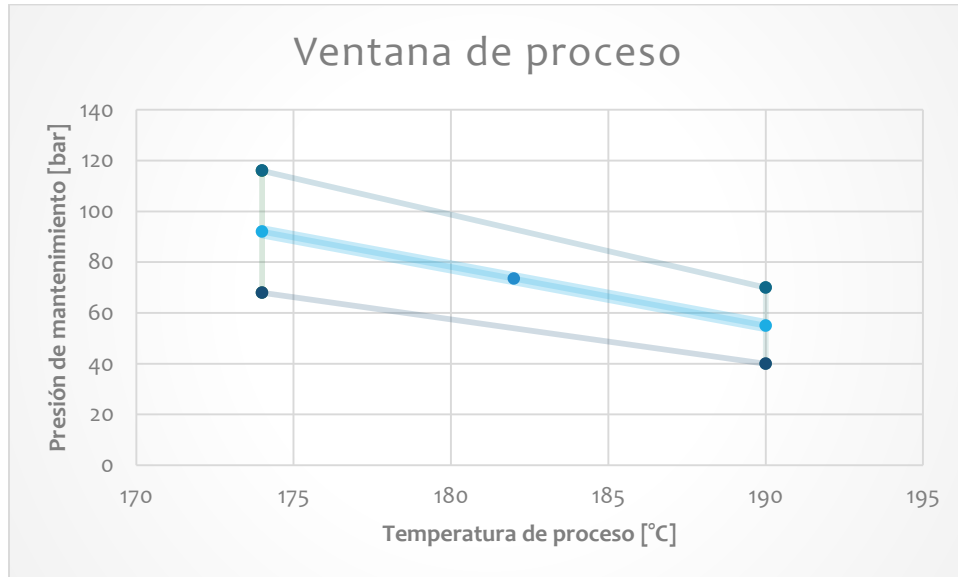


Imagen 37 Temperatura de masa fundida

Con los datos obtenidos se pudieron realizar las siguientes *Tabla 17* y *Gráfica 11*. Obteniendo las piezas mostradas en la *Imagen 38*.

Tabla 17. Datos de ventana cosmética de proceso

[TB [°C], PB [bar]]	[TB [°C], PA [bar]]	[TA [°C], PB [bar]]	[TA [°C], PA [bar]]
[174, 68]	[174, 116]	[190, 40]	[190, 70]



Gráfica 11. Ventana cosmética de proceso molde 2

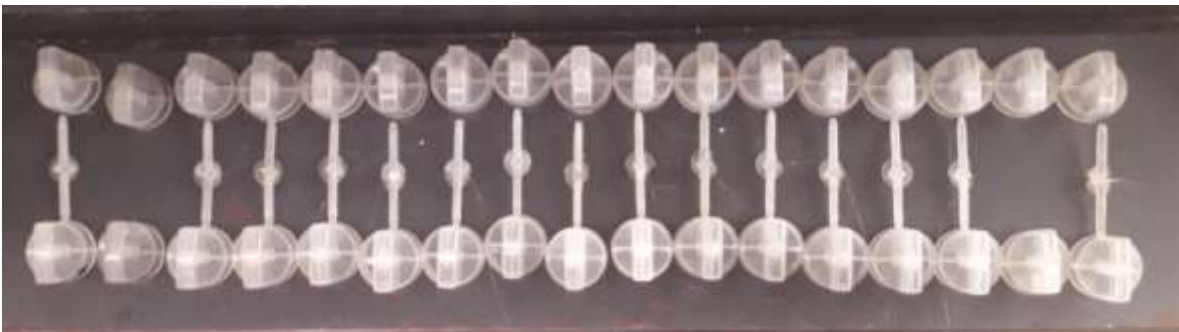


Imagen 38. Piezas obtenidas para ventana cosmética de proceso

El punto óptimo de temperatura de proceso y presión de mantenimiento fue:

[182 [°C], 74.5 [bar]]

Sello de compuertas

En el quinto paso del moldeo científico se comenzó con tiempo de mantenimiento en cero, y posteriormente se aumentó un segundo, se pesaron las piezas identificando la cavidad de la que provenían y se detectó que para la cavidad A, la masa dejó de variar a los 2 [s], mientras que para la cavidad B, en ningún momento hasta llegados los 5 [s] de tiempo de sostenimiento, la masa se estabilizó, al contrario esta iba en aumento, como se muestra en la *Gráfica 12*. Las piezas obtenidas se muestran en las *Imágenes 39 y 40*.

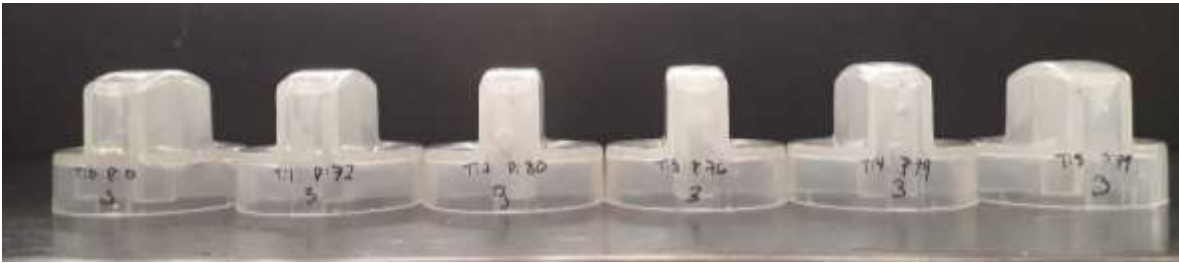
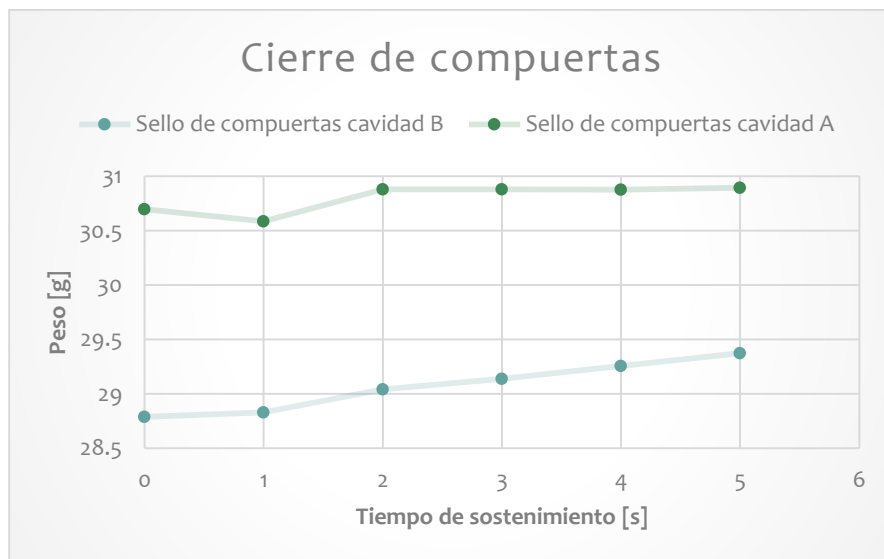


Imagen 39. Piezas obtenidas del cierre de compuertas cavidad A



Imagen 40. Piezas obtenidas del cierre de compuertas cavidad B

Se decidió igual que en el paso anterior, que el moldeo científico solo se haría con base en la cavidad A, que mostraba un mejor comportamiento con este material. Por ello, se detuvo el experimento a los 5[s] ya que la cavidad A, ya había llegado a la estabilidad.



Gráfica 12. Cierre de compuertas molde 2

Obteniendo el tiempo de sostenimiento = 3 [s]

Tiempo de enfriamiento

Para el último paso del moldeo científico, ya con todos los parámetros anteriores, se procedió a colocar el tiempo de enfriamiento en 25 [s] ya que era el valor más pequeño que el tiempo de dosificación permitía. Se hicieron aumentos de 5 [s] hasta llegar a 70 [s]. Se hicieron 4 inyecciones por cada tiempo y se tomaron las últimas tres para valorar las dimensiones críticas.

Para elegir las dimensiones críticas se decidió, que serían aquellas que hicieran el acoplamiento con las estufas, entonces se tomó la profundidad, el diámetro interior y el diámetro exterior de las perillas en la zona en que ensamblan y que se muestran en la *Figura 10*, *Figura 11* y *Figura 12*.

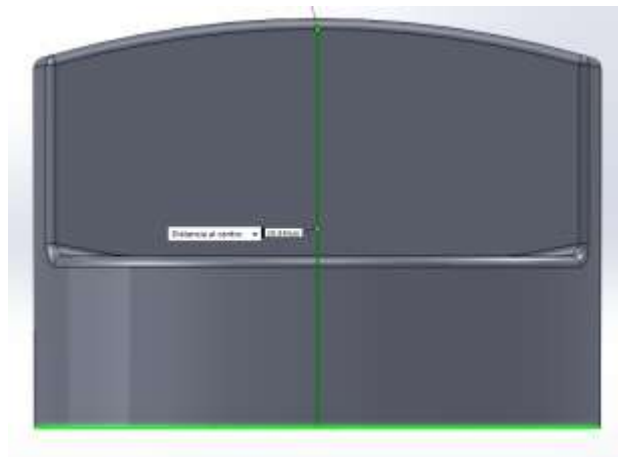


Figura 8. Profundidad.

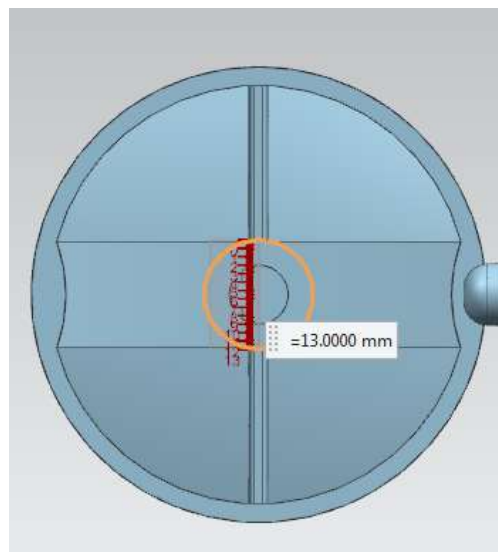


Figura 9. Diámetro exterior

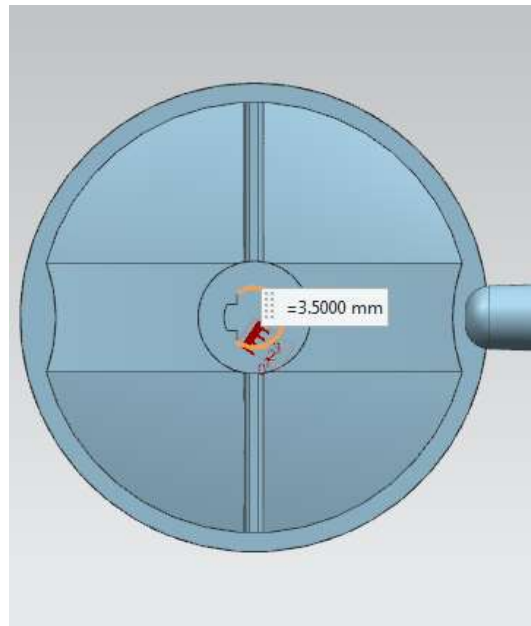
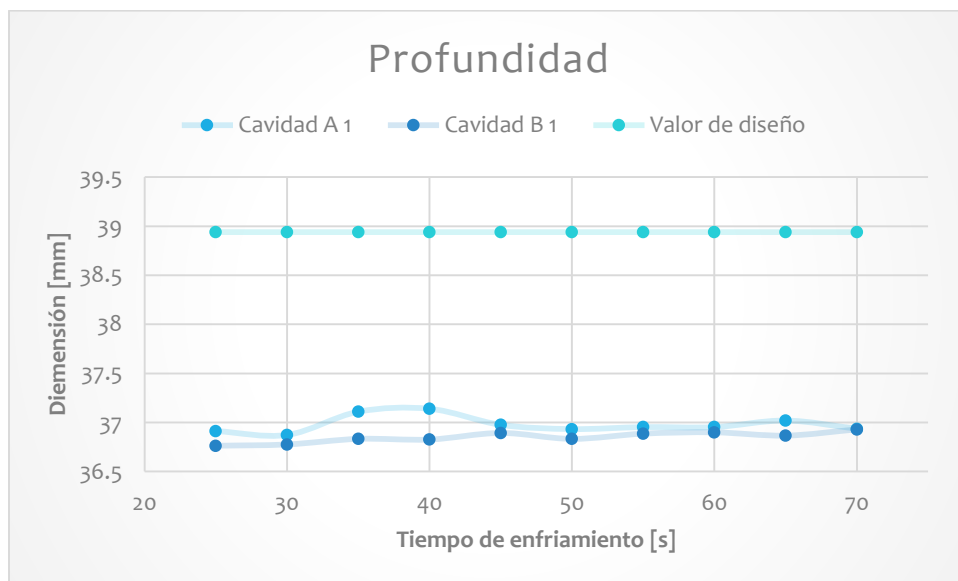
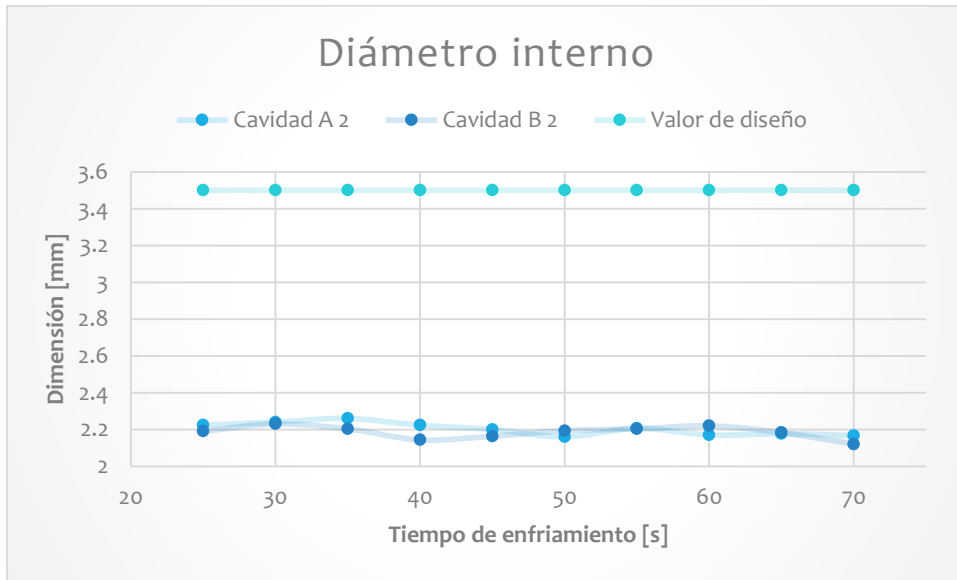


Figura 10. Diámetro interior

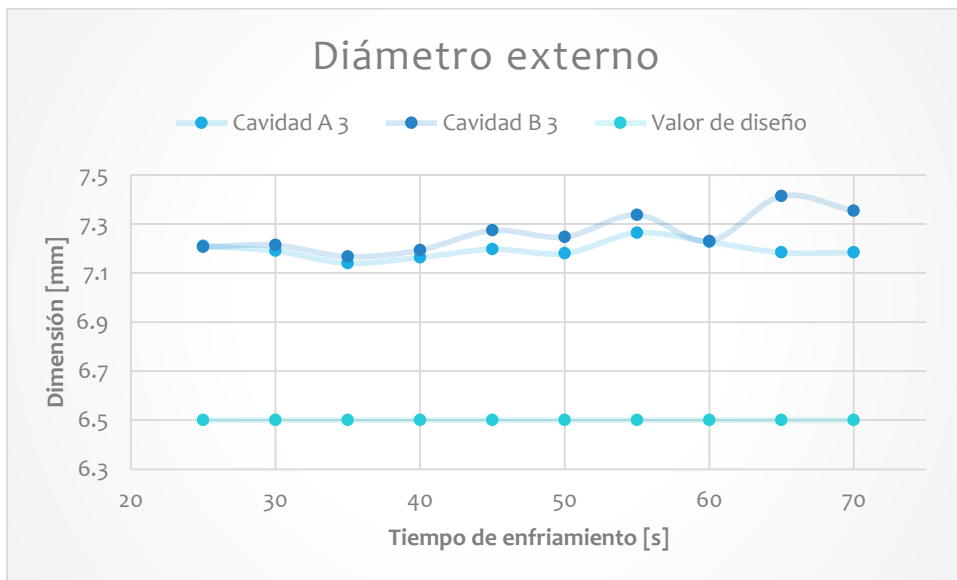
Para la profundidad de la pieza *Gráfica 13*, se encontró que los valores tanto de la cavidad A como de la cavidad B son inferiores al valor de diseño aligerándose para la cavidad A, en el valor de 40 [s] y para la cavidad B hasta los 70 [s]. Teniendo variaciones de hasta 6%. Las variaciones en los diámetros externo e interno se muestran en las *Gráficas 14 y 15*.



Gráfica 13. Tiempo de enfriamiento 1 molde 2



Gráfica 14. Tiempo de enfriamiento 2 molde 2



Gráfica 15. Tiempo de enfriamiento 3 molde 2

En el caso del diámetro interno y externo, tampoco las mediciones llegaron a estar cercanas a los valores de diseño, llegando a tener para el caso del diámetro interno, variaciones incluso de 40% y para el diámetro externo de 15%. Se verificó que el valor de tiempo de enfriamiento en el que menos variación existió fue de 35 [s], tomándose este como el tiempo de enfriamiento de este molde.

3.4 Molde de colada fría 3

En el molde de colada fría 3, se realizó el mismo procedimiento de secado que en los dos moldes anteriores. Para este molde se ocupó la máquina DEMAG Ergotech pro 50-270.

Se montó el molde y se ajustaron los parámetros de los expulsores y de la carrera del molde. El tamaño de tiro de esta pieza fue de 3.5 [cm³], el molde cuenta con 4 cavidades.

Se procedió a inyectar una pieza para verificar el funcionamiento del molde y de la máquina utilizando el perfil de temperatura en el barril mostrado en la *Tabla 18*.

Tabla 18. Perfil de temperaturas en el barril molde 3

Sección	Temperatura [°C]
To1va	46
MH1	150
MH2	165
MH3	175
Boqui11a	185

Se tomó el perfil anterior debido a la experiencia obtenida con los moldes anteriores a éste. Cabe destacar que, en el año 2015, se realizó el moldeo científico para este mismo molde para determinar los parámetros del proceso de inyección y que ahora se hace con el fin de verificar si después de 4 años de estar almacenado el material cambia sus propiedades de procesamiento.

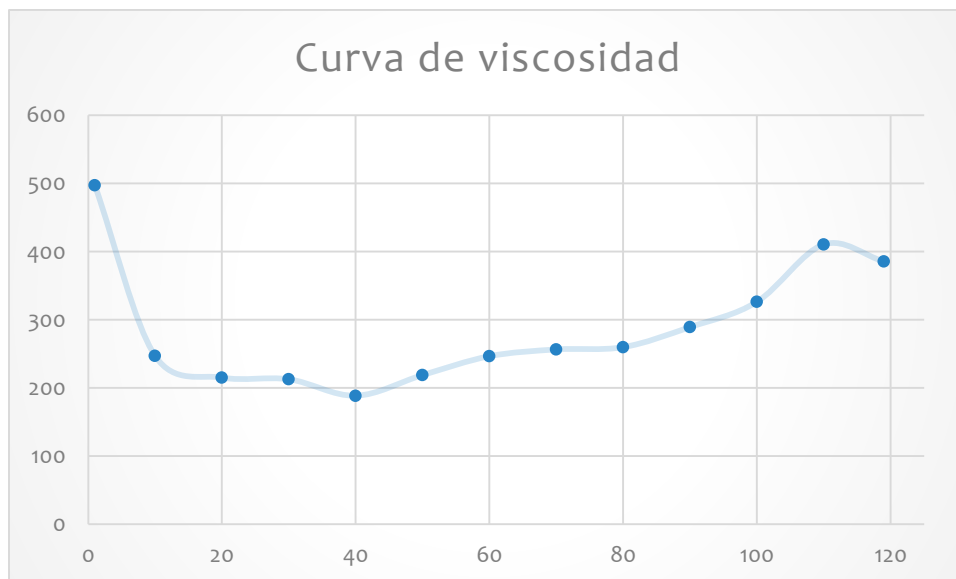
Una vez obtenidas piezas con el molde, se comenzó con el moldeo científico.

Curva de viscosidad

Para comenzar con este estudio se realizaron inyecciones para determinar el punto de conmutación en el cual se tendría el 95% del volumen de la pieza. Una vez obtenido se comenzó con una velocidad media de 60 [mm/s] y se descendió hasta llegar a 1 [mm/s] tomando los datos de tiempo de inyección y de presión de inyección de 3 inyecciones. Posteriormente se realizó del rango de 119[mm/s] hasta 70[mm/s]. Los datos relevantes se muestran en la *Tabla 19* y la curva de viscosidad en la *Gráfica 16*.

Tabla 19 Datos relevantes de la curva de viscosidad del molde 3

VI [mm/s]	PP [bar]	TIP [bar]	VA [bar*s]	Diferencia %
119	543.66666 7	0.09	385.5684	
70	336.66666 7	0.09666667	256.450222	-1.28075497
20	143.66666 7	0.19	215.097733	1.14871542
1	82.666666 7	0.76333333	497.245511	101.283005



Gráfica 16. Curva de viscosidad molde 3.

La curva de viscosidad tiene un comportamiento distinto al de los moldes anteriores ya que a excepción del primer punto en la velocidad 1 [mm/s] conforme la velocidad aumenta la viscosidad aparente también. Esto al igual que en el trabajo de tesis (Hernández A, 2015), se debe a la geometría de la pieza y al pequeño volumen que se inyecta, además de que (Kulkarni, 2016) indica que para piezas muy pequeñas se sugiere no hacer la curva de viscosidad ya que al no utilizar un tamaño de disparo suficiente, las variaciones entre inyección e inyección pueden ser grandes.

Con la gráfica y los datos recabados se seleccionó la velocidad de 75 [mm/s]. Aunque el rango de velocidades en la que la diferencia fue menor fue en el de 20 a 30 [mm/s], la calidad de la pieza fue mejor en el rango de 70 a 80 [mm/s]. Se muestran las piezas obtenidas en la *Imagen 41*.

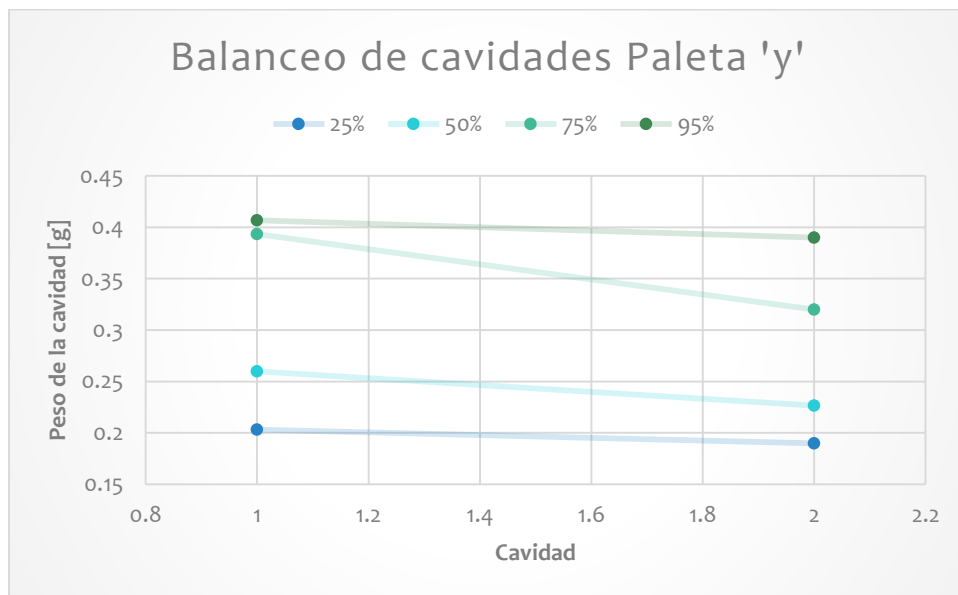


Imagen 41. Piezas obtenidas curva de viscosidad molde 3

Balanceo de cavidades.

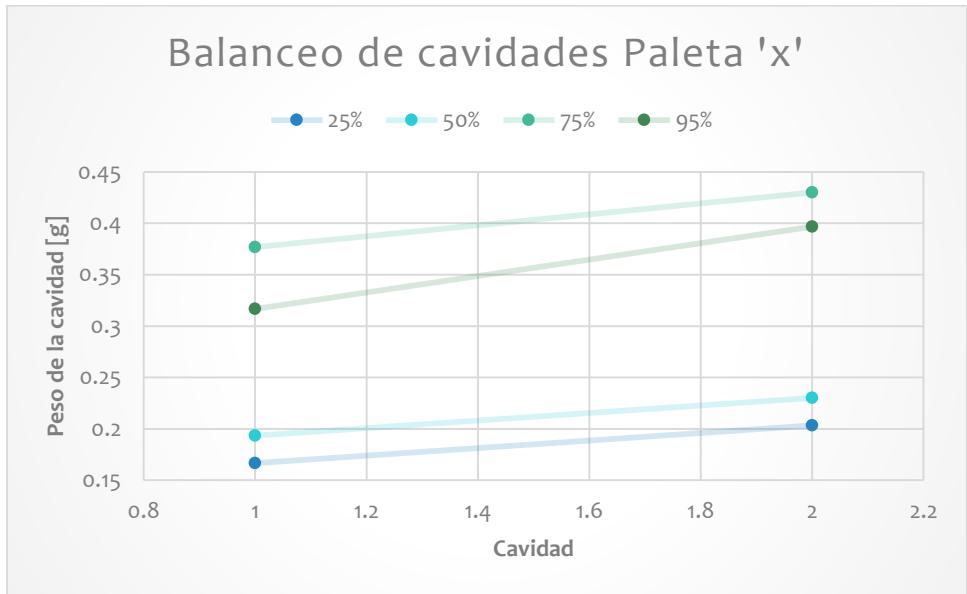
Para el balanceo de cavidades se comenzó con el análisis físico del molde, sabiendo además que, de las cuatro cavidades, dos son de la paleta x y dos de la paleta y. El molde no presentó diferencias en el sistema de refrigeración, en los canales ni en los puntos de inyección.

Ajustando el punto de conmutación, se obtuvieron distintos porcentajes de masa de la pieza. Debido al tamaño de tiro tan corto, solo se pudo llegar al 40% de la masa total. Se aclara que el balanceo se aplicará a los pares de paletas que se muestran en Gráficas 17 y 18.



Gráfica 17. Balanceo de cavidades paletas 'y'.

Con los datos anteriores se observa que las cavidades de las paletas 'Y' tienen un ligero desbalanceo del 4%, según (Kulkarni, 2016) se tiene permitido solamente 5%, por ende estas cavidades están balanceadas.



Gráfica 18. Balanceo de cavidades paletas 'x'

Con los datos anteriores se percibe un desbalanceo aún mayor que en las paletas 'Y', en este caso es del 21%, esto analizando el 90% del volumen de la pieza. Las piezas obtenidas se muestran en la *Imagen 42*.



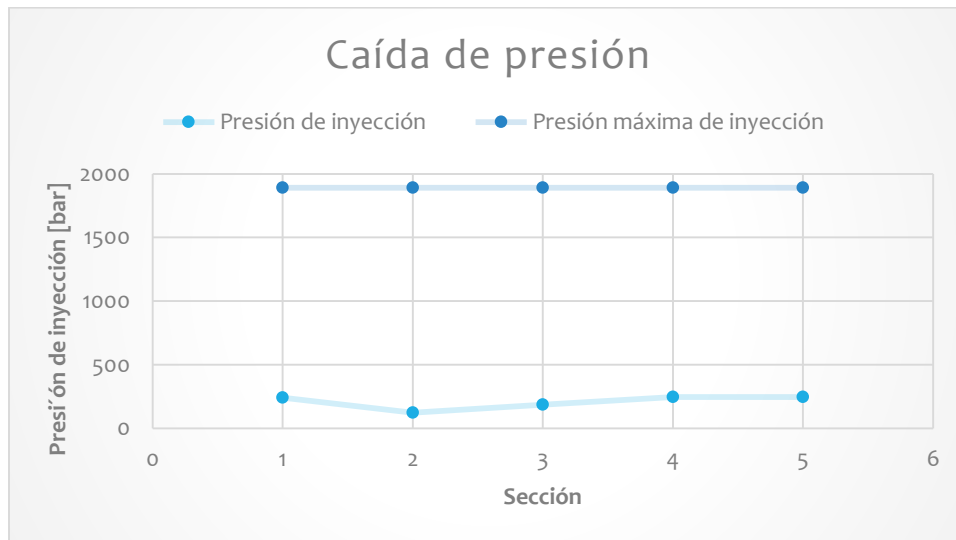
Imagen 42. Piezas obtenidas en balanceo de cavidades molde 3

Caída de presión

Para este estudio se tomaron los valores de presión del estudio anterior, añadiendo el valor de presión de la boquilla. Se obtuvieron los datos relevantes mostrados en la *Tabla 20* y la *Gráfica 19*.

Tabla 20. Dato relevante caída de presión molde 3.

Sección	PIP [bar]	PIM [bar]
90%	246.33	1892



Gráfica 19. Caída de presión molde 3

Se aprecia en los datos obtenidos que la presión máxima es de **246.33 [bar]** en el 90% de llenado de la pieza, ocupando el 13% de la capacidad de la máquina.

Ventana cosmética de proceso

Al igual que en los moldes anteriores la temperatura de proceso será la de masa fundida ya que no se cuenta con controladores de la temperatura del molde y se considera que el material una vez procesado es muy poco semicristalino (Auras, R; Lim, L.-T.; Selke, S.E.M.; Tsuji, 2010).

En la ventana cosmética de proceso se ajustó el perfil de temperaturas en el más bajo posible según las sugerencias del proveedor, sin embargo, en el momento de hacer experimento, se tuvieron que usar los perfiles de temperaturas mostrados en la *Tabla 21*.

Tabla 21. Perfiles utilizados durante la ventana cosmética de proceso molde 3

Sección	Perfil de baja T [°C]	Perfil de alta T [°C]
MH1	150	160
MH2	160	170
MH3	180	190
Boquilla	185	195

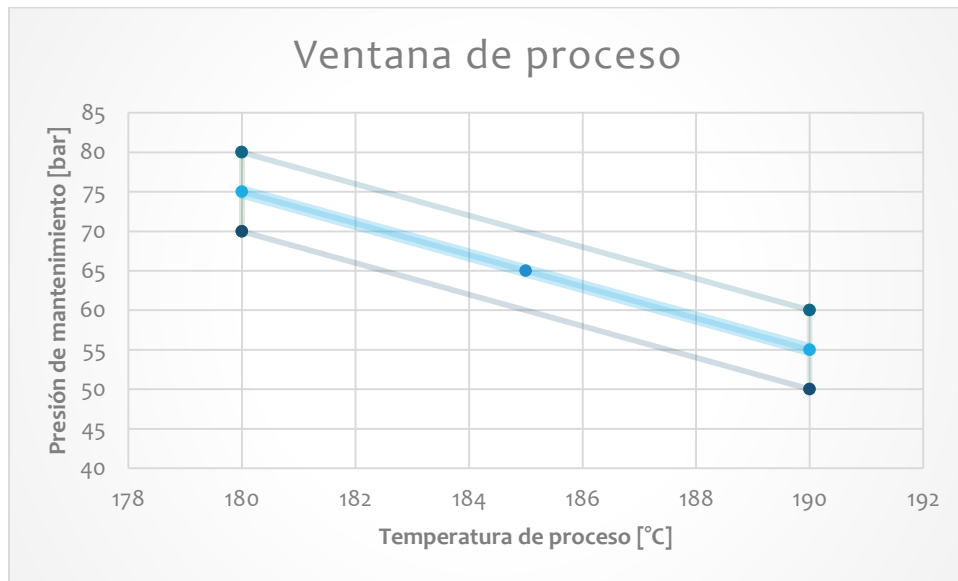
Se comenzó el estudio con una temperatura de masa fundida de 180 [°C] y con un tiempo de sostenimiento de 2 [s]. Se varió la presión de sostenimiento desde 10 hasta 110 [bar] y se encontró que los puntos de baja y alta presión son los siguientes 70 y 80 [bar] en esos puntos no se encontraban defectos visuales importantes.

Se realizó lo mismo para la temperatura de masa fundida de 190 [°C] y se encontraron los puntos 50 y 60 [bar] mostrados en la *Tabla 22*.

Tabla 22. Puntos de la ventana cosmética de proceso molde 3

[TB [°C], PB[bar]]	[TB [°C], PA[bar]]	[TA [°C], PB[bar]]	[TA [°C], PA[bar]]
[180, 70]	[180, 80]	[190, 50]	[190, 60]

Con los puntos anteriores se formó la ventana cosmética de proceso de la *Gráfica 20*, se obtuvieron las piezas mostradas en la *Imagen 43*.



Gráfica 20. Ventana cosmética de proceso molde 3

El punto óptimo de presión de temperatura de proceso y de presión de mantenimiento es:

[185 [°C], 65 bar]

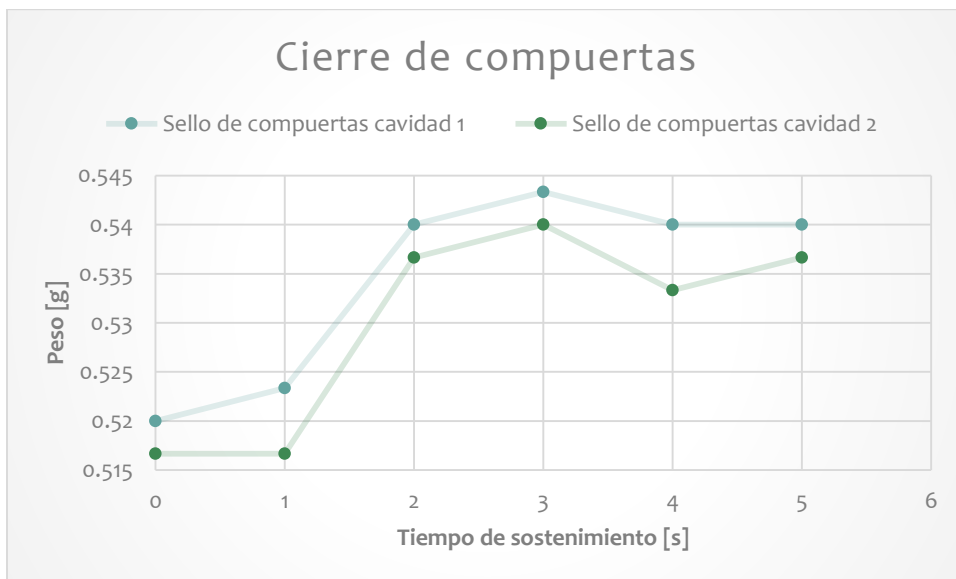


Imagen 43. Piezas obtenidas ventana cosmética de proceso molde 3

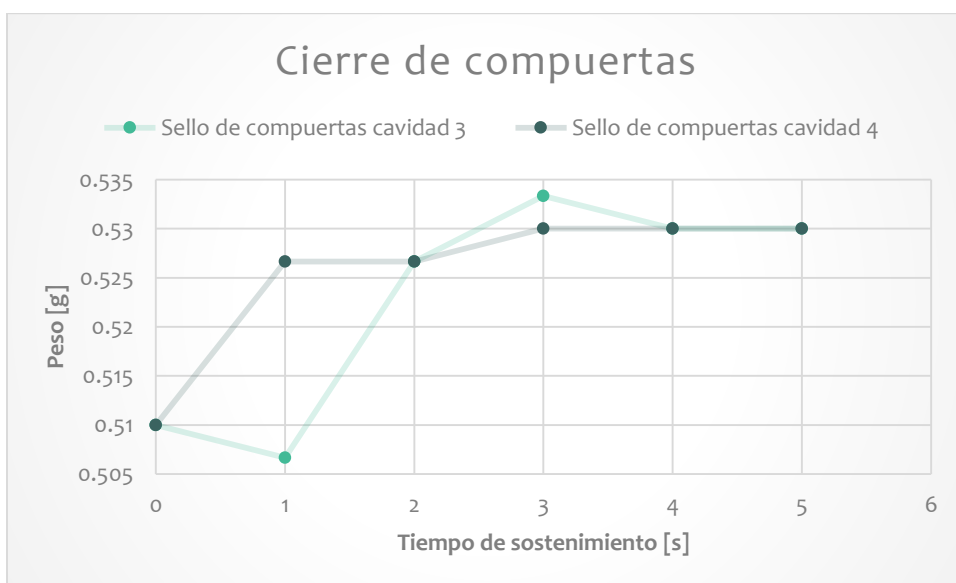
Sello de compuertas

Para comenzar este estudio, se ajustó la presión de sostenimiento y la temperatura de proceso a las encontradas en el paso anterior, así como los demás parámetros encontrados.

Se procedió a inyectar desde un tiempo de mantenimiento igual a cero, hasta que el peso de las piezas no variara. Se hizo el análisis para cada par de paletas y arrojó los datos mostrados en las Gráficas 21 y 22.



Gráfica 21. Sello de compuertas paletas 'y'



Gráfica 22. Sello de compuertas paletas 'x'

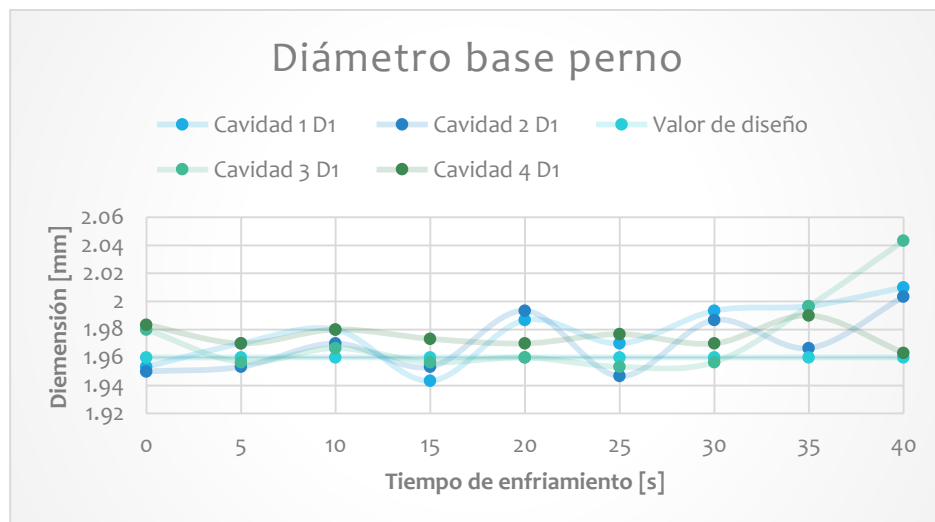
Como se observa en las *Gráficas 21 y 22*, para la cavidad 4, desde el tiempo 3 [s] se mantuvo constante el peso, para las cavidades 1 y 3 a partir del tiempo 4 [s]. Al tener las 3 de 4 cavidades con pesos constantes se decidió que el tiempo de 5 [s] de mantenimiento era el adecuado, ya que si se aumentaba el tiempo se corría el riesgo de sobreempacar las 3 piezas hasta que el peso de la cavidad 2 se estabilizara. Las piezas obtenidas se muestran en la *Imagen 44*.



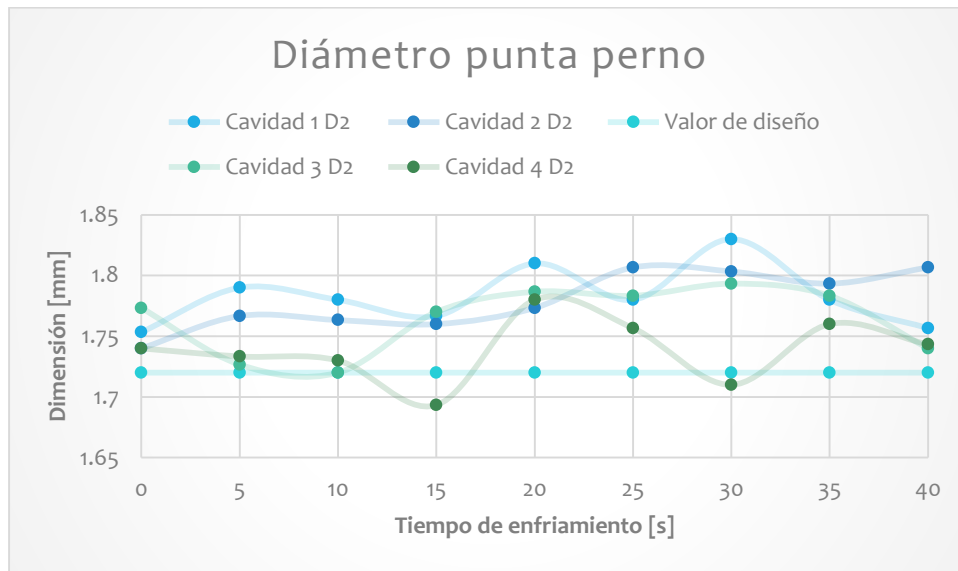
Imagen 44. Piezas obtenidas sello de compuertas molde 3

Tiempo de enfriamiento

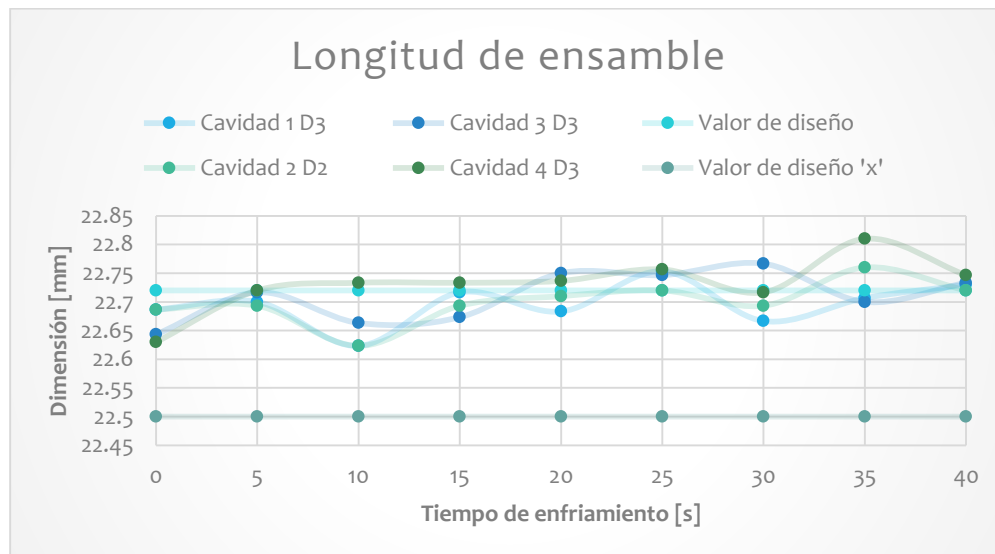
Para el tiempo de enfriamiento se hicieron 3 inyecciones por cada tiempo de enfriamiento en un rango de 0 a 40 [s] de tiempo de enfriamiento, igual al reportado por (Hernández A, 2015). Se midieron las piezas 24 horas después de inyectadas y los datos que arrojaron se muestran en los anexos de este trabajo de tesis. Las *Gráficas 23, 24 y 25* muestran los datos obtenidos.



Gráfica 23. Tiempo de enfriamiento dimensión 1



Gráfica 24. Tiempo de enfriamiento dimensión 2



Gráfica 25. Tiempo de enfriamiento dimensión 3

En muchas de las cavidades se tuvo una menor variación en el tiempo 0 como se aprecia en las Gráficas 23, 24 y 25, sin embargo, para ese tiempo parte de la colada se queda en el molde, en los tiempos 5 y 10, la pieza sale completa pero parte de la colada aun tiene temperaturas mayores a la de transición vítrea y por lo tanto su viscosidad es alta.

Se decidió entonces seleccionar 15 [s] de tiempo de enfriamiento, ya que en este tiempo en la mayoría de las dimensiones críticas de la pieza, se tenían variaciones 0.2% y 2.9%. Considerándose viable. Las piezas obtenidas se muestran en la Imagen 45.

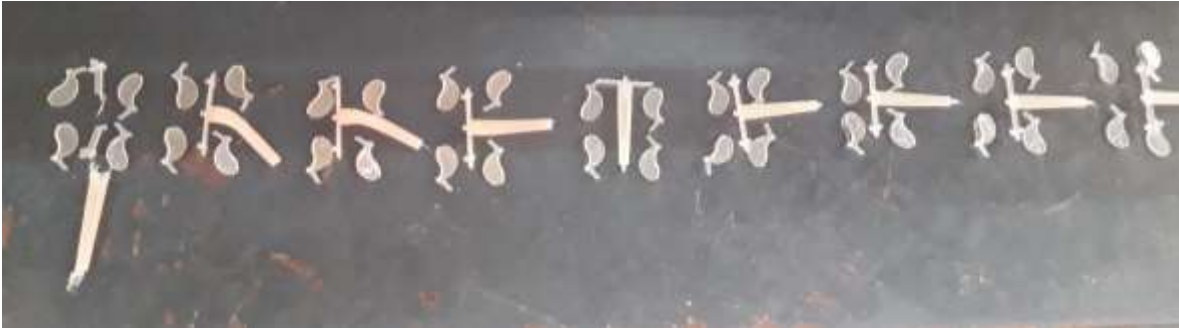


Imagen 45. Piezas obtenidas tiempo de enfriamiento molde 3

3.5 Molde de colada fría 4

Para el molde de colada fría 4, se inició con el secado del material en un deshumidificador marca Motan por 4 horas a una temperatura de 100[°C]. Con este molde se utilizó la máquina Sumitomo DEMAG Systec 210/840.

Una vez los parámetros del molde ajustados, se ajustó el perfil de temperaturas del barril justo en medio del sugerido por el proveedor, y se procedió a obtener una purga para verificar la temperatura de masa fundida y que esta coincidiera con la colocada en el perfil.

Se cargó un tamaño de disparo de 310 [cm³] para ajustar al 95% del volumen de la pieza. Se colocó la temperatura del sistema de enfriamiento del molde en 25[°C], sin embargo, hubo variaciones en mediciones subsecuentes.

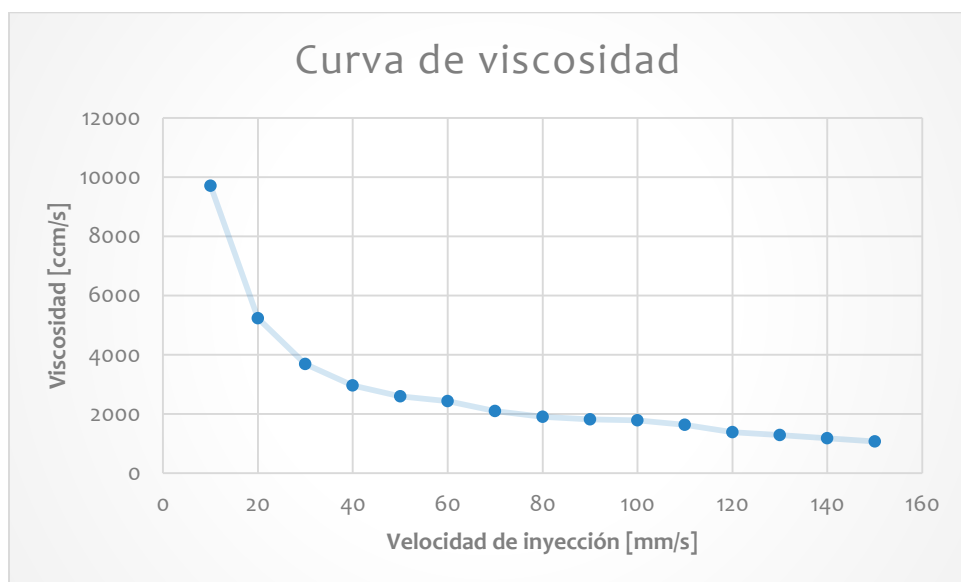
Curva de viscosidad

La curva de viscosidad se inició con la velocidad de 150 [mm/s], esta velocidad no es la máxima en la máquina, debido a que, si se utilizaba la máxima, la presión sobrepasaba la presión máxima de la máquina y la velocidad máxima que se pudo ocupar sin que se presentará esto fue de 150[mm/s].

Al igual que en los experimentos anteriores se hicieron 4 inyecciones por cada velocidad, tomando en cuenta solo las tres últimas. Los datos relevantes se muestran en la *Tabla 23* y *Gráfica 26*.

Tabla 23. Datos relevantes curva de viscosidad molde 3

VI [mm/s]	PP [bar]	TIP [bar]	VA [bar *s]	Diferencia %
150	940.33	1.146	1077.62	
90	1026.00	1.777	1821.83	1.99
80	958.67	1.985	1903.28	4.47
10	639.00	15.191	9707.26	85.42



Gráfica 26. Curva de viscosidad molde 4.

Con la curva de viscosidad obtenida, se advierte que la velocidad mínima fue de 10 [mm/s] ya que, si se disminuía, por la cantidad de material los puntos de inyección se solidificaban y no permitían el paso del material.

La menor variación de viscosidad aparente se tuvo entre 90 y 100 [mm/s]. Se decidió utilizar la velocidad de 95 [mm/s] y se realizaron inyecciones a esa velocidad para verificar que la calidad fuera la misma que durante el proceso. La calidad era menor que durante el proceso, existían ráfagas en muchas partes de la pieza y por ello se decidió disminuir la velocidad hasta 85 [mm/s], donde la calidad mejoraba. Se obtuvieron las piezas mostradas en la *Imagen 46*.

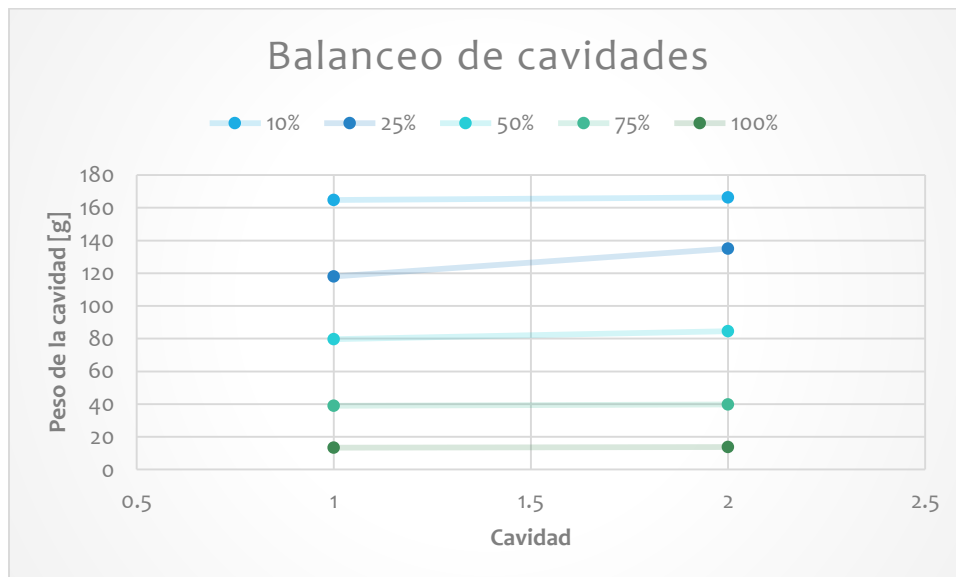


Imagen 46. Piezas obtenidas durante la curva de viscosidad molde 4.

Balanceo de cavidades

Para el estudio de balanceo de cavidades se verificó el molde físicamente, los puntos de inyección no presentaban alguna diferencia evidente, el sistema de enfriamiento era el mismo para ambas cavidades al igual que los venteos, sin embargo, se distinguían la parte móvil del molde de la fija, ya que en la fija se tenían los venteos, y el sistema de refrigeración era lineal en la parte fija del molde y en 'u' en la parte móvil del molde.

En la *Gráfica 27* se muestran los resultados obtenidos.



Gráfica 27. Balanceo de cavidades molde 4.

Con esta gráfica se aprecia que existe un ligero desbalance en las cavidades del 1% al 95% del volumen de la pieza. Sin embargo, el desbalanceo al 75% del volumen de la pieza es de 12.7% esto se explica sabiendo que, al llenarse una cavidad, la cavidad 2, el material al vérselo impedido el paso fluye hacia la otra cavidad disminuyéndose así el desbalance *Imagen 47*.



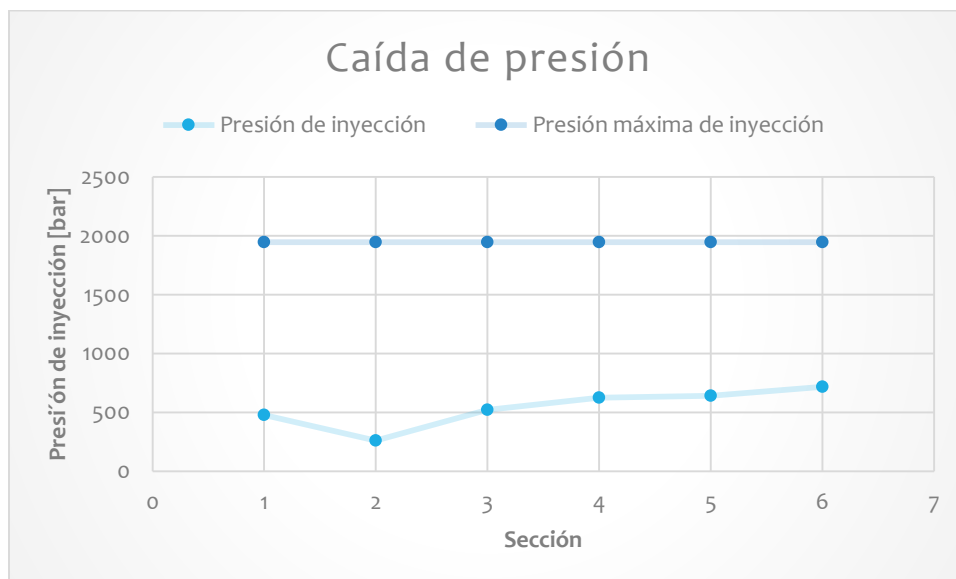
Imagen 47 Piezas obtenidas durante el balanceo de cavidades molde 4.

Caída de presión

El estudio de caída de presión se hizo a la par que el estudio de balanceo de cavidades. Se añadieron inyecciones de la colada y de la purga para terminar el estudio, el experimento arrojó los datos mostrados en la *Tabla 24* y *Gráfica 28*.

Tabla 24. Datos relevantes caída de presión molde 4

Sección	PIP [bar]	PIM [bar]
95%	716.00	1946



Gráfica 28. Caída de presión molde 4.

Con el estudio se observó que la presión máxima en este molde y con este material fue al 95% del volumen y fue de 716 [bar] siendo el 37% de la capacidad de la máquina. Las piezas obtenidas se muestran en la *Imagen 48*.



Imagen 48. Piezas obtenidas en caída de presión molde 4.

Ventana cosmética de proceso

Se utilizó la temperatura de masa fundida ya que el sistema de refrigeración del molde no funcionó adecuadamente, debido a que no mantiene la temperatura a la que se le configura.

Se comenzó con inyecciones sin presión de mantenimiento y posteriormente se le dieron incrementos de 30 [bar] hasta encontrar los puntos en donde la calidad de la pieza visualmente fuera adecuada a una temperatura de masa fundida de 191[°C].

Se observó que en las piezas con una presión de mantenimiento baja se presentaba el efecto Diésel en las dos cavidades hasta que se aumentó la presión a más de 50 [bar] *Imagen 49*.

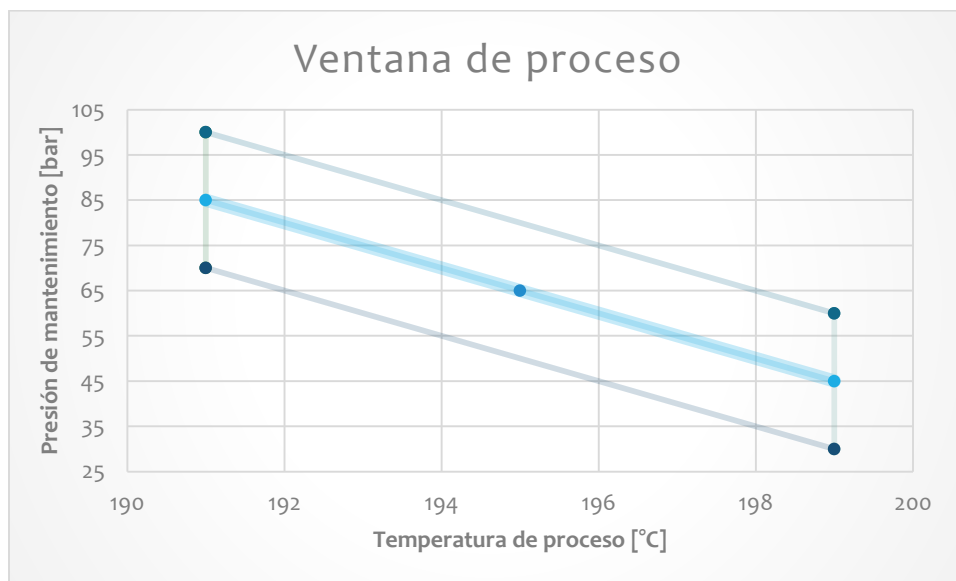


Imagen 49. Efecto Diésel en piezas a baja presión de sostenimiento

Para temperaturas bajas se encontró que el rango en donde no se presentaban defectos era de 70 a 100 [bar]. Sin embargo, se presentaron defectos que no se pudieron evitar ya que existieron rebabas desde el inicio del estudio mismas que se deben al mal cierre del molde y que en ciertas zonas el aire dentro del molde no alcanza a salir y el material fluye hacia donde no debe, debido a la manufactura incorrecta del molde.

Para la siguiente parte del estudio se aumentó la temperatura del perfil de temperaturas hasta alcanzar una temperatura de masa fundida de 199 [°C] ya que si se utilizaba la mayor temperatura sugerida por el proveedor el material comenzaba a fluir demasiado y se perforaban las piezas al tratar de expulsarlas.

Se realizó el mismo procedimiento para encontrar el rango donde la calidad de la pieza fuera aceptable, esta vez no se presentó el efecto Diésel en ninguna de las presiones de sostenimiento pero siguieron existiendo las rebabas antes descritas. Se encontró el rango de 30 a 60 [bar] y se obtuvo la *Gráfica 29* y la *Tabla 25*. Las piezas obtenidas se muestran en la *Imagen 50*.



Gráfica 29. Ventana cosmética de proceso molde 4.

Tabla 25. Datos ventana cosmética de proceso molde 4

[TB [°C], PB [bar]]	[TB [°C], PA [bar]]	[TA [°C], PB [bar]]	[TA [°C], PA [bar]]
[191, 70]	[191, 100]	[199, 30]	[199, 60]

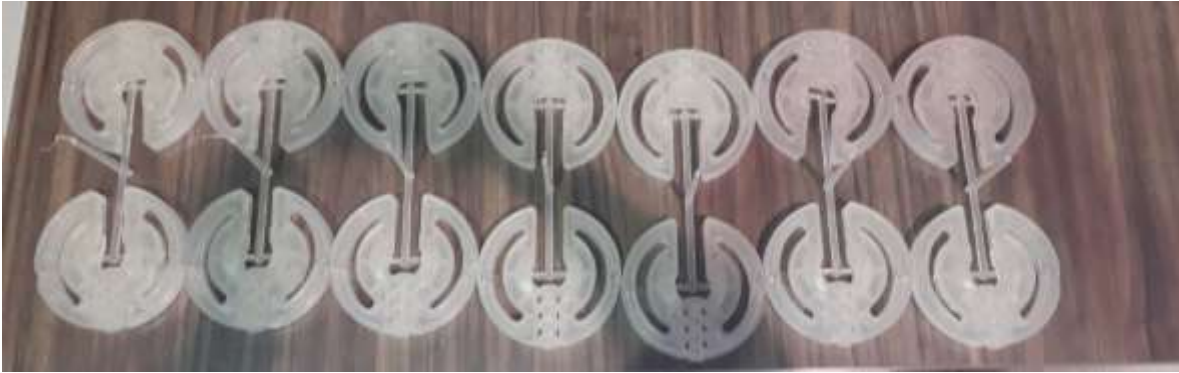


Imagen 50. Piezas obtenidas en ventana cosmética de proceso molde 4.

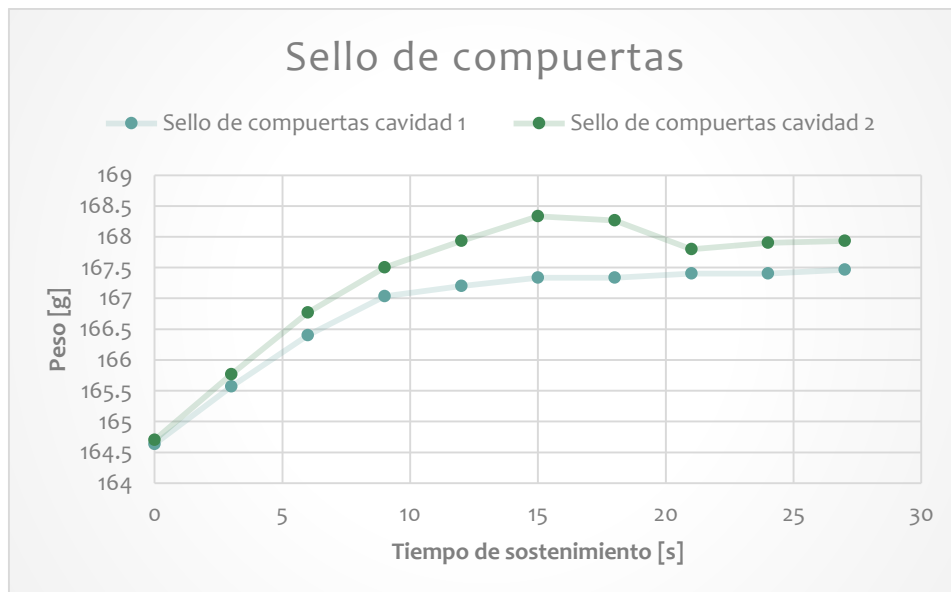
Con lo hecho anteriormente se obtuvo el punto de operación óptimo:

[195 [°C], 65 [bar]]

Sello de compuertas

Para comenzar con el estudio de cierre de compuertas, se ajustaron todos los parámetros encontrados hasta ahora. Se procedió a inyectar piezas sin presión de mantenimiento y posteriormente se hicieron incrementos de 3 [s], por cada tiempo de mantenimiento se realizaron 3 inyecciones y se obtuvo el promedio de la masa de cada una, hasta llegar a 27[s].

Los resultados obtenidos se muestran en la *Gráfica 30*.



Gráfica 30. Sello de compuertas molde 4

Se muestra una variación menor al 0.1% para la cavidad 1 desde el tiempo 18 [s] y para la cavidad 2 desde el 21 [s], por ello se decidió que el tiempo de mantenimiento adecuado es de 24 [s].

Tiempo de enfriamiento

Para el tiempo de enfriamiento se colocó en primera instancia un tiempo de enfriamiento en el cual la pieza pudiera ser desmoldada sin ningún problema, se decidió que el rango sería desde 190 [s] hasta 230 [s] para no aumentar demasiado el tiempo de ciclo. Se hicieron tres inyecciones de cada tiempo de enfriamiento y se midieron las dimensiones críticas 24 horas después. Las dimensiones críticas y los datos se presentan en la *Imagen 51* y *Gráfica 31* respectivamente.

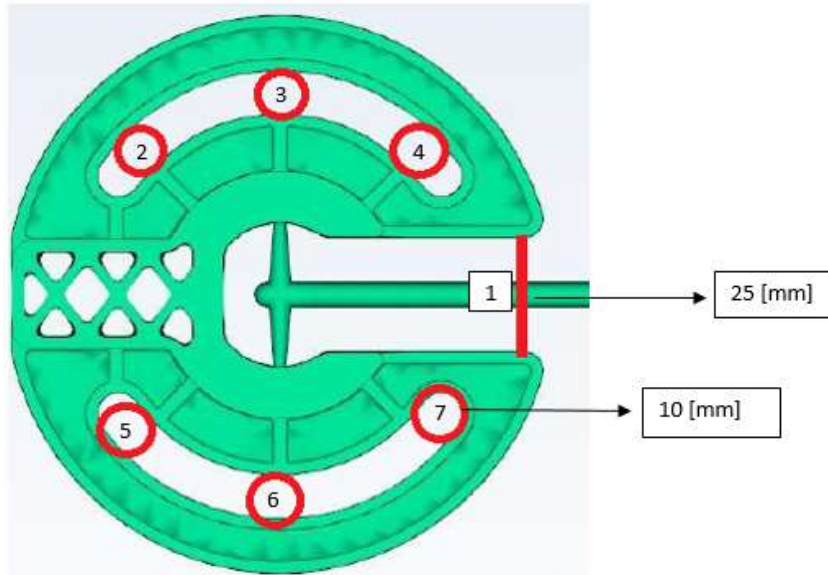
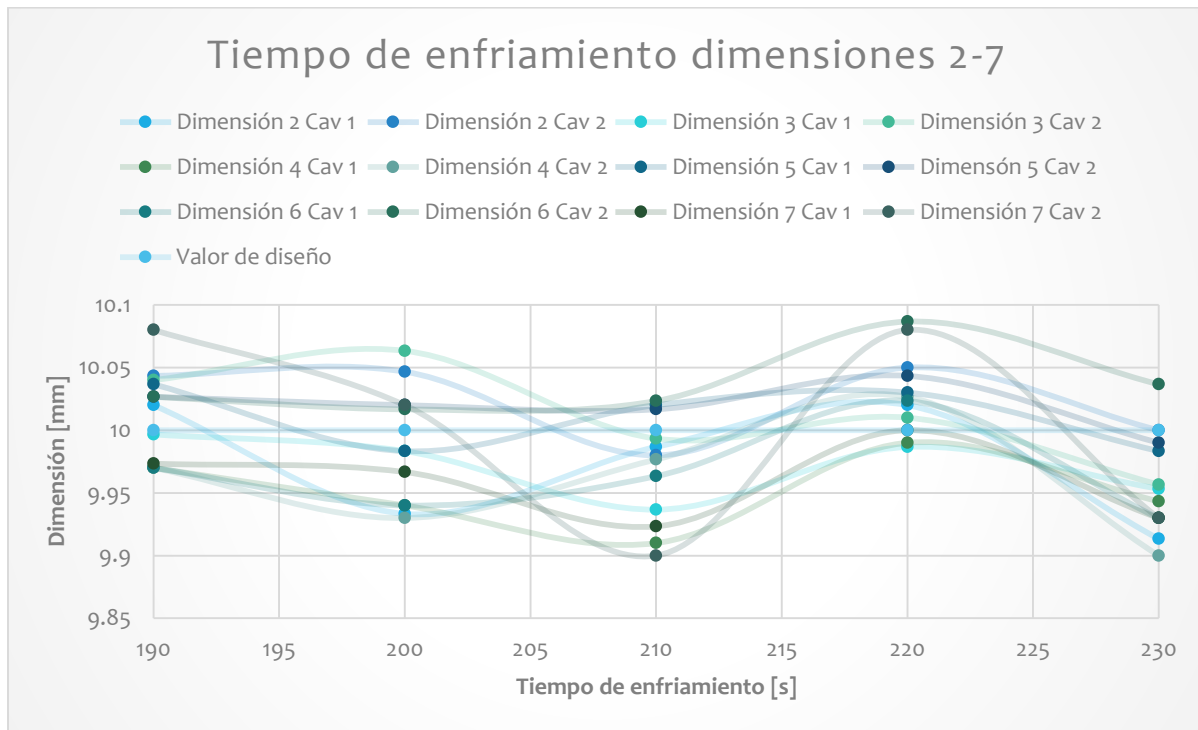


Imagen 51. Dimensiones críticas de la pieza, molde 4.

Se tomaron como dimensiones críticas a todas aquellas que forman parte del ensamble de la pieza.



Gráfica 31. Dimensiones de tiempo de enfriamiento molde 4.

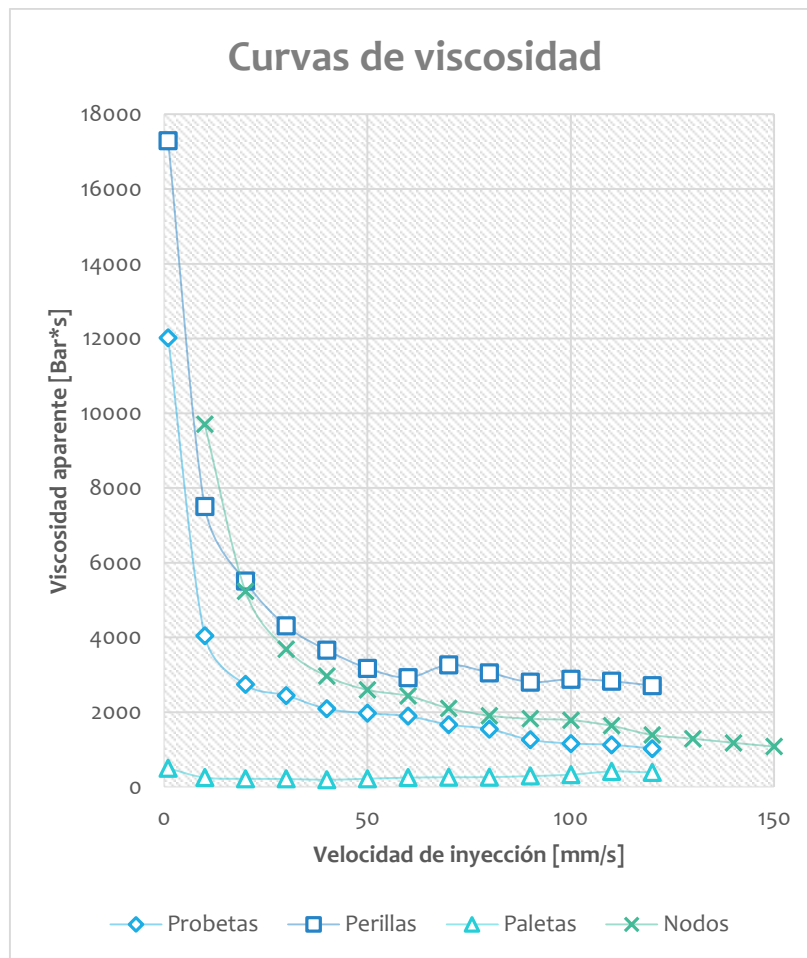
Con los datos obtenidos se observó que el tiempo de enfriamiento en el que había menos variación fue en 220 [s], en este tiempo hubo variaciones desde el 0 % hasta el 0.87%

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se realizó un análisis a cada uno de los pasos del moldeo científico aplicado a los cuatro moldes.

4.1 Curva de viscosidad

En tres de los cuatro moldes se tuvieron gráficas asintóticas descendientes de comportamiento características del moldeo científico; sin embargo, la curva del molde de paletas, se denota una curva en horizontal con muy poca variación de valores y a baja viscosidad aparente. De lo observado, la característica que resalta de tal comportamiento es el tamaño de las piezas inyectadas, la geometría y el tamaño de disparo que es de $3.5 [cm^3]$, además de puntos de inyección muy pequeños y que según (Kulkarni, 2016) la curva de viscosidad varía mucho por utilizar muy poca capacidad de la máquina *Gráfica 32*.



Gráfica 32. Curvas de viscosidad de los cuatro moldes

4.2 Balanceo de cavidades

En este paso solamente se verificó que, para ciertos moldes como el de probetas, que no son simétricos, no fue necesario realizar este paso, debido a que es obvio, a simple vista *Figura 11*, que la cantidad de material que entra en cada cavidad no es el mismo. Los otros tres moldes tuvieron ligeros desbalances (del 0.8 al 4%) y solo en el caso de las paletas se tuvo un 21% de desbalance que se atribuye a las variaciones que existieron con ese molde por tener un tamaño de disparo tan pequeño.

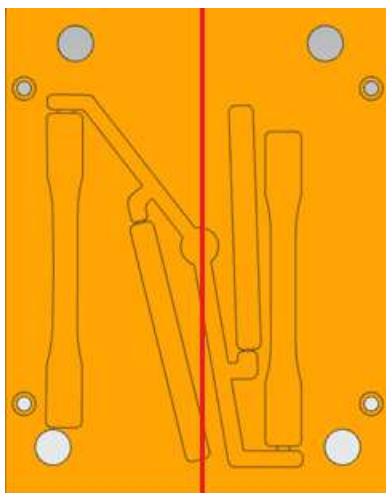


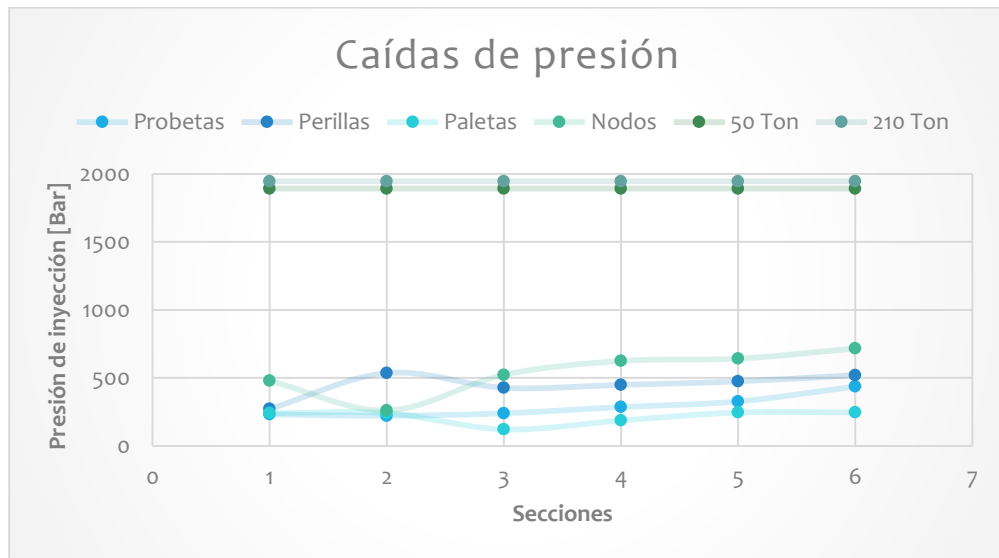
Figura 11 Asimetría del molde 2.

4.3 Caída de presión

En el caso de caída de presión; en los cuatro moldes la presión máxima fue en la sección del 95% del volumen de la pieza, sin embargo, es bueno resaltar que el perfil que se muestra en las gráficas es distinto para cada molde. En la *Gráfica 33* se presentan las curvas de cada molde estudiado tomando como referencia la presión máxima de cada máquina de 50 y 210 [ton].

Como puede observarse, el molde de probetas es totalmente ascendente, el molde de perillas tiene un pico en la sección de la colada que se atribuye a que el punto de inyección de la cavidad B es muy pequeño para este material, prueba de ello la *Imagen 29*. El perfil de las paletas presenta un comportamiento ascendente después de la boquilla.

En el caso de los nodos la presión disminuye en la sección de la colada ya que se tienen canales amplios al igual que el bebedero, en cambio para la siguiente sección al ser los puntos de inyección pequeños para el material que se está utilizando la presión aumenta.



Gráfica 33. Curvas características de caída de presión para 4 moldes.

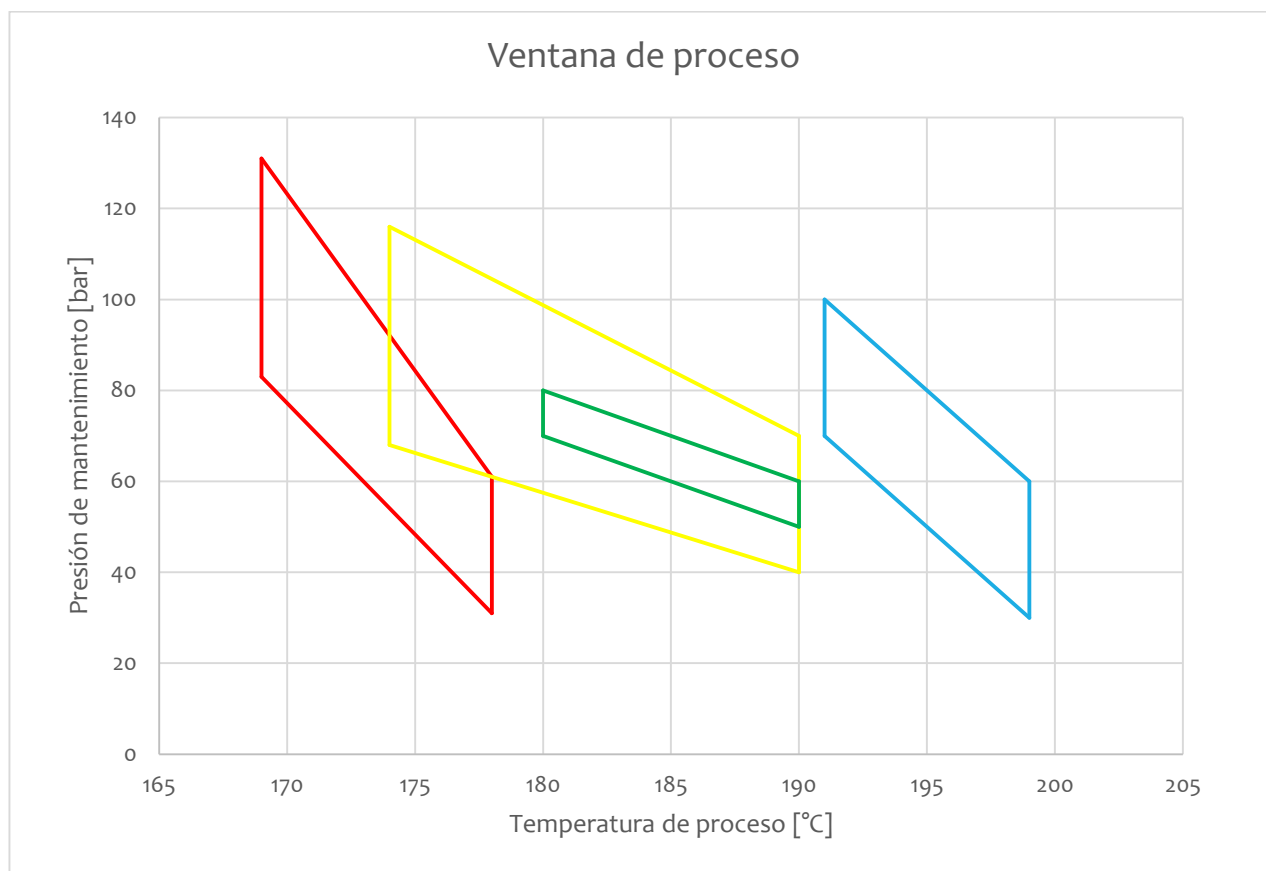
4.4 Ventana cosmética de proceso

De acuerdo a lo publicado (Auras, R; Lim, L.-T.; Selke, S.E.M.; Tsuji, 2010), se dice que para obtener características amorfas en el material, las temperaturas del molde son preferentemente bajas, durante la realización experimental, se consideró un intervalo pertinente de 18 a 25 [°C], mismo que al no tenerse los equipos para realizar el enfriamiento, se hicieron inyecciones con tiempos de espera largos para permitir que el molde enfriara.

La gráfica siguiente muestra que a pesar de ser el mismo material la ventana cosmética de proceso es diferente para todos los moldes, en el caso de la ventana de las paletas la ventana es muy reducida lo que se podría atribuir a que su tamaño de disparo es el menor de todos los moldes, sin embargo, no se puede decir lo mismo de la ventana de los nodos, es decir, es la pieza con el tamaño de disparo más grande y no es la ventana más grande. Para cada caso, se tomó en cuenta el área de cada una de las ventanas, así como el volumen desplazado durante los procesos respectivos de inyección *Tabla 26*.

Tabla 26. Área de las ventanas cosméticas de proceso

Molde	Área [ua]	Volumen inyectado [cm ³]
Probetas	351	44
Perillas	789.25	29
Paletas	100	3.5
Nodos	280	310



Gráfica 34. Ventanas cosméticas de proceso: probetas (roja), perillas (amarilla), paletas (verde) y nodos (azul)

Como puede observarse en la *Gráfica 34*, la ventana cosmética de las perillas (amarilla) presenta un área mayor a las demás debido a que el molde fue diseñado por profesionales al igual que la geometría, también se observa que la temperatura de proceso para cada uno de los cuatro moldes es diferente a pesar de ser el mismo material inyectado; por ende, es de observarse que las presiones de mantenimiento son variadas en un amplio rango y para relacionar el tamaño de los puntos de inyección con la cantidad de material que fluye, en la *Tabla 27* se presentan las relaciones consideradas.

Tabla 27. Análisis de material que fluye por el punto de inyección de cada molde.

Molde	Número de puntos de inyección	Área de los puntos de inyección [cm ²]	Tamaño de disparo [cm ³]	Tamaño de disparo [g]	Tiempo de inyección [s]	Flujo másico [$\frac{g}{cm^2 \cdot s}$]
Probetas	4	0.6728	44	54.56	0.70	115.85
Perillas	1	0.2022	29	35.96	0.89	199.85
Paletas	4	0.0156	3.5	4.34	0.10	2764.33
Nodos	4	0.0707	310	384.4	1.89	2877.33

La tabla anterior muestra que los flujos másicos más elevados fueron las ventanas cosméticas más pequeñas (paletas y nodos), lo que indica que el tamaño de la compuerta tiene repercusiones

en la calidad de la pieza. Sin embargo, esto no quiere decir que entre más pequeño el flujo másico mayor la ventana cosimética de proceso, ya que, si se tomara de esa forma, las velocidades menores serían las adecuadas, sabiéndose que a menores velocidades más defectos en la pieza no tendría sentido.

4.5 Sello de compuertas

En el caso del sello de compuertas el incremento en tiempo de cada experimento fue de 1 [s] excepto en el molde de nodos. Debido a que la pieza es muy grande en este experimento el incremento fue de 3 [s].

Para cada uno de los moldes el tiempo de mantenimiento fue distinto, se observó que en casos como el molde de las perillas, el desbalanceo de cavidades impide que las compuertas solidifiquen al mismo tiempo, que un molde familiar como el de las probetas en donde se tienen dos tipos de cavidades se corre el riesgo de que si alguna de las piezas es más pequeña, en este caso las probetas de flexión, al tratar de encontrar el tiempo de mantenimiento en las piezas más grandes, se pueden sobre empacar las piezas pequeñas.

También se observó que, a pequeñas variaciones en las cavidades, como en el caso del molde de las paletas, el tiempo de mantenimiento es casi el mismo para todos los puntos de inyección. Por último, que en piezas de espesores grandes y con un tamaño de disparo considerable, el tiempo de mantenimiento es mucho mayor.

Cabe destacar que el tamaño y la geometría de las compuertas repercuten en los tiempos de solidificación de la misma, si esta fuere pequeña o si se hubiese diseñado de forma incorrecta pueden llegar a salir incompletas las piezas.

4.6 Tiempo de enfriamiento

En el caso del tiempo de enfriamiento del molde de probetas, se observó que gracias a las grandes tolerancias de la norma y a que el molde de probetas está diseñado para cualquier tipo de material plástico, no hubo problemas con la elección del tiempo.

Para el caso del molde de perillas, las dimensiones críticas estuvieron por debajo del valor de diseño a excepción del diámetro exterior, lo que indicaría que la contracción del PLA en un sentido es mayor a la contracción del material para el que fue diseñado el molde PBT con un refuerzo, sin embargo, las fichas técnicas de los materiales muestran todo lo contrario, ya que para el PBT se tiene una contracción en paralelo que va desde los 0.3 a incluso 2.0 según lo reportado por Celanese® y para el PLA se tiene 0.004 (NatureWorks, 2018); pudiéndose deber a que la degradación del material en 5 años causo que el PLA contrajera más.

Con el molde de paletas las variaciones fueron en ambos sentidos, mayores y menores al valor de diseño, lo que se atribuye al tamaño de disparo tan pequeño y a las variaciones que se tienen en el proceso por ello.

Por último, el molde de nodos con un tamaño de disparo de $310 [cm^3]$ sus dimensiones alcanzaron a estar en un rango de 0 a 0.87%, siendo la menor variación de los cuatro moldes. Atribuyéndosele a su diseño.

5. CONCLUSIONES

Se observó, que la ventana cosmética de proceso depende de muchos factores, el material (densidad y viscosidad), la geometría (espesor y área transversal) y diseño del molde (puntos de inyección), encontrándose que la ventana no solo depende del material con que se inyecte refutándose en parte la hipótesis establecida al inicio de este trabajo y comprobándose la misma en su mayoría.

Por otro lado, en la comparativa que se tuvo entre las metodologías para encontrar los parámetros de inyección, moldeo científico e inyección breve y sucinta, se encontró que ambas metodologías tienen el objetivo de encontrar los parámetros del proceso de inyección de plásticos, sin embargo, las dos metodologías, si bien concuerdan en algunas cosas, difieren en otras tantas.

La inyección breve y sucinta se basa en rangos de parámetros encontrados en ambientes controlados, por ejemplo, las temperaturas del barril y la temperatura del molde se obtienen de tablas descritas en el mismo manual, en el caso del moldeo científico, se hace una valoración con la ventana cosmética de proceso, tomando también en cuenta la familia polimérica del material.

En el caso de la velocidad de inyección, el moldeo científico con ayuda de la curva de viscosidad sirve para encontrar el rango en el que el material tiene un comportamiento que se asemeja o se puede comparar con flujo newtoniano, asegurando así la homogeneidad de las propiedades mecánicas de las piezas obtenidas en el rango de velocidades de inyección, en la inyección breve y sucinta al igual que en el moldeo científico se busca la mayor velocidad posible tomando en cuenta la calidad de la pieza. Se puede decir que ambas metodologías buscan velocidades de inyección altas, sin embargo, el moldeo científico toma en cuenta la viscosidad aparente.

Para los parámetros de tiempo de enfriamiento y presión de sostenimiento, en el moldeo científico la presión de sostenimiento se obtiene a partir de la calidad de la pieza con la ventana cosmética de proceso, en la inyección breve y sucinta se da un rango que depende de la presión máxima de inyección requerida para cada pieza y que dependiendo del material se tienen presiones específicas también determinadas en el mismo manual.

La inyección breve y sucinta para el tiempo de enfriamiento se basa en una ecuación que toma en cuenta el material con el que está hecho el molde, el material utilizado en la inyección y las temperaturas involucradas en el proceso de enfriamiento, mientras que el moldeo científico toma en cuenta solo las tolerancias dimensionales de la pieza; además en las experimentaciones hechas en este trabajo se encontró que utilizando esta última metodología no hubo una relación entre el tiempo de enfriamiento y las dimensiones de las piezas, ya que los datos en todos los casos se mantuvieron dispersos.

Si bien el moldeo científico ayuda a encontrar parámetros de inyección importantes, no llega a cubrirlos todos, como son, velocidad del husillo, descompresión, contrapresión y tiempo de enfriamiento, para el caso de la inyección breve y sucinta sucede lo mismo se queda corta al

basarse en su mayoría en datos estipulados ya por experimentos controlados, pero abarca más parámetros que el moldeo científico.

Se observó también que, para una mejor obtención de los parámetros, es necesario que se tengan todos los equipos periféricos necesarios para el molde, además de personal con equipo de manufactura, capacitado para poder hacer correcciones en el molde si se requiriese, para de esta forma tener un proceso controlado.

El desempeño del molde depende en gran parte de su diseño y de las consideraciones que se tengan para el material que conformará, como se pudo verificar en el molde de perillas y de nodos, los cuales fueron diseñados para PBT y Nylon con carga de fibra de vidrio respectivamente, los cuales tuvieron deficiencias en la calidad de la pieza, piezas incompletas en el caso de ambos moldes y vacuolas importantes.

Se requiere cautela para utilizar los rangos de temperaturas o parámetros que sugiera el proveedor, ya que éstos fueron obtenidos en ambientes controlados y dependerán de las características que se tengan en cada proceso de inyección.

Si bien el moldeo científico sirve para validar moldes y encontrar los parámetros de inyección, la gran desventaja de este es el gasto de material que se tiene para realizarlo, en este trabajo se utilizaron 5 costales de 25 [kg] cada uno, dependiendo de la pieza inyectada. Lo que para materiales cuyo costo es elevado, podría resultar no viable.

Además, el moldeo científico está orientado a la calidad superficial de la pieza, se pudo verificar esto en el molde de las perillas, en el cual, aunque la pieza estuviera llena superficialmente, tenía vacuolas importantes, en el molde de nodos sucedió lo mismo e incluso se pudo extrapolar a otros materiales en los que también se tuvieron vacuolas aun haciéndose el moldeo científico.

Se concluye que el moldeo científico y la inyección breve y sucinta son complementarios, para poder trasladar este trabajo a la industria se requiere de emplear las mejores cosas que tienen uno y el otro.

Ni el moldeo científico ni la inyección breve y sucinta podrán resolver problemas de diseño del molde o manufactura del mismo, prueba de ello el molde de nodos, el cual está mal manufacturado al no tener un cierre homogéneo en todo el molde.

6. REFERENCIAS

- Askeland, D. (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. <https://doi.org/10.1063/1.2729587>
- Auras, R; Lim, L.-T.; Selke, S.E.M.; Tsuji, H. (2010). *Poly(lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing and Applications*.
- Crawford, R. J. (1998). *Plastics Engineering* (Tercera). Gran Bretaña: Butterworth Heinemann.
- Demag Plastic Group. (2004). *La Inyección en Forma Breve y Sucinta* (5a edición). Schwaig.
- Flores D, R. (2019). *Diseño y fabricación de piezas estructurales de plástico aplicada a la industria de la construcción*. México.
- Hernández A, V. E. (2015). *Determinación del procesamiento por inyección en colada caliente del PLA para piezas de ensamble*.
- Hernández A, V. E., & Chávez A, A. (2013). *Diseño y Validación de un Molde Prototipo Para un Producto de Plástico Biodegradable*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Kawai, F., Nakadai, K., Nishioka, E., Nakajima, H., Ohara, H., Masaki, K., & Iefuji, H. (2011). Different enantioselectivity of two types of poly(lactic acid) depolymerases toward poly(l-lactic acid) and poly(d-lactic acid). *Polymer Degradation and Stability*, 96(7), 1342–1348. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.03.022>
- Kazmer, D. O. (2007). *Injection Mold Design Engineering* (Primera). Alemania: Hanser Publishers.
- Kerkstra, R., Bra[mm]er, S., Kerkstra, R., & Bra[mm]er, S. (2018). Decoupled® or Scientific Molding. In *Injection Molding Advanced Troubleshooting Guide*. <https://doi.org/10.3139/9781569906460.003>
- Kulkarni, S. (2016). *Robust Process Development and Scientific Molding*. <https://doi.org/10.3139/9781569905876>
- Lim, L. T., Auras, R., & Rubino, M. (2008). Processing technologies for poly(lactic acid). *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 33(8), 820–852. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004>
- Nature Works. (2016). *Crystallizing and Drying Ingeo™ Biopolymer*. 1–12.
- NatureWorks. (2018). *Ingeo™ 3001D*. 1–2.
- Pruner, H., & Nesch, W. (2013). Understanding Injection Molds. In *Understanding Injection Molds*. <https://doi.org/10.1074/jbc.272.22.14087>
- Ren, J. (2010). *Biodegradable Poly (Lactic Acid) : Synthesis , Modification , Processing*.
- Sakai, T., & Kikugawa, K. (2009a). Injection Molding Machines, Tools, and Processes. In *Injection Molding* (First Edit). <https://doi.org/10.3139/9783446433731.002>
- Sakai, T., & Kikugawa, K. (2009b). Injection Molding Machines, Tools, and Processes. In *Injection Molding* (First Edit). <https://doi.org/10.3139/9783446433731.002>
- Schiller, G. F. (2018). A Practical Approach to Scientific Molding. In *A Practical Approach to Scientific Molding* (First Edit). <https://doi.org/10.3139/9781569906873.fm>

Tin, Lee; Razak, Abdul; Wan Abdul, W. (2013). *Polylactic Acid. PLA biopolymer technology and applications*. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-4459-0.00001-9>

Ingeo™ Biopolymer 3251D Technical Data Sheet

Injection Molding Process Guide

Ingeo biopolymer 3251D is designed for injection molding applications. This polymer grade has a higher melt flow capability than other Ingeo resin grades currently in the marketplace. The higher flow capability allows for easier molding of thin-walled parts. It is designed for injection molding applications, both clear and opaque, requiring high gloss, UV resistance and stiffness.

Processing Information

Ingeo biopolymer 3251D can be processed on conventional injection molding equipment. The material is stable in the molten state, provided that the drying procedures are followed. Mold flow is highly dependent on melt temperature. In order to control melt temperature, it is recommended to balance screw speed, back pressure, and process temperature. Injection speed should be medium to fast.

Process Details

Startup and Shutdown

Ingeo biopolymer 3251D is not compatible with a wide variety of other resins, and special purging sequences should be followed:

1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low viscosity, general purpose polystyrene or polypropylene.
2. Vacuum out hopper system to avoid contamination.
3. Introduce Ingeo biopolymer into the extruder at the operating conditions used in step one.
4. Once Ingeo biopolymer has purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
5. At shutdown, purge machine with high viscosity polystyrene or polypropylene.

Typical Material & Application Properties

Physical Properties	Ingeo 3251D	ASTM Method
Specific Gravity	1.24	D792
MFR, g/10 min (210°C, 2.16kg)	80	D1238
MFR, g/10 min (190°C, 2.16kg)	35	D1238
Relative Viscosity	2.5	
Crystalline Melt Temperature (°C)	155-170	D3418
Glass Transition Temperature (°C)	55-60	D3418
Clarity	Transparent	
Mechanical Properties		
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	9,000 (62)	D638
Tensile Elongation, %	3.5	D638
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16)	D256
Flexural Strength (MPa)	15,700 (108)	D790
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16)	D256
Heat Distortion Temperature (°C)	55	E2092

Note: These are starting points and may need to be optimized.

Processing Temperature Profile

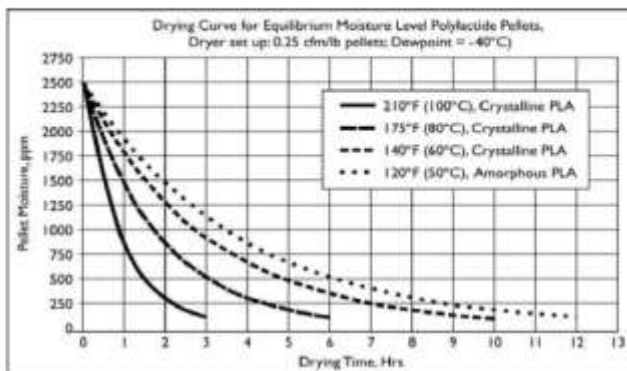
Melt Temp.	370-410°F	188-210°C
Feed Throat	70°F	20°C
Feed Temp.	330-350°F	166-177°C
Compression Section	360-380°F	182-193°C
Metering Section	370-400°F	188-205°C
Nozzle	370-400°F	188-205°C
Mold	75°F	25°C
Screw Speed	100-200 rpm	
Back Pressure	50-100 psi	
Mold Shrinkage	.004 in/in. +/- .001	

Ingeo Biopolymer 3251D Technical Data Sheet

Drying

Inline drying is recommended for Ingeo biopolymers. A moisture content of less than 0.010% (100 ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Polymer is supplied in foil-lined boxes or bags dried to <250 ppm. The resin should not be exposed to atmospheric conditions after drying. Keep the package sealed until ready to use and promptly dry and reseal any unused material. The drying curves for both amorphous and crystalline resins are shown to the right.

Note: Amorphous polymer must be dried below 120F (50C).



Food Packaging Status

U.S. Status

On January 3, 2002 FCN 000178 submitted by NatureWorks LLC to FDA became effective. This effective notification is part of list currently maintained on FDA's website at

<http://www.fda.gov/food/ingredientspackaginglabeling/packagingfcs/notifications/default.htm>

This grade of Ingeo biopolymer may therefore be used in food packaging materials and, as such, is a permitted component of such materials pursuant to section 201(s) of the Federal, Drug, and Cosmetic Act, and Parts 182, 184, and 186 of the Food Additive Regulations. All additives and adjuncts contained in the referenced Ingeo biopolymer formulation meet the applicable sections of the Federal Food, Drug, and Cosmetic Act. The finished polymer is approved for all food types and B-H use conditions. We urge all of our customers to perform GMP (Good Manufacturing Procedures) when constructing a package so that it is suitable for the end use.

European Status

This grade of Ingeo biopolymer complies with Plastics Regulation 10/2011 as amended. No SML's for the above referenced grade exist in Plastics Regulation 10/2011 as amended. NatureWorks LLC would like to draw your attention to the fact that the EU- Plastics Regulation 10/2011, which applies to all EU-Member States, includes a limit of 10 mg/dm² of the overall migration from finished plastic articles into food. In accordance with Plastics Regulation 10/2011 the migration should be measured on finished articles placed into contact with the foodstuff or appropriate food simulants for a period and at a temperature which are chosen by reference to the contact conditions in actual use, according to the rules laid down in Plastics Regulation 10/2011.

Please note that it is the responsibility of both the manufacturers of finished food contact articles as well as the industrial food packers to make sure that these articles in their actual use are in compliance with the imposed specific and overall migration requirements.

This grade as supplied meets European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste heavy metal content as described in Article 11.

Should you need further clarification, contact NatureWorks LLC.

Bulk Storage Recommendations

The resin silos recommended and used by NatureWorks LLC are designed to maintain dry air in the silo and to be isolated from the outside air. This design would be in contrast to an open, vented to atmosphere system that we understand to be a typical polystyrene resin silo. Key features that are added to a typical (example: polystyrene) resin silo to achieve this objective include a cyclone and rotary valve loading system and some pressure vessel relief valves. The dry air put to the system is sized to the resin flow rate out of the silo. Not too much dry air would be needed and there may be excess instrument air (-30°F dew point) available in the plant to meet the needs for dry air. Our estimate is 10 scfm for a 20,000 lb/hr rate resin usage. Typically, resin manufacturers specify aluminum or stainless steel silos for their own use and avoid epoxy-lined steel.

Ingeo Biopolymer 3251D Technical Data Sheet

Safety and Handling Considerations

Safety Data Sheets (SDS) for Ingeo biopolymers are available from NatureWorks. SDS's are provided to help customers satisfy their own handling, safety, and disposal needs, and those that may be required by locally applicable health and safety regulations. SDS's are updated regularly; therefore, please request and review the most current SDS's before handling or using any product.

The following comments apply only to Ingeo biopolymers; additives and processing aids used in fabrication and other materials used in finishing steps have their own safe-use profile and must be investigated separately.

Hazards and Handling Precautions

Ingeo biopolymers have a very low degree of toxicity and, under normal conditions of use, should pose no unusual problems from incidental ingestion or eye and skin contact. However, caution is advised when handling, storing, using, or disposing of these resins, and good housekeeping and controlling of dusts are necessary for safe handling of product. Pellets or beads may present a slipping hazard.

No other precautions other than clean, body-covering clothing should be needed for handling Ingeo biopolymers. Use gloves with insulation for thermal protection when exposure to the melt is localized. Workers should be protected from the possibility of contact with molten resin during fabrication.

Handling and fabrication of resins can result in the generation of vapors and dusts that may cause irritation to eyes and the upper respiratory tract. In dusty atmospheres, use an approved dust respirator.

Good general ventilation of the polymer processing area is recommended. At temperatures exceeding the polymer melt temperature (typically 175°C), polymer can release fumes, which may contain fragments of the polymer, creating a potential to irritate eyes and mucous membranes. Good general ventilation should be sufficient for most conditions. Local exhaust ventilation is recommended for melt operations. Use safety glasses (or goggles) to prevent exposure to particles, which could cause mechanical injury to the eye. If vapor exposure causes eye discomfort, improve localized fume exhausting methods or use a full-face respirator.

The primary thermal decomposition product of PLA is acetaldehyde, a material also produced during the thermal degradation of PET. Thermal decomposition products also include carbon monoxide and hexanal, all of which exist as gases at normal room conditions. These species are highly flammable, easily ignited by spark or flame, and can also

auto ignite. For polyesters such as PLA, thermal decomposition producing flammable vapors containing acetaldehyde and carbon monoxide can occur in almost any process equipment maintaining PLA at high temperature over longer residence times than typically experienced in extruders, fiber spinning lines, injection molding machines, accumulators, pipe lines and adapters. As a rough guideline based upon some practical experience, significant decomposition of PLA will occur if polymer residues are held at temperatures above the melting point for prolonged periods, e.g., in excess of 24 hours at 175°C, although this will vary significantly with temperature.

Combustibility

Ingeo biopolymers will burn. Clear to white smoke is produced when product burns. Toxic fumes are released under conditions of incomplete combustion. Do not permit dust to accumulate. Dust layers can be ignited by spontaneous combustion or other ignition sources. When suspended in air, dust can pose an explosion hazard. Firefighters should wear positive-pressure, self-contained breathing apparatuses and full protective equipment. Water or water fog is the preferred extinguishing medium. Foam, alcohol-resistant foam, carbon dioxide or dry chemicals may also be used. Soak thoroughly with water to cool and prevent re-ignition.

Disposal

DO NOT DUMP INTO ANY SEWERS, ON THE GROUND, OR INTO ANY BODY OF WATER. For unused or uncontaminated material, the preferred option is to recycle into the process otherwise, send to an incinerator or other thermal destruction device. For used or contaminated material, the disposal options remain the same, although additional evaluation is required. Disposal must be in compliance with Federal, State/Provincial, and local laws and regulations.

Environmental Concerns

Generally speaking, lost pellets, while undesirable, are benign in terms of their physical environmental impact, but if ingested by wildlife, they may mechanically cause adverse effects. Spills should be minimized, and they should be cleaned up when they happen. Plastics should not be discarded into the environment.

Product Stewardship

NatureWorks has a fundamental duty to all those that use our products, and for the environment in which we live. This duty is the basis for our Product Stewardship philosophy, by which we assess the health and environmental information on our products and their intended use, and then take

Ingeo Biopolymer 3251D Technical Data Sheet

appropriate steps to protect the environment and the health of our employees and the public.

Customer Notice

NatureWorks encourages its customers and potential users of its products to review their applications from the

standpoint of human health and environmental quality. To help ensure our products are not used in ways for which they were not intended or tested, our personnel will assist customers in dealing with ecological and product safety considerations. Your sales representative can arrange the proper contacts. NatureWorks literature should be consulted prior to the use of the company's products.

NOTICE:

No freedom from infringement of any patent owned by NatureWorks LLC or others is to be inferred. No information in this publication can be considered a suggestion to infringe patents.

The technical information, recommendations and other statements contained in this document are based upon tests or experience that NatureWorks believes are reliable, but the accuracy or completeness of such information is not guaranteed. Many factors beyond NatureWorks control can affect the use and performance of a NatureWorks product in a particular application, including the conditions under which the product is used and the time and environmental conditions in which the product is expected to perform. Since these factors are uniquely within the user's knowledge or control, it is essential that the user evaluate the NatureWorks product to determine whether it is fit for a particular purpose and suitable for the user's method of application. In addition, because use conditions are outside of NatureWorks control and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is solely responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace, use and disposal practices are in compliance with applicable laws and regulations. NatureWorks LLC assumes no obligation or liability for the information in this document.

NATUREWORKS MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING THE INFORMATION CONTAINED HEREIN OR ITS PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY WARRANTY AS TO ACCURACY OR COMPLETENESS OF INFORMATION, OR ANY IMPLIED WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.

NOTICE REGARDING PROHIBITED USE RESTRICTIONS: Unless specifically agreed to in writing by NatureWorks, NatureWorks LLC will not knowingly sell or sample any product into any of the following commercial or developmental applications (i) components of or packaging for tobacco products, (ii) components of products intended for human or animal consumption, (iii) any application that is intended for any internal contact with human body fluids or body tissues, (iv) as a critical component in any medical device that supports or sustains human life, (v) in any product that is designed specifically for ingestion or internal use by pregnant women, (vi) in any application designed specifically to promote or interfere with human reproduction, (vii) in microbeads, including those used in personal care/cosmetic applications, or (viii) to manufacture bottles or bottle pre-forms in North America.

For additional information please contact NatureWorks via our [website](#) on the tab called [FAQ's](#) or by clicking [here](#).



15305 Minnetonka Blvd., Minnetonka, MN 55345

Figura 12 Hoja técnica de proceso PLA 3051D

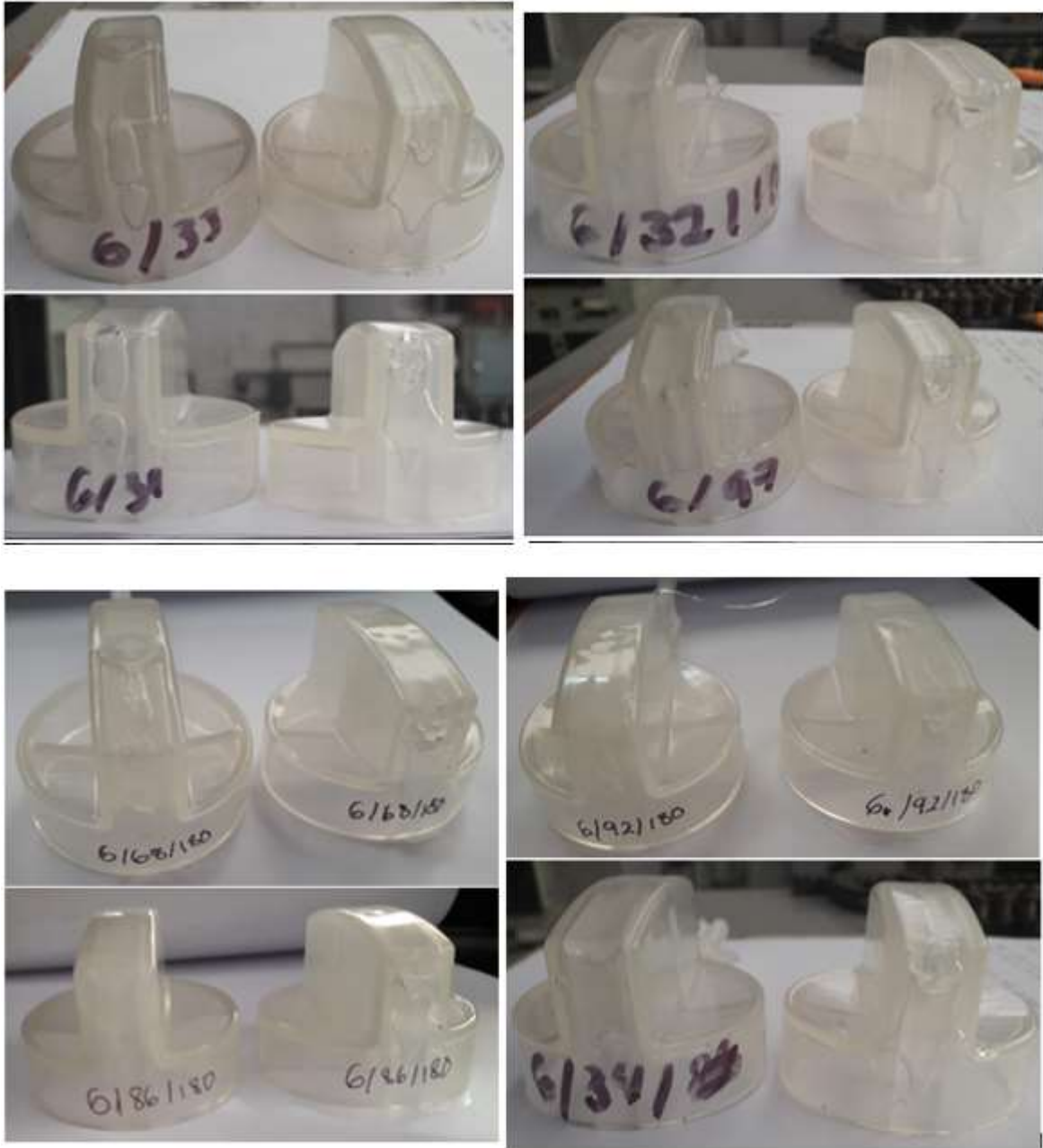


Imagen 52 Perillas obtenidas durante la ventana cosmética de proceso con defectos

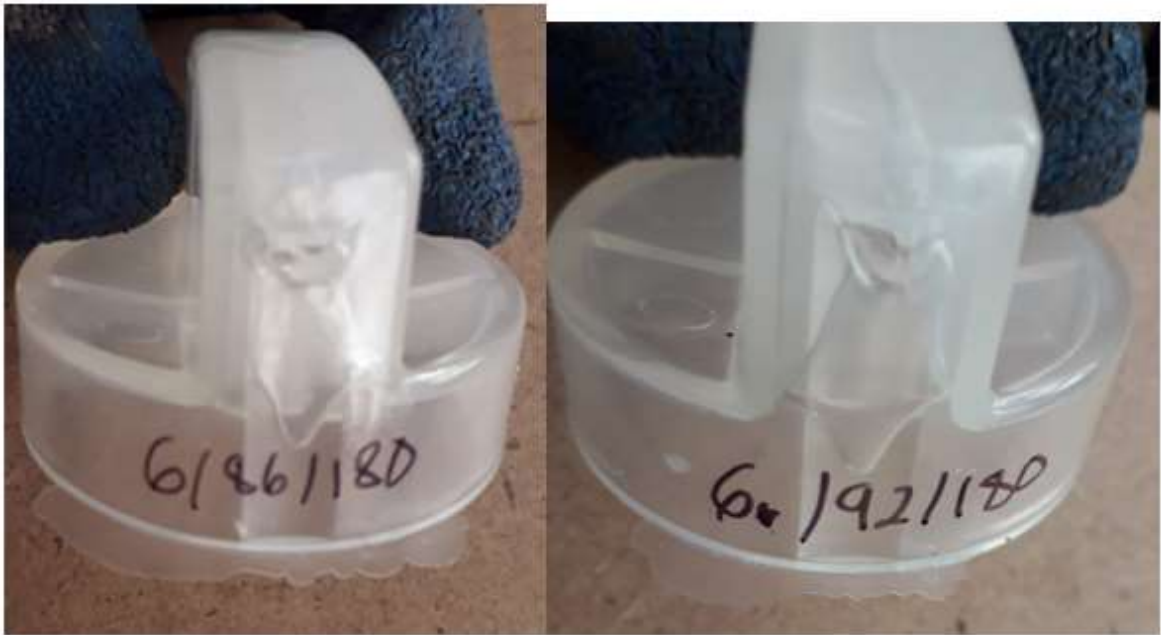


Imagen 53 Perillas con defectos por alta presión



Imagen 54 Probetas obtenidas durante la ventana cosmética de proceso



Imagen 55 Probetas obtenidas durante la ventana cosmética de proceso



Imagen 56 Paletas obtenidas durante la ventana cosmético de proceso

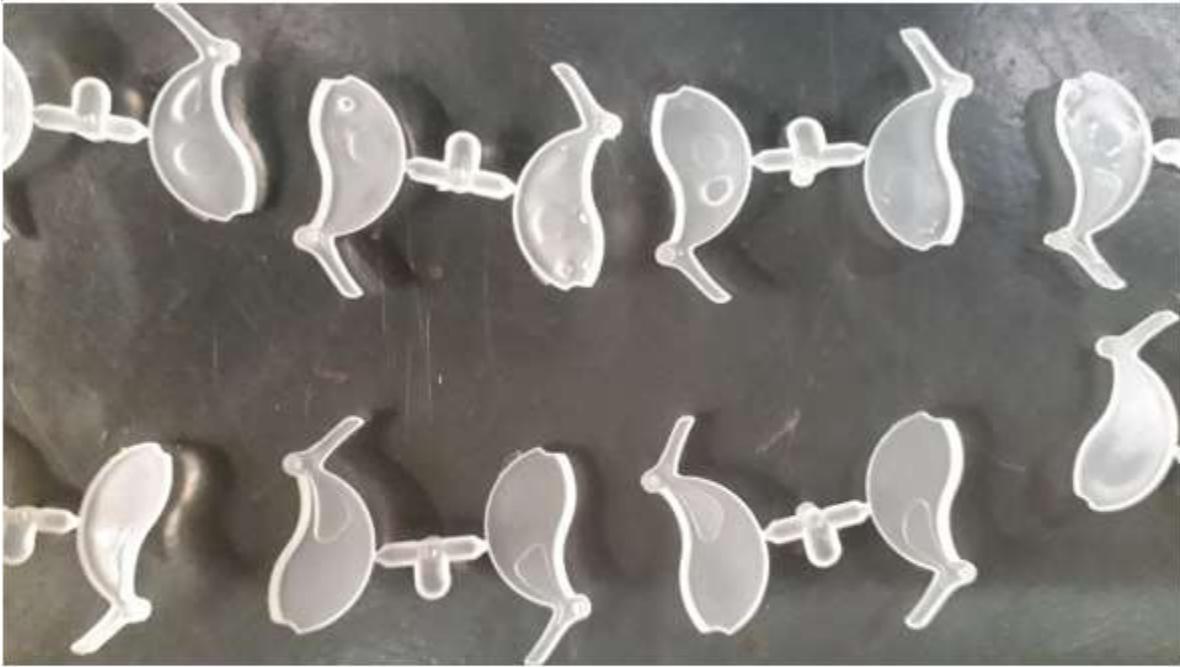


Imagen 57 Paletas obtenidas durante tiempo de sostenimiento y tiempo de enfriamiento



Imagen 58 Rebabas presentes en nodos, aún sin llenar la pieza



Imagen 59 Efecto Diésel en nodos durante la ventana cosmética de proceso

VI [mm/s]	P1	P2	P3	PP [bar]	TI1	TI2	TI3	TIP [bar]	VA [bar *s]	Diferencia %
119	416	417	425	419.33	0.31	0.31	0.31	0.31	1024.35	
110	443	422	422	429.00	0.33	0.33	0.34	0.33333	1126.84	10.01
100	394	392	419	401.66	0.37	0.36	0.37	0.36666	1160.55	2.99
90	392	382	386	386.66	0.41	0.42	0.41	0.41333	1259.40	8.52
80	416	434	411	420.33	0.46	0.47	0.47	0.46666	1545.71	22.73
70	403	400	394	399.00	0.55	0.52	0.52	0.53	1666.39	7.81
60	422	391	394	402.33	0.6	0.6	0.59	0.59666	1891.66	13.52
50	349	364	364	359.00	0.69	0.7	0.7	0.69666	1970.81	4.18
40	330	309	304	314.33	0.85	0.84	0.84	0.84333	2088.89	5.99
30	288	289	288	288.33	1.07	1.08	1.08	1.07666	2446.26	17.11
20	248	227	222	232.33	1.5	1.49	1.5	1.49666	2740.08	12.01
10	188	195	211	198.00	2.59	2.59	2.59	2.59	4041.02	47.48
1	174	202	205	193.66	7.93	7.85	7.84	7.87333	12015.44	197.34

Tabla 28 Datos curva de viscosidad molde 1

Sección	PI1 [bar]	PI2 [bar]	PI3 [bar]	PIP [bar]	PIM [bar]
Boquilla	227	235	233	231.67	1892
Colada	218	233	214	221.67	1892
25%	240	244	235	239.67	1892
50%	284	287	285	285.33	1892
75%	334	321	326	327.00	1892

98%	442	436	431	436.33	1892
------------	-----	-----	-----	---------------	------

Tabla 29 Datos completos caída de presión molde 1

TS [s]	M. Cav TA [g]	M. Cav TB [g]	M. Cav FA [g]	M. Cav FB [g]
0	9.52	7.14	7.01	6.97
1	9.92	9.74	7.04	7.01
2	10.01	9.96	7.08	7.06
3	10.01	10.03	7.13	7.11
4	10.14	10.10	7.18	7.15
5	10.13	10.14	7.20	7.19

Tabla 30 Datos Sello de compuertas molde 1

VI [mm/s]	P1	P2	P3	PP [bar]	TI1	TI2	TI3	TIP [bar]	VA [bar *s]	Diferencia %
119	735	719	725	726.33	0.47	0.48	0.47	0.47	2709.13	
110	702	757	680	713.00	0.49	0.51	0.51	0.50	2827.95	4.39
100	664	678	666	669.33	0.55	0.54	0.55	0.55	2883.31	1.96
90	600	616	563	593.00	0.6	0.6	0.6	0.60	2803.70	-2.76
80	584	588	590	587.33	0.66	0.66	0.66	0.66	3054.60	8.95
70	592	502	586	560.00	0.74	0.74	0.74	0.74	3265.47	6.90
60	441	438	431	436.67	0.85	0.85	0.85	0.85	2924.79	-10.43
50	391	410	424	408.33	0.98	0.98	1	0.99	3174.76	8.55
40	382	384	389	385.00	1.21	1.2	1.21	1.21	3660.79	15.31
30	361	345	359	355.00	1.54	1.54	1.54	1.54	4308.00	17.68
20	322	323	327	324.00	2.16	2.15	2.16	2.16	5506.23	27.81
10	267	267	263	265.70	3.58	3.59	3.58	3.58	7501.54	36.24
1	202	173	208	194.33	11.71	11.19	10.97	11.29	17288.90	130.47

Tabla 31 Datos curva de viscosidad molde 2

% V	PCP1	PCP2
10	4.63	2.79
25	10.35	7.66

50	18.99	11.72
75	25.72	15.75
98	29.92	28.24

Tabla 32 Datos balanceo de cavidades molde 2

* %V: porcentaje de volumen de la pieza, PCP: peso de la cavidad promedio, PC: peso de la cavidad.²⁴

Tabla 33 Datos caída de presión molde 2.

Sección	PI1 [bar]	PI2 [bar]	PI3 [bar]	PIP [bar]	PIM [bar]
Boquilla	274	269	272	271.67	1892
Colada	530	530	548	536.00	1892
25%	428	429	425	427.33	1892
50%	436	480	430	448.67	1892
75%	470	455	498	474.33	1892
98%	527	494	540	520.33	1892

TS [s]	M. A [g]	M. B [g]
0	28.79	30.70
1	28.83	30.56
2	29.04	30.88
3	29.14	30.88
4	29.26	30.88
5	29.37	30.89

Tabla 34 Datos cierre de compuertas molde 2

VI [mm/s]	P1	P2	P3	PP [bar]	TI1	TI2	TI3	TIP [bar]	VA [bar *s]	Diferencia %
119	490	532	609	543.666667	0.09	0.08	0.1	0.09	385.5684	
110	493	565	559	539	0.1	0.1	0.09	0.09666667	410.574267	6.48545541
100	497	491	392	460	0.09	0.09	0.09	0.09	326.232	-20.5425117
90	293	389	457	379.666667	0.1	0.1	0.09	0.09666667	289.204756	-11.3499732
80	306	412	271	329.666667	0.1	0.1	0.1	0.1	259.777333	-10.1752899
70	301	312	397	336.666667	0.1	0.09	0.1	0.09666667	256.450222	-1.28075497

²⁴ Acotaciones para todas las tablas de balanceo de cavidades

60	274	273	306	284.333333 3	0.11	0.1 1	0.1 1	0.11	246.460133	-3.89552748
50	248	242	224	238	0.11	0.1 2	0.1 2	0.11666667	218.801333	-11.2224235
40	184	184	184	184	0.13	0.1 3	0.1 3	0.13	188.4896	-13.8535414
30	181	180	167	176	0.15	0.1 5	0.1 6	0.15333333	212.654933	12.8205128
20	139	151	141	143.666666 7	0.2	0.1 9	0.1 8	0.19	215.097733	1.14871542
10	85	92	120	99	0.31	0.3 2	0.3 2	0.31666667	247.038	14.8491879
1	84	89	75	82.666666 7	0.79	0.6 9	0.8 1	0.76333333	497.245511	101.283005

Tabla 35 Datos curva de viscosidad molde 3

Sección	PI1 [bar]	PI2 [bar]	PI3 [bar]	PIP [bar]	PIM [bar]
Boquilla	277	229	216	240.666667	1892
25%	106	152	106	121.333333	1892
50%	174	203	183	186.666667	1892
75%	215	246	275	245.333333	1892
98%	250	251	238	246.333333	1892

Tabla 36 Datos caída de presión molde 3

TM [s]	MP1[g]	MP2[g]	MP3[g]	MP4[g]
0	0.52	0.52	0.51	0.51
1	0.52	0.52	0.51	0.53
2	0.54	0.54	0.53	0.53
3	0.54	0.54	0.53	0.53
4	0.54	0.53	0.53	0.53
5	0.54	0.54	0.53	0.53

Tabla 37 Datos sello de compuertas molde 3

% V	PC3(g)	PC4 (g)
25%	0.17	0.23
50	0.19	0.23
75	0.38	0.43
95	0.32	0.40

Tabla 38 Datos balanceo de cavidades paletas 'x'

% V	PC1 (g)	PC2 (g)
40	0.20	0.19
60	0.26	0.23
75	0.39	0.32

95	0.41	0.39
----	------	------

Tabla 39 Datos balanceo de cavidades paletas 'y'

VI [mm/s]	P1	P2	P3	PP [bar]	TI1	TI2	TI3	TIP [bar]	VA [bar*s]	Diferencia %
150	902	922	997	940.33	1.146	1.145	1.147	1.146	1077.62	
140	1070	994	943	1002.33	1.175	1.177	1.177	1.176	1179.08	9.41
130	1019	1099	952	1023.33	1.259	1.259	1.26	1.259	1288.72	9.30
120	1180	898	994	1024.00	1.356	1.354	1.356	1.355	1387.86	7.69
110	1100	1035	1200	1111.67	1.471	1.471	1.47	1.477	1634.89	17.80
100	963	1224	1146	1111.00	1.608	1.608	1.608	1.608	1786.49	9.27
90	1009	1076	993	1026.00	1.775	1.776	1.776	1.777	1821.83	1.99
80	945	1012	919	958.67	1.986	1.986	1.984	1.985	1903.28	4.47
70	891	901	1006	932.67	2.255	2.255	2.255	2.255	2103.16	10.50
60	940	824	1029	931.00	2.615	2.615	2.614	2.6145	2434.26	15.74
50	852	798	847	832.33	3.12	3.117	3.118	3.117	2594.66	6.59
40	763	771	763	765.67	3.89	3.873	3.873	3.872	2964.40	14.25
30	717	717	723	719.00	5.13	5.131	5.131	5.130	3688.71	24.43
20	685	679	690	684.67	7.65	7.645	7.647	7.646	5235.19	41.92
10	640	639	638	639.00	15.20	15.185	15.194	15.191	9707.26	85.42

Tabla 40 Datos curva de viscosidad molde 4.

% v	PC1 [g]	PC2 [g]
95%	164.83	166.34
75%	117.93	135.04
50%	79.63	84.50
25%	39.00	39.73
10%	13.30	13.77

Sección	PI1 [bar]	PI2 [bar]	PI3 [bar]	PIP [bar]	PIM [bar]
Boquilla	435	487	513	478.33	1946
Colada	260	264	257	260.33	1946
25%	550	518	499	522.33	1946
50%	627	630	617	624.67	1946
75%	627	687	610	641.33	1946
95%	677	722	749	716.00	1946

Tabla 41 Datos caída de presión molde 4.

TM [s]	MP Cav 1 [g]	MP Cav 2 [g]	Var. Cav 1 %	Var. Cav 2 %
0	164.63	164.7		
3	165.57	165.77	0.58	0.65
6	166.40	166.77	0.50	0.60
9	167.03	167.50	0.38	0.44
12	167.20	167.93	0.10	0.26
15	167.33	168.33	0.08	0.29
18	167.33	168.27	0.00	-0.04
21	167.40	167.80	0.04	-0.28
24	167.40	167.90	0.00	0.06
27	167.47	167.93	0.04	0.02

Tabla 42 Datos sello de compuertas molde 4

Cavidad 2							
TE [s]	D1 [mm]	D2 [mm]	D3 [mm]	D4 [mm]	D5 [mm]	D6 [mm]	D7 [mm]
190.00	25.11	10.04	10.04	9.97	10.03	10.03	10.04
200.00	25.22	10.05	10.06	9.93	10.02	10.02	10.01
210.00	25.22	9.98	9.99	9.98	10.02	10.02	9.97
220.00	25.27	10.05	10.01	10.03	10.04	10.09	10.01
230.00	25.17	10.00	9.96	9.90	9.99	10.04	10.00
Cavidad 1							
TE [s]	D1 [mm]	D2 [mm]	D3 [mm]	D4 [mm]	D5 [mm]	D6 [mm]	D7 [mm]
190.00	25.23	10.02	10.00	9.97	10.04	9.97	9.97
200.00	25.26	9.93	9.98	9.94	9.98	9.94	9.97
210.00	25.22	9.99	9.94	9.91	10.02	9.96	9.92
220.00	25.27	10.02	9.99	9.99	10.03	10.02	10.00

Tabla 43 Datos de tiempo de enfriamiento molde 4.

*TE: tiempo de enfriamiento, D: dimensión.

Índice de imágenes

Imagen 1 Morfología de materiales termoplásticos.....	5
Imagen 2 Aplicaciones del PLA.....	6
Imagen 3 Formas de obtención del PLA.....	7
Imagen 4 Pellets a utilizar de PLA.....	8
Imagen 5 Componentes de la máquina de inyección DEMAG 50/270 del Laboratorio de Procesamiento de plásticos, Facultad de Ingeniería UNAM.....	10
Imagen 6 Máquina de inyección marca DEGMAG Ergotech 50/270 con capacidad de fuerza de cierre de 50 ton.....	11
Imagen 7 Máquina de inyección Sumitomo DEMAG Systec 210/580-840 con capacidad de fuerza de cierre de 210 ton.....	12
Imagen 8 Molde de inyección.....	15
Imagen 9 Curva de Viscosidad polipropileno.....	17
Imagen 10 Balanceo de cavidades en un molde de dos cavidades.....	19
Imagen 11 Caída de presión molde de colada fría.....	20
Imagen 12 Ventana cosmética del proceso.....	21
Imagen 13 Tiempo de sostenimiento.....	22
Imagen 14 Tiempo de enfriamiento.....	23
Imagen 15 Ejemplo de obtención de tiempo de remanencia.....	24
Imagen 16 Molde de colada fría 1, Probetas.....	26
Imagen 17 Molde de colada fría 2, Perillas.....	28
Imagen 18 Molde de colada fría 2, Paletas.....	30
Imagen 19, molde de colada fría 4, Nodo.....	31
Imagen 20 Temperatura de masa fundida.....	33
Imagen 21 Piezas obtenidas durante el estudio de curva de viscosidad.....	34
Imagen 22 Piezas obtenidas en caída de presión molde 1.....	35
Imagen 23 Piezas obtenidas en sello de compuertas molde 1.....	39
Imagen 24 Piezas obtenidas tiempo de enfriamiento molde 1.....	40
Imagen 25 Temperaturas a las cuales se tuvo una purga ideal.....	¡Error! Marcador no definido.
Imagen 26 Parámetros de proceso.....	¡Error! Marcador no definido.
Imagen 27 Defectos en piezas obtenidas.....	41
Imagen 28 Parámetros de proceso.....	¡Error! Marcador no definido.
Imagen 29 Temperatura de masa fundida.....	42
Imagen 30 Perfil de temperaturas molde 2.....	42
Imagen 31 Defecto de ráfagas en velocidad de inyección 40 [mm/s].....	43
Imagen 32 Defectos debidos a la solidificación del punto de inyección.....	43
Imagen 33 Calidad de las piezas a velocidades altas.....	44
Imagen 34 Piezas obtenidas para la curva de viscosidad del molde 2.....	45
Imagen 35 Piezas obtenidas en el balanceo de cavidades.....	46
Imagen 36 Temperatura de molde.....	48

Imagen 37 Pieza inyectada con 5[s] de tiempo de mantenimiento y 59 [cm ³]	48
Imagen 38 Pieza obtenida con 6 [s] de tiempo de mantenimiento, 58 [cm ³] de volumen y 90 [bar] de presión de mantenimiento	49
Imagen 39 Temperatura de masa fundida	49
Imagen 40 Piezas obtenidas para ventana cosmética de proceso.....	50
Imagen 41 Piezas obtenidas del cierre de compuertas cavidad A	51
Imagen 42 Piezas obtenidas del cierre de compuertas cavidad B.....	51
Imagen 43 Piezas obtenidas curva de viscosidad molde 3	57
Imagen 44 Piezas obtenidas en balanceo de cavidades molde 3.....	58
Imagen 45 Piezas obtenidas ventana cosmética de proceso molde 3.....	60
Imagen 46 Piezas obtenidas sello de compuertas molde 3.....	62
Imagen 47 Piezas obtenidas tiempo de enfriamiento molde 3	64
Imagen 48 Piezas obtenidas durante la curva de viscosidad molde 4.	66
Imagen 49 Piezas obtenidas durante el balanceo de cavidades molde 4.....	67
Imagen 50 Piezas obtenidas en caída de presión molde 4.	68
Imagen 51 Efecto Diesel en piezas a baja presión de sostenimiento.....	68
Imagen 52 Piezas obtenidas en ventana cosmética de proceso molde 4.....	70
Imagen 53 Dimensiones críticas de la pieza, molde 4.	71
Imagen 54 Perillas obtenidas durante la ventana cosmética de proceso con defectos	87
Imagen 55 Perillas con defectos por alta presión.....	88
Imagen 56 Probetas obtenidas durante la ventana cosmética de proceso.....	88
Imagen 57 Probetas obtenidas durante la ventana cosmética de proceso	89
Imagen 58 Paletas obtenidas durante la ventana cosmético de proceso	89
Imagen 59 Paletas obtenidas durante tiempo de sostenimiento y tiempo de enfriamiento	90
Imagen 60 Rebabas presentes en nodos, aún sin llenar la pieza	91
Imagen 61 Efecto Diesel en nodos durante la ventana cosmética de proceso.....	92

Índice de tablas

Tabla 1 Principales temperaturas de transición de copolímeros de PLA seleccionados. .	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2 Tiempos medios de secado para pellets de PLA bajo el punto de rocío de -40[°C] y flujo de aire de 0.016m ³ /min/kg .	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 3 Características máquina DEMAG Ergotech 50/270	11
Tabla 4 Características máquina Sumitomo DEMAG Systec 210/580-840	12
Tabla 5 Puntos de la ventana cosmética de proceso	21
Tabla 6 Perfil de temperaturas	33
Tabla 7 Datos relevantes de curva de viscosidad molde 1	34
Tabla 8 Dato relevante de la caída de presión en molde 2	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 9 Perfiles de temperatura de la ventana cosmética de proceso	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 10 Datos ventana cosmética de proceso molde 1	36
Tabla 11 Datos de curva de viscosidad molde 2	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 12 Datos obtenidos para la caída de presión	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 13 Datos de ventana cosmética de proceso	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 14 Perfil de temperaturas en el barril molde 3	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 15 Datos relevantes de la curva de viscosidad del molde 3	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 16 Datos relevantes caída de presión molde 3	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 17 Perfiles utilizados durante la ventana cosmética de proceso molde 3	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 18 Puntos de la ventana cosmética de proceso molde 3	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 19 Datos relevantes curva de viscosidad molde 3	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 20 Datos relevantes caída de presión molde 4	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 21 Datos ventana cosmética de proceso molde 4	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 22 Área de las ventanas cosméticas de proceso	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 23 Análisis de material que fluye por el punto de inyección de cada molde.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 24 Datos curva de viscosidad molde 1	92
Tabla 25 Datos completos caída de presión molde 1	93
Tabla 26 Datos Sello de compuertas molde 1	93
Tabla 27 Datos curva de viscosidad molde 2	93
Tabla 28 Datos balanceo de cavidades molde 2	94
Tabla 29 Datos caída de presión molde 2	94
Tabla 30 Datos cierre de compuertas molde 2	94
Tabla 31 Datos curva de viscosidad molde 3	95
Tabla 32 Datos caída de presión molde 3	95
Tabla 33 Datos sello de compuertas molde 3	95
Tabla 34 Datos balanceo de cavidades paletas 'x'	95
Tabla 35 Datos balanceo de cavidades paletas 'y'	96

Tabla 36 Datos curva de viscosidad molde 4.	96
Tabla 37 Datos caída de presión molde 4.....	97
Tabla 38 Datos sello de compuertas molde 4.....	97
Tabla 39 Datos de tiempo de enfriamiento molde 4.....	97

Índice de gráficas

Gráfica 1 Curva de viscosidad molde de colada fría 1.....	34
Gráfica 2 Caída de presión molde 1.....	35
Gráfica 3 Ventana cosmética de proceso molde 1.....	37
Gráfica 4 Sello de compuertas molde 1. Probetas de tracción.....	38
Gráfica 5 Sello de compuertas molde 1. Probetas de flexión.....	38
Gráfica 6 Tiempo de enfriamiento probetas de tracción.....	39
Gráfica 7 Tiempo de enfriamiento probetas de tracción.....	40
Gráfica 8 Curva de viscosidad molde 2.....	45
Gráfica 9 Balanceo de cavidades del molde 2.....	46
Gráfica 10 Caída de presión molde 2.....	47
Gráfica 11 Ventana cosmética de proceso molde 2.....	50
Gráfica 12 Cierre de compuertas molde 2.....	51
Gráfica 13 Tiempo de enfriamiento 1 molde 2.....	53
Gráfica 14 Tiempo de enfriamiento 2 molde 2.....	54
Gráfica 15 Tiempo de enfriamiento 3 molde 2.....	54
Gráfica 16 Curva de viscosidad molde 3.....	56
Gráfica 17 Balanceo de cavidades paletas 'y'.....	57
Gráfica 18 Balanceo de cavidades paletas 'x'.....	58
Gráfica 19 Caída de presión molde 3.....	59
Gráfica 20 Ventana cosmética de proceso molde 3.....	60
Gráfica 21 Sello de compuertas paletas 'y'.....	61
Gráfica 22 Sello de compuertas paletas 'x'.....	61
Gráfica 23 Tiempo de enfriamiento dimensión 1.....	62
Gráfica 24 Tiempo de enfriamiento dimensión 2.....	63
Gráfica 25 Tiempo de enfriamiento dimensión 3.....	63
Gráfica 26 Curva de viscosidad molde 4.....	65
Gráfica 27 Balanceo de cavidades molde 4.....	66
Gráfica 28 Caída de presión molde 4.....	67
Gráfica 29 Ventana cosmética de proceso molde 4.....	69
Gráfica 30 Sello de compuertas molde 4.....	70
Gráfica 31 Dimensiones de tiempo de enfriamiento molde 4.....	72
Gráfica 32 Curvas de viscosidad de los cuatro moldes.....	73
Gráfica 33 Curvas características de caída de presión para 4 moldes.....	75
Gráfica 34 Ventanas cosméticas de proceso: Perilla, amarilla; probetas, naranja; paletas, roja; nodos, verde.....	76