



FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL

**DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MOLDE
PROTOTIPO PARA UN PRODUCTO DE PLÁSTICO
BIODEGRADABLE**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO
E
INGENIERO INDUSTRIAL**

PRESENTAN

VÍCTOR ERNESTO HERNÁNDEZ ÁLVAREZ

ADRIÁN CHÁVEZ ÁLVAREZ

Respectivamente

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGÁN



MÉXICO D.F.

CIUDAD UNIVERSITARIA 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Macaria y Juan por estos años de sacrificio y a mi familia por su apoyo.

A la doctora Magdalena Trujillo Barragán por permitirme desarrollar este trabajo y al equipo del Laboratorio de Procesamiento de Plásticos por su apoyo.

A Karina Sierra Doroteo por su paciencia y apoyo en la culminación de este trabajo.

Este trabajo se llevo a cavo gracias al apoyo del CONACYT, ICyTDF y la empresa Flexible Pack N´Process

Victor Ernesto Hernández Álvarez

ÍNDICE

1.-INTRODUCCION	1
1.1 INTRODUCCION	1
1.2 ANTECEDENTES.....	2
1.3 REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE	5
1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
1.5 OBJETIVO GENERAL	5
1.6 OBJETIVOS PARTICULARES.....	5
1.7 ALCANCES DEL TRABAJO	5
1.8 HIPOTESIS.....	5
2.-MARCO TEORICO	7
2.1 CONCEPTOS DEL MATERIAL PLÁSTICO	7
2.2 ACIDO POLI LÁCTICO (PLA).....	9
2.3 PROCESO DE INYECCIÓN PARA PROCESAR EL PLA	12
2.4 MOLDE DE INYECCION	21
2.5 MOLDEO CIENTIFICO.....	32
2.6 ETAPAS PARA DISEÑO DE MOLDE DE INYECCIÓN.....	37
2.7 COSTO DE MOLDE DE INYECCIÓN	43
3.-DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MOLDE PROTOTIPO DE INYECCION PARA UN DISPOSITIVO DOSIFICADOR.	45
3.1 DISEÑO CONCEPTUAL.....	45
3.2 ALTERNATIVAS DE DISEÑO DE LAS PLACAS DE CAVIDADES Y SU SELECCIÓN	49
3.3 DIMENSIONES EN LOS MOLDES DE INYECCION	76
3.4 COSTOS DE LOS MOLDES DE INYECCION	80
4.-VALIDACIÓN DEL MOLDE DE INYECCIÓN MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE MOLDEO CIENTÍFICO	83
4.1 DESARROLLO DE LA MEDICIÓN GRAVIMETRICA DE LA REMOCIÓN DE HUMEDAD EN MATERIAL PLA.....	85
4.2 PARAMETRIZACIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN PARA LAS PARTES DEL DOSIFICADOR.....	90

4.3 CONTROL DE TEMPERATURA EN EL MOLDE DE INYECCIÓN.....	91
4.4 ESTABLECIMIENTO DE LA VELOCIDAD DE INYECCIÓN.....	95
4.5 COMPROBACIÓN DEL BALANCE EN CAVIDADES.....	105
4.6 DETERMINACIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN	109
4.7 DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE MANTENIMIENTO Y OBTENCIÓN DE LA VENTANA DE PROCESO	118
4.8 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO PARA LA SOLIDIFICACIÓN DE LA COMPUERTA	126
4.9 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE ENFRIAMIENTO.....	129
4.10 VALIDACIÓN DE LA PARAMETRIZACIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN PARA LA FABRICACIÓN DEL ACTUADOR	145
4.11 TOLERANCIAS Y CONTRACCIONES.....	151
5.-CONCLUSIONES	153
BIBLIOGRAFÍA.....	155
ANEXOS	157

1.-INTRODUCCION

1.1 INTRODUCCION

El presente trabajo muestra la ruta de ejecución de una idea. Partiendo del diseño existente en modelo sólido de un dosificador de gránulos, hasta la manufactura de las piezas y su ensamble.

El dosificador consiste de un ensamble compuesto de cuatro piezas a las que llamaremos en adelante, actuador, base y paletas. En este trabajo se describe la fabricación de este por medio del proceso de inyección de plásticos. A partir de un modelo sólido del dosificador, se comenzó por hacer recomendaciones de diseño de los herramientales (molde) que ayudarían a formar al producto en cuestión. Se hizo un análisis comparativo entre las diferentes configuraciones que formarían al molde, se presenta la configuración final de los moldes para su fabricación, donde se muestran fotografías de las partes que configuran al sistema de moldeo y su funcionamiento.

También, en este trabajo, se determinan los parámetros de proceso para el material empleado, considerando que éste es un material biodegradable que tiene escasa producción nacional y nula transformación en México. A través de la implementación de un método de parametrización se obtiene un control de variables involucradas en la fabricación del dosificador.

La estructura de este trabajo se puede describir de la siguiente forma:

Marco teórico: Es el sustento teórico y de conocimientos para la realización de la tesis, en él se encuentra información del material biodegradable utilizado (PLA, ácido poliláctico), resaltando, su naturaleza, acomodamiento de cadenas poliméricas, tipos de degradación que puede sufrir, incluida la de carácter biológico, en el marco teórico se presenta información genérica a cerca del procesamiento por inyección del PLA. Se presenta la información teórica de la conformación de un molde de inyección, partes y funciones, continua el capítulo con la presentación del protocolo empleado llamado moldeo científico, a través de seis etapas cada una con su sustento teórico y los tópicos de aplicación. Finalmente se muestra una guía de diseño de un molde de inyección.

Diseño y fabricación de un molde prototipo de inyección para un dispositivo dosificador: Este capítulo muestra la vía recorrida para la liberación del diseño de las partes que conforman al molde de inyección. Se toma como guía la ruta de diseño de un molde de inyección y se complementa con las herramientas de software que permiten simular el comportamiento del material en el proceso de inyección para los diseños propuestos. A través de cuadros comparativos se muestra el mecanismo de selección que dio solución a las controversias propias del diseño. Se encuentran representados las partes y ensambles del molde con imágenes de modelos sólidos, desde los primeros diseños hasta el diseño final.

Validación del molde de inyección mediante la metodología de moldeo científico En este apartado se plasma la forma de implementación del método de moldeo científico haciendo uso del equipo de inyección del Laboratorio de Procesamiento de Plásticos, LPP. El capítulo cuenta con tres partes medulares:

- 1) Pre procesamiento del material y puesta en marcha del molde de inyección: aquí se describe el acondicionamiento del material para ser procesado bajo parámetros

recomendados por el fabricante y la literatura, se describe en esta parte la puesta en marcha del molde prototipo.

- 2) Implementación del moldeo científico: Enseña a detalle la aplicación de este para una pieza del dosificador y muestra los resultados obtenidos de las otras, la información emanada se concentra en las hojas de proceso para cada pieza, estas se incluyen en el apartado de anexos.
- 3) Validación del método. En esta sección se pone a prueba los resultados del método en una producción piloto, de las piezas del ensamble, y se muestran los resultados obtenidos, se muestran las tolerancias con las que se entrega el ensamble y las contracciones que presentan las piezas. Se concluye el capítulo con las recomendaciones de diseño y procesamiento para un molde de producción..

Posteriormente se encuentra el apartado de conclusiones; se termina el trabajo con el apartado de anexos donde se incluyen las hojas de proceso y la ficha técnica del material empleado.

1.2 ANTECEDENTES

Una empresa del sector privado, productora de envases flexibles para alimento, a la cual se le denominará cliente, requiere desarrollar un dosificador para gránulos, tanto finos como gruesos, para ser colocado en envases de productos alimenticios. El mecanismo del dosificador es un ensamble de cuatro piezas, las cuales deben de ser del material polimérico Poliacido Láctico PLA. Se presenta esta propuesta al Laboratorio de Procesamiento de Plásticos de la Facultad de Ingeniería, para la manufactura del dosificador, para ello, se opto por el uso de una máquina de inyección, teniendo la necesidad de diseñar los moldes de inyección enfocados a las geometrías requeridas para el ensamble del dosificador y pensado en la utilización del material polimérico PLA.

El material polimérico PLA no es procesado en México, así que es necesaria la importación de este, en la tabla 1.1 se presenta el listado de las empresas que a nivel mundial producen este material.

Tabla 1.1 Empresas productoras a nivel mundial [1]

Empresa	País	Producto comercial
Cargill LCC	E.U.A	NatureWorks
Mitsubishi	Japón	Ecoloju
Chronopol	E.U.A	Helpon
Hycail	Holanda	Hycail HM,LM
Toyota	Japón	Toyota Eco-Plastic
PuracBiomaterials	Holanda	Purasorb
Durect	E.U.A	Lactel
Shimadzu	Japón	Lacty

La tabla 1.1 muestra que la distribución geográfica de la producción de PLA, en presentación de gránulos, se reparte entre E.U.A, Holanda y Japón; de ellos, el productor más importante es NatureWorks (Nebraska, E.U.A) con capacidad de ciento cuarenta mil toneladas por año y precios de venta por kilogramo entre los \$3.22 y los \$7.2 USD [1].

Por el lado de la transformación, durante la búsqueda de información, se encontró que la comercialización de productos hecho con este material, se concentraban en 5 países como se muestra en la tabla 1.2, según el sitio de internet *spanish.alibaba.com* [3] y *miempaque.com*[4]

Tabla 1.2 Comercialización mundial de productos de PLA

Producto	País
Llavero	Taiwán
Hoja para termoformado	Inglaterra
Taza de propósito general	China
Filtro en forma de bolso	China
Popote	China
Cubiertos	China
Bolsa de propósito general	China
peine	China
Carcasa para teléfono celular	China
Trapo para limpieza	Corea del sur
Botellas 200-600 [ml]	china
Botellas BIOTA	E.U.A
Envases para comidas	Inglaterra

La tabla 1.2 muestra, que China es el líder en transformación, sin embargo los ingleses y norteamericanos son competentes en cuestiones de calidad y reputación. México no fabrica productos de PLA. A excepción de SIEG Plásticos & Biodegradables de México [5] quienes según su portal en internet se especializan en la fabricación de bolsas comerciales 100% biodegradables.

En cuanto al diseño y fabricación de moldes la Facultad de Ingeniería de la UNAM fomenta el desarrollo de esta área tan esencial para la industria en nuestro país, mediante asignaturas de Diseño y Manufactura Asistido por computadora (CAD-CAM), que en conjunto con el Laboratorio de Procesamiento de Plásticos, han diseñado y fabricado diversos moldes prototipo.

Actualmente la industria de los moldes de plástico se encuentra ya en todo el país, siendo estados como Chihuahua, Coahuila, Sonora, Querétaro y la Zona metropolitana los de mayor producción, la tabla 1.3 muestra las opciones de proveedores para la fabricación profesional del molde.

Tabla 1.3.Opciones de empresas de manufactura de moldes de inyección

Empresa	País de Origen	Servicios	Contacto
STARPROTOTYPE MANUFACTURING CO., LTD	China	Fabricación de moldes prototipo	Tel:86 760 2222 2556 Fax:86 760 2222 2558 sales@star-prototype-china.com
COMPARTEC	México	Fabricación de moldes maquila e inyección	Tel:(52-55) 5397-2744 Fax:(52-55) 5397-7106 compartec@compartec.com
CHINAPLASTIC MANUFACTURING COMPANY SYNERGY	China	Fabricación de moldes Inyección	Teléfono:86-21-6150 40-07 Fax:86-21-63-75-72-66 contact@chinaplasticmolding.com
MFC Mold Center, s.l	España	Fabricación de moldes diseño y prototipos	Tel:34 91 2277180 Fax:34 91 8851830 info@mfc moldcenter.com
DIMAQ MOLDS	México	Fabricación de moldes ,modelos para fundición.	Teléfono (01 55) 56 37 66 13 dimaq@prodigy.net.mx
VENTOOLING	México	Fabricación de moldes Inyección	Tel: (+442) 199-0290 Fax: (+442) 199-0290 www.ventooling.com
ABASTECEDORA LUVICA	México	Fabricación de moldes de inyección y soplado	Teléfono:555\6000.281
DOYCA, S.A. DE C.V	México	Fabricación de moldes de inyección	Teléfono:(555)5397290 Fax:55\5539.3204
CONSORCIO PLÁSTICOS Y MOLDES ESTRELLA, S.A. DE C.V	México	Fabricación de moldes de inyección	Teléfono:55\5845.0777 Fax:55\5845.9524
ARTÍCULOS DE BAKELITA, S.A	México	Fabricación de moldes	Teléfono:(55)53962655 Fax:(55)53414506 www.articulosdebakelita.com.mx
MOLDES Y PLASTICOS DE PRECISION	México	Fabricación de moldes	Teléfono:555-300-1443 Fax:555-300-5732
ELECTROEROSIÓN FINA, S.A. DE C.V	México	Fabricación de moldes Por electroerosión	Teléfono:55\5362.0207 Fax:55\5362.0207 www.electroerosionfina.com.mx
MOLDES Y PIEZAS DE CALIDAD, S.A. DE C.V. MOLPI	México	Fabricación de moldes	Teléfono:(442)21866040 Fax:442\2182073

1.3 REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE

El cliente solicitó mil ensambles prototipo del dosificador los cuales deben cumplir con los siguientes requisitos.

- Material termoplástico PLA
- Apariencia transparente
- Textura lisa
- Piezas sin defectos visuales
- El cliente no especifica tolerancias

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se requiere fabricar las piezas del dosificador de gránulos en un material polimérico termoplástico definido por el cliente, se parte del modelo sólido suministrado por él cliente y un prototipo rápido hecho de ABS/PC. Los problemas a resolver son los siguientes:

- Diseñar y fabricar los moldes de inyección prototipo para la producción de las partes requeridas
- Definir los parámetros de procesamiento para la manufactura de los componentes del dosificador
- Fabricar los cuatro componentes que conforman a un dosificador de gránulos en material biodegradable PLA
- Validación de los moldes prototipo el funcionamiento del mecanismo
- Realizar producción piloto

1.5 OBJETIVO GENERAL

Entregar al cliente mil dosificadores de gránulos cumpliendo sus requerimientos.

1.6 OBJETIVOS PARTICULARES

- Realizar las recomendaciones de diseño de los moldes prototipo de inyección
- Establecer las condiciones de procesamiento para cada componente mediante la técnica del moldeo científico
- Realizar la producción piloto de mil ensambles

1.7 ALCANCES DEL TRABAJO

Como resultados del proyecto reportado en esta tesis se obtendrán, mil ensambles del dosificador de gránulos, hecho de material PLA, a partir del diseño de las piezas del dosificador. Estas piezas tendrán una apariencia transparente, textura lisa, sin defectos visuales y ensamblarán adecuadamente.

Se validará el molde prototipo obteniendo recomendaciones de diseño y procesamiento para un molde de producción.

1.8 HIPOTESIS

Mediante el seguimiento de una guía de diseño de molde de inyección y la aplicación de la técnica de moldeo científico [2] es posible que se obtengan las piezas que constituyen al dosificador hecho de PLA, de tal manera que su ensamble sea el adecuado para el cliente.

2.-MARCO TEORICO

2.1 CONCEPTOS DEL MATERIAL PLÁSTICO

Los materiales poliméricos tienen diversas clasificaciones, ya sea por su comportamiento térmico, mecánico, arreglo molecular, económico, o de procedencia, natural o sintética. En la figura 2.1 se muestra la clasificación de los termoplásticos según la demanda de consumo, los costos del material y sus propiedades, así como el tipo de material según su estructura, la cual repercute en la forma de procesarlos.

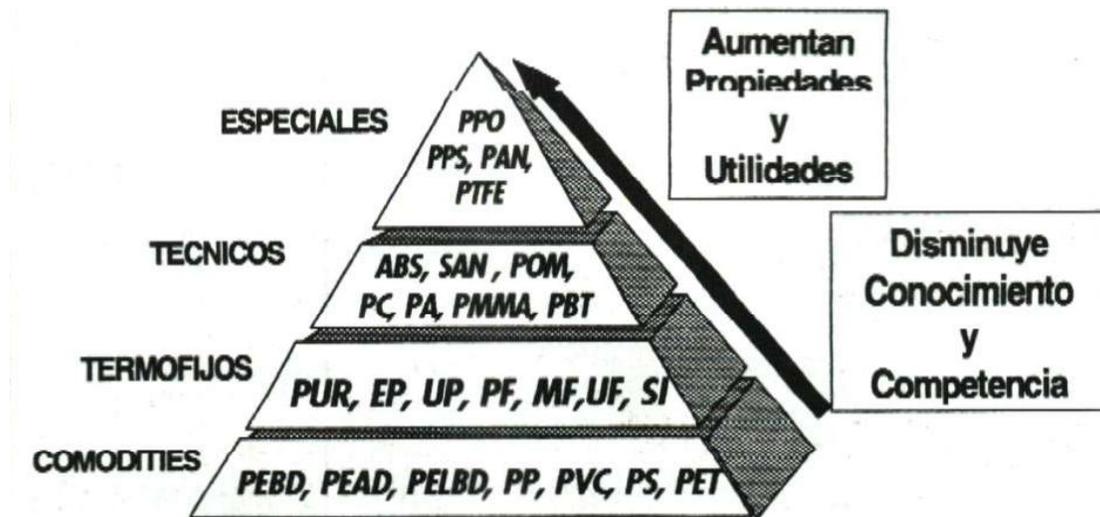


Figura 2.1. Clasificación de polímeros [3].

Como se mencionó en el primer párrafo, la morfología del acomodo molecular en polímeros influye directamente en su procesamiento, en cuanto a contracciones, propiedades. Esta morfología se muestra en la figura 2.2

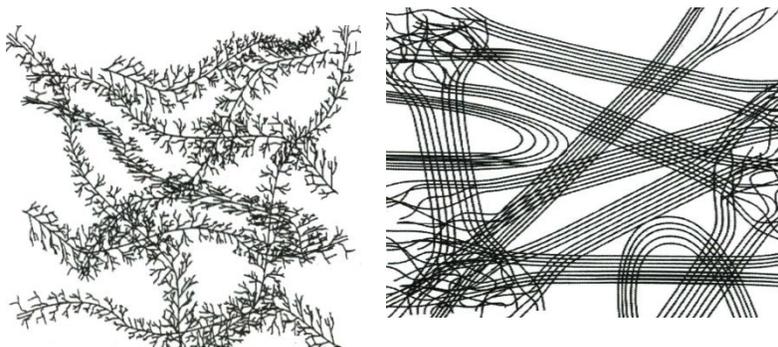


Figura 2.2. Morfología del acomodo molecular de un termoplástico amorfo y semicristalino. (izquierda y derecha respectivamente) [3]

La tabla 2.1 muestra una comparación entre polímeros amorfos y semicristalino

Tabla 2.1. Polímeros amorfos VS semicristalinos[3]

Amorfo	Semicristalino
Estructura aleatoria	Estructura “ordenada”
Región de fusión amplia	Región estrecha de fusión
Baja contracción	Alta contracción
Bajas propiedades mecánicas	Altas propiedades mecánicas
Ejemplo: ABS, PC, PS.	Ejemplo: Nylon, Acetal.

Durante años los materiales poliméricos o plásticos, han sido objeto de críticas, positivas y negativas, siendo estas últimas las más. El plástico no es “malo”, es deficiente la disposición final de él, en países en vías de desarrollo como México carecemos de educación ambiental, es por eso que los plásticos en este País contaminan de manera visual y afectan la vida en diversos ecosistemas.

Los materiales poliméricos de mayor volumen de consumo no cuentan con la capacidad de integrarse al ambiente en corto plazo, si se agrega una clasificación más a la tabla 2.1 la mayoría de los polímeros mostrados caen en el orden de materiales no biodegradables.

Un plástico biodegradable es capaz de experimentar descomposición en dióxido de carbono, metano, agua, compuestos inorgánicos, o biomasa en el cual el mecanismo predominantes el de acción enzimática de microorganismos, este puede medirse por ensayos estandarizados en un periodo específico de tiempo[4].

Por otro lado, la sustentabilidad ambiental, se refiere a la administración eficiente y racional de los recursos naturales, de manera tal que sea posible mejorar el bienestar de la población actual sin comprometer la calidad de vida de las generaciones futuras. En este tenor, es importante volcar la atención en materiales que son capaces de degradarse por acción de microorganismos e incorporarse al ciclo de vida.[5]

Hasta hoy, primavera del 2013 los materiales poliméricos sintéticos y naturales que cumplen con lo anterior son, según la universidad de Valladolid España [6]:

Polímeros sintéticos

- Acido poli láctico (PLA)
- Poli (acido glicólico)(PGA)
- Copolímeros de acido láctico y glicólico (PLGA)
- Policaprolactonas
- Poli (hidroxialcanoatos) (PHAs)
- Polidioxanona
- Poli (gliconato)
- Poliortoésteres
- Poliesteramidas
- Polifosfacenos
- Esteres de polifosfato
- Polianhídridos

Polímeros naturales

- Colágeno
- Gelatina
- Albúmina
- Fibrina
- Poli aminoácidos y pseudoaminoácidos
- Polisacáridos

Como se expresó en el capítulo 1, el material a emplear para la fabricación de piezas de plástico biodegradables es el ácido poliláctico (PLA)

2.2 ACIDO POLI LÁCTICO (PLA)

El PLA es un polímero biodegradable y compostable derivado de fuentes renovables (principalmente almidón y azúcar), hasta la década pasada el principal uso del PLA estaba limitado a aplicaciones médicas, tal como implantes, andamiaje de tejidos y suturas internas[7] Es un material que puede reemplazar al poliestireno (PS) y al polietilentereftalato (PET) en algunas aplicaciones, tales como contenedor de alimentos.[4]

El PLA pertenece a la familia de los poliésteres, derivado de hidroxiaácidos- α . La piedra angular del PLA es el ácido láctico, pueden existir enantiómeros (isómeros ópticos) D o L, las cuales son imágenes especulares no superponibles [8] como se observa en la figura 2.3, y dependiendo de la proporción de enantiómeros el PLA tiene diferentes propiedades. Esto permite la producción de un amplio espectro de polímeros PLA para cumplir los requerimientos de desempeño.

El ácido láctico puede producirse por fermentación de carbohidrato o síntesis química. La mayor producción de ácido láctico es basada en la fermentación.

Una de las razones de la reciente expansión del uso del PLA en Europa, es atribuible a la económica producción de polímeros de alto peso molecular PLA (más de 100,000 [Da], sabiendo que 1[Da]= 1/12 de la masa de un Carbono 12) estos polímeros pueden producirse usando varias técnicas, incluida la condensación deshidratante azeotrópica, polimerización por condensación directa y/o polimerización a través de la formación de láctidos fig. 2.3.

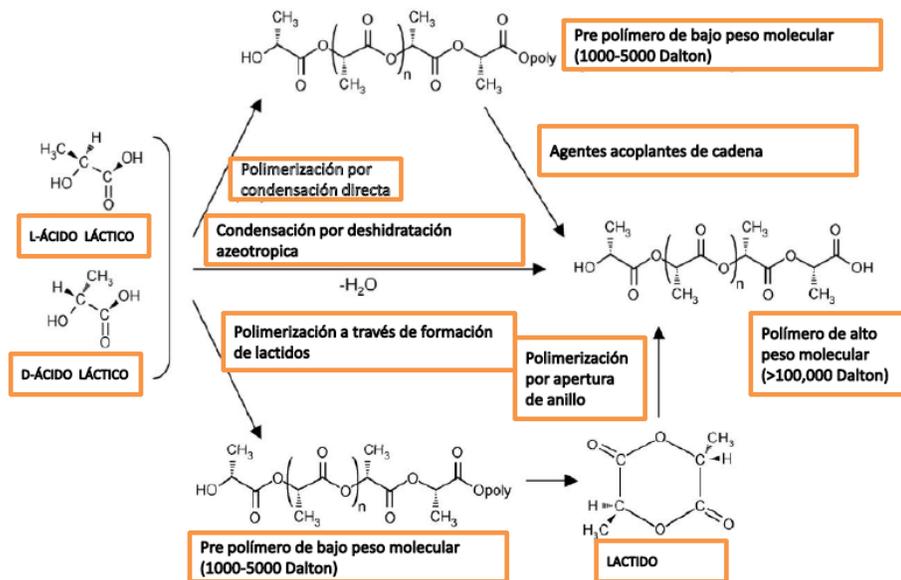


Figura 2.3. Obtención de PLA de bajo y alto peso molecular, este último por apertura de anillo[9]

En general, las resinas de PLA con alto peso molecular que se encuentran disponibles en el mercado son producidas por la vía de polimerización por apertura de anillo.

El PLA comercial es un copolímero de poli (L- ácido láctico) (PLLA) y poli (D,L-acido láctico) (PDLLA), que son obtenidos a partir de L- láctidos y D,L-láctidos respectivamente. El isómero -L constituye la fracción principal de PLA derivado de fuentes renovables[9].

Dependiendo de la composición de los isómeros L y D-L el PLA puede cristalizar en dos formas (α y β). La estructura α es más estable, tiene temperatura de fusión $T_m=185^\circ\text{C}$; la estructura β tiene $T_m=175^\circ\text{C}$. Una composición superior al 90%, en contenido, de enantiomero L, brinda la característica de semicristalinidad al material PLA. Por otro lado, la temperatura de fusión T_m , temperatura de transición vítrea T_g . y la cristalización decrecen cuando decrece el contenido del Isómero -L. Usualmente los artículos de PLA requieren resistencia térmica, estos pueden ser moldeados por inyección usando PLA que contengan menos del 1% de isómero D, es decir, una composición mayor al 99% en contenido de enantiomero L. En procesos como el termoformado, extrusión y soplo, se recomienda usar PLA de baja semicristalinidad, es decir, composición en contenido del isómero D del 4 a 8%.

Es importante conocer el valor de la capacidad térmica del PLA, ya que esta información es necesaria para hacer los cálculos de tiempo de enfriamiento en el proceso y de caudal de enfriamiento para el diseño de molde de inyección. La capacidad térmica del PLA en los

estados sólido y líquido, que van desde los 5 a 600 [K] respectivamente, $C_{p-liquido} = 120.17 + 0.076 T$ donde T es en kelvin [K], en unidades $\left[\frac{J}{K mol}\right]$

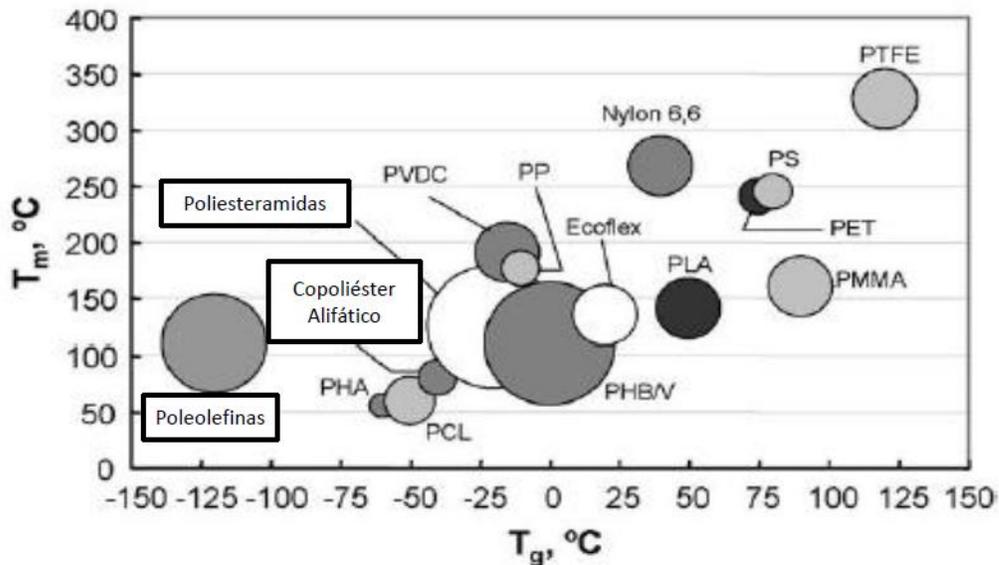


Figura 2.4. Comparativo de las temperaturas de transición vítrea y de fundido entre el PLA y otros termoplásticos [9]

La figura 2.4 compara los valores de T_g y T_m del PLA con otros termoplásticos, se muestra que el PLA tiene T_g alta con respecto a la T_g del Polipropileno (-10°C) y un valor bajo de T_m en comparación con el mismo PP (180°C). Esta información es de suma importancia para el personal encargado en la transformación de polímeros termoplásticos, ya que brinda un panorama general del comportamiento térmico del material en comparación con otros materiales, de los cuales probablemente ya se cuenta con experiencia.

Las propiedades físicas, mecánicas y de barrera del PLA son dependientes de la morfología del estado sólido y la cristalinidad. El PLA puede ser semicristalino o amorfo dependiendo de la disposición espacial de sus moléculas (estereoquímica) y su historial térmico. La cristalinidad del PLA se determina usando la técnica de Calorimetría diferencial de barrido (DSC). Esta es una técnica en la cual se obtienen los parámetros termodinámicos asociados a las transiciones de las macromoléculas inducidas por calor, mediante un termograma el cual es un registro continuo de la capacidad calorífica de cualquier macromolécula (polímero) en función de la temperatura.[9]

Las viscosidades del fundido del PLA de alto peso molecular son del orden de 5,000-10,000 [P] (500-1,000 [Pa S]) a razones de corte de 10-50 [1/S]. Para el moldeo por inyección el grado del polímero recomendado es equivalente a 100,000 [Da] y para extrusión de película de 300,000 [Da][9]

Los fundidos de PLA con alto peso molecular tienden a comportarse como un pseudoplástico, fluido No-newtoniano, ver figura 2.5, en contraste con los de bajo peso molecular (40,000 [Da]) muestran comportamiento de fluido Newtoniano; esto es, en

condiciones de razón de corte típicas de la extrusión de películas. Bajo condiciones idénticas de procesamiento, el PLA semicristalino tiende a poseer una mayor viscosidad de corte que su contraparte amorfo, además a medida que aumenta la razón de corte, las viscosidades de la masa fundida disminuyen considerablemente.

La figura 2.5 muestra, de manera esquemática, el comportamiento de la viscosidad en función de la razón de corte, los fluidos que no mantengan su viscosidad constante en función de la razón de corte impuesta se denominan fluidos no newtonianos, de estos, los que muestren un aumento en viscosidad al incrementar la razón de corte se denominan flujos dilatantes y aquellos que presenten disminución de su viscosidad al aumentar la razón de corte se llaman flujos adelgazantes.

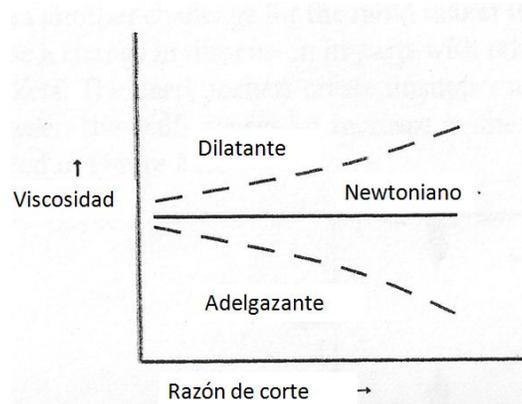


Figura 2.5. Comportamiento de la viscosidad en flujos newtonianos y no newtonianos en función de la razón de corte [2]

2.3 PROCESO DE INYECCIÓN PARA PROCESAR EL PLA

Antes del procesamiento del PLA, este debe ser secado para prevenir una hidrólisis excesiva (caída de peso molecular), lo cual puede comprometer las propiedades físicas del PLA. Típicamente el polímero se seca por debajo de 100 ppm (0.01% w/w) [9], pero, Nature Works LLC, recomienda que el material sea secado a 250 ppm (0.025% w/w) antes de ser plastificado.[9]

El secado del PLA cobra importancia en el rango de 80-100°C. El tiempo de secado es dependiente de la temperatura a la cual se lleve a cabo este. Los pellets de PLA comercial, normalmente tienen una morfología molecular semicristalina, lo cual permite un secado a alta temperatura, hasta 100 [°C], para reducir los tiempos de secado. En contraste, los pellets de PLA con morfología molecular amorfa deben secarse por debajo de su Tg (60 °C) para prevenir que los pellets se adhieran unos con otros; en este caso, se puede usar un secado mediante aire caliente, por debajo de los 40°C, para que el aire caliente circule por los pellets y remueva la humedad, después, este aire es enfriado y la humedad que haya quedado atrapada es condensada, para después desecar el aire y hacerlo pasar de nuevo por los pellets. En la tabla 2.2 se muestra los tiempos de secado para los pellets amorfos y semicristalino en función del tiempo.

Tabla 2.2. Tiempos de secado para pellets de PLA, flujo de aire $0.016 \left[\frac{m^3}{\min Kg} \right]$ [9]

Temperatura de secado [°C]	Tiempo de secado [h]
Pellets amorfos	4.0
40	
Pellets semicristalino	
40	4.3
50	3.9
60	3.3
70	2.1
80	1.3
100	0.6

Posterior al secado del material se procede a describir el proceso de inyección. Desde que se patentó la máquina de tornillo de desplazamiento recíproco en 1956 [10]. En la actualidad es prácticamente imposible hacer algo sin partes moldeadas por inyección. Se utilizan en interiores de automóviles, cubiertas de dispositivos electrónicos, artículos para el hogar, equipos médicos, discos compactos e incluso casas para perros. El moldeo por inyección se utiliza para fabricar pellets, juguetes, cajones, y baldes, contenedores para alimentos de paredes delgadas, tazas de promoción para bebidas, y tapas de botellas de leche.

El moldeo por inyección es un proceso en el que un polímero se calienta hasta un estado altamente plástico y se hace fluir bajo alta presión dentro de la cavidad de un molde donde solidifica.[11], el equipo que se encarga de la inyección del material termoplástico se denomina máquina de inyección. Como muestra la figura 2.6, Una máquina de inyección, de husillo desplazable axialmente, se compone principalmente de:

- ✓ Unidad de inyección: contiene al motor hidráulico, tolva de alimentación, garganta alimentación, barril de inyección, calefactores, husillo desplazable y boquilla de inyección
- ✓ Molde: se explicará más adelante.
- ✓ Unidad de cierre: Abre y cierra el molde aplicando en esta última fase la fuerza necesaria para mantener el molde cerrado durante la inyección
- ✓ Unidad de control: Se maneja en su totalidad las variables del proceso, excepto la presión posterior que se controla con un manómetro en la unidad de inyección.

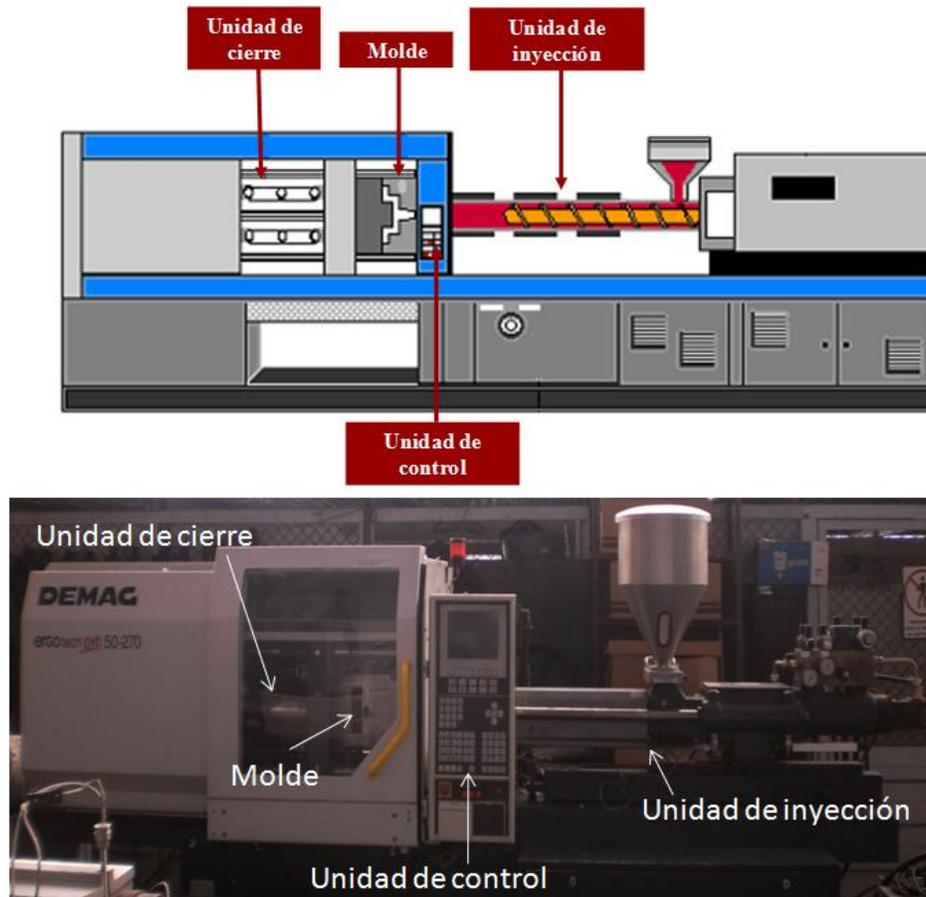


Figura 2.6. Esquema e imagen de una máquina de inyección [12]

El proceso es discontinuo, y de carácter cíclico, por lo tanto, la base fundamental para el control del proceso se denomina ciclo de inyección.[11] El ciclo de inyección en sus etapas principales se visualiza en la figura 2.7. En la posición a) el molde de inyección cierra, la boquilla del cilindro se acopla al bebedero del molde, en b) el material plastificado se inyecta en la cavidad del molde por acción del husillo que es conducido axialmente por un cilindro hidráulico.

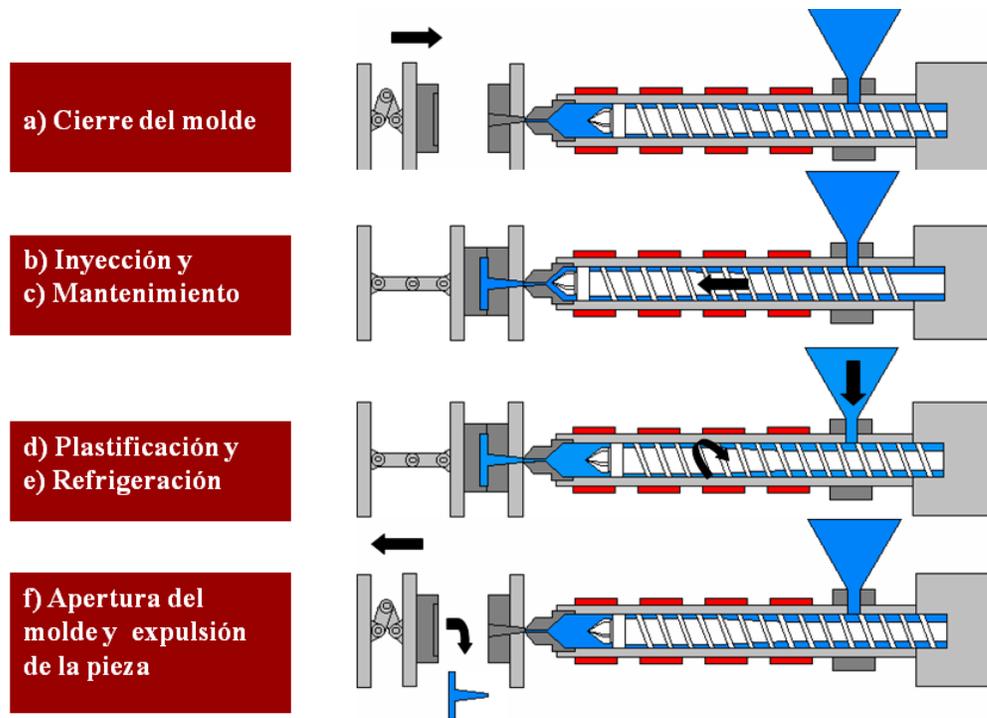


Figura 2.7. Ciclo de inyección por etapas[12]

Durante la solidificación del material se lleva a cabo un llenado adicional del molde debido a la presión de sostenimiento[2], esta etapa también se le denomina c) mantenimiento. d) El material se plastifica por la rotación del husillo y por acción de los calentadores exteriores. El husillo es accionado rotacionalmente sobre su eje por el motor hidráulico, figura 2.8 de la máquina.



Figura 2.8 Ubicación del motor hidráulico en la máquina de inyección.

La masa acumulada en la parte delantera del cilindro desplaza el husillo hacia la derecha de la fig. 2.7. Mediante un indicador de posición del husillo o una pantalla indicadora, figura 2.09 y 2.10 respectivamente, se controla la cantidad de material a inyectar.

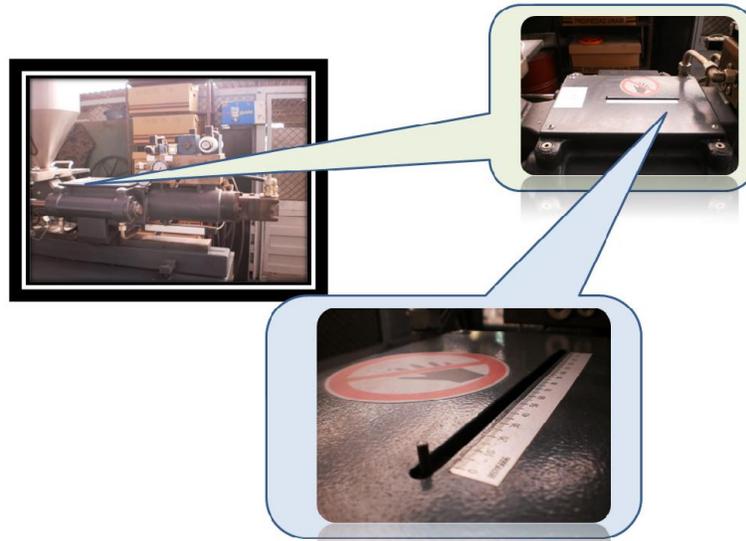


Figura 2.9. Ubicación del indicador de posición del husillo en la máquina de inyección



Figura 2.10. Unidad de control, manejo de variables por ejemplo control de material a inyectar

En esta etapa la cavidad del molde se encuentra totalmente llena de material plastificado con fluidez controlada. A partir de este instante, se inicia la solidificación del material, la etapa de e) refrigeración, considera a la pieza en enfriamiento bajo la presión del fluido acumulado en el cilindro o barril. El Laboratorio de Procesamiento de Plásticos (LPP) cuenta con equipo para refrigeración de molde, figura 2.11, el equipo permite mantener constante la temperatura en el molde, con lo cual se puede establecer un tiempo de enfriamiento constante.



Figura 2.11 Equipo de refrigeración para molde y garganta de alimentación.

Concluido el tiempo de enfriamiento, f) el molde se abre accionado por la unidad de cierre para expulsar el artículo acabado. La porción del material necesaria para el siguiente ciclo de inyección, se acumula en la parte delantera del cilindro de inyección. Al cerrarse el molde comienza el nuevo ciclo.

El ciclo de inyección toma en cuenta el tiempo que dura cada una de sus etapas, la figura 2.12. Muestra la proporción en tiempo que poseen las etapas del ciclo de inyección, la participación adecuada del molde de inyección en el ciclo es fundamental para la obtención de piezas que cumplan con los requisitos establecidos por el proceso en sí y el cliente, ya que el molde tiene alojado en su interior al material desde la fase de inyección hasta que la pieza es expulsada. Es preciso señalar que, el tiempo de refrigeración empieza desde que el material plastificado tiene contacto con el bebedero del molde.

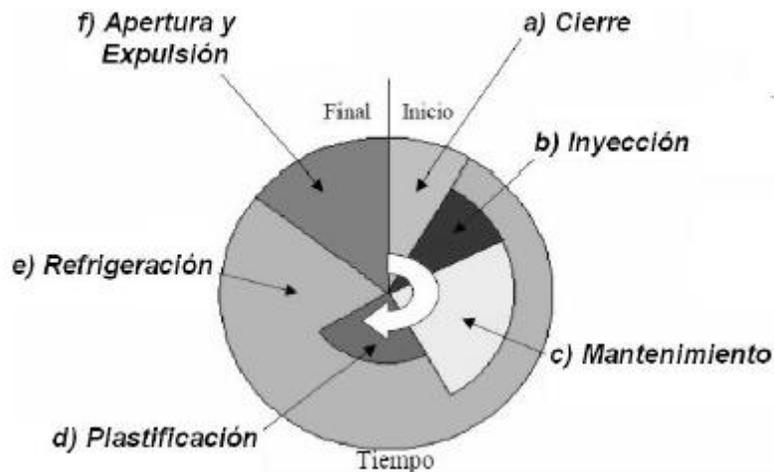


Figura 2.12 .Ciclo de inyección por tiempo[12]

El conocer las etapas el ciclo de inyección permite establecer el tiempo de producción de las piezas, esto impacta en el costo de las piezas y en su calidad. Pero, la calidad no sólo depende del ciclo de inyección, también depende de otros factores tales como el diseño y manufactura del molde

El ciclo de inyección para el PLA se explica de la siguiente manera. Durante la inyección, el polímero primero se somete a inyección isotérmica dentro de la cavidad, con esto la presión aumenta haciendo que el polímero sea inyectado y empaquetado por la presión de mantenimiento (trazo [a-b]), figura 2.13.

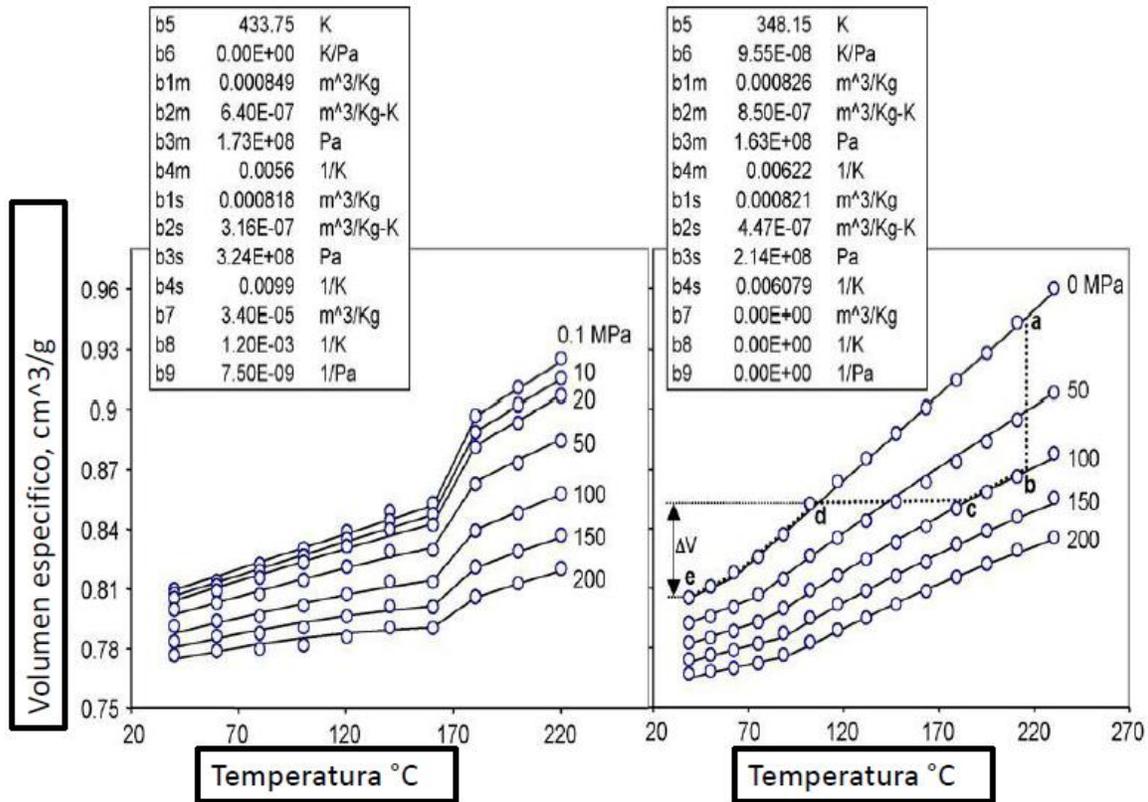


Figura 2.13. Diagramas PVT y sucesión de eventos durante el proceso de inyección del PLA. [9]

El polímero se somete a enfriamiento isobárico en la fase de mantenimiento (trazo b-c), seguido por un enfriamiento isocórico, cuando el polímero enfría por debajo del punto de solidificación, las compuertas o puntos de inyección solidifican y la presión dentro de las cavidades cae a presión atmosférica (trazo c-d), la pieza moldeada sigue enfriando isobáricamente a temperatura ambiente (trazo d-e). El cambio en el volumen específico durante el enfriamiento final (trazo d-e) dicta la exención o contracción de la parte. La presión de mantenimiento y temperatura juegan un papel importante en la determinación de cuanto contraerá el producto.

Durante el enfriamiento el producto se contrae, siendo la contracción en piezas plásticas una relación del volumen del plástico en estado fundido y el volumen del plástico en el estado final, cuando es aplicado al moldeo, se expresa como la relación de la dimensión del molde y su correspondiente dimensión en la parte moldeada, la contracción es expresada en unidades de longitud sobre unidades de longitud [in/in] o [mm/mm] o en porcentaje, como se muestra en la figura 2.14.

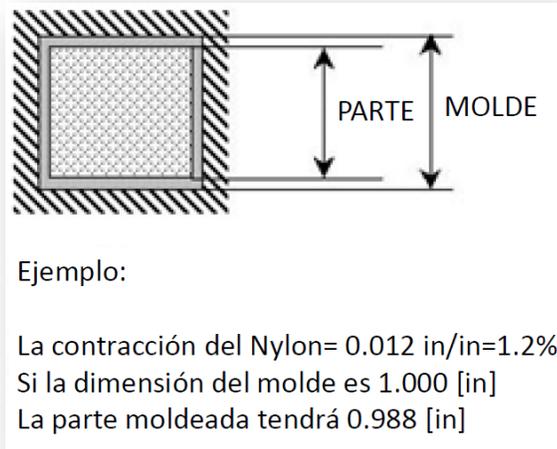


Figura 2.14 Ejemplo de la contracción de un material semicristalino (nylon). Así como se contrae la pieza de nylon, el PLA, tiene una contracción de 0.004 [in/in] +/- 0.001 dando una diferencia con el nylon de 66.66 % [2]

En caso de materiales semicristalinos, la contracción no es la misma en dirección transversal al flujo que la paralela al flujo de inyección, este tipo de comportamiento para estos materiales es llamado anisotropía. Figura 2.15 [14]

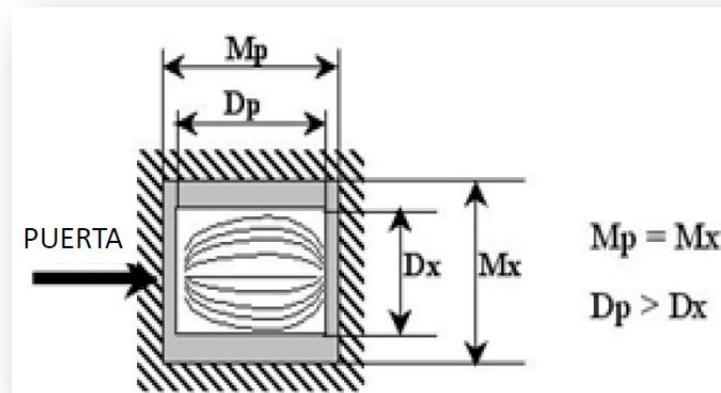


Figura 2.15 Contracción de un material anisotrópico [2]

Para el caso de materiales amorfos, la contracción es la misma en dirección del flujo de inyección y dirección transversal de este [13].

La relación PVT puede modelarse matemáticamente utilizando la modificación de dos dominios, modelo Tait. Este modelo usado para un análisis de elemento finito con el cual se puede predecir el comportamiento de la contracción del moldeo por inyección.

Por otro lado, el perfil de temperaturas es un requisito indispensable en el procesamiento por inyección de cualquier termo plástico, durante la plastificación, dicho perfil tiene la función de calentar el barril de inyección, el cual, transmitirá por conducción térmica la energía de los calefactores eléctricos a la materia prima.

El perfil de temperaturas se divide en tres zonas, alimentación, compresión y dosificación, la zona de alimentación está compuesta por la garganta de alimentación y la primera zona del barril de inyección, las temperaturas en esta zona son inferiores a las regiones consecuentes, específicamente en la garganta la temperatura debe ser tal que se evite el reblandecimiento y acumulamiento de la materia impidiendo el acceso continuo al barril[12].

En la zona de alimentación la temperatura de los calefactores debe permitir el calentamiento y ablandamiento de la materia prima, así como, también el arrastre de los gránulos (presentación de la materia prima) hacia la siguiente región[12].

La región de compresión tiene la finalidad de fundir los gránulos, mezclarlos entre si y formar una masa homogénea; lo anterior, mediante el aumento de la temperatura en los calefactores eléctricos, el incremento en el diámetro del husillo y el efecto del esfuerzo cortante que imprime el husillo con sus filetes al material que tiende a adherirse a la pared del barril[12].

La zona de dosificación provee y mantiene al material condiciones de fluidez y temperatura necesarias para el ingreso de la resina plastificada al molde de inyección[12].

La plastificación es la transformación de la materia prima desde su presentación en gránulos o pellets a flujo viscoso, en la máquina de inyección la plastificación corresponde al movimiento rotatorio y axial del husillo, hacia la derecha de la figura 2.7, el movimiento axial es amortiguado por la presión hidráulica conocida como presión posterior.

En resumen, los parámetros teóricos encontrados en literatura y hoja técnica del material PLA enfocados al moldeo por Inyección se muestran en la tabla 2.3. La hoja técnica corresponde al material ingeo® Biopolimero 3251D de Nature Works LLC, material que será usado en la experimentación subsecuente.

Tabla 2.3. Resumen de los parámetros teóricos de procesamiento de PLA[9]

Parámetro	Valor
Humedad del material [ppm]	100
Velocidad de inyección	Media- alta
Velocidad angular de husillo[RPM]	100-200
Temperaturas por zona de proceso[°C]	
Garganta	20
Alimentación	166-177
Compresión	182-193
Dosificación	188-205
Boquilla	188-205
Molde	25
Fundido	188-210
Presión Posterior [psi]	50-100
Contracción en molde [in/in]	0.004 +/- 0.001

2.4 MOLDE DE INYECCION

El molde es la herramienta especial del moldeo por inyección, se diseña y fabrica a la medida de la pieza a producir. Cuando termina la corrida de producción de la parte, el molde se reemplaza por otro nuevo para la parte siguiente[11].

Tareas que debe cumplir un molde de inyección[14]:

- Alojamiento y distribución del fundido.
- Formación y enfriamiento del material.
- Solidificar al fundido
- Expulsar el material de la cavidad una vez solidificado

Funciones mecánicas del molde de inyección[14]:

- Soporte de cargas mecánicas y de montaje
- Transmisión de movimiento
- Guiar sus componentes

Para llevar a cabo estas tareas y funciones se emplea[14]:

- Bebedero y sistema de canal
- Cavidad de ventilación o venteo de cavidad
- Sistema intercambiador de calor
- Sistema de expulsión
- Sistemas de guía y localización
- Sistemas de soporte de cargas y de montaje
- Sistemas de transmisión de movimiento

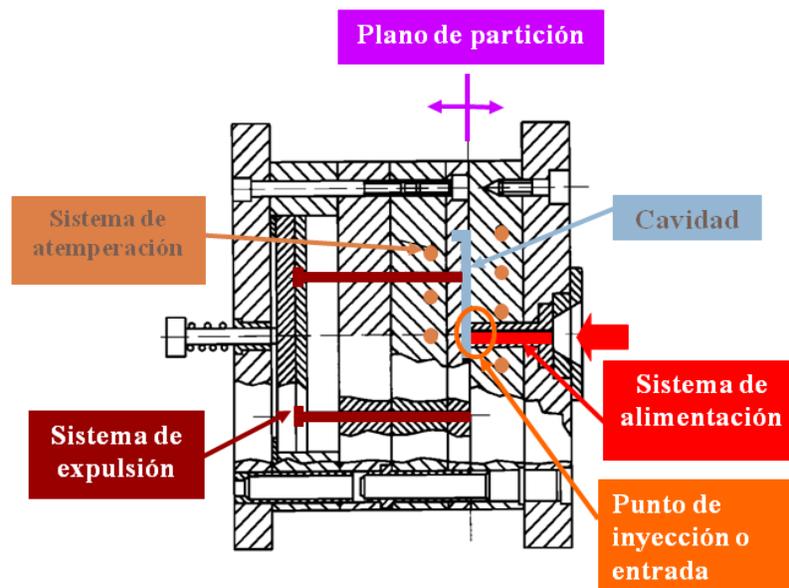


Figura 2.16. Sistemas de un molde de inyección para materiales termoplásticos[14]

Para describir las partes que componen un molde de inyección es conveniente partir de una clasificación que facilite la ubicación de los componentes del molde según se requiera.

Dependiendo el material a procesar los moldes para plásticos se clasifican en[14]:

- Moldes de inyección para termoplásticos.
- Moldes para termoestables.
- Moldes para elastómeros
- Moldes para estructuras de espuma

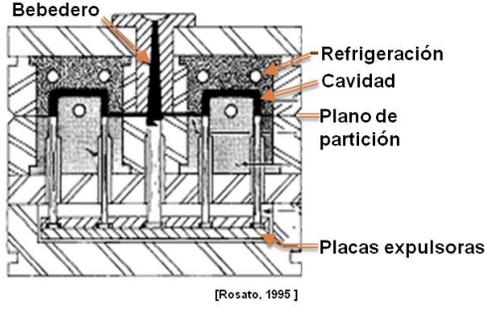
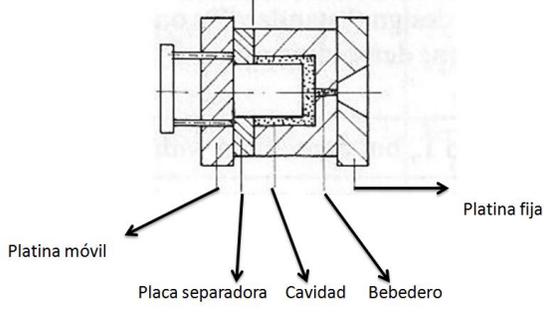
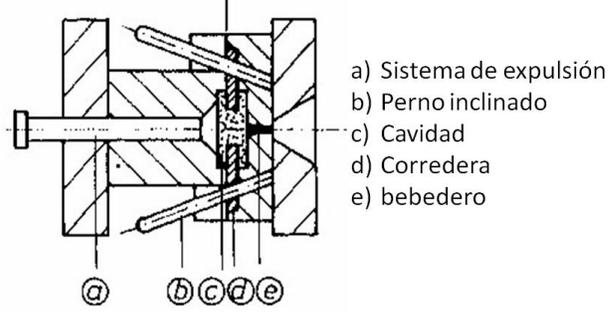
Sin embargo, la clasificación puede ser diferente, dependiendo del criterio que puede estar basado en otras funciones.

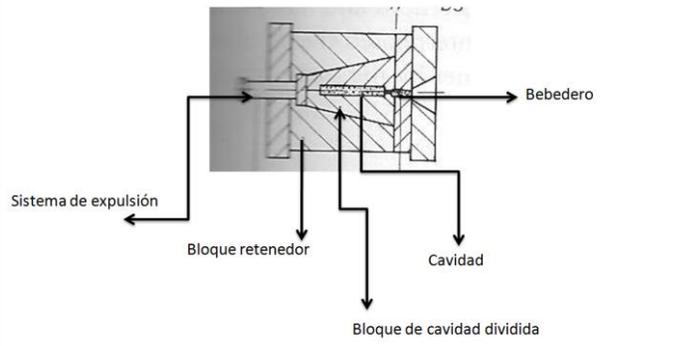
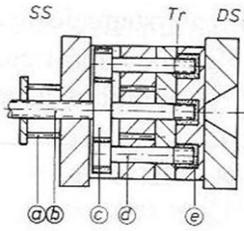
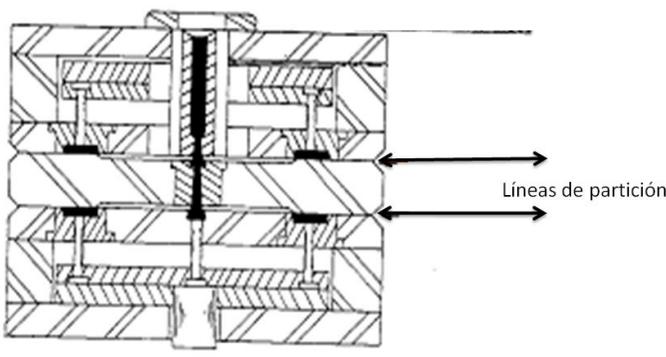
Tabla 2.4. Clasificación de moldes de inyección[14]

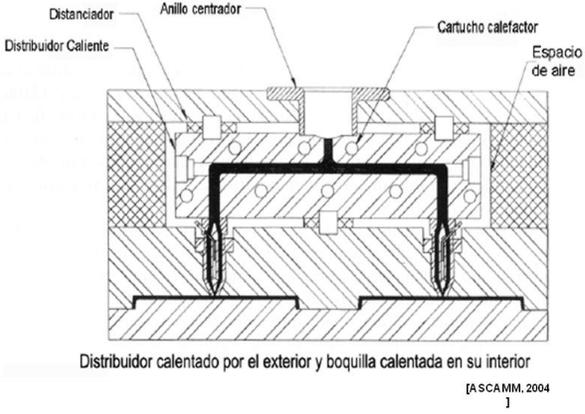
Características de Distinción	Versión de diseño	Designación de moldes
Número de líneas de partición, Siendo esta la línea formada por las superficies del material moldeado y las superficies de las cavidades.	Dos placas Tres placas Placa separadora (dos líneas de partición)	Molde estándar Molde diseñado para arranque de colada Molde con separador o apilador
Sistema de expulsión	Correderas Cavidad dividida Dispositivo de desenrosque Placa separadora	Molde deslizante Molde de cavidad dividida Molde con desenrosque Molde con separador
Sistema de inyección	Colada caliente Colada aislada	Molde de colada caliente Molde de colada aislada
Transmisión de fuerzas	Cavidad dividida Pernos Guía	Molde de cavidad dividida Molde estándar

A partir de la designación de los moldes, el criterio que define a cada molde se observa en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Designación y criterio de definición de moldes de inyección[14]

Designación	Criterio
<p>1.- Molde estándar</p>  <p>[Rosato, 1995]</p>	<p>Diseño simplificado (estándar), cuenta con una línea de partición, movimiento unidireccional de apertura, expulsión por gravedad con pernos expulsores</p>
<p>2.- Molde con separador</p> 	<p>Similar a 1, pero con expulsión mediante placa separadora.</p>
<p>3.- Molde deslizante</p>  <p>a) Sistema de expulsión b) Perno inclinado c) Cavidad d) Corredera e) bebedero</p>	<p>Una línea de partición, movimiento de apertura en dirección de inyección y transversal, con corredera actuada por perno o leva. Una corredera es un elemento que forma parte de una cavidad, en el molde, y es capaz de deslizarse por acción de un perno inclinado u otro mecanismo, con el fin de dejar libre la pieza moldeada para su expulsión.</p>
<p>4.- Molde diseñado para corte de moldeo</p>	<p>Similar a 1, pero se corta la colada del moldeo, mediante una placa adicional que se mueve transversalmente.</p>
<p>5.- Molde de cavidad dividida</p>	<p>Una línea de partición, movimiento de apertura en dirección de inyección y transversal, las mitades de las cavidades deslizan en planos</p>

	<p>inclinados y pueden resistir fuerzas laterales.</p>
<p>6.- Molde con desenrosque</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Sistema de expulsión b) Husillo c) Engrane d) Corazón e) Cavity 	<p>Movimiento rotacional para la expulsión automática hecha por una rosca actuada mecánicamente.</p>
<p>7.- Molde diseñado para arranque de moldeado</p>	<p>Dos líneas de partición para desmoldar la colada o vela y el moldeado, entendiéndose moldeado como un termino que se refiere al material dentro del molde que adquiere la forma de la cavidad que lo contiene. Es así que la colada y el moldeado son separados después de haber sido desgarrados.</p>
<p>8.- Molde con apilamiento</p> 	<p>Las placas de las cavidades apiladas con varias líneas de partición.</p>
<p>9.- Colada aislada</p>	<p>Dos líneas de partición; con sistema no convencional de bebedero, canales con amplia sección</p>

	<p>transversal que permiten la formación de un corazón caliente aislado por el material que lo envuelve.</p>
<p>10.- Molde de canal caliente</p> 	<p>En el bebedero se coloca un calentador eléctrico. Este sistema reduce la merma por colada dejando disponible el material como si fuese una extensión de la boquilla del inyector.</p>
<p>11.- Moldes especiales</p>	<p>Son la combinación de 2 a 10. Moldes con requerimientos especiales que no permiten una simple solución.</p>

A continuación se presenta la descripción de las partes que componen un molde de inyección estándar y deslizante para procesar polímeros termoplásticos.

Sistema de canales

El sistema de canales hace la conexión del material plastificado entre el barril o cañón de inyección y las cavidades del molde, usualmente los elementos de este sistema para un molde de inyección con cavidades múltiples se presenta en la figura 2.17.

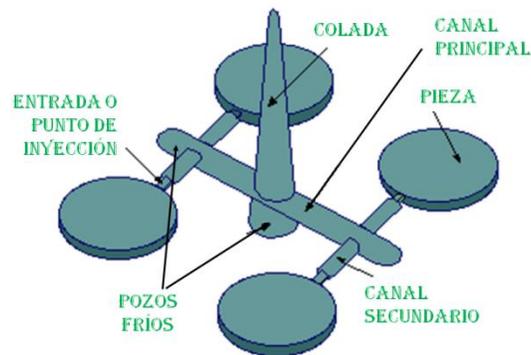


Figura 2.17 Sistema de canales con sus partes principales[14]

Las partes de la figura 2.17 se enlistan y describen a continuación[14]:

- ✚ Colada: Recibe y guía el material desde el barril de inyección a través de las líneas de partición.
- ✚ Bebedero: Es el casquillo que recubre la colada y sirve de acoplamiento entre la boquilla del barril de inyección y el molde de inyección.
- ✚ Canal: Es la comunicación entre la colada y la cavidad del molde mediante la compuerta o punto de inyección, el propósito principal del canal es la distribución de material y mantener llena la o las cavidades, según sea el caso, con las mismas condiciones de presión y temperatura, al mismo tiempo.
- ✚ Compuerta, entrada o punto de inyección: Es la transición del canal a la cavidad, sirve para una separación fácil y limpia de la pieza moldeada, sus dimensiones dependen del material termoplástico, el tipo de pieza y la estética deseada en la pieza.
- ✚ Pozos fríos: Cavidades que funcionan como mazarota evitando que el material solidifique por el choque térmico con el molde y el canal sea obstruido.

En resumen las partes que componen un molde de inyección se muestran en la figura 2.18[14]

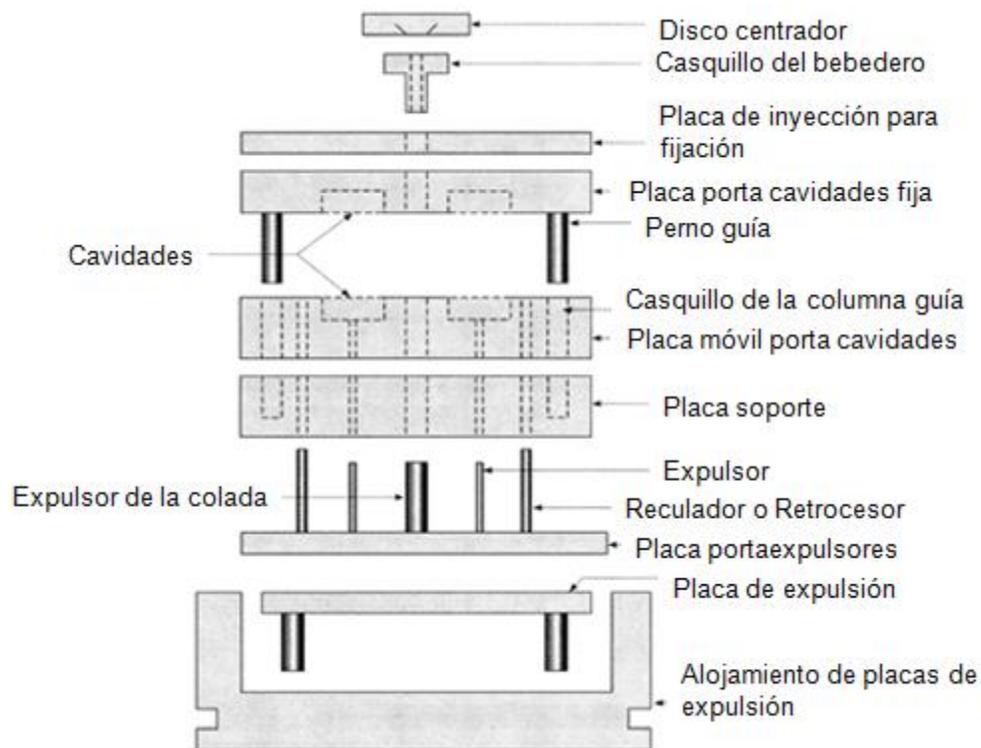


Figura 2.18. Componentes básicos de un molde de inyección[14]

De la figura 2.18 se extraen quince componentes básicos los cuales se encuentran en la tabla 2.6, en ella se expresa la función que realizan dentro del molde.

Tabla 2.6. Componentes y función de un molde estándar[14].

Parte	Función
Disco centrador	Alineación axial del molde con la boquilla de inyección
Placa de inyección para fijación	Soporte y fijación a la máquina de inyección
Placa porta cavidades fija	Aloja cavidades del lado fijo, también conocido como lado de inyección
Pernos guía	Alineación de las placas de cavidades al cerrar, evita el desfase de las cavidades
Casquillos-guía	Aloja pernos guía, evita el desgaste de las placas y provee un deslizamiento correcto
Placa móvil porta cavidades	Aloja cavidades del lado móvil, también conocido como lado de expulsión.
Placas de soporte	Delimitación de la carrera de las placas de expulsión en su retorno, es soporte de la placa móvil porta cavidades
Expulsor colada	Expulsar a la colada con su respectivo pozo frío
Expulsor	Expulsar la pieza moldeada
Reculador o retrocesor	Colocar las placas de expulsión en su posición inicial después de haberse desplazado para expulsar, puede ser un perno más largo que los expulsores, un resorte o el perno de expulsión principal que conecta el sistema hidráulico de la máquina con las placas porta expulsores, en acoplamiento mediante roscado, ya que de manera general, no existe dicho acoplamiento y el perno principal solo empuja la placa porta expulsores.
Placa porta expulsores	Alojar y desplazar expulsores
Placa de expulsión	Desplazar la placa porta expulsores
Alojamiento de placas de expulsión	Alojar placas de expulsión permitiendo la visualización de su posición.

Fijación a la máquina

Mediante el uso de grapas, figura 2.19, el molde, se sujeta de sus placas, fija y móvil, a las platinas figura 2.20.

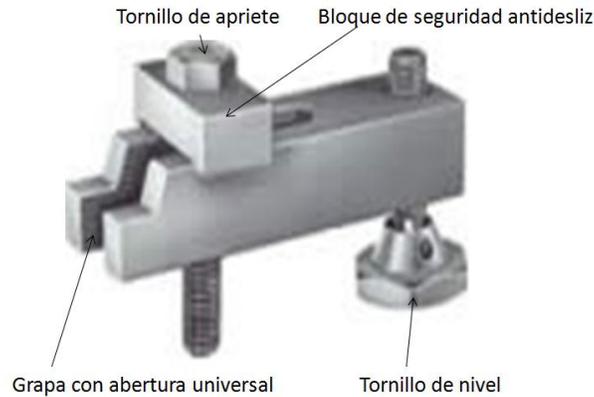


Figura 2.19. Grapa para fijación[14]

En este caso figura 2.19, la grapa de fijación se compone de cuatro elementos, tornillo de apriete, bloque de seguridad anti deslice, tornillo de nivel y la grapa, en sí, con abertura universal. Las piezas varían según el fabricante y el tipo de molde.[14] En la figura 2.20 se muestra la interacción de las platinas y el molde mediante las grapas de fijación.

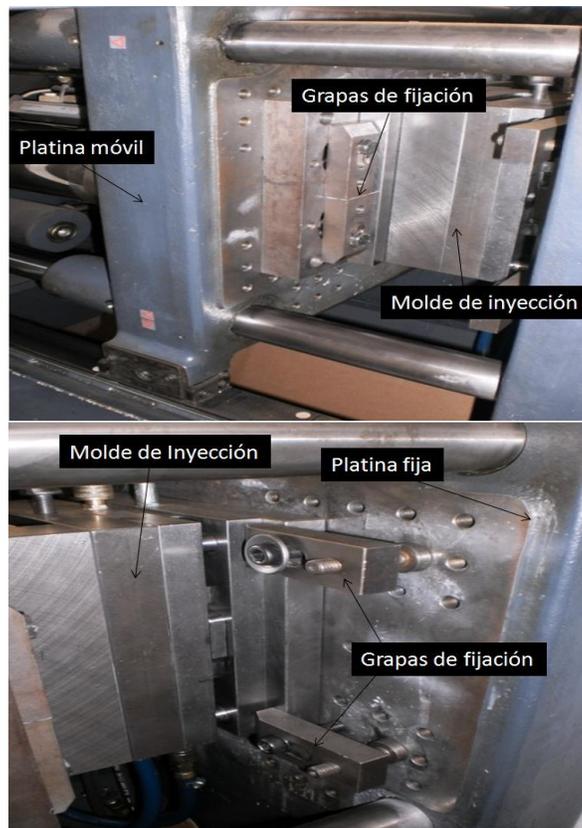


Figura 2.20. Platinas móvil (arriba) y fija (abajo) de la máquina de inyección.

En la figura 2.20 se muestra el empleo de las grapas para sujeción de un molde de inyección. En este caso las grapas se adecuan a la forma de la placa de sujeción móvil, mientras las que sujetan la placa de inyección se colocan de manera convencional. También

se puede observar los elementos de la grapa, tonillo de apriete, tornillo de nivel y como bloque anti deslice el desgaste inducido en el cuerpo de la abertura universal de la grapa.

Otros sistemas de fijación se realizan mediante sistemas hidráulicos o platinas magnéticas para cambios de molde automáticos, estos ayudan a reducir los tiempos de cambio de molde como ayuda para el operador[14].

INSERTOS

En el contexto de moldes de inyección los insertos son elementos que se fijan en las placas porta cavidades, ya sea móvil o fija, y dan cuerpo a la cavidad donde será moldeado el material, también, un inserto puede ser una protuberancia (macho). La figura 2.21 muestra el uso esquemático de los insertos del molde de inyección.

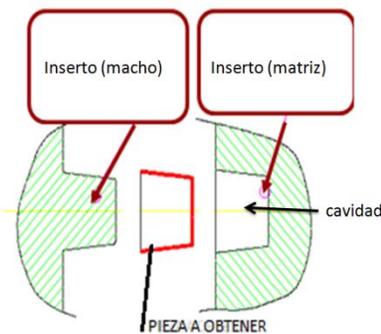


Figura 2.21. Ejemplo de insertos hembra, macho y la pieza a obtener[12]

Los insertos son elementos que permiten el moldeo de geometrías complicadas, por lo tanto son maquinados por separado de las demás piezas del molde. La aplicación de insertos macho implica evitar el mecanizado una placadejando solo la protuberancia, lo cual impacta en el costo total del molde[14].

SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE TEMPERATURA

Dentro del molde de inyección se da un intercambio de calor entre la masa del fundido (temperatura del fundido) y las paredes de la cavidad del molde (temperatura del molde) hasta la temperatura de expulsión. El sistema de acondicionamiento de temperatura o de intercambio de calor es fundamental en el desempeño económico del molde de inyección, ya que el intercambio de calor rápido propicia un tiempo de refrigeración menor que reduce el tiempo de ciclo de inyección; por esa razón, es necesario agregar canales de refrigeración o calefacción que propicien las condiciones óptimas de transferencia de calor[14].

En la figura 2.22 se muestra el flujo de calor en un molde de inyección cuya descripción es la siguiente:

- Región de enfriamiento.
- Región de enfriamiento o calentamiento.
- $\dot{Q}_E =$ Intercambio de calor con el medio ambiente.
- $\dot{Q}_P =$ Intercambio de calor con el material moldeado.
- $\dot{Q}_C =$ Intercambio de calor con el refrigerante.

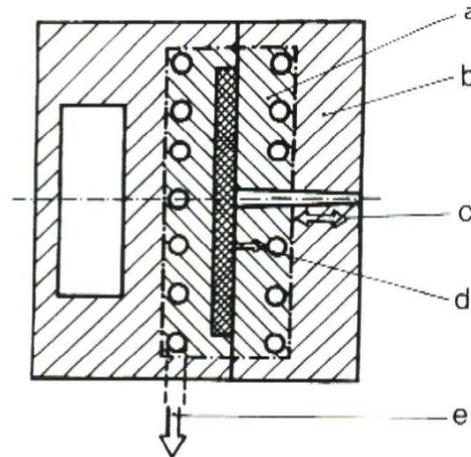


Figura 2.22. Flujo de calor en un molde de inyección[14]

Para un correcto sistema de acondicionamiento de temperatura, es necesario conocer las variables que intervienen en la transferencia de calor del molde de inyección. La tabla 2.7 muestra las variables con sus criterios característicos de aplicación de manera resumida[14].

Tabla 2.7. Variables del sistema de acondicionamiento de temperatura.

Variable	Criterio
Tiempo de enfriamiento	Mínimo tiempo de enfriamiento a la temperatura de desmoldeo
Balace flujo de calor	Flujo de refrigerante requerido
Velocidad de flujo de refrigerante	Temperatura uniforme a lo largo de la línea de refrigeración
Diámetro de los canales	Flujo turbulento
Posición de los canales	Flujo de calor Uniformidad de temperaturas
Caída de presión	Selección de diversos sistemas Modificación del diámetro o velocidad

VENTEO

Durante el llenado de las cavidades el material desplaza el aire atrapado en las cavidades, si el aire no tiene salida, es comprimido y en combinación con los vapores del material que en esencia es un hidrocarburo, se lleva a cabo una combustión, conocida como efecto diesel. Se recomienda colocar venteos, en las cavidades frente a las entradas o puntos de inyección.[12]

El efecto diesel no es deseable pues los productos de la combustión son corrosivos para el material del molde, en la pieza inyectada se manifiesta como puntos negros (ver figura 2.23)[13].



Figura 2.23.Efecto diesel en piezas de plástico[12].

Existen moldes que no necesitan venteo, esto es porque el aire tiene suficiente espacio para escapar por los barrenos de los expulsores y por la línea de partición; esto es válido para rugosidades en la línea de partición obtenida por herramientas de desbaste de grano grueso (tamaño de grano 240) según [14] existen dos tipos de venteo el pasivo y el activo.

- El venteo pasivo consiste en el maquinado de canales de comunicación de aire entre la cavidad y el exterior del molde. Este canal según el material debe tener cierta profundidad, en la tabla 2.10 se proponen profundidades de venteo en función de ciertos materiales.

Tabla 2.8. Profundidad del venteo

MATERIAL	PROFUNDIDAD [mm]
Termoplástico semicristalino PP, PA, GF-PA, POM, PE	0.015
Termoplástico amorfo PS, ABS, PC, PMMA, PLA	0.03
Materiales extremadamente fluidos	0.003

- El venteo activo consiste en la aplicación de sistemas de extracción de aire en las cavidades por medio de bombas de vacío. Se recomienda el venteo activo para procesos de inyección de micro estructuras, inyección de materiales con viscosidad extremadamente baja.

Finalmente, habiendo considerado los tópicos anteriores, un proyecto de molde es una tarea ardua no trivial, que incluye a mucha gente, es decir, una actividad multidisciplinaria, por ejemplo, el desempeño efectivo de un molde de inyección se comprueba mediante una reunión que mantienen el diseñador del molde, el fabricante de él, el proveedor de la resina polimérica, el operador de la máquina de inyección y el cliente, estos actores están presentes frente a la máquina de inyección deliberando en la conformidad de las piezas requeridas

2.5 MOLDEO CIENTIFICO

El moldeo científico es un método aplicado al proceso de inyección de plásticos que permite convertir en parámetros las variables que intervienen en dicho proceso, el objetivo es hacer competitivo ,a nivel internacional, el proceso y servicio de los transformadores de plásticos [2] .

El moldeo científico fue desarrollado por John Bozzelli egresado del Colegio de Marietta (BS) y de la Universidad de Ohio (MS) con veinte años de trabajo en Dow Plastics le brindan gran experiencia en síntesis de polímeros, desarrollo, producción y procesamiento; [15].

Según“ Frontier Injection Molding and material Technologies, Inc.” (FIMMTECH) [2], El moldeo científico es, entonces, una herramienta que permitirá de manera lógica y ordenada la conmutación de las variables a parámetros del proceso; para ello se presenta a continuación, el método conocido como moldeo científico.

El moldeo científico consta de seis etapas en las que se establecen los parámetros ideales del proceso de inyección. Las etapas que el moldeo científico comprende, se enlistan a continuación[2]

1. Obtención de la curva de viscosidad en el moldeo por inyección
2. Obtención del balance de cavidades del molde
3. Determinación de la caída de presión
4. Obtención de la presión de mantenimiento y ventana de proceso
5. Determinación de la solidificación de la compuerta
6. Determinación del tiempo de enfriamiento para moldeo por inyección

Obtención de la curva de Viscosidad en el Moldeo por Inyección

Todos los plásticos tienen un comportamiento no newtoniano, ya que su viscosidad no permanece constante en un rango de velocidades de corte. El comportamiento reológico de los plásticos es una combinación de comportamientos no newtoniano y newtoniano, la figura 2.24 muestra este comportamiento tanto de la viscosidad como del esfuerzo cortante.

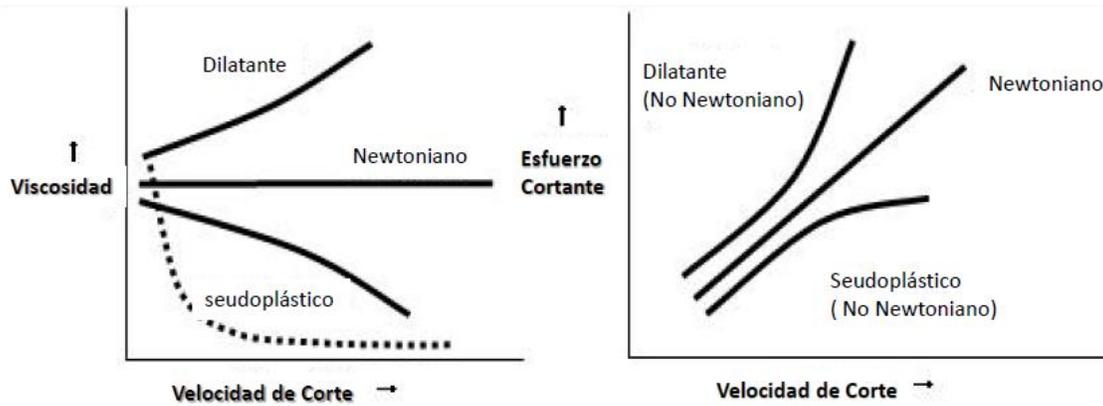


Figura [2.24].Comportamiento de viscosidad y esfuerzo cortante en fluidos newtonianos y no newtonianos[2].

Con una baja razón de corte, el plástico se comporta como no newtoniano pero al incrementar la razón de corte, el plástico tiende a mostrar un comportamiento newtoniano. Esto es porque al incrementar la velocidad de corte las moléculas poliméricas empiezan a desenredarse y se empiezan a alinear en dirección del flujo; como se indica en la figura 2.25

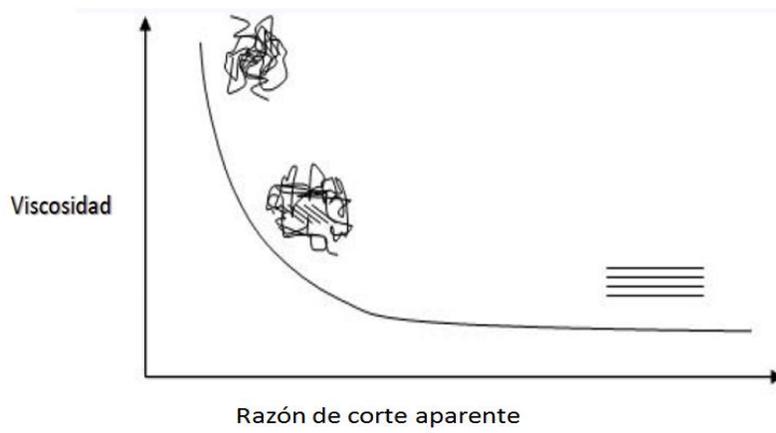


Figura 2.25 Alineación de las cadenas poliméricas en presencia del aumento de la velocidad de corte[2].

Durante el moldeo por inyección, el material presenta esfuerzos cortantes en la etapa de llenado de la cavidad, en velocidades bajas, pequeñas variaciones en la velocidad de corte pueden provocar grandes cambios en la viscosidad, lo cual se puede ver reflejado en inconsistencias del llenado de la cavidad entre disparos. Por lo tanto es importante encontrar la región de la curva y la velocidad de inyección donde el plástico tiene comportamiento de fluido newtoniano[2]

Obtención del Balance de cavidades del molde.

Cuando el plástico fluye por los canales de la cavidad, el fundido posee temperatura, presión y velocidad, variables dependientes del tiempo, lo que significa que el valor de cada una de las variables va a cambiar dentro del corto lapso de tiempo en el que el plástico

fluye hasta que alcanza el final del llenado. La calidad final de la pieza moldeada es función de cada una de estas variables, en otras palabras las dimensiones y calidad final de la pieza depende de la temperatura, presión y velocidad de inyección del plástico mientras se llena la cavidad.

Considerando dos cavidades de idénticas condiciones en el mismo molde, que darán forma a dos piezas idénticas, si las dos cavidades no llenarán en condiciones similares, las dos partes serían diferentes, por eso es imperativo que el flujo en las dos cavidades sea balanceado, está demostrado que el llenado de cavidades bajo las mismas condiciones resulta en la manufactura de piezas idénticas [2].

Determinación de la caída de presión

El plástico fluye a través de diferentes secciones de la máquina y del molde, debido a los efectos de arrastre y fricción el flujo pierde presión en la sección frontal, adicionalmente, el plástico que entra en contacto con las paredes del molde empieza a enfriar incrementando la viscosidad del plástico requiriendo presión adicional para empujar el plástico. Las capas del plástico que se van formando en las paredes del molde reducen la sección transversal del flujo del plástico dando como resultado una caída de presión. La máquina de inyección está limitada a una máxima presión disponible que empujara al husillo proveyendo cierta velocidad de inyección. El proceso está entonces limitado por la máquina, si se sabe la pérdida de presión en todas las secciones se sabrá entonces la caída total de presión, entonces el molde puede ser modificado para reducir la caída de presión y obtener una mejor consistencia de flujo[2].

Obtención de la presión de mantenimiento y ventana de proceso

El proceso de inyección se puede dividir en dos fases, en una fase de inyección y una segunda fase, conocida como, de mantenimiento que va inmediatamente después de la fase de inyección. La presión de mantenimiento empuja dentro de la cavidad, lo equivalente a la contracción volumétrica que ocurre durante el enfriamiento. Se requiere que la presión de empujamiento o presión de mantenimiento, tiempo de empujamiento y tiempo de mantenimiento sean controlados. En muchos casos el tiempo de empujamiento y tiempo de mantenimiento no son diferenciados y son llamados en colectivo como fase de mantenimiento. En los casos donde la fase de inyección es separada de la fase de mantenimiento “RIG-Tecnologies”, acuña el término de Moldeo desacoplado. [15]

La fase de empujamiento consiste en encajonar dentro de la cavidad el plástico hasta obtener el peso teórico esperado de la pieza, el cual es igual a la densidad del plástico multiplicado por el volumen de la cavidad. Cualquier valor inferior es resultado de un empujamiento pobre y cualquier resultado superior es resultado de un sobre empujamiento. El empujamiento pobre resulta en defectos volumétricos tales como rechupes o piezas cortas; estas piezas presentan contracción post-moldeo superior a la estimada. Piezas sobre empujadas producen esfuerzos internos que derivan en deformaciones o fallas prematuras.

La presión de mantenimiento ideal se determina por la evaluación de la ventana de proceso o también llamada “Área de Moldeo” Es la zona donde las piezas serán producidas de manera conforme, es preciso indicar que, una ventana de proceso grande es indicativa de un proceso robusto, como el que se visualiza en la figura 2.26, cabe señalar que se entiende como proceso, según la Norma ISO 9000:2005[16], cualquier actividad o conjunto de

actividades, que utiliza recursos para transformar elementos de entrada en resultados, y se le denomina robusto si tiene la capacidad de funcionar correctamente aunque existan factores de distorsión, tales como variaciones en los parámetros, cambios ambientales y condiciones de funcionamiento.

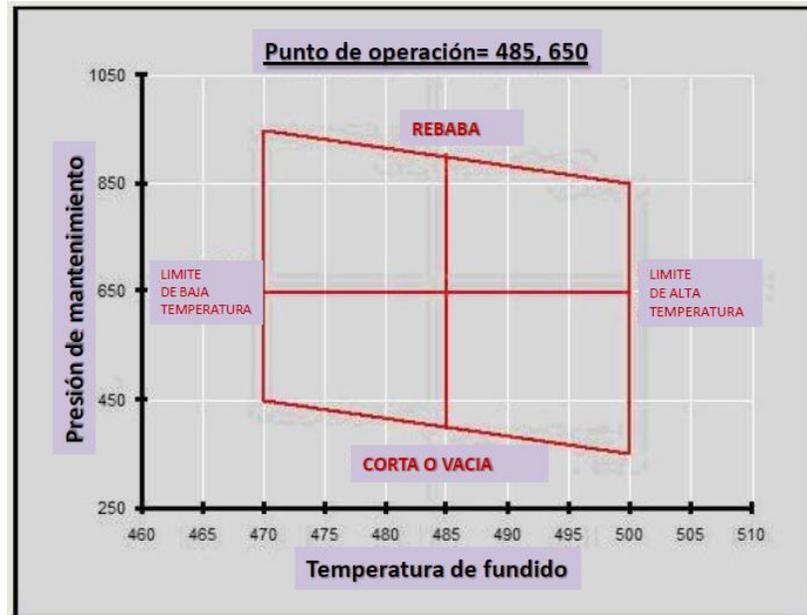


Figura 2.26. Ventana de proceso o área de moldeo[2]

En la figura 2.26 se muestra que por fuera de la ventana de proceso, las piezas pueden ser cortas o presentar rebabas, por debajo o por encima de los límites de presión de mantenimiento respectivamente. Fuera de los límites de la temperatura de fundido, se puede tener la presencia de pellets sin fundir por debajo del límite de baja temperatura de fundido y por encima del límite de alta temperatura la presencia de degradación térmica. El proceso, es decir los valores de temperatura y presión de mantenimiento, se debe colocar al centro de esta ventana y cualquier variación que pueda ocurrir quedará dentro de la ventana, asegurando la obtención de partes conformes con los requisitos. Entre más grande sea la ventana de proceso o área de moldeo más robusto es el proceso[2].

Determinación de la solidificación de la compuerta

El plástico entra en las cavidades a través de una compuerta o punto de inyección, la presión de mantenimiento se aplica en un tiempo de mantenimiento, hasta que el material que se encuentra en la compuerta halla solidificado.

El tiempo de mantenimiento se determina pesando la pieza moldeada disparo a disparo y variando el tiempo de mantenimiento, cuando el peso permanezca constante se habrá determinado el tiempo en el cual la compuerta se ha sellado. La figura 2.27 muestra una curva típica de la experimentación del sello de compuerta [2].

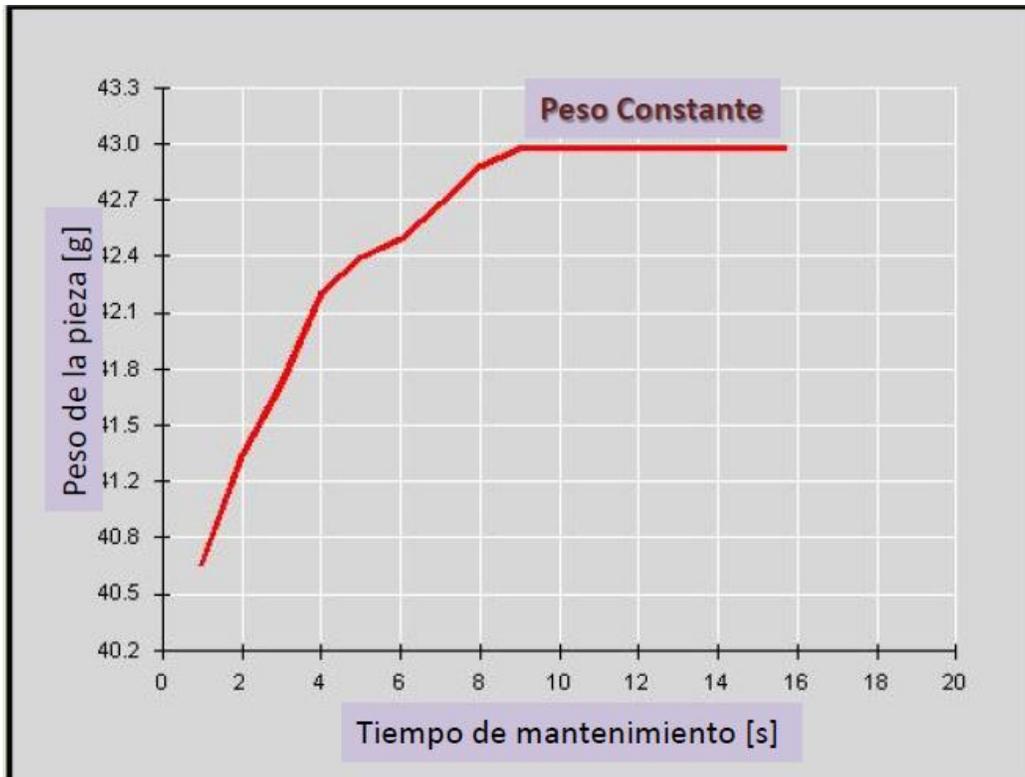


Figura 2.27 Sello de compuerta donde se obtiene la constante del peso en la pieza[2]

Determinación del tiempo de enfriamiento para moldeo por inyección.

El plástico empieza a enfriar cuando entra en contacto con las paredes del molde, el cual permanece cerrado hasta que el tiempo de enfriamiento concluya y la pieza tenga la temperatura de expulsión de plástico. Si la pieza es expulsada antes de esta temperatura, la pieza resultante es blanda y puede ser deformada durante la expulsión. Tiempo excesivo de enfriamiento resulta en aumento del tiempo de ciclo innecesario.

El tiempo de enfriamiento influye directamente en la contracción de la parte moldeada. La dificultad de fijar un tiempo de enfriamiento radica en la complejidad de la pieza a moldear, la cual puede contener secciones de diferente espesor que enfriaran de manera desigual, lo que resulta en un incremento del tiempo de enfriamiento como se observa en la figura 2.29.

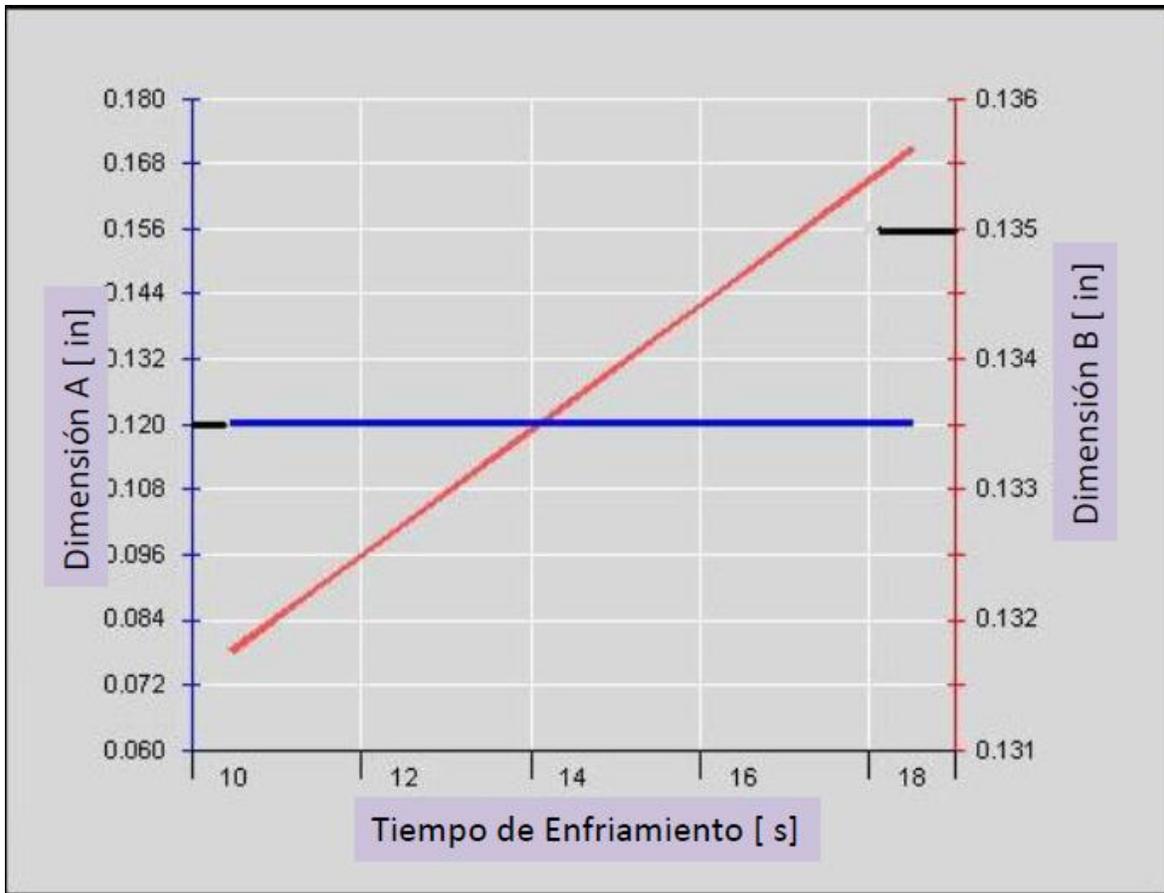


Figura 2.28. Dimensión de la pieza que se ven afectadas con el tiempo de enfriamiento[2].

En la figura 2.28 se muestra que existen dimensiones sobre la pieza que son menos sensibles al enfriamiento. La dimensión A no es influenciada por el tiempo de enfriamiento (es constante), mientras que la dimensión B cambia con el tiempo de enfriamiento. Por ejemplo se puede suponer que el valor objetivo para la dimensión B es de 0.135". Se puede colocar el tiempo de enfriamiento cerca de los 17 [s] o hacer cambio de acero para alcanzar más rápido las mismas dimensiones. Identificando los límites superior e inferior en la gráfica se puede fijar el tiempo de enfriamiento[2].

2.6 ETAPAS PARA DISEÑO DE MOLDE DE INYECCIÓN

El sector de fabricación de piezas de plástico se caracteriza por la necesidad de utilizar en las diferentes empresas que lo forman, tecnologías avanzadas de producción: control numérico, máquinas de 3/5 ejes, máquinas de alta velocidad, electroerosión, inspección tridimensional, CAD, CAE, CAM, prototipo rápido, inyectoras de altas prestaciones, etc. La utilización de todas estas tecnologías se hace en empresas de dimensiones desiguales, y que en su conjunto constituyen la cadena de producción en este sector figura 2.29. De aquí se puede observar que la relación entre empresas es necesaria, ya que todos los grupos de trabajo involucrados deben tener conocimiento del avance del proyecto, en cualquiera de sus etapas.

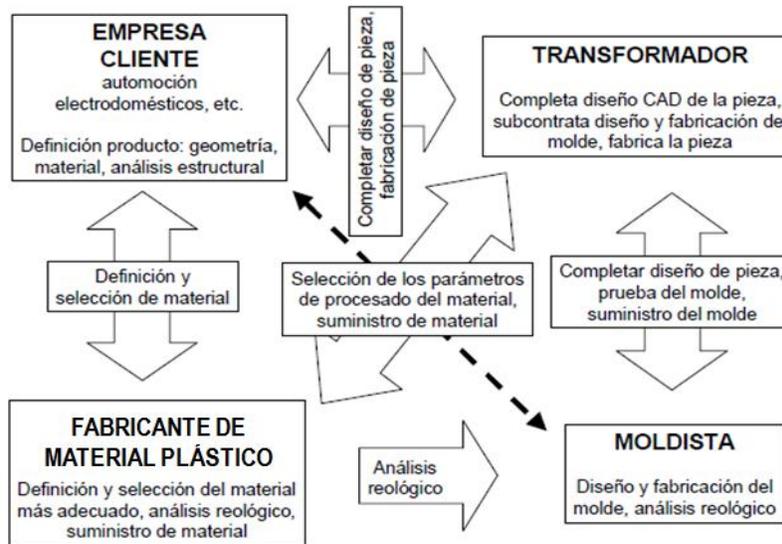


Figura 2.29. Ciclo de producción de piezas de plástico [17]

El diseño completo del molde tiene en cuenta la descripción de la pieza a fabricar, donde el concepto del producto es liberado por personal de comercialización e ingeniería. El enfoque principal es analizar las oportunidades de negocio; y las características de la máquina con que se va a inyectar. Esta actividad se divide a su vez en tres actividades principales[17]:

1.- Estudio previo del molde, se verifica la geometría de la pieza, se realiza un estudio de viabilidad del molde necesario para fabricarla y se genera una oferta para su diseño y construcción. Se analiza la posible configuración del molde, pero desde un punto de vista conceptual, sin entrar en detalle. El objetivo es iniciar esta actividad una vez que la definición de la pieza sea suficiente, para lo cual se define un estatus de nivel de definición geométrica de forma que con esta información se alcanza el estado *Diseño Previo*. Esto permite, por tanto, iniciar de forma paralela el diseño del molde, obteniéndose su configuración general y estimando el costo de fabricación y el plazo de entrega.

2.- Anteproyecto del molde, se define qué configuración va a tener el molde, tipo de molde, número de cavidades, posición de la línea de partición, tipo de sistema de inyección, extracción, refrigeración, etc. Comprende un análisis previo de la posible configuración del molde, teniendo en cuenta aspectos tales como: geometría completa de la pieza, análisis de fallos, análisis reológicos en función de la configuración de molde elegida, etc. En esta actividad no se llegan a determinar completamente las dimensiones geométricas, tolerancias y materiales del molde, términos que se realizarán posteriormente en la actividad de proyecto de molde. Por ejemplo, en esta actividad en función de las características geométricas y tecnológicas de la pieza se determinará si el tipo de canal, frío o caliente; si el tipo de entrada es en anillo, punto o laminar; si el molde será de dos placas, de mordazas, de extracción por segmentos o de tres placas. Además, se determinarán las siguientes características relativas a las cavidades: número de cavidades a usar, en función de criterios económicos según la oferta emitida en la actividad (estudio previo del molde), la línea de partición del molde y las características de los insertos a emplear en la cavidad (material, número, geometría aproximada, etc.). Se determinarán también las características generales del sistema de inyección: características del bebedero, de los canales de

alimentación y distribución, de las entradas y de los venteos; así como del resto de los sistemas que conforman el molde.

3.- Proyecto del molde, se realiza el diseño de detalle de las distintas partes que componen el molde (cavidades, sistema de inyección, refrigeración, guiado, expulsión y cierre) y de las herramientas necesarias para fabricarlo (electrodos para erosionado de cavidades). Como datos de entrada a esta actividad se tienen: la información sobre la geometría definitiva de la pieza, la oferta económica y los plazos de entrega estimados en la en la actividad de estudio previo y toda la información del anteproyecto del molde; obteniéndose por ejemplo: la información geométrica y tecnológica completa de las cavidades e insertos del molde (dimensiones exactas, forma, posición, tolerancias, acabado superficial, método de fabricación, etc.), así como de todos los sistemas del molde. El resultado de esta actividad es el proyecto final del molde. Asimismo, se obtiene un listado de los materiales necesarios y el plazo de entrega de estos.

Las actividades anteriores se trasladan a un esquema de trabajo, en el cual se muestra, de manera ordenada, los elementos a considerar para el diseño de molde, figura 2.30.

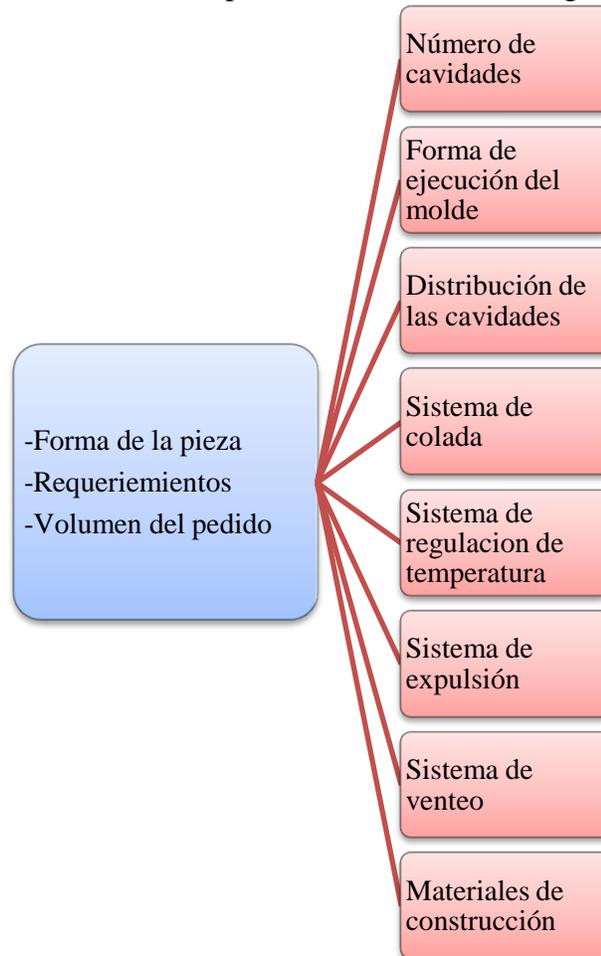


Figura2.30 Elementos a considerar para el diseño de un molde de inyección[18]

Las figura 2.31-2.38 muestran el desglose de los elementos a considerar para el diseño del molde.

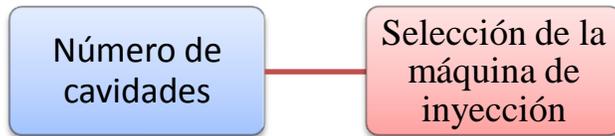


Figura 2.31 Selección de la máquina de inyección[18]

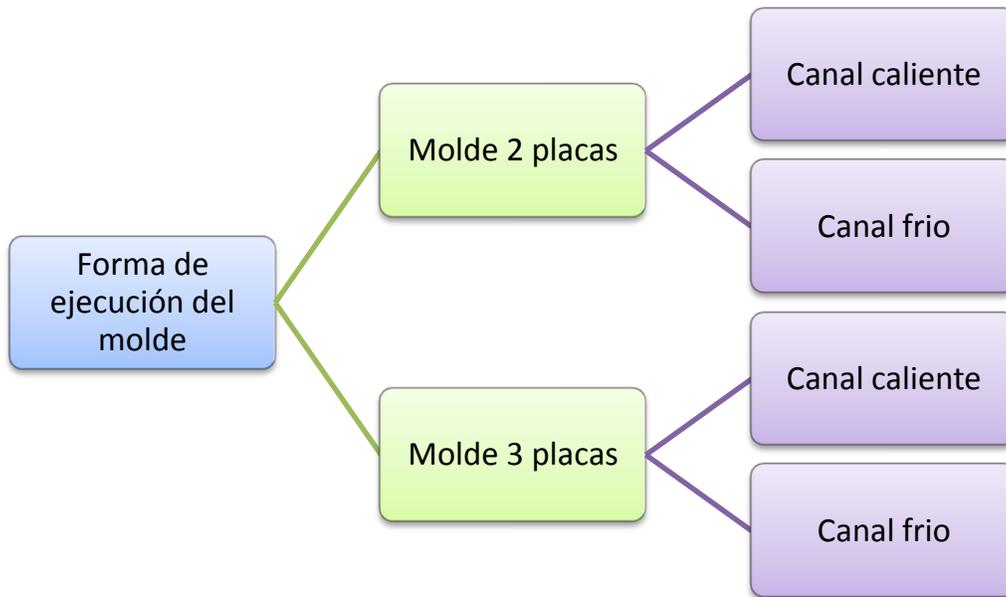


Figura 2.32 Ejecución del molde[18]

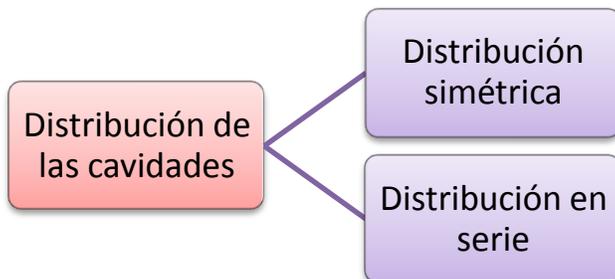


Figura 2.33 Distribución de cavidades[18]

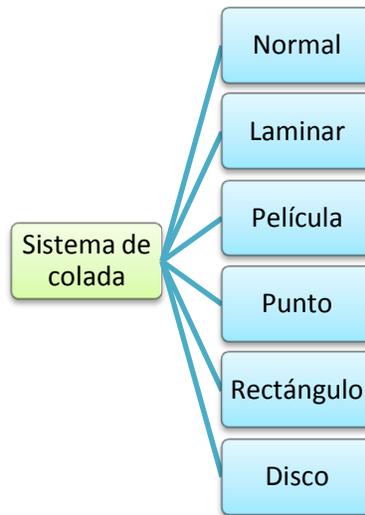


Figura 2.34 Sistema de colada[18]

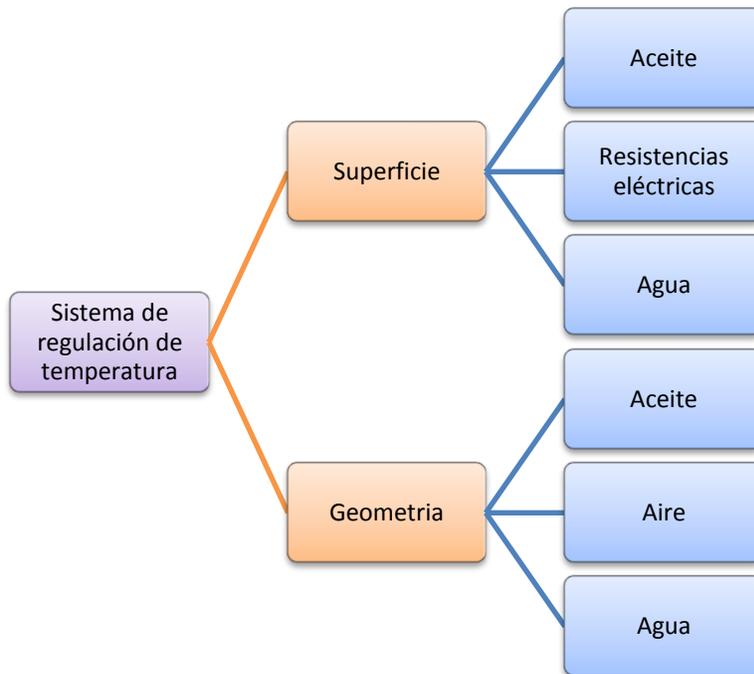


Figura 2.35 Sistema de regulación de temperatura[18]

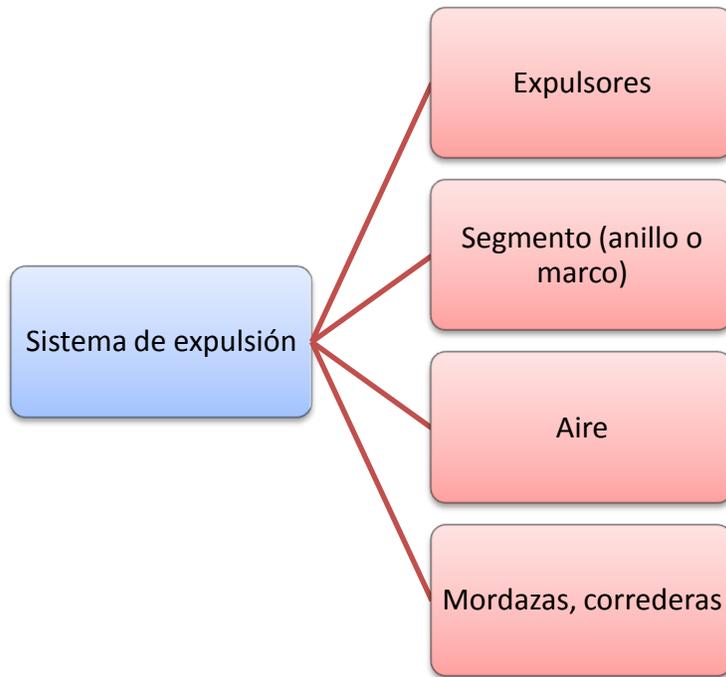


Figura 2.36 Sistema de expulsión[18]

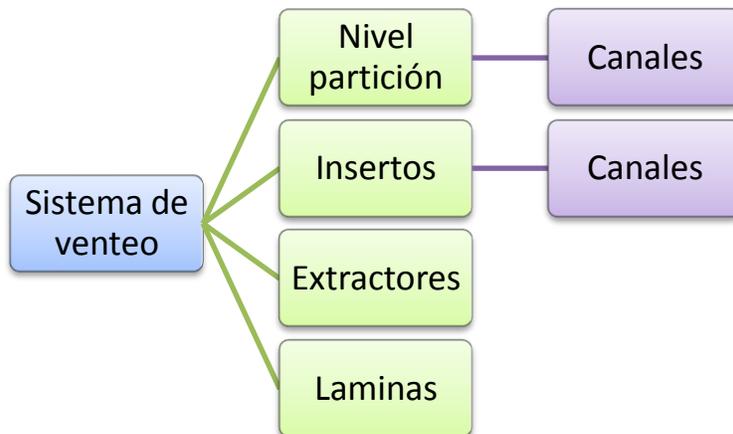


Figura 2.37 Sistema de venteo[18]

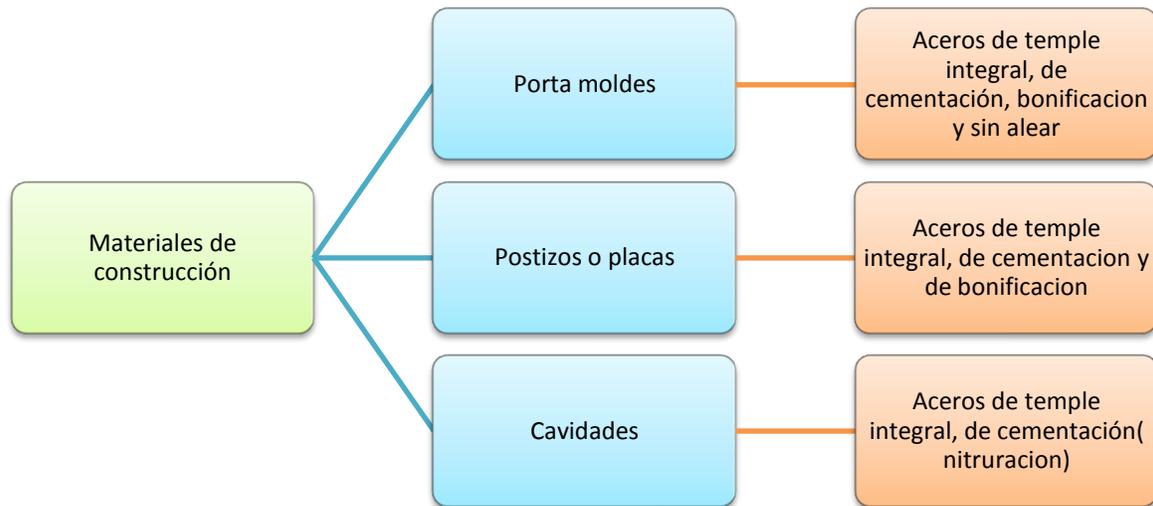


Figura 2.38 Materiales de construcción[18]

2.7 COSTO DE MOLDE DE INYECCIÓN

Normalmente la determinación de los costos de un molde se hace con base en la experiencia o en la comparación entre moldes de características similares. La estimación empírica es el método más usado, Menges y Mohren[14] expresan que “a menudo los costos no se calculan del todo” por otro lado, “el número de órdenes de compra solo es del 5% del total de cotizaciones realizadas, las cuales requieren de cierto tiempo para realizarlas”.

El método para estimar de manera empírica los costos requiere que el constructor de molde recuerde todos los detalles de construcción, pero si olvida algún detalle puede subestimar algún elemento lo cual afecta de manera significativa el costo del molde. Otro problema es la imprecisión para estimar el costo del material, el cual se debe de comparar entre los proveedores y/o hacer referencia en manuales. Por lo tanto no se recomienda la estimación de costos de manera empírica[14].

Teóricamente, los estimadores de costos, quienes calculan de manera manual obtienen de manera precisa y consistente resultados, pero les consume tiempo excesivo e impráctico[14].

Un paquete de software hace rápido el cálculo del costo del molde y tiempo de maquinado a partir de una base de datos donde se encuentre la información del producto. Los datos involucrados son:

- A. Información de entrada
 - i. Detalles del producto, como nombre del cliente, tamaño del producto y polímero requerido
 - ii. Nombre de los insertos, dimensión de los insertos y criterio de maquinado

- iii. Información general, como tamaño del porta molde, tipo de compuerta y estructuras simples (por ejemplo, expulsores, tacones y guidores)
El costo es calculado con base en estos datos junto con la información de precio e información técnica
- B. Información resultante
 - I. Costo de materiales, costo de mano de obra y costo de maquinado.
 - II. Tiempo total de maquinado individual para componentes e insertos
- C. Precio de componentes estándar
 - I. Precio de componentes estándar tales como diferentes tipos de porta moldes y expulsores
 - II. Precio para diferentes tipos de materiales como acero y cobre (en el caso de electrodos)
- D. Información técnica
 - I. Información de maquinado, como secuencia de maquinado.
 - II. Tiempo estándar dedicado a actividades, como tiempo para compilar el programa de manufactura asistida por computadora (CAM)

Para fines de estimación, en este documento se hará uso del software *CALC MASTER 6.1.0* . Software basado en la información anterior y que permite mediante una interfaz gráfica, el ingreso de datos

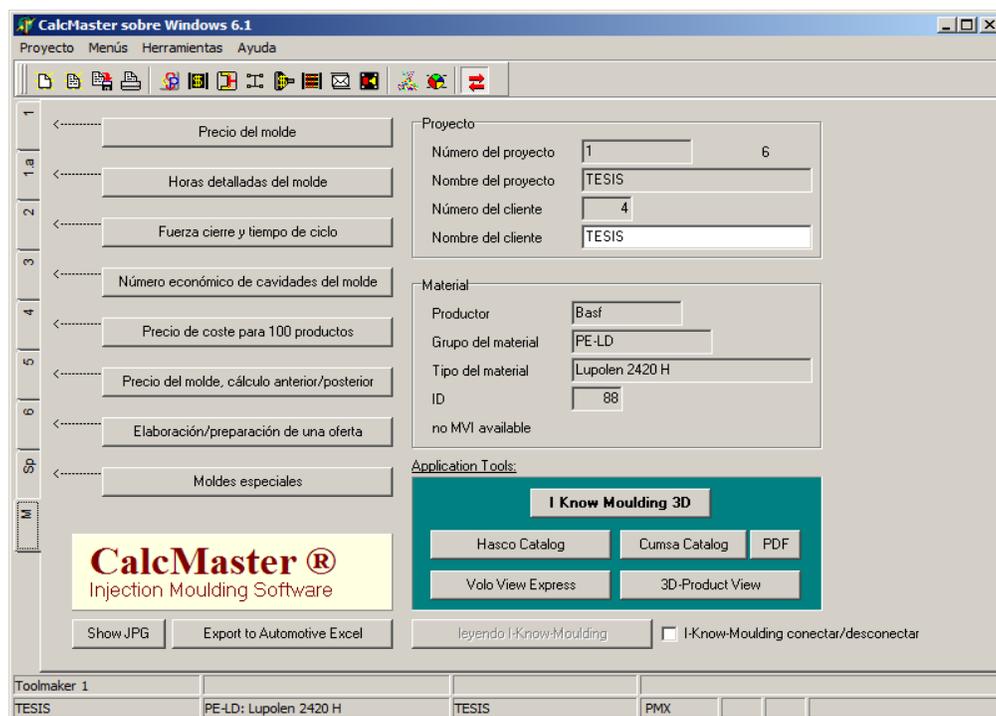


Figura 2.32. Software Cálculo de Molde.

El costo obtenido por este software será comparado con la cotización final de la empresa que se encargará de fabricar los moldes requeridos.

3.-DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MOLDE PROTOTIPO DE INYECCION PARA UN DISPOSITIVO DOSIFICADOR.

De acuerdo a lo solicitado por el cliente, se considera el análisis del ensamblado por cada pieza y la retroalimentación con los diseñadores con el fin de obtener cavidades de viable fabricación, además de tomar en cuenta dentro del diseño de los moldes, los sistemas de refrigeración, de expulsión, de ventilación y equipo auxiliar.

Previo al proceso de diseño del los moldes, el diseño del dosificador había sido valorado por medio del ensamble en modelos sólidos y un prototipo rápido hecho de ABS/PC por parte de los diseñadores; el que ayudó a visualizar los detalles más significativos del ensamble, estos se encuentran referenciados en [19] y en la patente [20]. Para fines de este trabajo se le denominarán a las partes que lo componen como:

- Base
- Actuador
- Paleta X
- Paleta Y

El molde a diseñar es prototipo es decir de prueba para la fabricación de las piezas que forman al dispositivo dosificador.

3.1 DISEÑO CONCEPTUAL

Por cuestiones económicas, se seleccionó un molde que permitiera conjuntar el número de placas de cavidades de tal manera que sólo se utilizara un portamolde y que las placas de cavidades de diferentes configuraciones fueran intercambiables.

Se decidió entonces diseñar un portamolde de placas intercambiables para que al producir cada parte del dispositivo, sólo fuera necesario cambiar las placas de cavidades de las piezas a producir y con ello reducir el tiempo de cambio de las cavidades.

Se pensó usar el portamolde de la cavidad de probetas ASTM de tracción que se disponía en el Laboratorio de Procesamiento de Plásticos de la Facultad de Ingeniería, este funciona en la máquina de inyección Demag ErgoTech 50-270. Por lo tanto, las placas de cavidades del dispositivo de dosificación se dimensionaron usando como base las placas del portamolde de probetas.

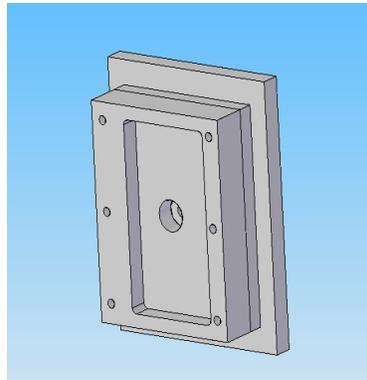


Figura 3.1. Placas de portamolde a reutilizar disponible en el laboratorio de procesamiento de plásticos.

Teniendo el portamoldes como base, se vio que era necesario diseñar y fabricar una nueva placa de expulsores, placa de soporte y tres placas de cavidades, uno para el actuador, otro para la base y uno más para las paletas, en el caso de las paletas, se consideró incluirlas a las dos en un mismo molde por la semejanza en cuanto a volumen y forma geométrica, a pesar de ser contrarias en su ensamble.

Surge la idea de hacer una placa de soporte con una configuración de barrenos para expulsores que fuese común a la cavidad de todas las piezas del dispositivo dosificador. De esta manera se podría hacer un portamoldes universal con placas de cavidades intercambiables, no solo para estas tres piezas, sino para otros proyectos futuros.

Por lo que las placas de expulsores y la de soporte, se tenían que modificar de acuerdo a las geometrías del actuador, la base y las paletas en un mismo sistema, se comenzó con un diseño de mallado circular concéntrica al centro de la placa de expulsores que se encuentra desplazada del centro del portamoldes y a su vez concéntrica a la geometría circular de las piezas (actuador y base).

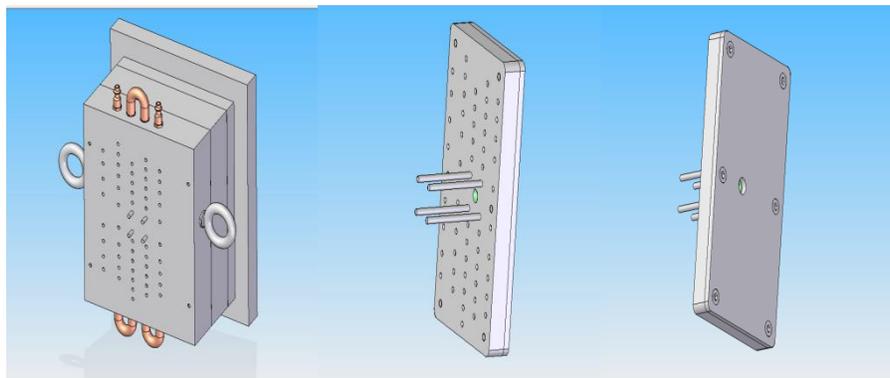


Figura 3.2. Configuración de mallado concéntrico a la placa de botadores

Se pensó entonces en tener el mayor número de barrenos posibles a lo largo y ancho de la placa de expulsores. Con ello se lograría tener más libertades de colocar los pernos expulsores en más puntos de contacto con la superficie, sin afectar los canales de enfriamiento ubicados de forma de serpentín lineal.

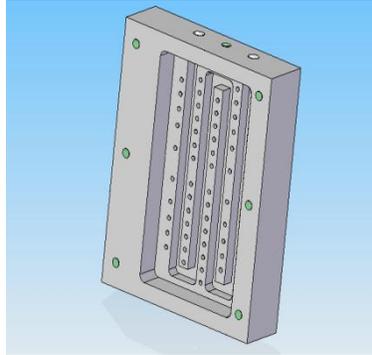


Figura 3.3. Configuración de canales de enfriamiento y barrenos para botadores

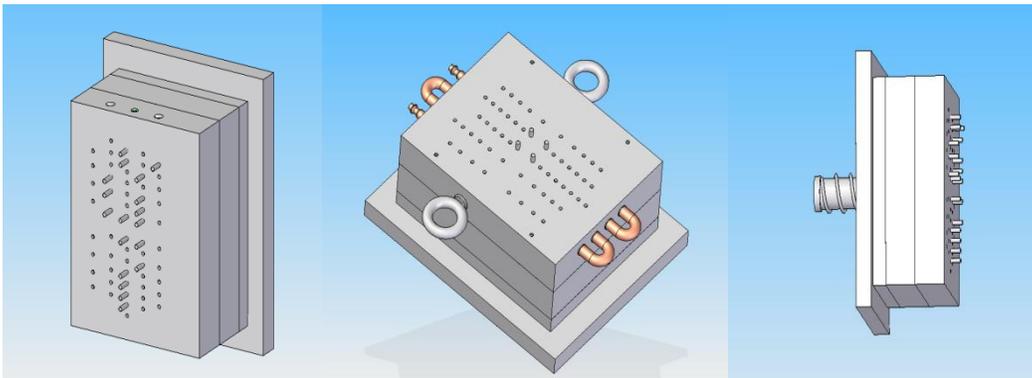


Fig. 3.4. Diseño inicial del portamoldes con placa de soporte y de expulsores universales.

Sin embargo, al hacer la superposición de las placas de cavidades, se observó que carecía de practicidad para la expulsión de las piezas actuador, base y paletas porque era difícil hacer coincidir los botadores con las necesidades específicas de botado de cada pieza, por ejemplo que la placa de paletas necesita expulsores de menor diámetro dado el tamaño y en puntos cercanos al perno, por otro lado los pernos expulsores son de diferente longitud para las paletas y para las piezas base y actuador debido a las alturas, por lo que de cualquier manera se tendrá que desmontar el molde para desarmar las placas de botadores, por tanto, la idea de una placa de soporte universal pierde su funcionalidad en este proyecto.

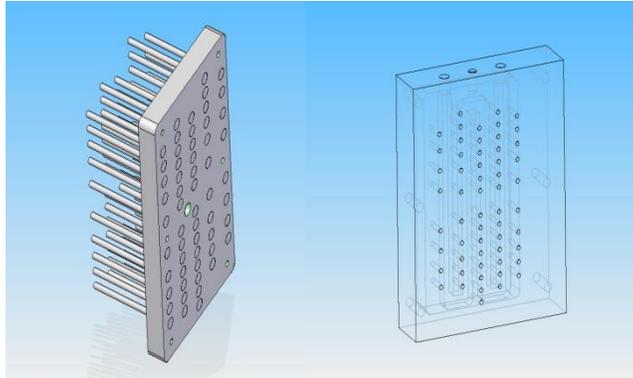


Fig. 3.5. Configuración de placa de pernos expulsores

Además, se consideró que la colocación de tantos barrenos y expulsores en las placas, ocasionaran exceso en tiempo y costo de maquinado.

Por las anteriores complicaciones se opta por descartar la placa de soporte y combinar las placas de cavidades.

Hasta este punto, se percibe que la adaptación de las placas existentes, así como la idea de una placa de soporte universal, no es la mejor solución para disminuir tiempos de maquinado y costos, ya que el hecho de fabricar la placa universal representaba un excesivo maquinado, sin mencionar que necesitaba de un método de sellado por dilatación para sellar herméticamente las placas que contendrán los canales de enfriamiento.

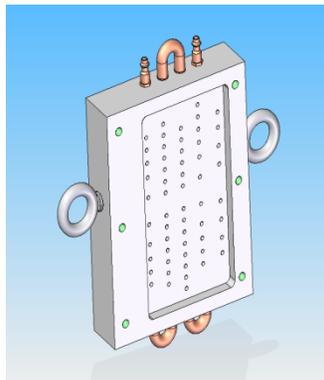


Figura 3.6. Placa de soporte universal

En esta etapa surge la idea de diseñar tres moldes para cada una de las geometrías requeridas o diseñar un portamolde efectivo para las partes del dosificador, como elemento de decisión se realiza una estimación de costos mediante el software *Calc master*, se ingresan valores preliminares de diseño, tales como numero de cavidades

Por tanto, se decide replantear el diseño del portamolde que fuese efectivo para las tres placas de cavidades planteadas desde un inicio, pero sin utilizar el diseño de las placas existentes, considerando que existen empresas que ya fabrican las partes del portamoldes de acuerdo a las necesidades del producto, llamados “portamoldes estándar”. Con ello se reducen los tiempos de maquinado del portamoldes para enfocarse a las placas de cavidades y su adaptación a los portamoldes estándar y por ende se reduce el costo. Dado lo anterior, se analiza cada una de las tres placas de cavidades a diseñar por separado, siguiendo el esquema de la figura 2.30.

3.2 ALTERNATIVAS DE DISEÑO DE LAS PLACAS DE CAVIDADES Y SU SELECCIÓN

Se realizaron cuadros comparativos llamados Benchmarking para la selección de las diferentes alternativas de los elementos de la figura 2.30:

Algunos de estos son de manera general como el material de construcción, otros más, se analizaran de manera particular en cada pieza. A pesar de que los moldes comparten algunas de sus piezas es necesario hacer los análisis de los elementos ya mencionados por separado.

Por ejemplo, las piezas base y actuador es conveniente utilizar una placa con insertos intercambiables, sin embargo el sistema de expulsión se analizara a detalle por las diferencias y complejidad de cada pieza.

A partir de esto se realizó una matriz de selección la cual permite comparar de manera cuantitativa y gráfica los elementos determinados anteriormente, tales calificaciones se obtendrán de manera ponderada de acuerdo a las mejores características de las opciones a comparar.

La figura 3.7 representa de la forma en que estará constituido el molde y la interrelación del portamolde con las placas de cavidades intercambiables.

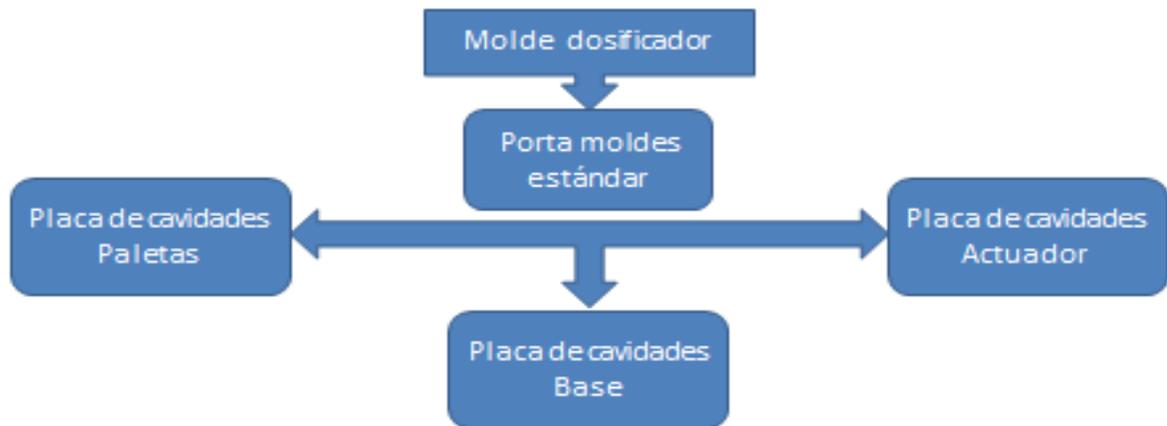


Fig. 3.7 Partes que componen al molde del dosificador

Diseño de cavidades paletas

Forma de ejecución del molde. Después de hacer una observación de complejidad de la pieza, se decidió comenzar con la cavidad más sencilla de fabricar, la de paletas, teniendo en cuenta que las paletas son de geometrías parecidas, más no, iguales, se pensó hacer una placa que contuviera las paletas. En esta condición el molde será de dos placas con una línea de partición.

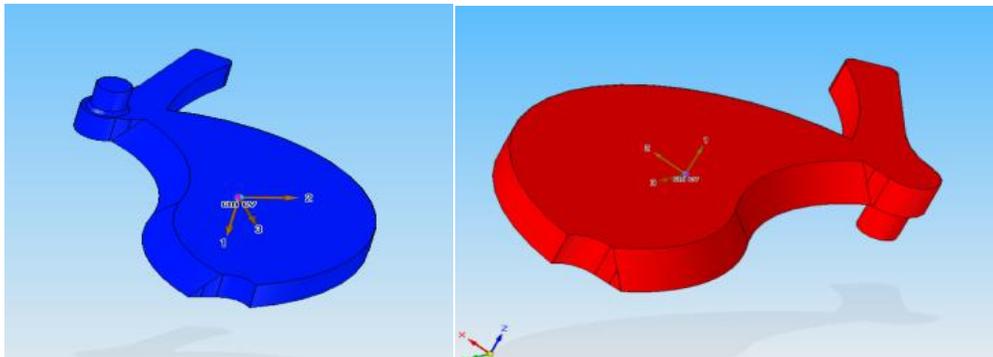
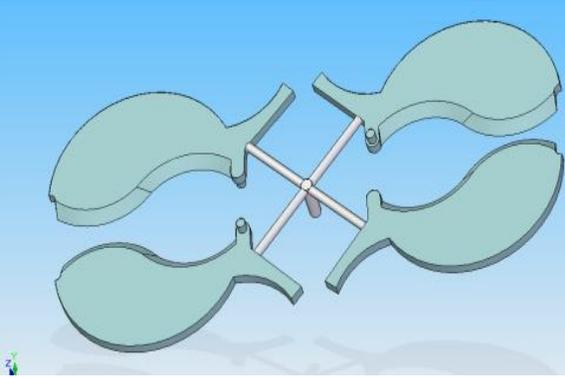
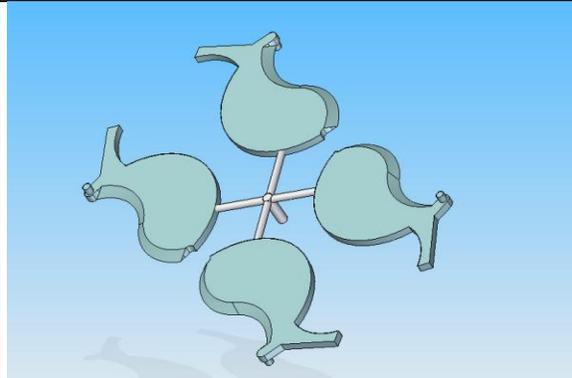


Figura 3.8 Paletas “X”(izquierda) e “Y”(derecha) respectivamente.

La posición del punto de inyección no se representa en la figura 2.30, sin embargo es de gran importancia, pues determina el tipo de llenado que tendrá la pieza, orientación de las cadenas poliméricas dentro de la cavidad, presión de inyección, líneas de unión, atrapamiento de aire [14]. Se presenta dos alternativas en la tabla 3.1:

- A punto de inyección en la base de la palanca
- B punto de inyección en la cara lateral

Tabla 3.1 Cuadro comparativo, ventajas y desventajas en dos alternativas de posición de punto de inyección.

<p>En la alternativa A se presenta como ventaja el punto de inyección en la base de la palanca, para no afectar las caras de contacto entre las piezas, cuando se corte el canal y la vela. Sin embargo como desventaja, se observa que está alejada del centro de masa de la pieza por lo que se necesita mayor presión de inyección.</p>	
	<p>En la alternativa B tiene como ventajas que el punto de inyección se ubica en la parte lateral de la pieza más cercano al centro de masa en la pieza, lo que permitirá un mejor llenado y menor presión de inyección, además la cara en la que se encuentra ubicado el punto de inyección no afecta la superficie de contacto entre las paletas. No se observan desventajas mayores en esta opción.</p>

De entre las dos opciones anteriores se determina que la opción que más conviene es la alternativa B, principalmente por que se encuentra más cerca del centro de masa de la pieza para garantizar que las piezas sean llenadas en su totalidad, No obstante no está definido aún el número de piezas que se inyectaran en cada ciclo, este análisis se presentara mas adelante.

Se realizó el análisis de flujo con el punto de inyección elegido, la figura 3.18 nos indica que tiene un pequeño riesgo de no llenar totalmente el final la palanca, en lo posterior se localizara más cerca del centro.

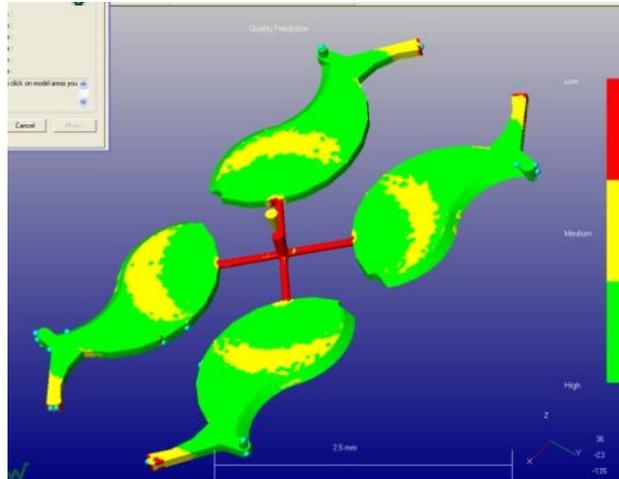


Figura 3.9 Análisis de flujo de 4 cavidades de paletas

Número de cavidades. Está en función de la fuerza de cierre de la máquina de inyección, en la mínima y máxima capacidad de disparo de la máquina y de la capacidad de plastificación de esta[14].

El número máximo de cavidades que se pueden tener según [22] es:

$$N = \frac{Sv}{Mv} \dots\dots\dots 3.1$$

Donde:

Sv → volumen máximo de inyección

Mv → volumen de la pieza más el volumen de la colada y canales

El volumen máximo que puede inyectar la maquina Demag Ergo tech 50-270 es de 150[mm] de carrera de husillo(C.H), el cual tiene un diámetro(D) de 35[mm], ecuación 3.2.

$$Sv = (CH)\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \left(\frac{1[cm]}{10[mm]}\right)^3 = (150[mm])\pi \left(\frac{35[mm]}{2}\right)^2 \left(\frac{1[cm]}{10[mm]}\right)^3 \dots 3.2$$

$$Sv = 144.31[cm^3]$$

$$Mv \text{ para las paletas} = 4.01[cm^3]$$

Sustituyendo Mv y Sv en la ecuación 3.1.

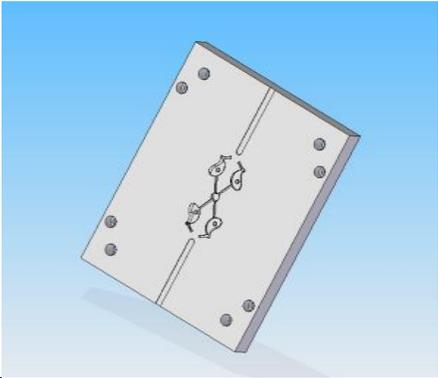
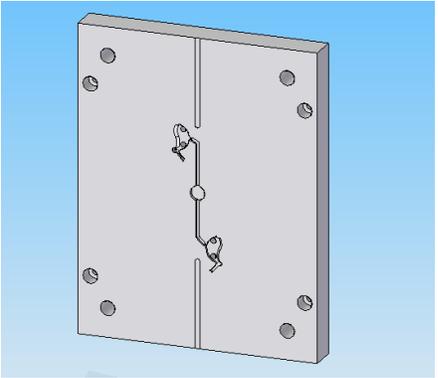
$$N = \frac{144.31[cm^3]}{4.01[cm^3]} = 35.98$$

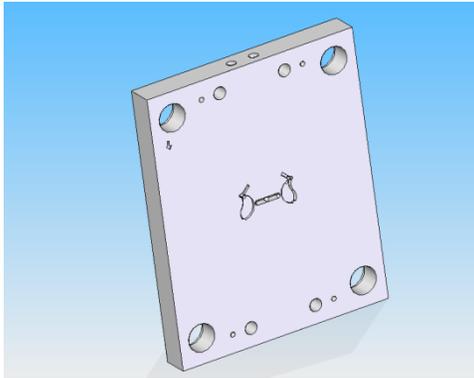
El número máximo de cavidades considerando un número par para asegurar el balance en el molde es de 34, entonces las paletas deberán estar en pares en la misma placa para balancear el molde[13]. Los detalles que se observaron en el análisis de la pieza, fueron que la pieza paleta X puede quedar con el perno hacia la placa móvil de la inyectora, mientras que la paleta Y necesita quedar con el perno hacia la placa fija por el ángulo de desmoldeo, el número de cavidades se fijo en dos por razones económicas que consideran este molde como prototipo.

Distribución de cavidades. Las cavidades se distribuyeron de manera simétrica para mantener el balance en el molde[2]

La tabla 3.2 muestra el número de cavidades y un cuadro comparativo de las ideas propuestas de distribución.

Tabla3.2 Cuadro comparativo de numero de cavidades en la placa de paletas.

	<p>En la opción A se presentan 4 cavidades en un arreglo simétrico, la ventaja es que en un ciclo de inyección se fabrican dos juegos, además la maquina permite el llenado de las piezas ya que son de un volumen pequeño, las desventajas son que entre más cavidades se tengan será más costosa su fabricación, otra desventaja es la de maquinarse más pernos en la placa fija del molde.</p>
<p>En esta opción B, se reduce el número de cavidades a solo un juego por ciclo de inyección la ventaja se traduce en menor costo por manufactura y tiempo de maquinado. Se observa que los canales de inyección son demasiado largos afectando los parámetros de inyección, Obsérvese también de igual forma se necesita maquinarse un perno en la placa fija del molde.</p>	



En la opción C se observan dos cavidades lo que representa como ya se dijo una ventaja en el costo, se presentan en par para obtener un juego completo de paletas, la vela es más pequeña por lo que se ahorra en material, puesto que el molde es de colada fría, y por último el tiempo de maquinado se reduce, la desventaja es que a pesar de eso se necesita maquinar el perno en la placa fija del molde.

Como puede observarse la última configuración reduce los tiempos de manufactura y por ende los costos de fabricación del molde, también reduce el desperdicio que se genera por vela y canales de alimentación.

Sistema de colada. Se plantea el sistema de colada normal, figura 2.30, es decir sin calefactores, y con sistema de pozo frío[21]

Se procedió después a simular el llenado de las cavidades con un simulador de flujo de material plástico, utilizando los valores de los parámetros de procesamiento del material y de la máquina a utilizar, tabla 3.3, para observar cómo se comportara el llenado de las cavidades, con este se puede detectar anomalías y puntos críticos de las cavidades antes de maquinar cualquier placa. Esta herramienta permite hacer más eficiente el diseño además de ahorrar tiempo y dinero.

Tabla 3.3. Parámetros pre cargados en el programa basados en la ficha técnica del material y de la maquina utilizada.

- ° Temperatura de masa fundida: 190.0 (C)
- ° Temperatura del molde: 25.0 (C)
- ° Puntos de inyección: 1
- ° Presión máxima de inyección de la máquina: 180.000 (MPa)
- ° Tiempo de inyección seleccionado: Automático
- ° Conmutación velocidad/presión: Automático
- ° Resolución del análisis: Predeterminado

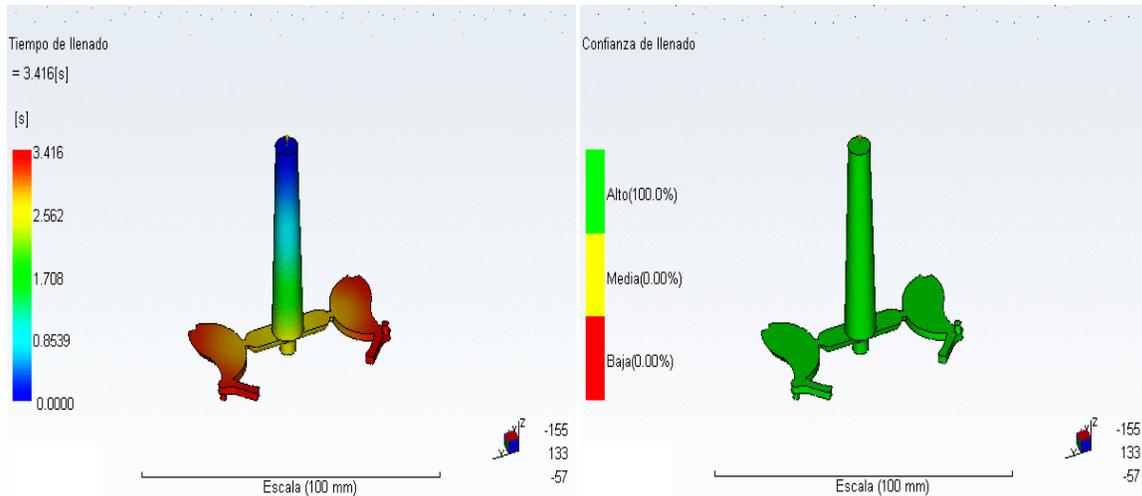


Figura3.10 Tiempo de llenado

Figura3.11 Confianza de llenado

La ventana de tiempo de llenado (Fig. 3.10), indica que las piezas tardaran un aproximado de 3.416 [s], en la etapa de inyección, por otra parte, la confianza de llenado (fig. 3.11) asegura que la pieza a pesar de tener partes pequeñas y lejanas al punto de inyección, como son los pernos no estará incompleta.

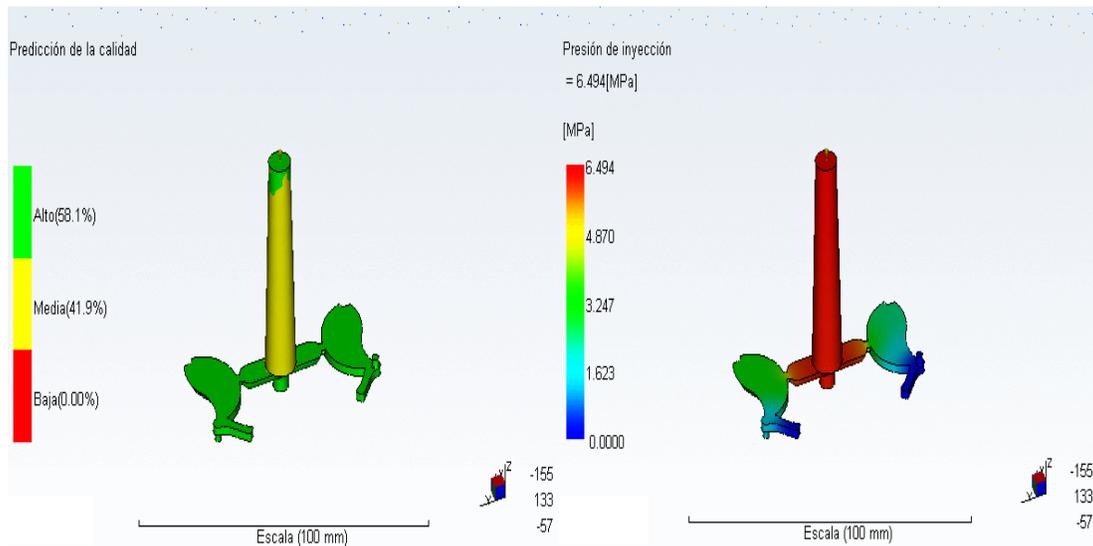


Figura 3.12 Predicción de la calidad

Figura3.13 Presión de inyección

Como se observa en la fig. 3.12, las piezas presentan una calidad aceptable, aunque la vela tiene una calidad menor, que no es de importancia, nuevamente relacionado al tamaño y a la ubicación correcta del punto de inyección, no se observan partes incompletas, como ya se esperaba la presión se pierde a medida que se aleja del punto de inyección, la presión máxima de inyección es de 6.4 [MPa] o 64[bar] lo que representa el 3.5% de la presión de inyección máxima que la inyectora ofrece.

Tabla 3.4 Resultados de la simulación

- ° Tiempo de llenado: 3.42 [s]
- ° Presión de inyección: 6.494 [MPa]
- ° Área de fuerza de cierre: 6.7099 [cm^2]
- ° Fuerza máx. de cierre durante el llenado: 0.269 [t]
- ° Conmutación de velocidad/presión a % volumen: 99.05 %
- ° Conmutación de velocidad/presión en tiempo: 3.33 [s]
- ° Tiempo estimado del ciclo: 124.00 [s]
- ° Peso total de la pieza: 7.497 [g]
- ° Volumen inyectado: 4.0139 [cm^3]

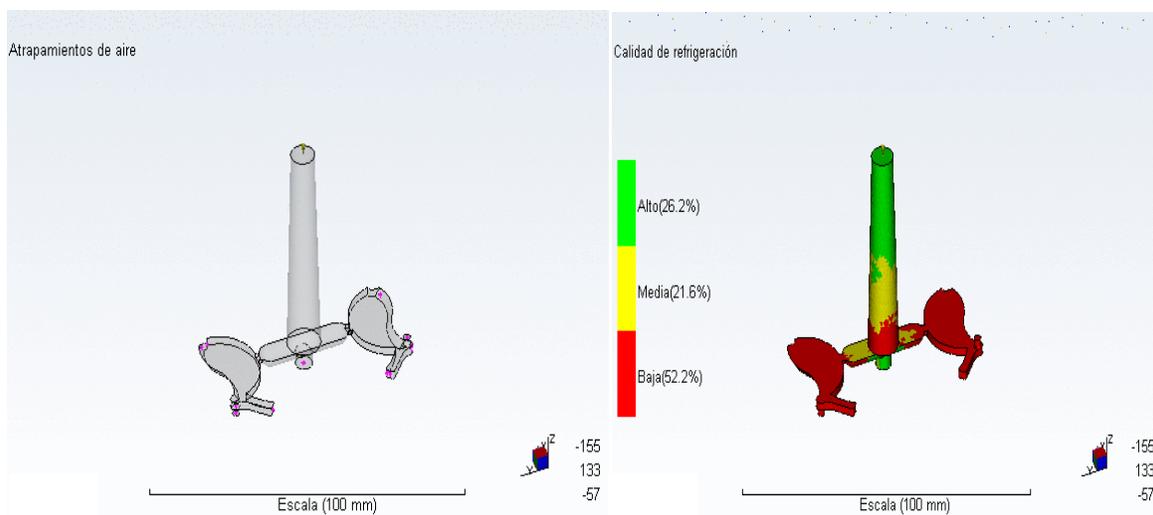


Figura 3.14 Aire atrapado

Figura 3.15 Calidad de refrigeración

El aire atrapado se ubica cerca de la línea de partición, figura 3.14, y como las cavidades no son totalmente herméticas podrá salir, sin embargo se tomara en cuenta tales puntos en el diseño para los venteos. De la tabla 3.4 se visualiza que la fuerza máxima de cierre de 0.26 [t] es el 0.52% de la fuerza de cierre disponible de la inyectora

La superficie plana de las caras ayuda a un mejor contacto con las placas lo que favorece la transferencia de calor, sin embargo es necesaria la implementación de sistemas de refrigeración y de control de temperatura, figura 3.15.

Tabla 3.5 El cuadro de resultados indica que la estimación de rechupes es tolerable.

- Menos del 1% del modelo tiene rechupes.
- ° Profundidad del rechupe: 0.06 [mm]
- ° Profundidad media del rechupe: 0.05 [mm]
- ° Porcentaje del modelo con propensión a rechupes: 0.14 %

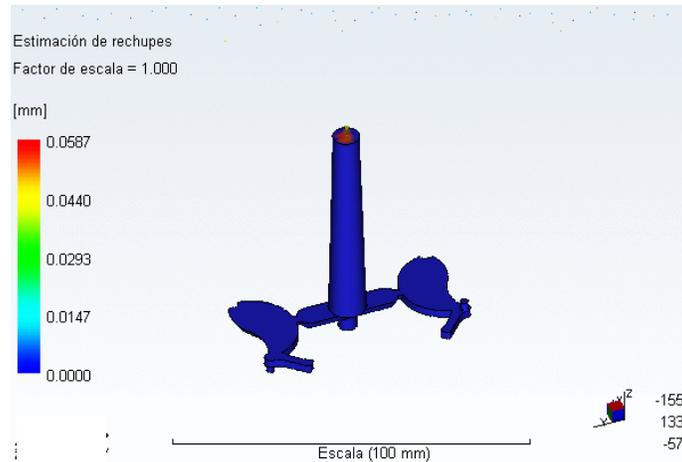


Figura 3.16 Estimación de rechupes

Materiales de construcción. Existen en el mercado infinidad de aceros y otros materiales con los cuales se puede fabricar un molde prototipo para una baja producción como es el caso, desde el aluminio, pasando por aceros de bajo contenido de carbón [14]

Entre las alternativas de decisión que se pueden considerar se tienen:

- Maquinabilidad. Esta propiedad debe ser excelente, ya que el tiempo de máquina-emplado en desbastes y ajuste de cavidad es alto y representa costos elevados.
- Tenacidad. El material debe soportar esfuerzos variados que pueden afectar sus características, para ello el valor de la tenacidad es factor importante a considerar.
- Resistencia al desgaste. El material y los ciclos de inyección afectan las superficies del molde por lo que requieren un material que garantice la máxima durabilidad posible.
- Mínima deformación al tratamiento térmico. Un molde puede ser tratado térmicamente para aumentar su tiempo de vida y mejorar sus propiedades por lo que se debe garantizar la menor deformación de las cavidades.
- Transferencia de calor. Los cambios repentinos en la temperatura afectan el material con que es elaborado el molde por lo que se requiere de un material que soporte esos cambios en la temperatura además de contar con una buena capacidad de transferencia de calor para el caso del sistema de enfriamiento.



Figura 3.17 Placas para la fabricación de un molde

Se debe recordar que a mayores propiedades mayor costo, como también entre más dureza del material mayor será el tiempo de maquinado, por lo que se realiza el siguiente cuadro comparativo entre 5 de los materiales de uso común [11]. Se determinaron valores en escala del 1 al 10 para ponderar los valores de las características de los 5 materiales elegidos.

Tabla 3.6. Ponderación de valores de las características de materiales comunes para la fabricación del molde prototipo [24].

Materiales comunes para moldes	Maquinabilidad (% De maquinabilidad)	Modulo de elasticidad (E [GPa])	Dureza (Dureza Brinell)	Transferencia de calor(Coeficiente transferencia calor K[W/mK])	Menor Costo Relativo(Costo USD/Kg)	Promedio
Aluminio 1180-H18	10 (125%)	3 (67)	3 (30)	10 (234)	6 (6.94)	6.4
AISI1018 COLD DRAW	8 (70%)	9 (205)	5 (126)	5 (51.9)	10 (4.06)	7.4
AISI1045 COLD DRAW	7 (55%)	9 (205)	9 (179)	4 (49.8)	9 (4.79)	7.6
AISI4140 RECOCIDO	8 (65%)	9 (205)	10 (197)	3 (42.2)	7 (6.04)	7.4
AISI H13 HERRAMENTAL	5 (50%)	10 (210)	9 (180)	2 (25)	3 (12.57)	5.8

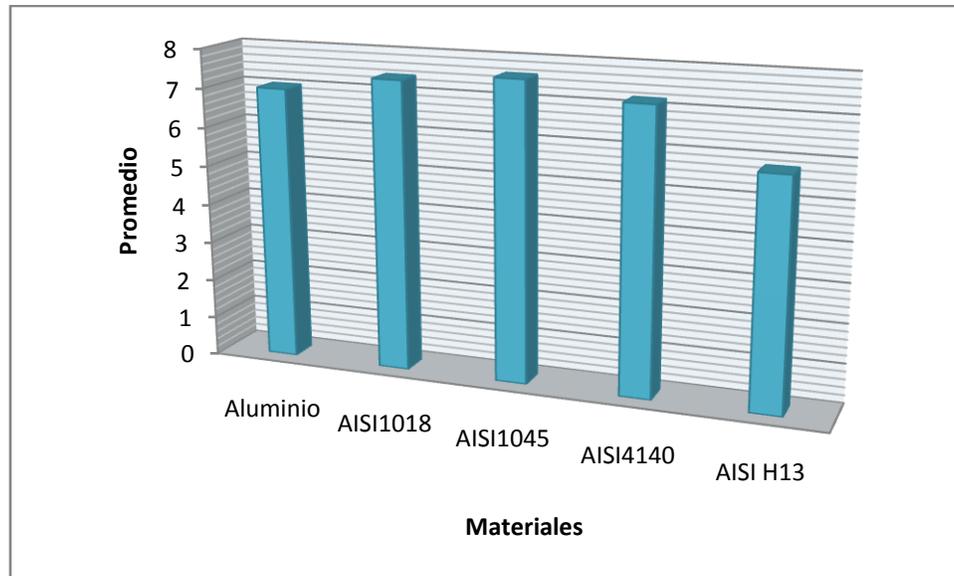


Figura 3.18 Grafica de comparación de resultados de materiales de selección

La figura 3.18 muestra los materiales que tuvieron mayor calificación, AISI 1018 y AISI 1045, para la fabricación de los moldes, como en el Laboratorio de Procesamiento de Plásticos se tiene el antecedente de un molde construido de acero AISI 1018 que sufrió deformación por acción de la fuerza de cierre de la máquina, se decide realizar el molde en acero AISI 1045.

Sistema de expulsión. En esta parte se detectó el problema que tiene que ver con el ángulo de salida o de desmoldeo [13] ya que la cara inclinada de una de las piezas no permitiría la salida de la pieza al momento de expulsarla, de no ser que la pieza se volteara hacia la otra cara y maquinara un barreno en la placa fija del molde.

La placa que contendría a las cavidades para moldear las paletas será una placa con las cavidades de las paletas, X, Y, donde el perno de la paleta Y estaría formado por un barreno en la placa fija de inyección. En resumen este molde tendría una línea de partición, con un sistema de expulsión por dos expulsores de diferentes diámetros para cada pieza. Los puntos de inyección o compuertas son dos, colocados en las partes de la paleta que no tienen exigencia mecánica, es decir contacto con otras piezas del ensamble, cuidando siempre, la simetría en la disposición de las cavidades que repercute en el balanceo del molde. El sistema de refrigeración se conforma por canales en la placa de cavidades.

La figura 3.19 muestra la placa de cavidades para las paletas sujeta al portamoldes convencional, incluyendo los expulsores para las cavidades de las paletas. El portamolde fue considerado, para que pudiera sujetar a las placas de cavidades tanto del actuador como de la base.

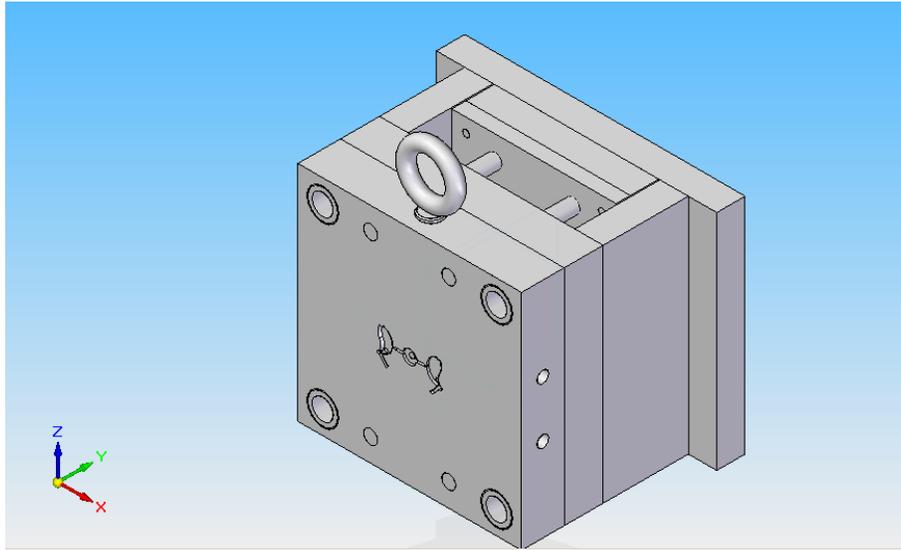


Figura 3.19 Porta molde de inyección cerrado donde se incluyen las cavidades de las paletas

La figura 3.20 muestra en forma de diagrama las partes que componen al portamolde.

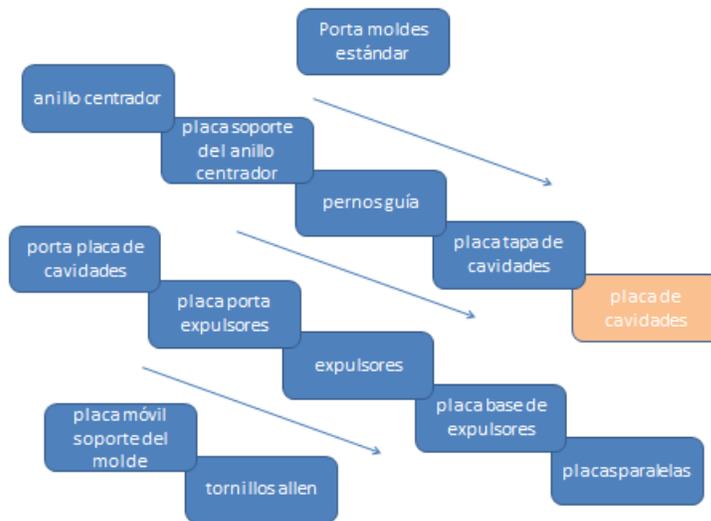


Figura 3.20 Partes que componen al molde de cavidades paletas



Figura 3.23 Ensamble de Placa de expulsores (izq.) y placas paralelas las cuales contienen a las placas de expulsores (der)

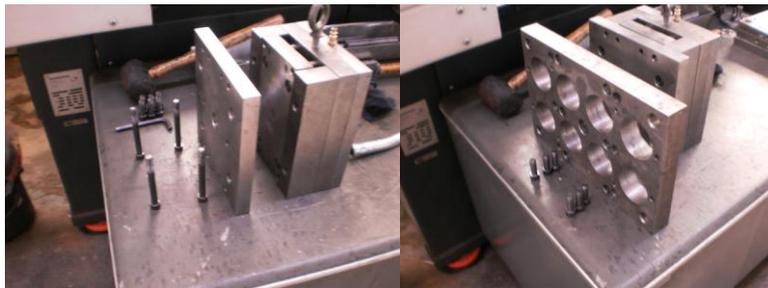


Figura 3.24 Placas de portamolde con tornillos de ensamble (izq.) y placa aumento para ajustar dimensiones a máquina (der)

Las cavidades para las paletas se realizaron por medio de electroerosión, después de tener las placas rectificadas, a las cavidades se les dio un acabado espejo para eliminar problemas de expulsión y para obtener el acabado superficial requerido, figura. 3.25 y 3.26. Además de las cavidades de paletas, se puede observar el canal de inyección, pozo frío, punto de inyección, barrenos para expulsores, venteo.

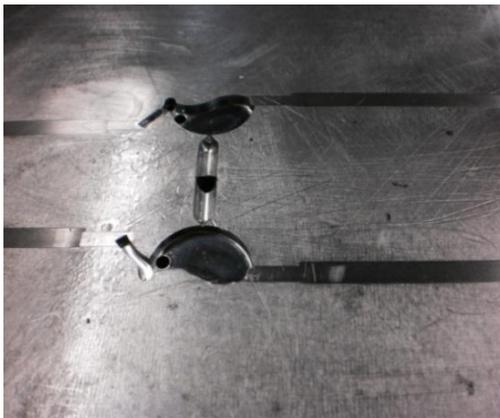


Figura 3.25 Detalle cavidades paletas

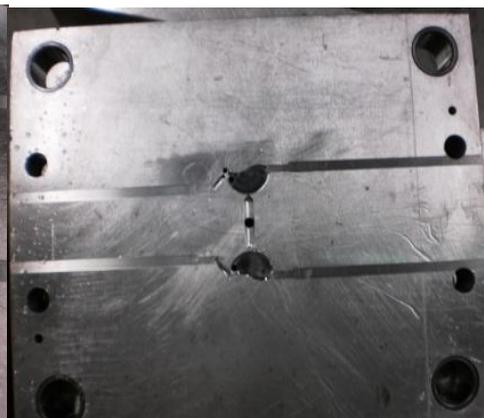


Figura 3.26 Detalle venteos paletas

Diseño de cavidad para la pieza base

El modelo sólido de la base del dosificador, fig. 3.27, muestra la necesidad de fabricar una placa con insertos que permita una liberación de la pieza al momento de su expulsión. Lo anterior es debido a que la pieza presenta protuberancias en la circunferencia.

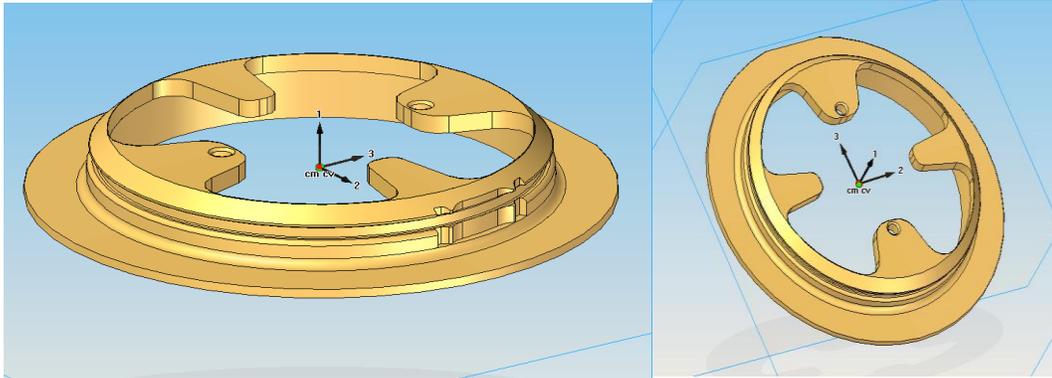


Figura 3.27 Modelo sólido de pieza base.

Forma de ejecución del molde: El molde debe contener sistemas de correderas deslizables para liberar la parte moldeada al momento de la expulsión, por cuestiones económicas se busco que el desplazamiento de las correderas fuese conducido por la apertura y cierre del molde, sin la necesidad de agregar un sistema más complejo. El molde se compone de dos placas con inserto macho, cavidad formada por dos correderas deslizables y la placa de inyección como tapa de la cavidad, con esto la pieza presentará dos líneas de partición.

Posición del punto de inyección. Se consideraron dos propuestas para determinar el punto de inyección. En la figura 3.28 (izquierda) se pensó en que los puntos de inyección tocaran las 4 salientes de la base para garantizar el llenado de los puntos críticos, pero esto crearía varias líneas de unión y complejidad en el maquinado. En la misma figura (derecha) se plantea que solo dos puntos de inyección podrían cubrir el espectro de llenado, reduciendo los tiempos de maquinado y costos. Con el análisis de flujo, se comprueba la funcionalidad del llenado de la cavidad.

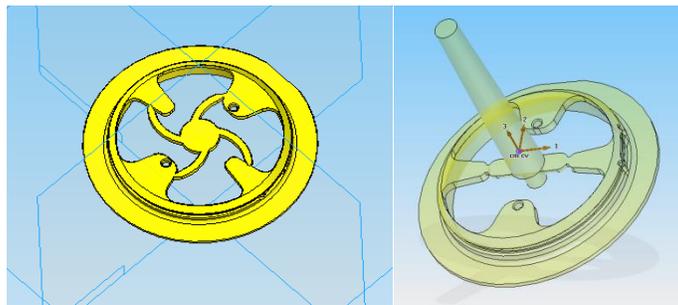


Fig. 3.28 Propuestas de punto de inyección para piezas base

Número de cavidades. Aplicando la ecuación 3.1 con el mismo valor de C.H y con el volumen de la pieza base igual a $5.02[cm^3]$, se obtiene que el número máximo de cavidades es de 28. Sin embargo por el carácter de prototipo y la inexperiencia en el dimensionamiento del sistema de correderas se decide fijar el numero de cavidades en uno.

Distribución de cavidades. La cavidad se ubicará al centro de la placa de cavidades, con lo cual se busca el balance del molde.

Sistema de colada. Se plantea el sistema de colada normal, figura, es decir sin calefactores, y con sistema de pozo frio.

Material de construcción. Acero 1045

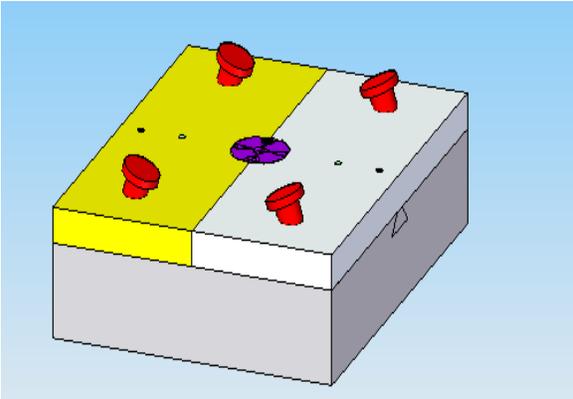
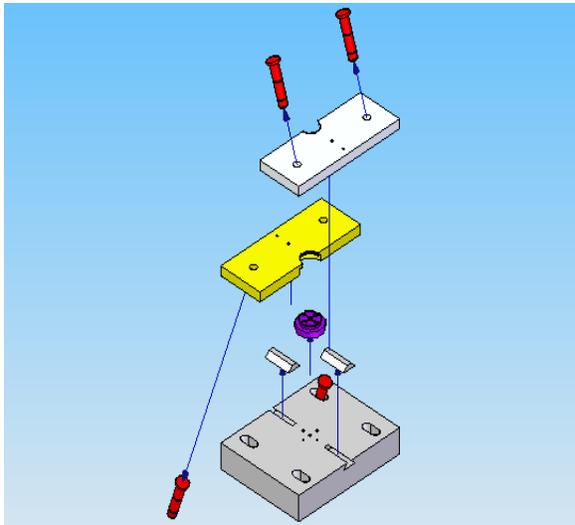
Sistema de expulsión. La expulsión de la pieza requiere de un sistema de correderas accionadas por pernos inclinados para liberar el trinquete circular que forma parte de la base antes de ser expulsada por los pernos. Las correderas con la geometría de la superficie exterior de la pieza son desplazadas por pernos guía inclinados 20° con respecto del eje de inyección de la máquina, esta inclinación recorre las guías para que permita la expulsión de la pieza y cuando el molde es cerrado las guías se desplazan para formar la cavidad de la base del dosificador.

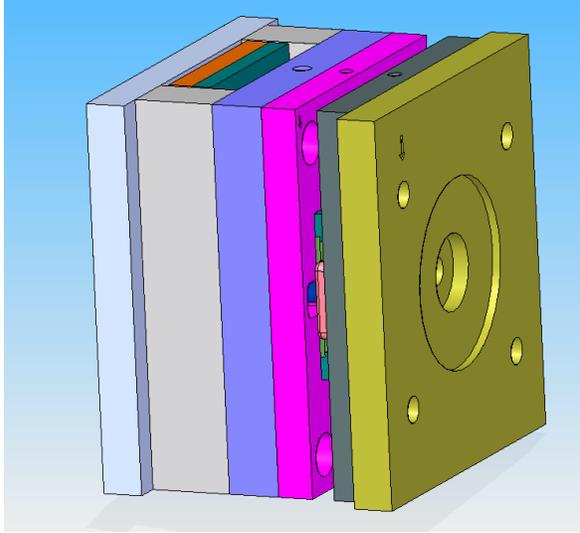
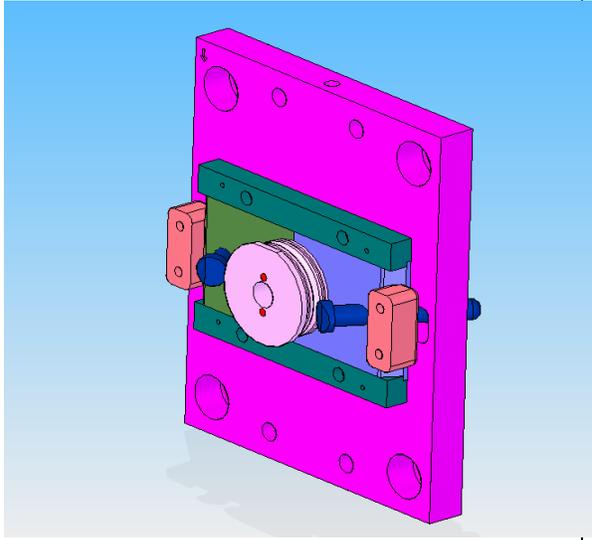
Las correderas fueron pensadas para deslizarse sobre colas de milano. Sobre la placa móvil se diseñó un inserto que dará la forma a la superficie interna de la base del ensamble. Se colocaron dos puntos de inyección que están colocados en las salientes que no contienen los barrenos porta paletas, donde no existe requerimiento mecánico.

En este caso la placa fija de inyección es plana y sólo recubre la cavidad formada por las correderas y el inserto, también llamado corazón; para formar la pieza.

En la tabla 3.7 se muestra un cuadro comparativo de dos opciones que se pensaron pudieran ser factibles de obtener para el sistema de deslizamiento antes planteado.

Tabla3.7 Cuadro comparativo opciones A y B para placa de insertos para pieza Base.

	<p>En la opción A se presentan placas correderas que abarcan el ancho y largo de las placas de cavidades las cuales estarán accionadas por pernos con inclinación de 20 °, estas a su vez correrán con placas sujetas a las correderas. La configuración del sistema de expulsión de ésta pieza es quizá la de mayor complejidad, la cual se observa en la imagen que vemos a la izquierda ya que contiene 4 pernos inclinados que le darán apertura a las placas correderas sobre la guía de cola de milano, y con esto permitir abrir el molde antes de ser expulsada la pieza. Se tiene el inserto con la configuración de molde cerrado, el cual será intercambiable y común al Portamolde.</p>
<p>En esta vista de la opción A se observa el despiece al separar los componentes de esta configuración de molde, se observa también que requiere de maquinados muy específicos como lo es la misma cola de milano con sus tolerancias para permitir el deslizamiento de las mismas, la placa base contiene además una serie de barrenos con ojales que contendrán a los pernos. Obsérvese que la placa base es de un espesor grande, esto es para contener a los pernos inclinados. Se observa el inserto y su fijación mediante tornillos.</p>	
	<p>En la opción B la configuración de molde con correderas para la pieza base, se muestra con el ensamble completo del</p>

	<p>molde, se ve que el porta placa de cavidades es el mismo que el utilizado en el molde de paletas, así como la placa que contiene al anillo centrador, se reducen considerablemente las correderas y se cambian las colas de milano por otras en forma rectangular. El inserto continuo estando al centro y la placa base reduce su tamaño considerablemente.</p>
<p>Se observa el detalle de las piezas de la configuración de la opción B, como ya se mencionó se reduce el tamaño de las correderas para solo ser de un tamaño un poco mayor al del inserto lo cual reduce a su vez a los pernos a solo 2, se observan además topes para las correderas al momento de estar cerrado el molde lo que impide que el material las abra por la presión del mismo.</p> <p>La placa de insertos intercambiables se diseña en esta configuración para permitir ser común a los dos insertos.</p> <p>Se diseñan correderas no tan largas como en el modelo anterior solo cubren la parte del inserto, se reduce además el número de pernos inclinados a solo 2 y en esta imagen se observa como quedarían los tacones (color rosa) que impiden que las correderas se abran al estar cerrado el molde</p>	

De la comparativa anterior, se observa que la opción B es la más adecuada para la fabricación de la placa de insertos de la pieza Base, por lo cual se hace el análisis de flujo y se verificará así, si el diseño es el adecuado.

Análisis de flujo para la base del dosificador. En la tabla 3.8 se indican los parámetros de inicio para el análisis de flujo en el simulador de flujo.

Tabla 3.8 parámetros de inicio para el análisis de flujo en el simulador .

- ° Temperatura de masa fundida: 190.0 (C)
- ° Temperatura del molde: 25.0 (C)
- ° Puntos de inyección: 1
- ° Presión máxima de inyección de la máquina: 180.000 (MPa)
- ° Tiempo de inyección seleccionado: Automático
- ° Conmutación velocidad/presión: Automático

Las figuras 3.29 y 3.30 muestran el análisis de flujo en relación a la calidad durante el enfriamiento y al tiempo de llenado.

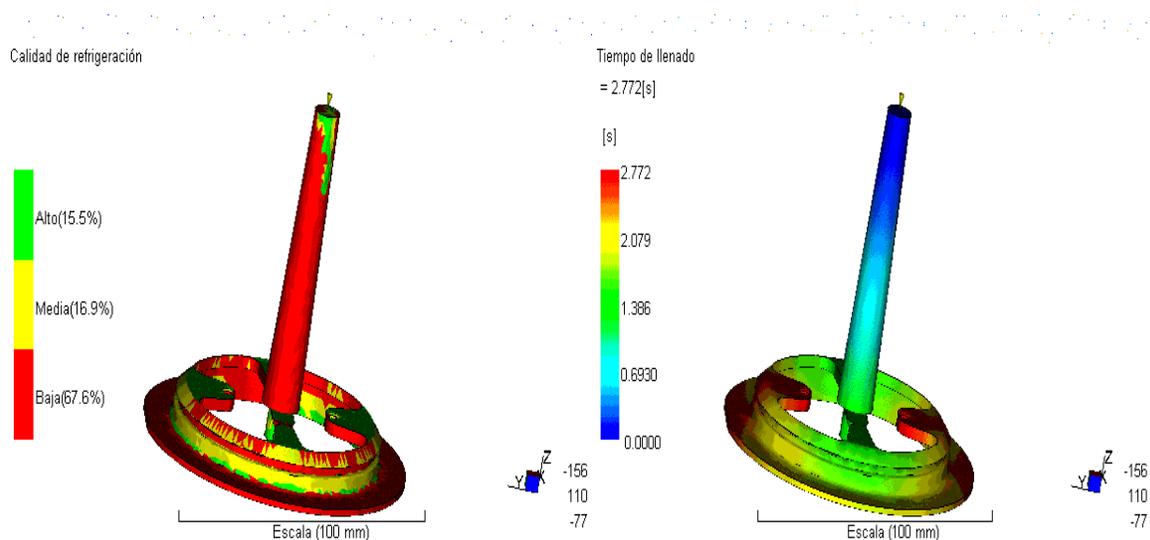


Figura 3.29 Calidad de refrigeración

Figura 3.30 Tiempo de llenado

Se aprecian por una parte que la calidad de la pieza durante el enfriamiento es deficiente, ya que se muestran muchas partes en color rojo o amarillo, que indican que la pieza tardará en enfriarse hasta la expulsión y por ende se deberá aumentar el tiempo de refrigeración durante el proceso. Respecto al tiempo de llenado, se puede ver que las protuberancias con los barrenos tardarán más en llenarse, 2.77[s]. La figura 3.31 se muestra una confianza de llenado alta, lo que indica que la pieza podrá llenarse con un buen ajuste en los parámetros.

Así mismo en la figura 3.32 se indica que la predicción de calidad es alta, y sólo es deficiente en la vela.

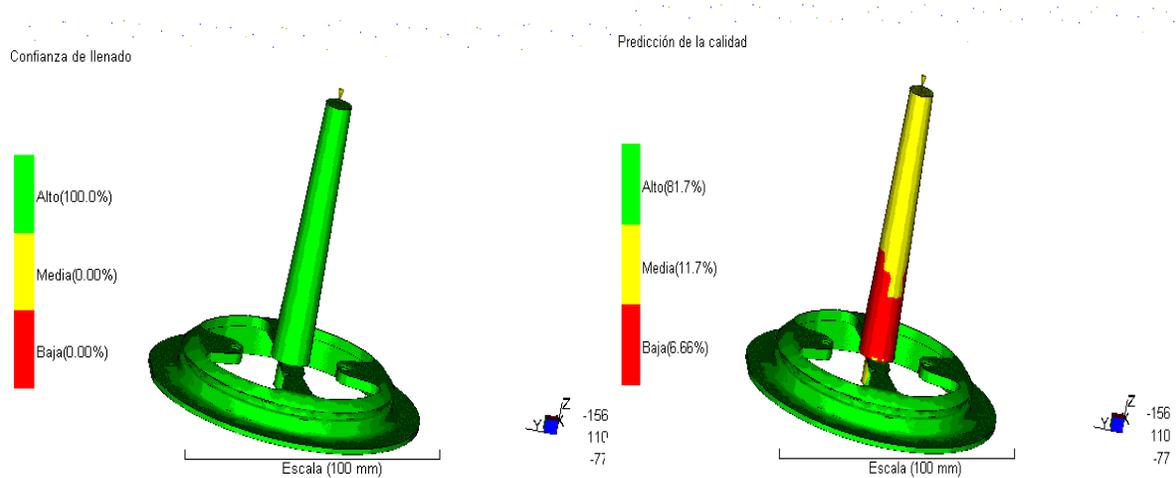


Fig. 3.31 Confianza de llenado

Fig. 3.32 Predicción de la calidad

El resumen del análisis de flujo se puede ver en la tabla 3.9.

Tabla 3.9 Resumen del análisis de flujo para la pieza base

- ° Tiempo de llenado: 2.77 [s]
- ° Presión de inyección: 19.323 [MPa]
- ° Área de fuerza de cierre: 17.5401 [cm²]
- ° Fuerza máx. de cierre durante el llenado: 1.666 [t]
- ° Conmutación de velocidad/presión a % volumen: 99.02 %
- ° Conmutación de velocidad/presión en tiempo: 2.70 [s]
- ° Tiempo estimado del ciclo: 88.97 [s]
- ° Peso total de la pieza: 7.552 [g]
- ° Volumen inyectado: 5.0257 [cm³]

Del resumen se observa que la presión de inyección de 19.32 [MPa] representa el 10.73% de la presión máxima de inyección disponible en la inyectora. También se visualiza que la fuerza máxima de cierre de 1.66 [t] es el 3.32% de la fuerza de cierre disponible de la inyectora.

En las figuras 3.33 y 3.34 se observan los resultados del aire atrapado y la estimación de rechupes durante el proceso de inyección.

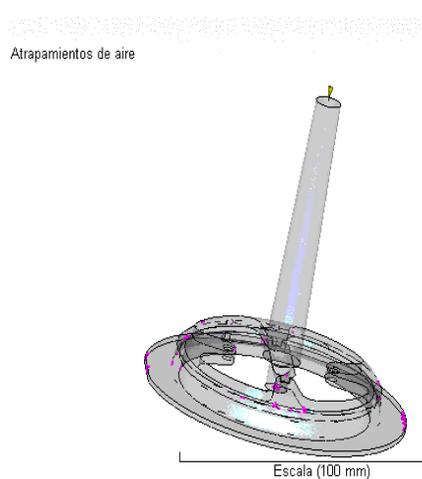


Figura 3.33 Aire atrapado

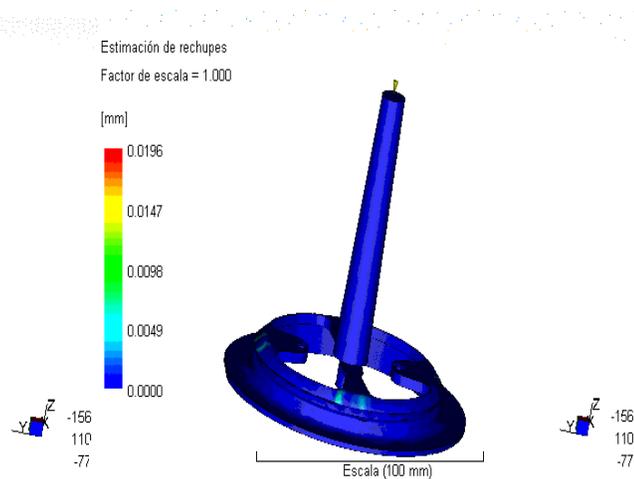


Figura 3.34 Estimación de contracciones

Se puede apreciar que existe aire atrapado en la periferia de la pieza, sin embargo, se puede considerar que su afectación en el funcionamiento es mínima ya que se encuentran sobre la línea de partición donde pueden escapar con un sistema de venteo. En cuanto a los rechupes, se observa que menos del 1% del modelo tiene rechupes con una profundidad de 0.02 [mm]

En la figura 3.35 y 3.36 se presenta el inserto de pieza base, se aprecia en la imagen el detalle de los pernos expulsores



Figura 3.35 Inserto pieza base

Figura 3.36 Inserto pieza base

Las placas correderas de la pieza base contienen barrenos inclinados, que le darán el movimiento diagonal a las correderas, los pernos se fabricaron con un menor diámetro para permitir el deslizamiento con las placas.

En la figura 3.37 se aprecia el detalle de las placas correderas en posición del molde cerrado, mientras en la figura 3.38 se observa la posición en molde abierto que permitirá la liberación de la pieza antes de su expulsión.

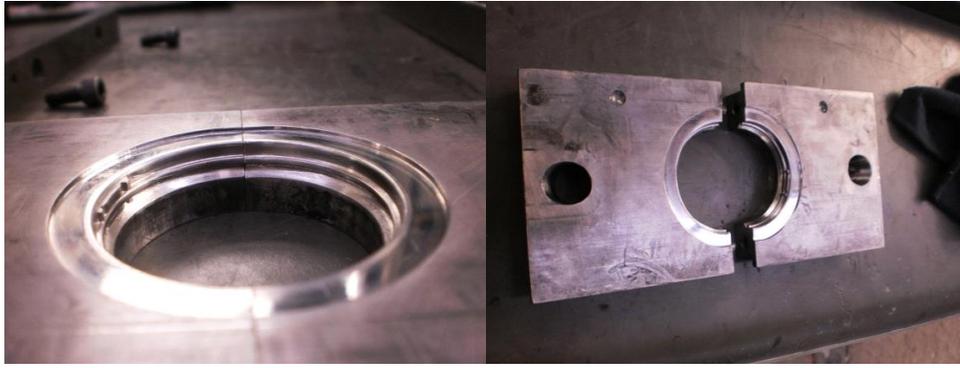


Figura 3.37 Placas correderas (cerrado)

Fig. 3.38 Placas correderas (abierto)

El ensamble de las placas correderas, insertos y pernos requiere un orden específico de ensamble, y especial cuidado de las piezas como pernos expulsores, ya que un ensamble erróneo provocará un mal funcionamiento. Tanto la figura 3.39 como la 3.40 muestran la posición del ensamble.



Figura 3.39 Ensamble de piezas que conforman la placa de pieza base. Detalle del ensamble de las correderas y la sujeción con tornillos.



En la figura 3.40 se muestra la secuencia que se siguió para ensamblar las partes que conforman el molde.

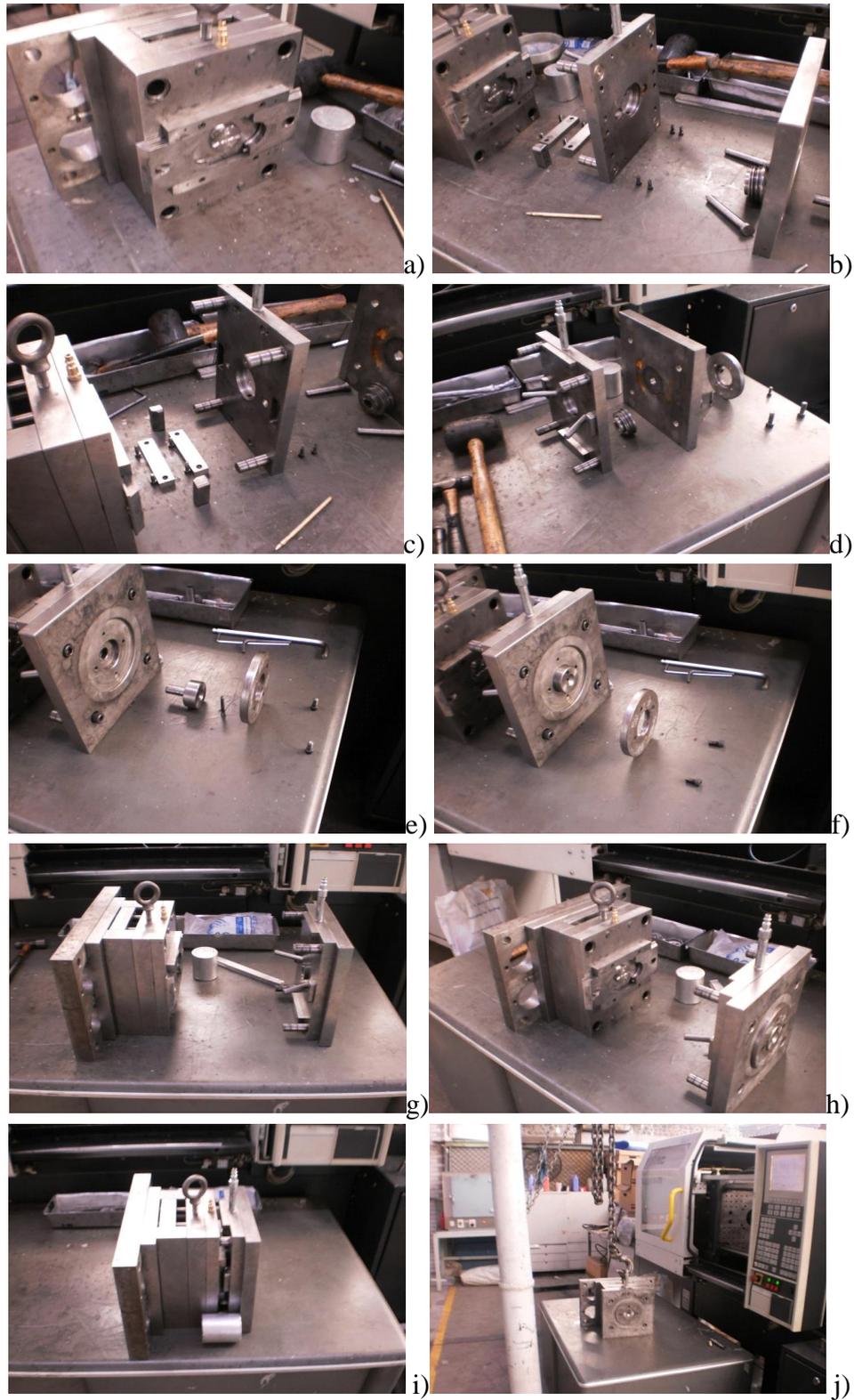


Figura3.40 Procedimiento de ensamblado de los componentes del molde para la fabricación de la pieza base.

Diseño de la cavidad para la pieza actuador.

Es la pieza superior o tapa que forma parte del dosificador, se considera esta pieza con mayor complejidad, ya que en la superficie interior cuenta con unas protuberancias que permiten el ensamble con la base, pero dificulta su expulsión. La propuesta de diseño se pensó en un inserto colocado en la placa de inyección móvil con la geometría requerida, y un inserto en la placa fija para dar forma a la superficie exterior.

Una parte importante en el diseño fue un cambio en el trinquete original de la pieza diseñada recortando la longitud de la protuberancia en cuatro secciones, esto es, para facilitar la expulsión de la pieza, además de tratar de aprovechar la flexibilidad del material cuando éste aún es caliente. Las secciones se sugieren de igual dimensión y colocadas simétricamente para procurar el balanceo de la cavidad.

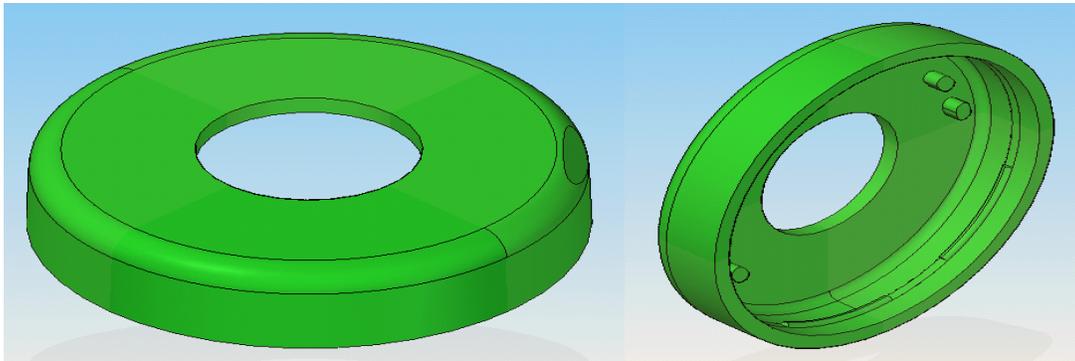


Fig. 3.41 Modelo sólido que muestra la geometría de la pieza actuador.

La figura 3.41 muestra el modelo sólido del actuador, como puede verse, contiene a los pernos que accionan las palancas de las paletas; Y se denotan las protuberancias internas de esta pieza.

Para desarrollar el diseño de la cavidad para esta pieza, se tenía la opción de utilizar corazones colapsables para facilitar la expulsión de la pieza. Sin embargo, por el corto tiempo que se tenía para el desarrollo del diseño y por la implicación de un mayor costo que no se autorizó, se decidió aprovechar la parte flexible de la pieza en caliente, quedando una alternativa del uso de un inserto intercambiable aprovechando el espacio para el inserto de la base.

Punto de inyección. Siguiendo la misma lógica que surgió para la fabricación de la pieza base, se propuso colocar solo dos puntos de inyección como se muestra en la figura. 3.42.

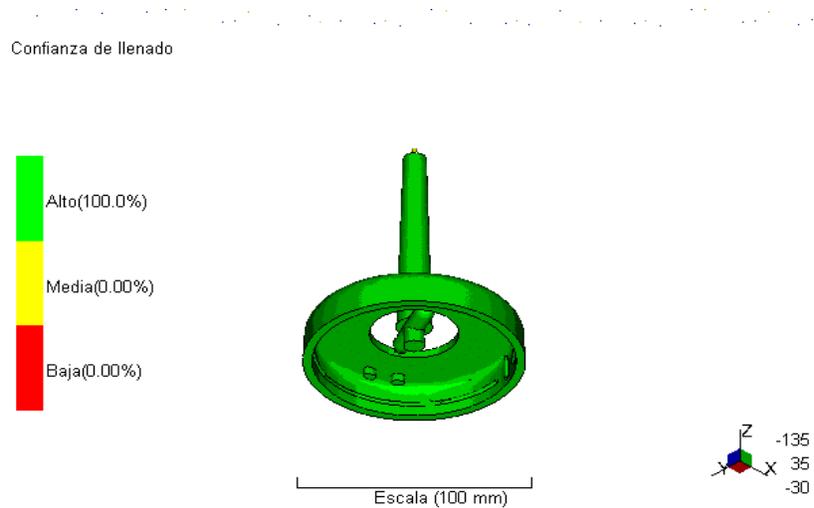


Figura 3.42 Distribución de los Puntos de inyección

Se realizó el análisis de flujo para buscar la posición en la cual los puntos de inyección aseguran el llenado simétrico de la pieza.

Número de cavidades. Usando la ecuación 3.1 con el mismo valor de C.H y con el volumen de la pieza actuador igual a $7.45[cm^3]$, se obtiene que el número máximo de cavidades es de 20. Sin embargo por el carácter de prototipo se decide que sea una cavidad.

Distribución de cavidades. La cavidad se ubicará al centro de la placa de cavidades, con lo cual se busca el balance del molde.

Sistema de colada. Se plantea el sistema de colada normal, es decir sin calefactores, y con sistema de pozo frío.

Material de construcción. Acero 1045

Análisis de flujo para pieza actuador. Al igual que en la pieza base se introducen los parámetros al simulador mismos que aparecen en la tabla 3.10.

Tabla 3.10 Parametros de entrada al simulador de flujo

<ul style="list-style-type: none"> ° Temperatura de masa fundida: 190.0 (C) ° Temperatura del molde: 25.0 (C) ° Puntos de inyección: 1 ° Presión máxima de inyección de la máquina: 180.000 (MPa) ° Tiempo de inyección seleccionado: Automático ° Conmutación velocidad/presión: Automático
--

Se observa que la confianza de llenado, figura. 3.43, es alta en las partes críticas de la pieza como lo son los pernos, por lo que la colocación de los puntos de inyección se considera adecuada. El tiempo de llenado es de 1.08 [s], fig. 3.44.

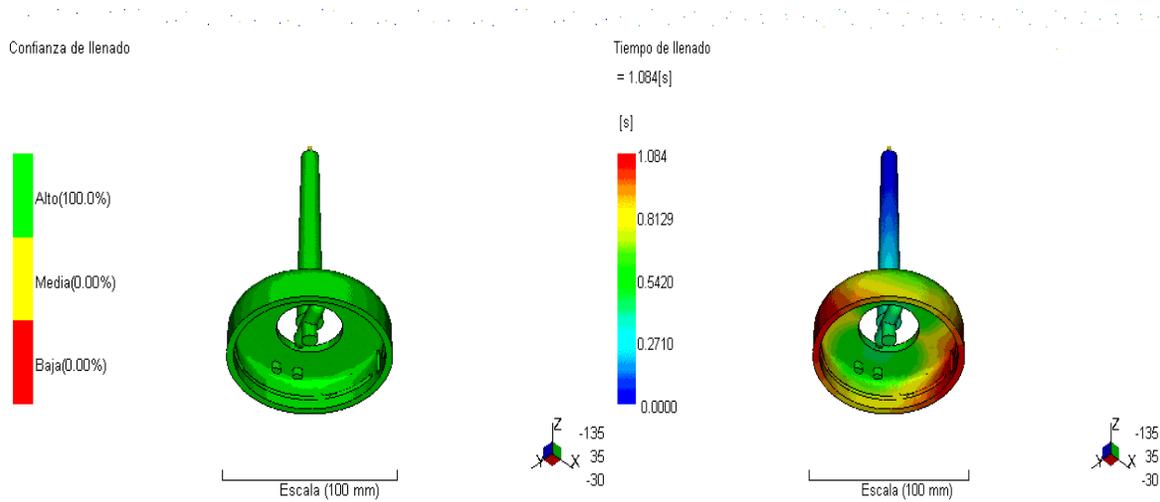


Figura 3.43 Confianza de llenado

Figura 3.44 Tiempo de llenado

En cuanto a la predicción en la calidad, figura 3.45, se denota alta en la pieza más no en la colada. En cuanto al aire atrapado, este se observa en la base inferior de la pieza, por lo que se considera despreciables para el buen funcionamiento del dosificador ya que puede escapar por la línea de partición, sin embargo el aire atrapado al final de los pernos puede ocasionar problemas de llenado de la pieza y el efecto diesel, figura 3.46.

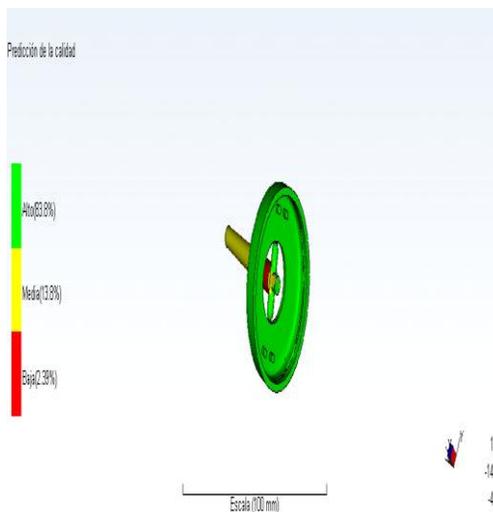


Fig. 3.45 Predicción de la calidad

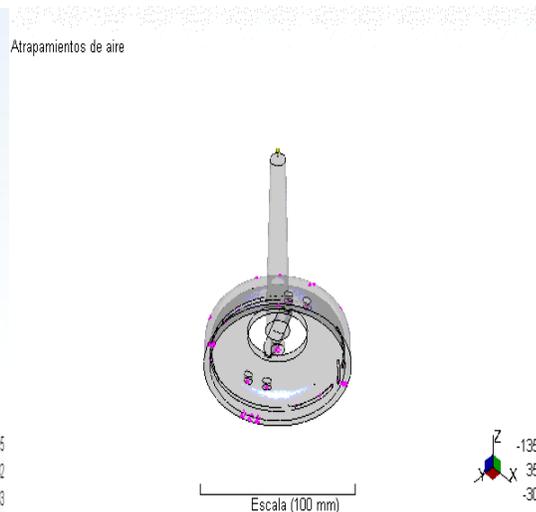


Fig. 3.46 Aire atrapado

El resumen del análisis de flujo que proporciona el simulador de flujo, aparece en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Resumen del análisis de flujo para el actuador

° Tiempo de llenado: 1.08 [s]
° Presión de inyección: 9.302 [MPa]
° Área de fuerza de cierre: 17.6623 [cm ²]
° Fuerza máx. de cierre durante el llenado: 0.570 [t]
° Conmutación de velocidad/presión a % volumen: 99.00 %
° Conmutación de velocidad/presión en tiempo: 1.07 [s]
° Tiempo estimado del ciclo: 77.40 [s]
° Peso total de la pieza: 9.972 [g]
° Volumen inyectado: 7.4530 [cm ³]

De la tabla 3.11 se observa que la presión de inyección de 9.30 [Mpa] corresponde al 5.16% de la máxima presión de inyección disponible, también se visualiza que la fuerza máxima de cierre de 0.57 [t] es el 1.14% de la fuerza de cierre disponible de la inyectora

Sistema de expulsión. Se decide por simplificación en el diseño optar por la expulsión en caliente aprovechando la flexión del material, como ya se mencionó, aun con la temperatura alta esto conlleva el riesgo de que la pieza no sea lo suficientemente flexible o sea demasiado flexible, para lograr que la pieza se logre sin defectos, ya que hasta este momento no se sabe si el material será frágil al solidificarse, pues se carece de información del comportamiento del material en estas condiciones

La figura 3.47 muestra el detalle de ranura y canales de inyección, se observan los barrenos que darán forma a los pernos y los cuatro barrenos donde serán colocados los expulsores.



Figura 3.47 Inserto de la pieza actuador.

La placa fija contiene un inserto que dará forma a la superficie exterior del actuador, se observa en la figura 3.48 que el acabado es pulido, para facilitar la expulsión y para lograr acabado superficial requerido en las piezas inyectadas.

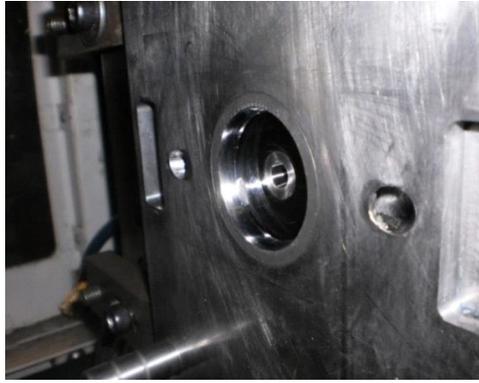


Figura 3.48 Placa de inserto actuador parte exterior.

Los insertos cuentan con un sistema de refrigeración que permitirá a la pieza lograr una solidificación controlada antes de su expulsión. En la figura 3.49 se muestran algunos de los componentes.



Figura 3.50 Inserto para la fabricación del actuador donde se observan los empaques y el canal de refrigeración.

3.3 DIMENSIONES EN LOS MOLDES DE INYECCION

Las cavidades del molde de inyección se deben sobredimensionar para compensar el efecto de la contracción, este sobredimensionamiento está basado en el material a procesar.[14] en este caso el material contrae 0.004[in/in]+/- 0.001, según el fabricante. Se presentan a continuación las dimensiones críticas de las piezas sobre el modelo sólido y su contra parte en el molde.

La figura 3.51 muestra las dimensiones críticas de las paletas, estas dimensiones se comparan con las de los moldes y se obtiene su desviación mediante la ecuación 3.3

$$Desviación \left[\frac{mm}{mm} \right] = \frac{(dimensi \acute{o}n \text{ en el modelo s\u00f3lido [mm]) - (dimensi \acute{o}n \text{ en el molde [mm])}{dimensi \acute{o}n \text{ en el modelo s\u00f3lido [mm] } \dots 3.3$$

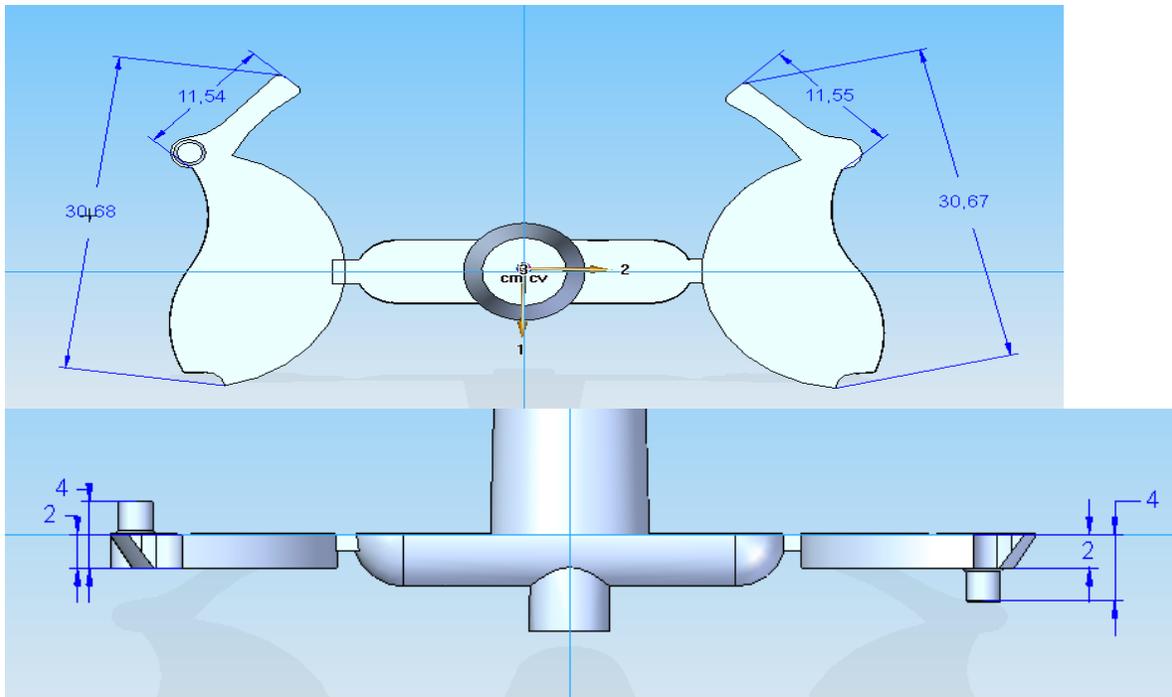


Figura 3.51 Dimensiones críticas de las paletas sobre el modelo sólido

Tabla 3.12 Dimensiones críticas de las paletas

Dimensión crítica	Modelo sólido[mm]	Molde[mm]	Diferencia[mm]	Desviación[mm/mm]
Longitud paleta X	30.68	31.36	-0.68	0.02
Longitud paleta Y	30.67	31.28	-0.61	0.01
Longitud palanca paleta X	11.54	11.38	0.16	0.01
Longitud palanca paleta Y	11.55	11.44	0.11	0.09
Espesor paleta X	2	2.01	-0.01	0.005
Espesor paleta Y	2	1.96	0.04	0.02
Espesor + altura perno paleta X	4	4.09	-0.09	0.02
Espesor + altura perno paleta Y	4	4.12	-0.12	0.03

De la tabla 3.12 se obtiene que la máxima diferencia va desde -0.68 a 0.16 [mm]. Por lo tanto estas son las tolerancias entregadas por el fabricante en el molde de paletas. Se observa que la desviación va desde 0.005 a 0.02[mm/mm] de aquí se puede observar que el molde excede la desviación recomendada por el fabricante en un 300%. Sin embargo se decide continuar con el trabajo y observar cómo se comportan las dimensiones sobre las piezas moldeadas.

La figura 3.52 muestra las dimensiones críticas para la pieza base del dosificador.

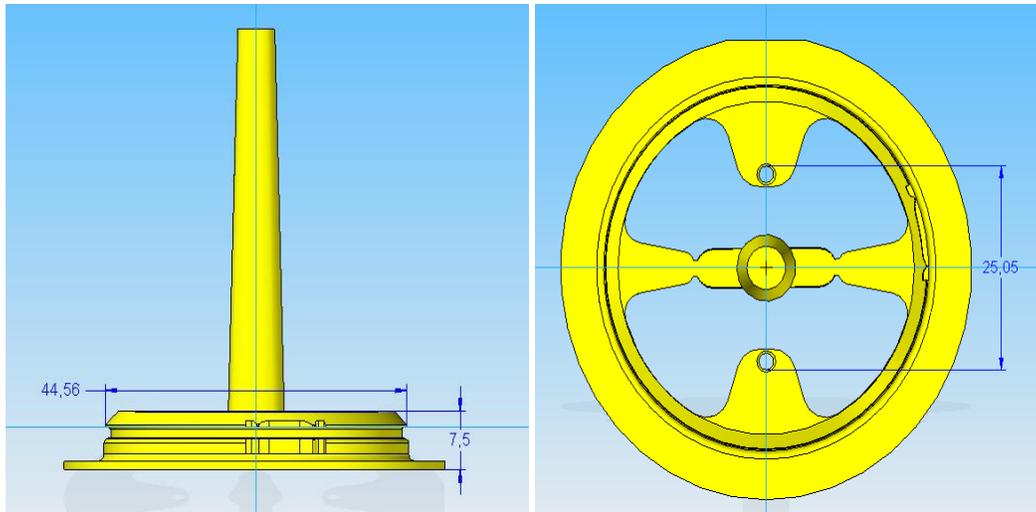


Figura 3.52. Dimensiones críticas de la base sobre el modelo sólido

Tabla 3.13 Dimensiones críticas de la base

Dimensión crítica	Modelo sólido[mm]	Molde[mm]	Diferencia[mm]	Desviación[mm/mm]
Altura de base	7.5	7.54	-0.04	0.005
Diámetro de enganche	44.56	45.05	-0.49	0.01
Distancia exterior entre barrenos	25.05	24.99	0.06	0.002

De la tabla 3.13 se obtiene que la máxima diferencia va desde -0.04 a 0.06 [mm]. Por lo tanto estas son las tolerancias entregadas por el fabricante en el molde de la base. Se observa que la desviación va desde 0.002 a 0.01[mm/mm] de aquí se puede observar que el molde excede la desviación recomendada por el fabricante en un 100%. Sin embargo se decide continuar con el trabajo y observar cómo se comportan las dimensiones sobre las piezas moldeadas.

La figura 3.53 muestra las dimensiones críticas para el actuador del dosificador.

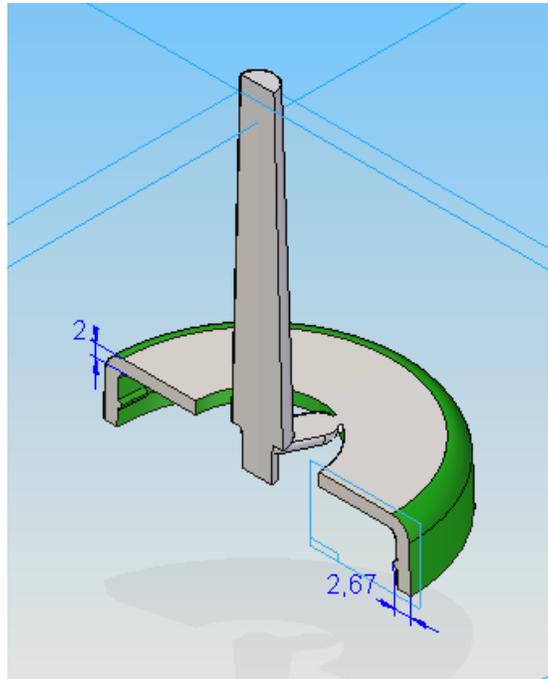


Figura 3.53. Dimensiones críticas del actuador sobre el modelo sólido

Tabla 3.14 Dimensiones críticas del actuador

Dimensión crítica	Modelo sólido[mm]	Molde[mm]	Diferencia[mm]	Desviación[mm/mm]
Espesor tapa	2	1.99	0.01	0.005
Protuberancia 1	2.67	2.7	-0.03	0.01
Protuberancia 2	2.67	2.5	0.17	0.06
Protuberancia 3	2.67	2.5	0.17	0.06
Protuberancia 4	2.67	2.5	0.17	0.06

De la tabla 3.14 se obtiene que la máxima diferencia va desde -0.03 a 0.17 [mm]. Por lo tanto estas son las tolerancias entregadas por el fabricante en el molde de la base. Se observa que la desviación va desde 0.005 a 0.06[mm/mm] de aquí se puede observar que el molde excede la desviación recomendada por el fabricante en un 1100%. Sin embargo se decide continuar con el trabajo y observar cómo se comportan las dimensiones sobre las piezas moldeadas, además de dejar las cavidades para las protuberancias más pequeñas para facilitar la expulsión.

3.4 COSTOS DE LOS MOLDES DE INYECCION

Las cotizaciones de fabricación de moldes de inyección requieren entre otros detalles la presentación de la pieza a realizar en plano o modelo sólido, como esta información no se podía ofrecer a los fabricantes de moldes porque el dosificador se encontraba en proceso de patente se hizo una estimación del costo del molde como si fuesen tres moldes distintos, figura 3.54-3.56

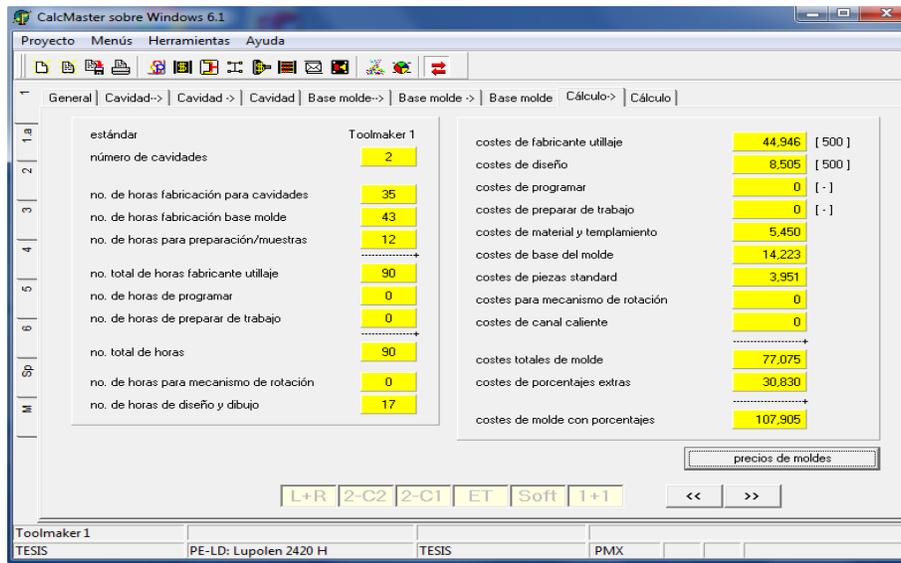


Figura 3.54 Estimación de costo del molde de paletas

Este molde según el software empleado tendría un costo de \$107,905.00 MXN, considerando los detalles de diseño ya planteados.

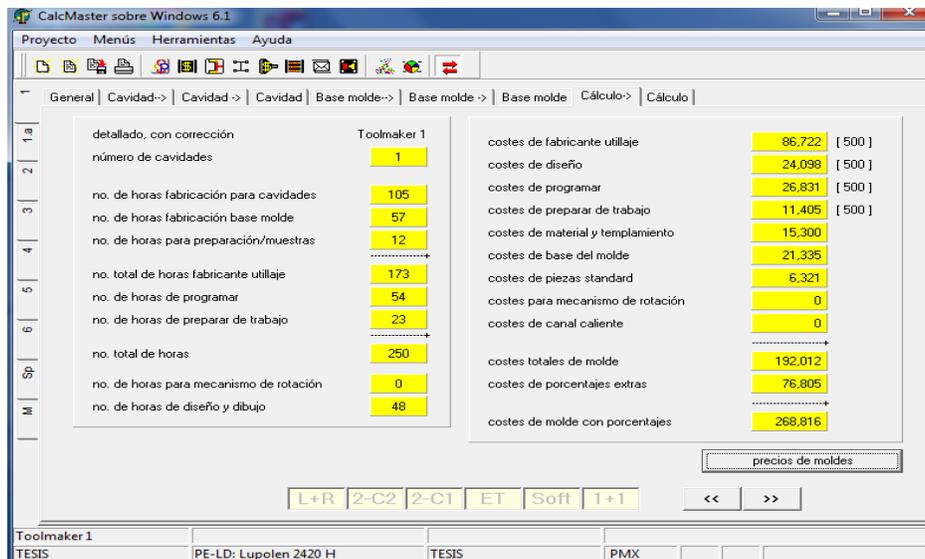


Figura 3.55 Estimación de costo del molde de la base

El molde de la base tendría un costo de \$268,816.00 MXN, considerando los detalles de diseño ya planteados.

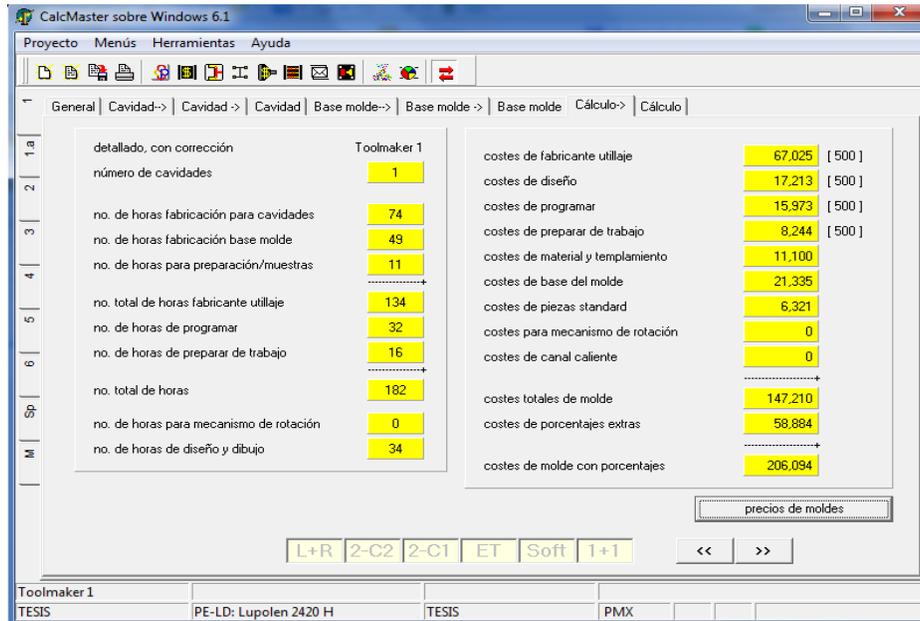


Figura 3.56 Estimación de costo del molde del actuador

El molde del actuador tendría un costo de \$206,094.00 MXN, considerando los detalles de diseño ya planteados.

La suma del costo de los tres moldes prototipo es de \$582,815.00MXN, el molde usado fue cotizado en \$130,000.00 MXN(2011) aproximadamente El costo disminuyó principalmente por la capacidad del molde de compartir piezas en el ensamble de la cavidad de una geometría a otra.

4.-VALIDACIÓN DEL MOLDE DE INYECCIÓN MEDIANTE LA METODOLOGÍA DE MOLDEO CIENTÍFICO

La experimentación se realizó para las diferentes cavidades que dan forma al ensamble del dosificador, usando el mismo material.

El PLA, como se indicó en el capítulo 2, muestra afinidad por absorber agua del medio ambiente, es por eso que el fabricante entrega el material en bolsas cerradas que mantienen una humedad relativa inferior a 250 ppm. Este material para ser procesado se requiere que la humedad de los pellets sea inferior a las 100 ppm, según *NatureWorks LLC*. Por lo tanto, es necesaria la implementación de un proceso de secado sobre el material que se encontró expuesto a la atmosfera, la figura 4.1 muestra las condiciones de secado recomendadas por el fabricante del PLA.

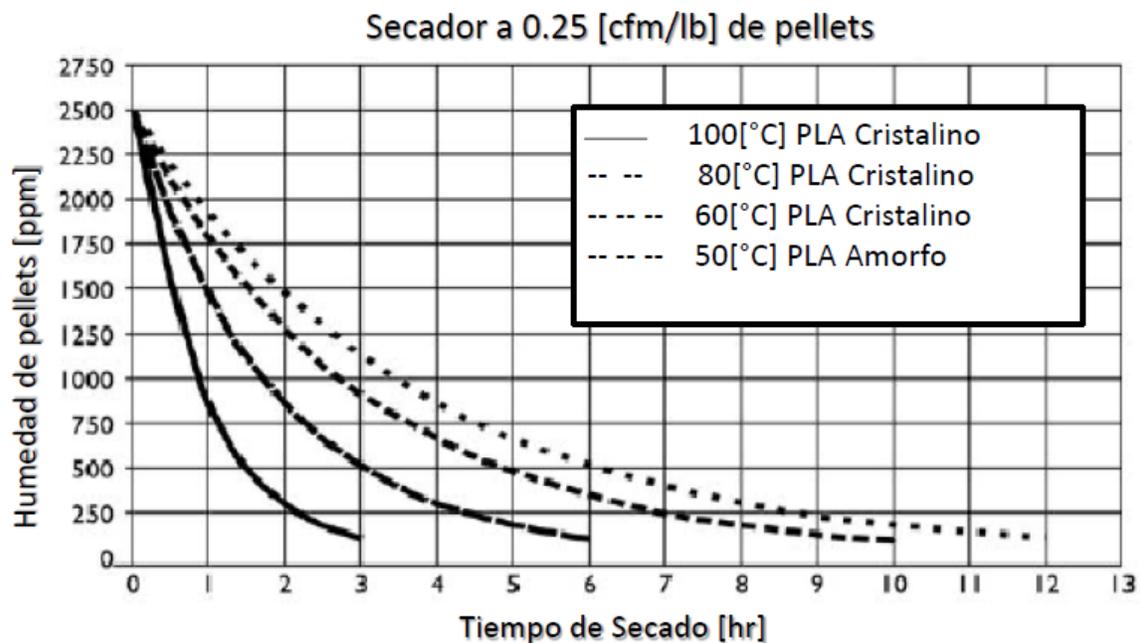


Figura 4.1. Curva de secado para disminuir el nivel de Humedad en Pellets de PLA.[3]

Según la figura 4.1, dependiendo de la presentación del material, semicristalino o amorfo, y de la humedad presente en él, se requiere de un secador de tiro forzado con capacidad mínima de 0.25 [cfm/lb] (pie cubico por minuto por cada libra de material) de pellets a secar. En contraste el Laboratorio de Procesamiento de Plásticos cuenta sólo con una estufa de secado Marca Riosa ® Modelo EC51, que brinda una temperatura máxima de 120[°C] en 12 [hr.] de rampa de calentamiento, con tiro inducido, figura 4.2; en la tabla 4.3 se muestra los datos principales de la estufa.



Figura 4.2. Estufa de Cultivo del Laboratorio de Procesamiento de Plásticos, izquierda y derecha charolas de uso para el secado del material.

Tabla 4.3. Datos de la estufa de cultivo Marca Riosa®

EQUIPO	Estufa de cultivo
MARCA	Ríos Rocha S.A (Riossa)
MODELO	EC51
SERIE	ECML
VOLTS	127
AMPS	2.5
CICLOS	50-60
MEDIDAS INTERIORES	51 x 46 x 46 [cm]

Es claro que este equipo no cumple con las condiciones de secado recomendadas por el fabricante; sin embargo, se adecuó la estufa de cultivo para obtener los escenarios de

secado recomendados por los fabricantes de cualquier polímero, para este trabajo el escenario que se requiere es el siguiente; un secado con flujo de aire de $Q= 0.25$ [cfm/lb] con temperatura $T= 80^{\circ}\text{C}$ durante un tiempo $t= 6$ [hr], según figura 4.1. Pero dadas las condiciones del laboratorio se decide utilizar la estufa marca Riosa de tal manera que fuese equivalente el tratamiento previo.

Cabe mencionar que el Laboratorio de Procesamiento de Plásticos no cuenta con el equipo necesario para estimar la cantidad de humedad que retira del material la estufa de cultivo instalada, por esta razón se experimentó en el Laboratorio de Biología de Suelos perteneciente al Instituto de Geofísica de la UNAM campus C.U. ya que este laboratorio cuenta con una estufa de cultivo marca Riosa, un desecador y una balanza analítica, equipos necesarios para realizar la medición gravimétrica de la remoción de humedad en el material PLA.

4.1 DESARROLLO DE LA MEDICIÓN GRAVIMETRICA DE LA REMOCIÓN DE HUMEDAD EN MATERIAL PLA.

Se extrajeron 10 muestras del saco de PLA, figura 4.3, Posteriormente, las muestras se colocaron en 10 recipientes de aluminio, con una masa de 5.0238 gr de PLA figura 4.4. La medición de la masa fue realizada en la balanza analítica ohaus explorer pro, capacidad de 200 [g] y resolución de 0.0001[g] figura 4.5.,



Figura 4.3. Saco de PLA y extracción de muestras.



Figura 4.4. Muestras en recipientes de aluminio dentro de la estufa marca Riosa.



Figura 4.5. Balanza analítica explorer Pro perteneciente al Laboratorio de Biología de Suelos. UNAM.

Después de los ajustes iniciales de la balanza, se llevaron a cabo las mediciones de la masa a cada hora hasta completar 4 hrs de exposición a 80°C.

Las muestras se colocaron en un desecador inmediatamente que salieron del horno a una temperatura de 80°C y permanecieron ahí hasta que las muestras alcanzaron la temperatura ambiente de 18°C. Fig 4.6.



Figura 4.6. Desecador usado para enfriar las muestras evitando la hidratación de la muestra.

Enseguida, se tomó la medición de la masa de las muestras y se reincorporaron a la estufa. Este procedimiento se llevó a cabo después de completar la primera hora y hasta completar 4 hrs.

En una hoja de cálculo se fueron vaciando las lecturas tomadas para formar la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Medición de masas de las muestras de PLA

MUESTRAS	PLA		TIEMPO DE SECADO[h]			
			1	2	3	4
#MUESTRA	PESO INICIAL [g]	TEMPERATURA SECADO [°C]	PESO FINAL 1 [g]	PESO FINAL 2[g]	PESO FINAL 3[g]	PESO FINAL 4[g]
1	50.0272	80	49.9134	49.8963	49.9059	49.8922
2	50.0196	80	49.8928	49.875	49.8884	49.879
3	50.0254	80	49.9216	49.8985	49.8931	49.887
4	50.0322	80	49.915	49.8895	49.8953	49.8915
5	50.0066	80	49.8852	49.873	49.8694	49.8744
6	50.0198	80	49.8905	49.8802	49.8769	49.8838
7	50.0314	80	49.9236	49.907	49.9024	49.8996
8	50.0375	80	49.9215	49.905	49.9022	49.9115
9	50.0189	80	49.8792	49.868	49.8715	49.8827
10	50.0194	80	49.9063	49.883	49.8768	49.8885

La tabla 4.4 muestra el comportamiento de la masa de cada una de las 10 muestras después del tiempo de secado a 80[°C], se observa que la masa va disminuyendo debido a la humedad que fue removida, aplicando el método gravimétrico de comparación de masas y aplicando la ecuación 4.1.

$$\%H = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i} \right) \times 100 \quad 4.1$$

Donde:

$\%H \rightarrow$ Porcentaje de humedad removido

$P_i \rightarrow$ Peso inicial de la muestra

$P_f \rightarrow$ Peso final de la muestra

Se obtiene la cantidad de humedad retirada de cada muestra después de 1,2,3 y 4 horas de exposición a 80°C de secado, como se ve en la tabla 4.5

Tabla 4.5. Porcentaje de Humedad relativa en las muestras de PLA

#Muestra	% DE HUMEDAD RELATIVA			
	1 hr	2 hr	3 hr	4 hr
	$((P_i - P_{f1})/P_i) \times 100$	$((P_{f1} - P_{f2})/P_{f1}) \times 100$	$((P_{f2} - P_{f3})/P_{f2}) \times 100$	$((P_{f3} - P_{f4})/P_{f3}) \times 100$
1	0.227476253	0.034259337	-0.019239904	0.027451664
2	0.253500628	0.03567649	-0.026867168	0.018842055
3	0.207494593	0.046272555	0.010821969	0.012226139
4	0.234249144	0.051086848	-0.011625693	0.007615948
5	0.242767955	0.024456151	0.007218335	-0.010026188
6	0.258497635	0.020645213	0.006615852	-0.013834059
7	<u>0.215464688</u>	<u>0.033250807</u>	<u>0.009217144</u>	<u>0.005610953</u>
8	0.23182613	0.033051891	0.00561066	-0.018636453
9	0.279294427	0.022454249	-0.017646587	-0.011829147
10	0.226112268	0.046687492	-0.010404346	-0.00062139

La tabla 4.5 muestra el porcentaje de humedad relativa extraída de cada muestra durante 4 horas, se observa que las muestras, a pesar del secado, absorbieron humedad, pero la muestra 7, disminuyó su peso hasta el valor de 49.8996 [g] con ello se obtuvo un valor de 0.005% de humedad relativa mediante el secado a 80 [°C] durante 4 horas. La figura 4.7 muestra la caída de humedad de la muestra 7.

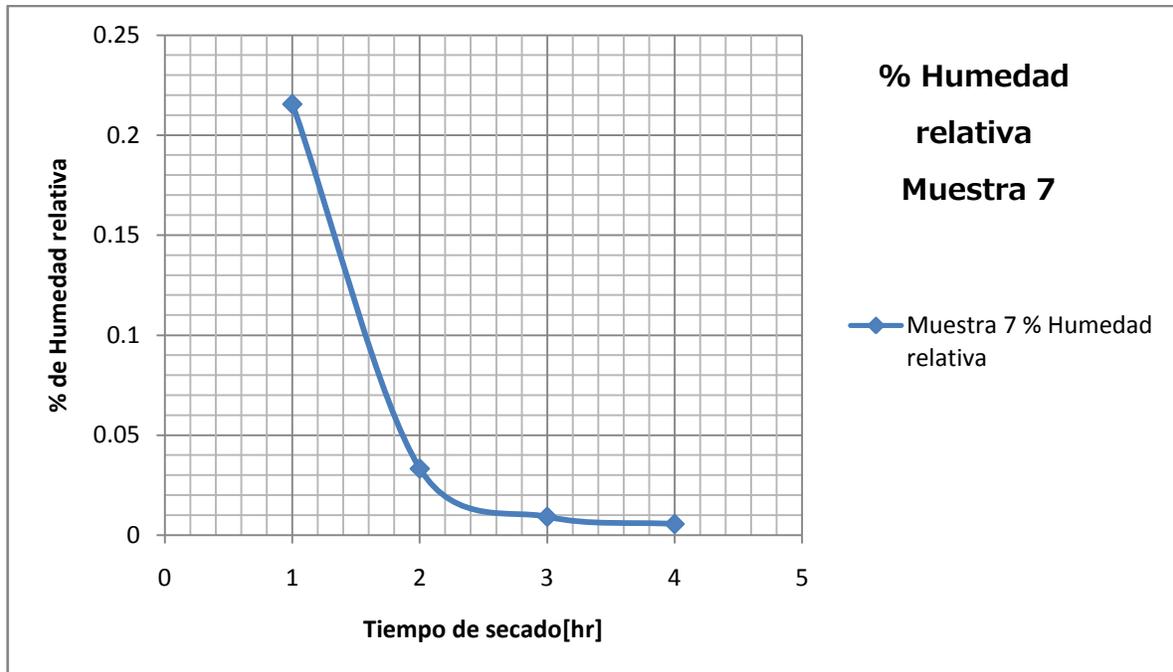


Figura 4.7. Relación del tiempo de secado vs % de humedad relativa para la muestra 7.

Con base en estos resultados se determinó que el material adquiere una humedad relativa de 0.010 % en 4 horas a temperatura 80[°C].

Con los datos obtenidos en la experimentación anterior, se estableció la secuencia de secado para la estufa del Laboratorio de Procesamiento de Plásticos, esto es:

- Se elevó la temperatura de la estufa durante 3 horas hasta alcanzar 80[°C]
- Se dispusieron tres contenedores con material PLA en las siguientes cantidades
 - Contenedor uno: 5 [kg]
 - Contenedor dos: 3.3 [kg]
 - Contenedor tres: 3 [kg]
 - Total 11.3 [kg]
- Se controló la temperatura de homogenización del material con movimientos uniformes a cada hora. La figura 4.8, muestra el incremento de temperatura del PLA durante la etapa de secado.

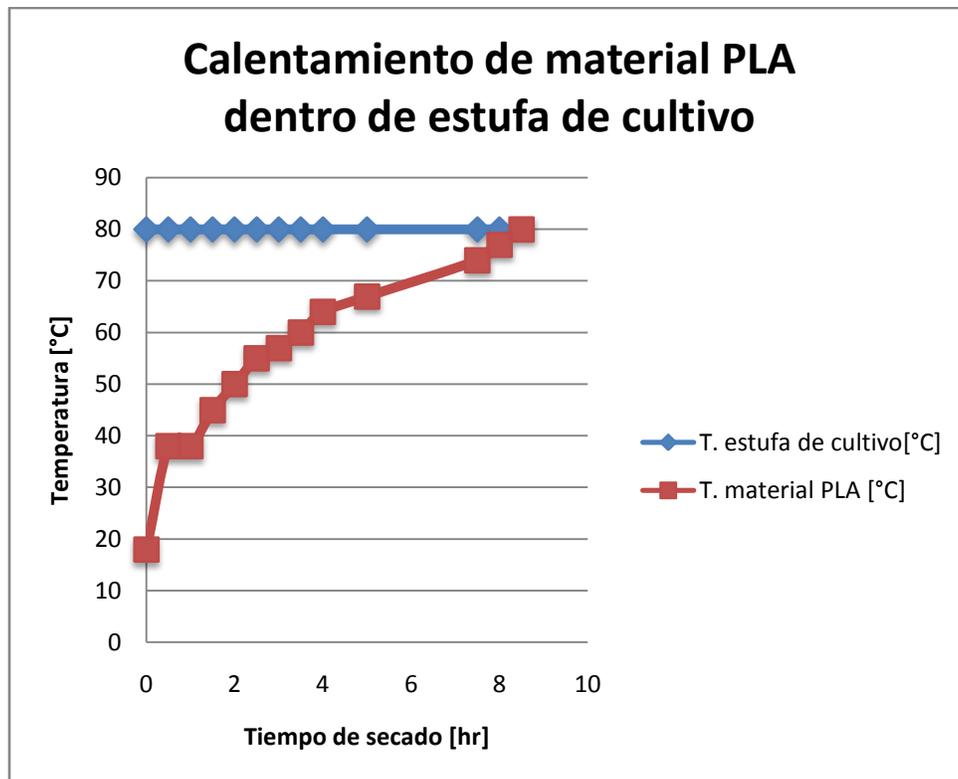


Figura 4.8 Gráfico de la curva de calentamiento del material PLA dentro de la estufa de cultivo Riosa ® del Laboratorio de Procesamiento de Plásticos (LPP).

De la figura 4.8 se observa que para la cantidad de masa a deshumidificar en la estufa del Laboratorio de Procesamiento de Plásticos, en el tiempo de secado de 4 horas, la temperatura del material no ha alcanzado la de la estufa, por lo que se decidió dejar un mayor tiempo de exposición hasta alcanzar 80[°C]. Requiriendo para esto 8 horas para que se deshumidifique 11.3 [kg] de material.

4.2 PARAMETRIZACIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN PARA LAS PARTES DEL DOSIFICADOR

- La parametrización del proceso de inyección se inicia con la fabricación del actuador para el dosificador de acuerdo al modelo sólido de la figura 4.9.

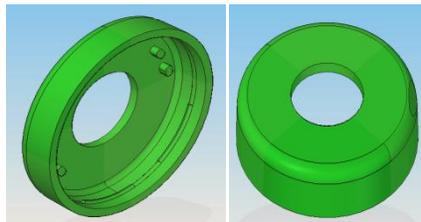


Figura 4.9 Modelo sólido de la pieza actuador del dosificador

Así mismo se aplicó el análisis de moldeo científico para cada una de las piezas restantes pero sólo se mostrarán los resultados obtenidos para fines de comparación.

Las condiciones iniciales para el montaje del molde de la cavidad actuador del dosificador, son las siguientes: el espesor de molde es de 222.7 [mm], apertura máxima de 300[mm], carrera de expulsores en 85[mm] y presión de expulsión de 40[bar].

4.3 CONTROL DE TEMPERATURA EN EL MOLDE DE INYECCIÓN

Una vez montado el molde se procede a medir el flujo máximo de líquido refrigerante en los canales 3 y 4, de la máquina que se relacionan con el enfriamiento del molde, el canal 3 tiene un caudal máximo de 3.448[L/min] para el control de atemperamiento de la placa fija, el canal 4 con un caudal máximo de 4.274 [L/min], controla la atemperación de la placa móvil, figura 4.11. La figura 4.10 muestra las conexiones respectivas de refrigeración para cada parte del molde.

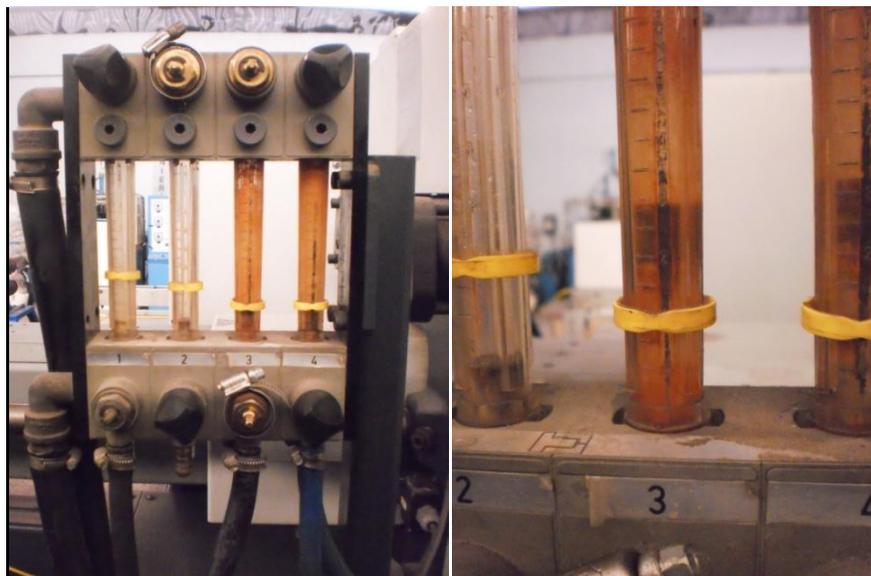


Figura 4.10. Medidores de flujo de la máquina de inyección DEMAG ergotech pro 50-270 correspondientes a la atemperación del molde

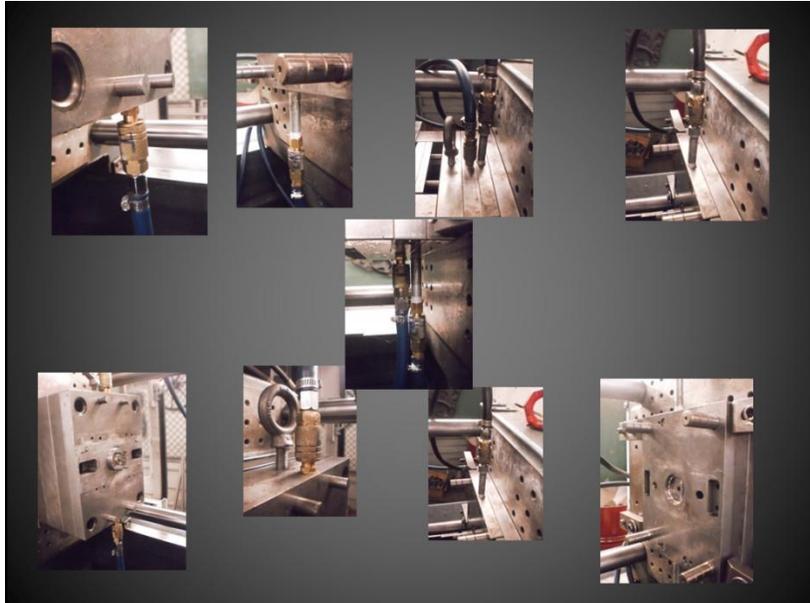


Figura 4.11. Conexiones de refrigeración al molde de inyección, cavidad actuador del dosificador.

Para relacionar los indicadores de flujo de la máquina con el caudal, se genera un modelo matemático lineal para estimar el flujo que sale del molde según la posición del indicador de flujo, partiendo de la ecuación 4.2 se tiene:

$$Y = mX + b \quad 4.2$$

Donde se redefinen las variables como:

$$Y = \text{Flujo del refrigerante } FR$$

$$X = \text{Lectura de flujo en Indicador } LFI$$

La pendiente m se expresa en la ecuación 4.3,

$$m = \frac{FR2 - FR1}{LFI2 - LFI1} \quad 4.3$$

Las pendientes respectivas a los canales se calculan con la ecuación 4.3 y los valores de la tabla 4.8.

$$m3 = \frac{LFR2 - LFR1}{LFI2 - LFI1} = \frac{3.448 - 0}{3 - 0} = 1.149$$

$$m_4 = \frac{LFR2 - LFR1}{LFI2 - LFI1} = \frac{4.274 - 0}{3.25 - 0} = 1.315$$

$$b = 0$$

Se construyen las ecuaciones, 4.3 y 4.4, para los canales 3 y 4 respectivamente.

$$LFR = 1.149 LFI \quad 4.3$$

$$LFR = 1.315 LFI \quad 4.4$$

Con lo anterior, se realizan los gráficos de las figuras 4.12 y 4.13, que permitirán saber el flujo de refrigerante que atraviesa el molde según la posición de la válvula y el indicador de flujo.

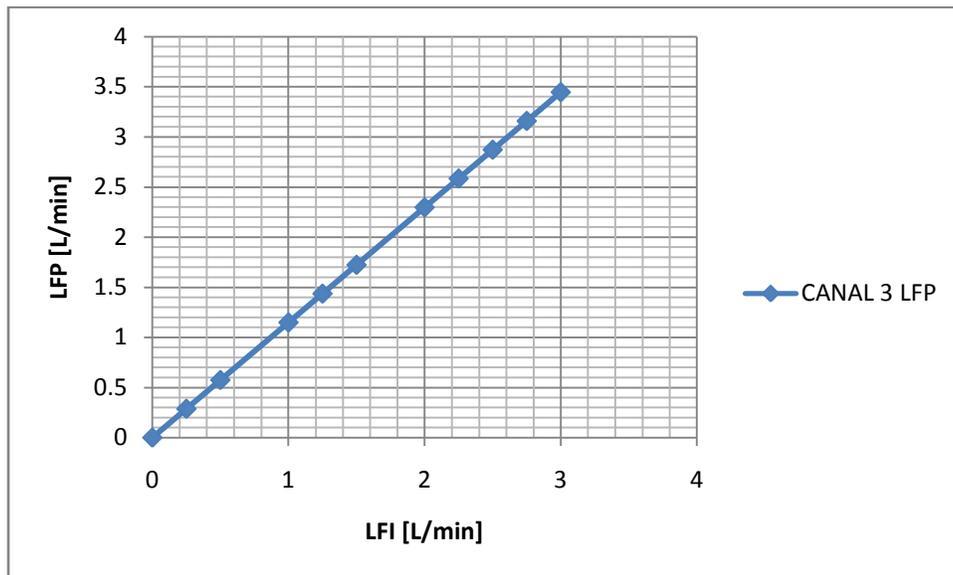


Figura 4.12 Flujo en canal 3 según posición del indicador de flujo.

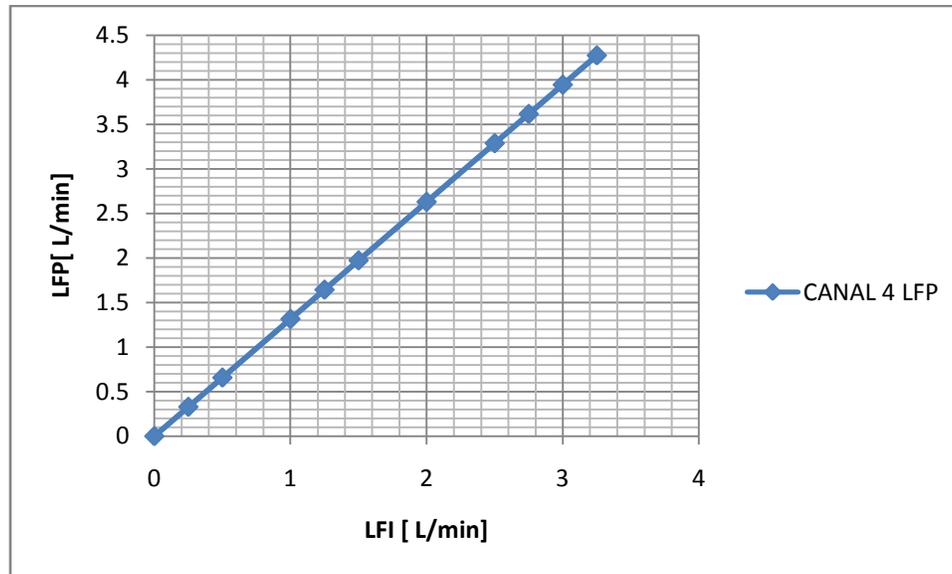


Figura 4.13 Flujo en canal 4 según posición del indicador de flujo.

Una vez realizadas las conexiones se procedió a arrancar el equipo de refrigeración de molde (friomold), el rango de temperaturas de operación del controlador es de 5-11 [°C] en la salida del flujo refrigerante hacia el molde de inyección. La temperatura del molde debe ser de 25[°C] para procesar PLA según la ficha técnica. Por esta razón se demanda la temperatura de 11[°C] en el controlador del equipo de refrigeración y se mide la temperatura en el molde, los resultados se muestran en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Relación del flujo de líquido refrigerante y temperatura de molde de inyección.

Canal 3	parte fija molde		canal 4	parte móvil molde	
indicador flujo	flujo de refrigerante [L/min]	Temperatura en molde [°C]	Indicador flujo	flujo de refrigerante [L/min]	Temperatura en molde [°C]
3	3.447	15	3	3.945	14
1.5	1.723	16	1.5	1.972	15
1	1.149	20	1	1.315	19
0.5	0.574	26.6	0.5	0.657	25

La tabla 4.6 muestra el comportamiento de la temperatura en función del flujo de refrigerante que entra a las partes del molde, muestra que para el canal 3, el flujo de 0.574 [L/min] correspondiente a la lectura de 0.5 en el indicador de flujo, mantiene la temperatura en la parte fija del molde en 26.6 [°C] y la misma lectura pero en el indicador del canal 4 mantiene una temperatura de 25[°C] para la parte móvil del molde.

4.4 ESTABLECIMIENTO DE LA VELOCIDAD DE INYECCIÓN

Mediante el establecimiento de la curva de viscosidad (paso 1 de moldeo científico), se establece la velocidad de inyección a la cual el polímero hipotéticamente se comportará como un flujo newtoniano; es decir, que la viscosidad del material permanecerá constante en cada disparo consecuente de la máquina.

Se ajustó el perfil de temperaturas del fundido de acuerdo a las recomendadas por el fabricante, en este caso, se escogió las mínimas del intervalo de temperaturas descrito, ver tabla 4.7

Tabla 4.7. Ajuste de temperaturas de proceso en máquina de inyección.

Fecha: 15/08/2012	T. de boquilla[°C]	T. de compresión1[°C]	T. de compresión 2 [°C]	T. de alimentación [°C]	T. garganta [°C]	T. de [°C]	molde
Temperatura de la ficha técnica	188-205°C	188-205°C	182-193°C	166-177°C	20°C	25°C	
Temperatura de la máquina	188°C	188°C	182°C	166°C	20°C	25°C	

La velocidad de giro del husillo recomendada por el fabricante es de 100-200 [RPM], en la máquina se fijó a 100 [RPM] ya que, se hicieron pruebas previas a la aplicación de la metodología y se encontró que, con las velocidades recomendadas se presentaba un exceso de fluidez en el material que imposibilitaba el proceso, esto debido a su alto índice de fluidez. El diámetro de husillo es de 35[mm]

Se establecieron los parámetros de la fase de sostenimiento en cero. Esto significa que sólo se manejó la fase de inyección.

Se fijó la contra presión o presión de retroceso en 3.4 [bar]

Se ajustó la presión de inyección hasta el valor máximo disponible, ver tabla 4.8. La fase de mantenimiento se determina en posición nula.

Tabla 4.8. Ajuste de presión de inyección

Presión de inyección recomendada moldeo científico	Máxima disponible
Presión de inyección ficha técnica	No específica
Presión de inyección máxima máquina	1800 [bar]

Como muestra la tabla 4.8, la presión de inyección (P.I) sólo fue limitada por la capacidad de la máquina 1800[bar], la cual mediante su pantalla digital indica la presión de inyección que fue requerida durante el disparo.

Se estableció el tiempo de enfriamiento, de tal manera que mediante la toma de temperatura con un termómetro digital marca OMEGA modelo HH81 rango -160 a 1372 [°C] resolución de 0.1 [°C]; en 9 segundos la pieza se enfriaba alcanzando la temperatura de 30[°C] antes de la expulsión desde el molde.

Cabe señalar que durante la experimentación la pieza actuador al ser expulsada presentaba un enganche por parte de sus bordes internos con el inserto (macho) del molde y que al ser expulsada a temperatura de molde 25 [°C] la pieza mostraba comportamiento frágil al romperse por acción de los expulsores, como esta parte se refiere al establecimiento de la velocidad de inyección se procedió a la experimentación como lo indica el método de Moldeo científico.

Se ajustó la velocidad de inyección en 10 [mm/s] y la posición de transferencia (P.T) en 5.1 [mm] como se muestra en la tabla 4.9.

Tabla 4.9. Ajuste de llenado de pieza al 50% velocidad baja 10 [mm/s]

Velocidad de inyección recomendada Moldeo Científico	Lento
Velocidad de inyección de la ficha técnica	Media a rápida
Velocidad inyección de la máquina [mm/s]	10
Posición de transferencia [mm]	5.1
Cojín de masa [mm]	5

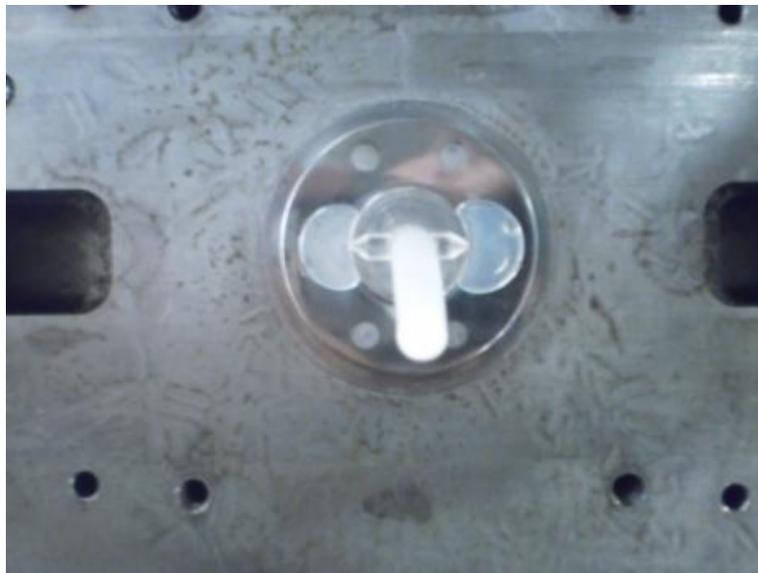


Figura 4.14 Fotografía de la pieza al 60% de volumen, inyectada con velocidad de 10 [mm/s]

Es preciso señalar que la mínima cantidad de material que inyecta la máquina DEMAG ERGOTECH PRO 50-270 es la que desplaza en 0.1 [mm] de carrera del husillo, es decir 3.5 [g] de PLA, con lo cual se llena el 60% del volumen de la pieza actuador dosificador.

Se aumento la velocidad por incrementos de 10 [mm/s], asegurando que las piezas se hayan obtenido cortas mediante el ajuste de la posición de transferencia (P.T.), tabla 4.10.

Tabla 4.10 Parámetros de llenado pieza a 119[mm/s]

P. Dosificación	Cojín masa	% Volumen Pieza	Masa[g]
5.1	5	60	3.33
4.9	4.8	70	3.97
5.5	4.5	90	8.79

Con la velocidad máxima de inyección ,119 [mm/s], se busca obtener un llenado de la pieza al 90%, esto se logra moviendo la posición de transferencia, las tablas 4.10 y 4.11 muestran los datos de ajuste de llenado.

Tabla 4.11. Ajuste de llenado de pieza al 95% velocidad alta 119[mm/s]

Velocidad de inyección recomendada Moldeo Científico	Alta
Velocidad de inyección de la ficha técnica	Media a rápida
Velocidad inyección de la máquina [mm/s]	119
Posición de transferencia [mm]	5.5
Cojín de masa [mm]	4.5

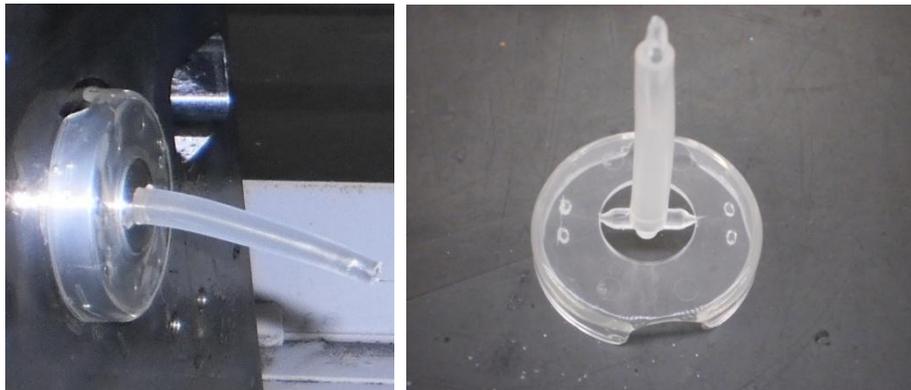


Figura 4.15 Fotografía de la pieza al 90% de volumen, inyectada con velocidad de 119 [mm/s]

Se hizo un nuevo disparo y se tomaron los datos de tiempo de llenado y presión de inyección requerida para llenar la pieza al 90%.Tabla 4.12

Tabla 4.12 Parámetros de llenado al 90% con velocidad alta de 119[mm/s]

V.iny[mm/s]	% Llenado	P.T.[mm]	Cojín masa.[mm]	P.I[bar]	Tiempo de llenado [s]
119	90	5.5	4.5	246	0.08

El siguiente paso fue reducir la velocidad de inyección, en decrementos de 10 [mm/s] hasta la mínima posible, 0 [mm/s] se fue tomando nota de los valores de tiempo de llenado, presión de inyección y cojín de masa, tabla 4.13.

Tabla 4.13.Reducción de la velocidad de inyección pieza actuador del dosificador.

Decrementos	velocidad Inyección [mm/s]	Tiempo de llenado [s]	Presión de Inyección[bar]
1	119	0.08	246
2	115	0.08	281
3	110	0.09	299
4	100	0.09	243
5	95	0.09	238
6	90	0.09	255
7	85	0.09	259
8	80	0.1	212
9	75	0.09	226
10	70	0.1	213
11	65	0.1	201
12	60	0.1	208
13	55	0.1	213
14	50	0.12	188
15	45	0.12	192
16	40	0.13	181
17	35	0.14	168
18	30	0.14	156
19	25	0.16	146
20	20	0.2	127
21	15	0.21	120
22	10	0.28	103
23	5	0.35	87
24	1	0.57	72
25	0	0.65	66

Posteriormente se investigó en el manual del fabricante de la máquina de inyección Demag Ergotech Pro 50-270 la relación de intensificación del husillo. Como este número no está disponible, [15] indica que en estos casos se use el valor de 10, *ya que no importa, porque es una constante en la ecuación y será un factor de proporcionalidad de la viscosidad*, esta traducción textual de la fuente del Moldeo científico [15] propicia la investigación en literatura para el manejo adecuado del término “Relación de intensificación del husillo”. John Bozzelli [2] explica que la relación de intensificación de husillo es el cociente entre la presión que ejerce el husillo al polímero y la presión que ejerce el fluido hidráulico sobre el husillo, en la etapa de inyección, es decir, el fluido hidráulico por medio de la bomba hidráulica de la máquina ejerce cierta presión a la base del husillo, base de empuje o área de

empuje, el husillo transfiere esta energía en forma de fuerza y desplazamiento al polímero en la parte frontal, la fuerza que obtuvo el husillo es aplicada al polímero sobre el área equivalente a la de la sección transversal del husillo, generalmente el área de empuje es mayor que el área del husillo, teniendo de esta forma una intensificación de presión. Figura 4.16

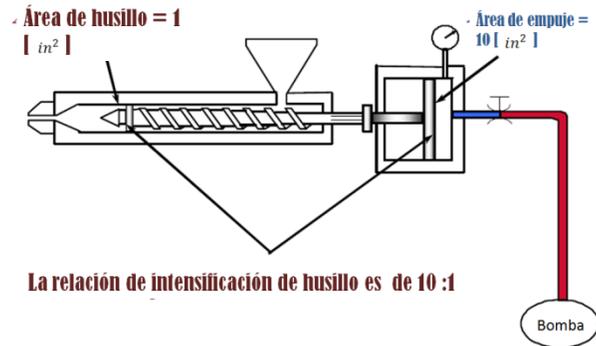


Figura 4.16 Diagrama de la relación de husillo con ejemplo incluido.

La figura 4.16 brinda un diagrama que ejemplifica de manera sencilla como la presión es intensificada por el uso de áreas de diferentes magnitudes, el ejemplo muestra que el área de empuje (A_e) de 10 [in²] y el área de la sección transversal del husillo en la parte frontal (A_v) de 1 [in²], la relación de intensificación de husillo, se estima con la ecuación 4.5.

$$Ri = \frac{A_e}{A_v} \quad 4.5$$

Por lo tanto, para este ejemplo, la relación de intensificación es de:

$$Ri = \frac{A_e}{A_v} = \frac{10}{1} = 10$$

Es preciso indicar que para calcular de esta manera la relación de intensificación es necesario conocer las dimensiones del área transversal del husillo y del área de empuje, estos datos pueden encontrarse en el manual del equipo de inyección, otro método de cálculo es conocer las presiones de inyección (P_i) que requiere la máquina para inyectar polímero y dividirla entre la presión hidráulica que ejerce la bomba (P_h) sobre el husillo en la fase de inyección, la ecuación 4.6 muestra la relación:

$$Ri = \frac{P_i}{P_h} \quad 4.6$$

En este trabajo, usando la ecuación 4.6 se calculó la relación de intensificación para la máquina de inyección DEMAG-ERGOTECH PRO 50-270.

La presión de inyección P_i que la máquina requiere se registra en la pantalla optimización del proceso, como se indica en la figura 4.17.

		DEBE	ES			DEBE	ES
TIEMPO CONTROL CICLO [s]	100.0		14.9	RETROCESO SC	[nn]	17.9	19.7
TIEMPO DE BLOQUEO [s]	0.00		0.00	PARADA DE DOSIF.	[nn]	14.0	14.0
TIEMPO DE PAUSA [s]	0.00			COJIN DE MASA	[nn]		6.2
TIEMPO DE INYECCION [s]			0.33	P.POST. C.DE HUS.	[nn]	10.0	10.0
TIEMPO DE DOSIFIC. [s]			2.21	TIEMPO P.POST.	[s]	0.00	0.33
PRESION INYECC. [Bar]	1800		0				
VELOCIDAD INYECC. [mm/s]	30						
TIEMPO PRES.POST. [s]	1.0			PERFIL DE INYEC.	<input type="checkbox"/>		
PRESION POST. [Bar]	180		0	PERFIL PR.POST.	<input type="checkbox"/>		
TIEMPO DE ENFRIAM. [s]	4.00			PERFIL DE DOSIF.	<input type="checkbox"/>		
RETARDO DOSIFIC. [s]	0.01						
REVOLUCION [U/min]	100		0				
PERFIL DE DOSIFICA.	PERFIL DE INYECCION	PERFIL DE PRES.POST.	UI	MJE	INTRUSION		

Figura 4.17 Lectura de la presión de inyección, obtenida de la pantalla optimización del proceso.

En la zona resaltada de la figura 4.17 se muestra la presión de inyección que requirió la máquina y a la izquierda se muestra la presión de inyección que el operador puede solicitar a manera de limitación para el control y seguridad del proceso.

La presión hidráulica P_h se toma de la pantalla control de función como se muestra en la figura 4.18

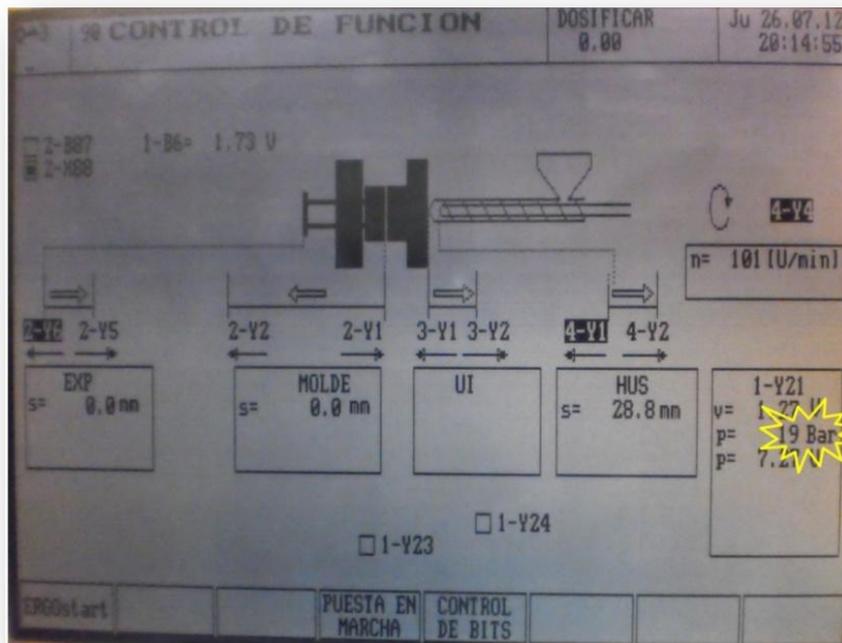


Figura 4.18 Lectura de la Presión hidráulica aplicada por la bomba en la pantalla de control de función.

En la pantalla de control de función se puede leer la presión que la bomba hidráulica de la máquina está ejerciendo, en cualquier operación el indicador mostrará la presión requerida, ya sea para mover la platina, aplicar fuerza de cierre, desplazar la unidad de inyección, girar el husillo y en este caso, se toma lectura de la operación de inyección.

El proceso para determinar la relación de intensificación del husillo se realizo de la siguiente manera.

Se hicieron 5 disparos en igualdad de condiciones, de la Tabla 4.12 parámetros de llenado al 90% con velocidad alta de 119[mm/s], por disparo se colocaba el indicador digital en la pantalla de “control de función” se tomó lectura de la presión hidráulica en la fase de inyección, concluida esta, se cambio la pantalla a la de “optimización de proceso” en la cual se tomó la lectura de la presión de inyección. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 4.14.

Tabla 4.14 Presión hidráulica y presión de inyección.

# Disparo	Presión hidráulica Ph [bar]	Presión inyección Pi [bar]
1	39	314
2	41	330
3	42	341
4	42	332
5	41	299
Promedio	41	323.2

Obtenidos los promedios de la tabla 4.14, se procede a aplicarlos en la ecuación 4.6

$$Ri = \frac{Pi}{Ph} = 7.88$$

Obteniendo de manera experimental la relación de intensificación del husillo para la máquina DEMAG-ERGOTECH PRO 50-270, Ri=7.88. El cálculo de la relación de intensificación de husillo es necesario para obtener la viscosidad aparente según la ecuación 4.7, donde se incluye el valor de la relación de intensificación de husillo:

$$\mu = PI \times TLL \times RI \quad 4.7$$

Donde:

Viscosidad aparente → μ

Presion de inyeccion → *PI*

Tiempo de llenado → *TLL*

Relacion intensificacion husillo → *RI*

Haciendo uso de la tabla 4.13 y una hoja de cálculo se aplico la ecuación 4.7 a los datos correspondientes de cada decremento de velocidad. A sí mismo se construyo la gráfica de viscosidad VS velocidad de inyección, para la formación de la pieza actuador del dosificador, figura 4.19.

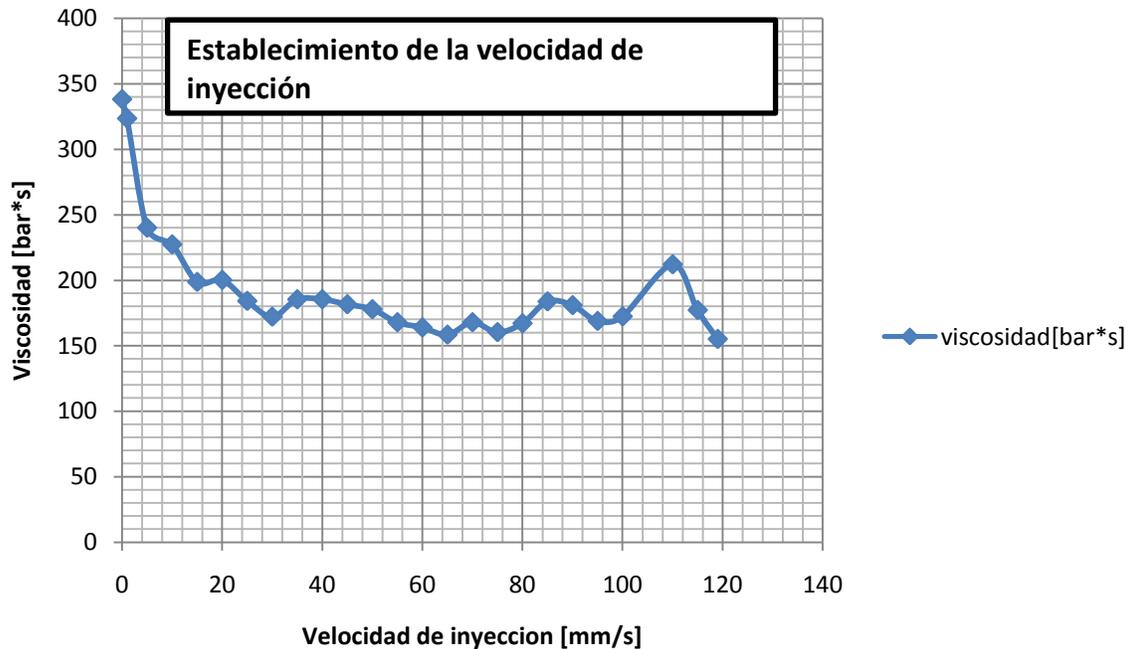


Figura 4.19 Gráfico de velocidad de inyección Vs viscosidad en la pieza actuador del dosificador

En la figura 4.19 se observa que la viscosidad tiende a variar menos a partir de la velocidad de 60 [mm/s] por lo que se define usar la velocidad de 70 [mm/s] para asegurar que la etapa de llenado de la pieza actuador del dosificador durante el proceso sea consistente y que cualquier variación natural, por pequeña que sea, no cause un cambio sustancial en la viscosidad mayor a 9.456 [bar*s], que es la máxima variación presente en el rango de velocidades de inyección de 60-80 [mm/s], los cambios de viscosidad se traducen en variaciones de llenado de pieza entre disparos. Con esta experimentación se corrobora la hipótesis de que un material con comportamiento de flujo no newtoniano, bajo ciertas condiciones, tiende a comportarse como flujo newtoniano, en este caso, las condiciones son las siguientes: velocidad de inyección = 70 [mm/s], giro de husillo = 100[RPM], perfil de temperaturas de: 188[°C] en la boquilla, 188[°C] en zona de compresión número dos, 182[°C] en zona de compresión número uno, 166[°C] en zona de alimentación y 20[°C] en la garganta de alimentación.

Se realizó el mismo procedimiento por pieza integrante del ensamble del dosificador. A continuación se muestran los gráficos de velocidad de inyección vs viscosidad, figura 4.21 para la pieza base del dosificador.

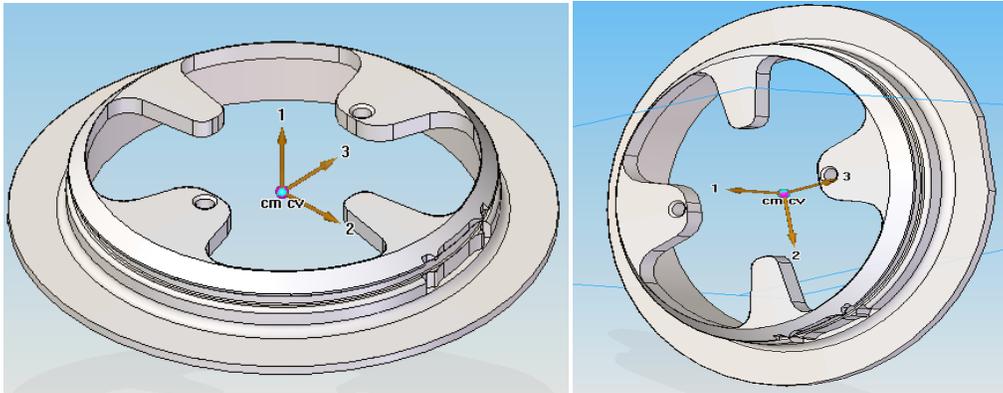


Figura 4.20 Modelo solido de la pieza base del dosificador

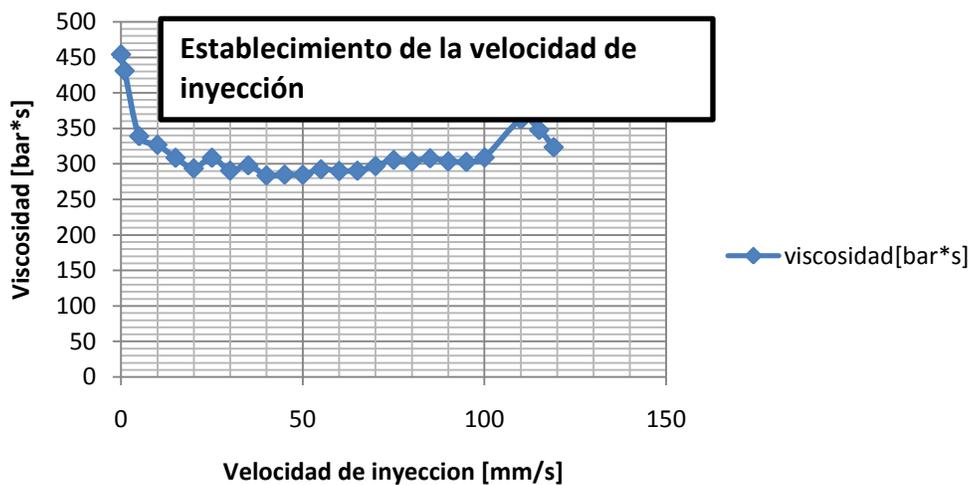


Figura 4.21 Gráfico de velocidad de inyección Vs viscosidad base del dosificador

En la figura 4.21 se observa que la viscosidad tiende a ser constante después de la velocidad de 40 [mm/s] por lo que se define usar la velocidad de 50 [mm/s] para asegurar que la etapa de llenado de la pieza base del dosificador durante el proceso se mantendrá consistente.

Para el caso de las paletas del dosificador, figura 4.22, el establecimiento de la velocidad de inyección se muestra en seguida.

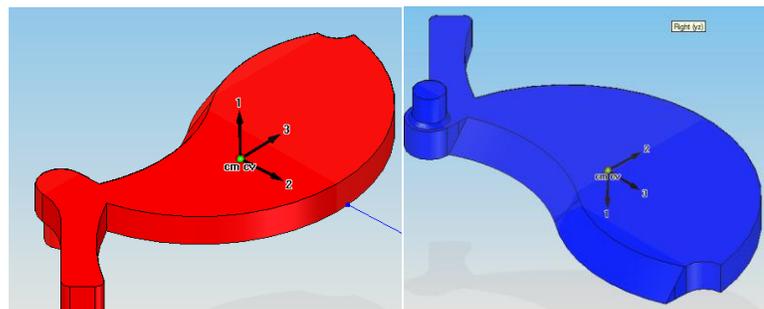


Figura 4.22 Modelo solido de las piezas paletas del dosificador, paleta X izquierda y paleta Y derecha.

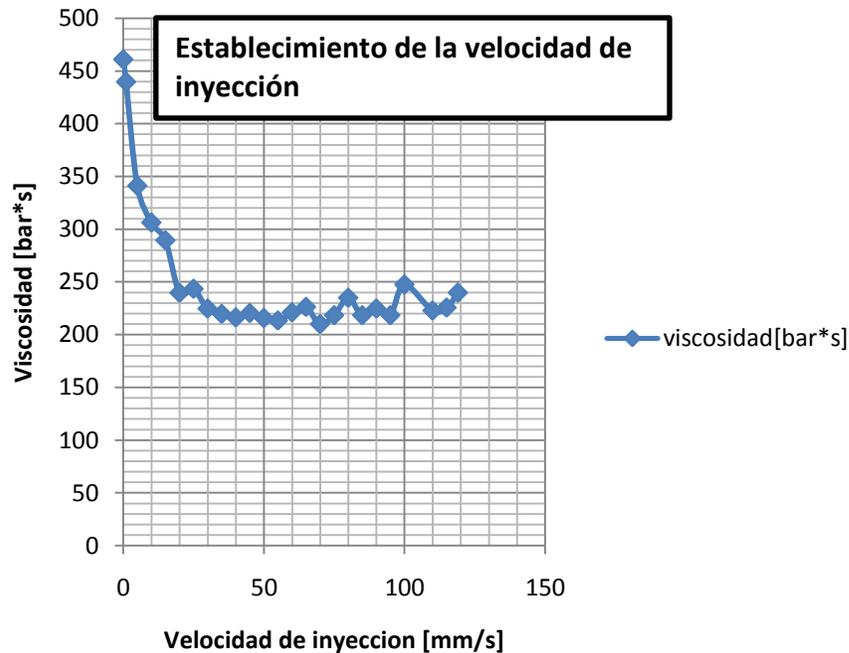


Figura 4.23 Grafico de velocidad de inyección vs viscosidad piezas paletas del dosificador.

La figura 4.23 muestra que la viscosidad tiende a reducir su variación después de la velocidad 40 [mm/s] por lo que se define usar la velocidad de 50 [mm/s], de igual forma, para asegurar que la etapa de llenado de las piezas paletas durante el proceso se mantendrá consistente.

La tabla 4.15 muestra el resumen de los parámetros fijos hasta este punto de la experimentación y muestra la sugerencia del tiempo de llenado que indica el simulador Mold Flow. Para alcanzar este tiempo es necesaria la manipulación de la velocidad de inyección, es decir, el simulador mediante la sugerencia del tiempo de llenado está recomendando la velocidad de inyección.

Tabla 4.15 parámetros fijos después del establecimiento de la velocidad de inyección

Parámetro /pieza	Actuador dosificador	Base dosificador	Paletas
Velocidad inyección[mm/s]	70	50	50
Velocidad giro husillo [RPM]	100	100	100
Tiempo de llenado recomendado por el simulador [s]	1.08	2.77	3.42

Estos tiempos de llenado sugieren una velocidad de inyección baja la cual no corresponde en primera instancia con la recomendada en la ficha técnica del material y con las usadas en la experimentación anterior.

Se concluye que la velocidad de inyección es una variable dependiente del material, temperatura del material y del molde de inyección, en el caso de la pieza actuador del dosificador se requiere mayor velocidad de inyección, que en resto de las piezas del ensamble, ya que la pieza requiere un mayor flujo de material para completarse.

4.5 COMPROBACIÓN DEL BALANCE EN CAVIDADES.

El procedimiento para determinar el balance en cavidades, (segundo paso de moldeo científico) se recomienda para moldes de múltiples cavidades, es decir, a partir de dos cavidades. Para el caso de la pieza actuador del dosificador el molde es de una cavidad, por lo tanto no aplica este procedimiento, de igual manera no aplicará para la pieza base del dosificador, en contraste, el molde de las piezas paletas de dosificador, figura 4.24, es adecuado para la comprobación del balance en cavidades.



Figura 4.24 Placa de cavidades para las piezas paletas del dosificador.

De acuerdo a la literatura, en la mayoría de los casos el porcentaje de variación no debe ser superior al 5%. Para tolerancias cerradas la variación no debe sobre pasar el 3%. Si la tolerancia es holgada, la variación máxima de 5% se toma como aceptable. La calidad final de la pieza debe revisarse para ver si es necesario cerrar el análisis de balance de cavidad. En esta parte se toma en cuenta que los materiales poliméricos amorfos son susceptibles de aceptar mas desbalance que sus semejantes semicristalinos. En resumen, cuando las tolerancias están próximas a cero, la variación en las masas de las piezas inyectadas debe ser de mismo modo cercana a cero [4].

Los pasos seguidos en la comprobación del balance de cavidades son los siguientes.

- Se colocó la presión y tiempo de mantenimiento en cero.
- Se fijó el tiempo de retardo de dosificación en 5 [s] estimando que este valor será cercano al que resultará después de la correspondiente experimentación para fijar el tiempo de mantenimiento. La función del retardo de dosificación en este procedimiento es la de simular el transcurso del tiempo de la fase de mantenimiento.
- Se estableció el tiempo de enfriamiento en 9[s], los mismos usados para la obtención de la velocidad de inyección.
- Se situó la velocidad de inyección en el valor obtenido del estudio de la curva de viscosidad, 50[mm/s].

- Con el resto de los parámetros en valores idénticos a los usados en el estudio de viscosidad se inició el moldeo.
- Se inyectaron piezas cortas (con faltante de material) mediante el ajuste de la posición de transferencia o parada de dosificación.
- Se hicieron diez disparos de prueba, tomando la diferencia de masas correspondientes a las piezas obtenidas por cavidad.
- Las discrepancias másicas se promediaron para identificar el máximo y mínimo valor diferencial.
- Se calculó el rango mediante la sustracción del mínimo en el máximo valor.
- El rango fue multiplicado por cien para definirlo como porcentaje de error, la tabla 4.16 y el gráfico de la figura 4.25 muestra el resumen de la comprobación del balance de cavidades.

Tabla 4.16 Comparación y porcentaje de error entre las masas de las paletas X e Y

BALANCEO DE CAVIDADES		MOLDE recién fabricado	
INYECCION	MASA[g]		DIFERENCIA DE MASAS ENTRE PALETAS X e Y
	PALETA X	PALETA Y	
1	0.52	0.51	0.01
2	0.43	0.5	0.07
3	0.51	0.52	0.01
4	0.43	0.49	0.06
5	0.55	0.55	0
6	0.41	0.5	0.09
7	0.46	0.51	0.05
8	0.51	0.51	0
9	0.49	0.51	0.02
10	0.54	0.52	0.02
		PROMEDIO	0.033
		MINIMO	0
		MAXIMO	0.09
		RANGO	0.09
		% ERROR	9

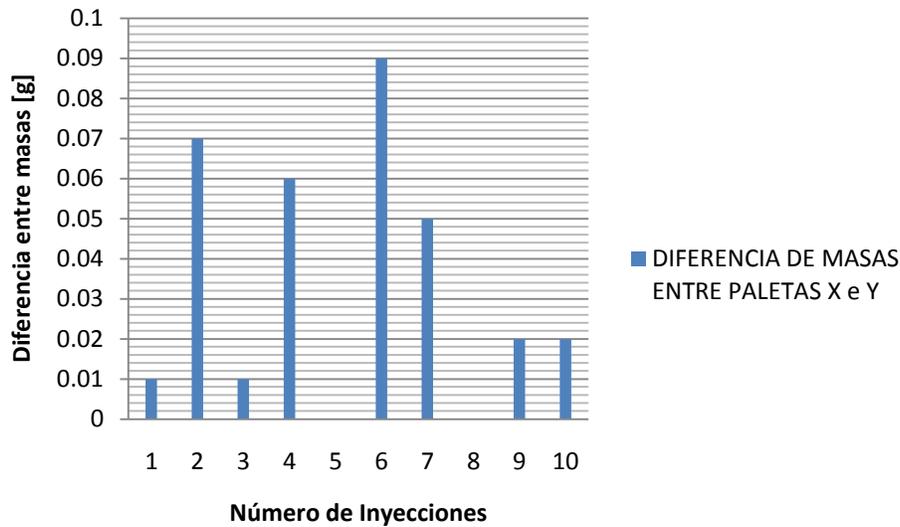


Figura 4.25 Resultados del análisis de balance de cavidades para piezas paletas.

De la tabla 4.16 y de la figura 4.25 se puede observar que el desbalance en las cavidades existe con un valor promedio de 0.09 [g] equivalente al 9%, esta diferencia es provocada por la compuerta en la cavidad de la paleta X, figura 4.26.

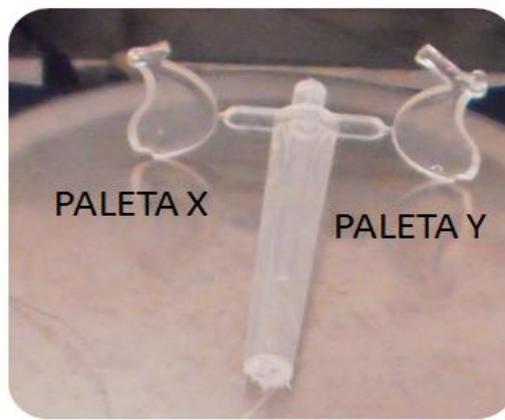


Figura 4.26 Desbalance en pieza inyectada paleta X, definido por el llenado nulo de la palanca y el perno de dicha paleta.

Por lo tanto es preciso realizar una corrección en la compuerta de la paleta X, figura 4.27

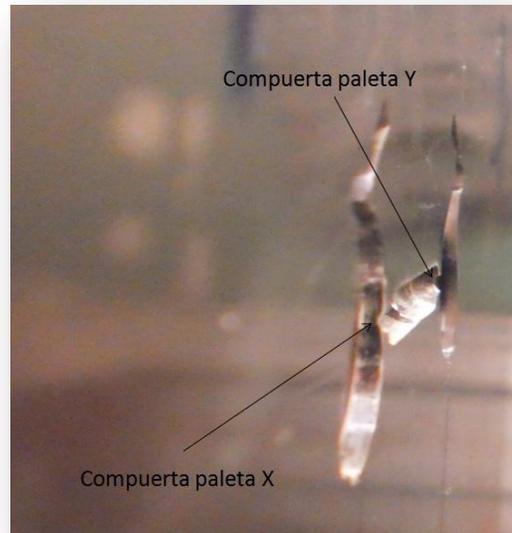


Figura 4.27 Compuertas en placa de cavidades intactas.

La corrección impuesta a la compuerta de la cavidad consistió en aumentar el área transversal de la compuerta, mediante un desbaste manual.

La compuerta de la cavidad es de forma de media circunferencia (media caña), tiene un diámetro $D= 1.6[\text{mm}]$ dando un área inicial de $A1=1.005[\text{mm}^2]$. El desbaste hecho en forma de triángulo de profundidad $0.2 [\text{mm}]$ y de ancho $0.2 [\text{mm}]$ adiciona un área de $A2 = 0.02[\text{mm}^2]$

Posteriormente se realizaron diez inyecciones y se midieron las masas de las paletas obtenidas, los resultados se muestran en la tabla 4.18 y la figura 4.28.

Tabla 4.18 Comparación y porcentaje de error entre las masas de las paletas X e Y posterior a corrección en compuerta paleta X

BALANCEO DE CAVIDADES		MOLDE CON MODIFICACION DE COMPUERTA X	
	MASA		
INYECCION	PALETA X	PALETA Y	DIFERENCIA PESOS ENTRE PIEZAS
1	0.54	0.52	0.02
2	0.53	0.52	0.01
3	0.55	0.53	0.02
4	0.52	0.53	0.01
5	0.52	0.52	0
6	0.53	0.53	0
7	0.53	0.52	0.01
8	0.54	0.52	0.02
9	0.53	0.52	0.01
10	0.53	0.51	0.02

	PROMEDIO	0.012
	MINIMO	0
	MAXIMO	0.02
	RANGO	0.02
	%error	2

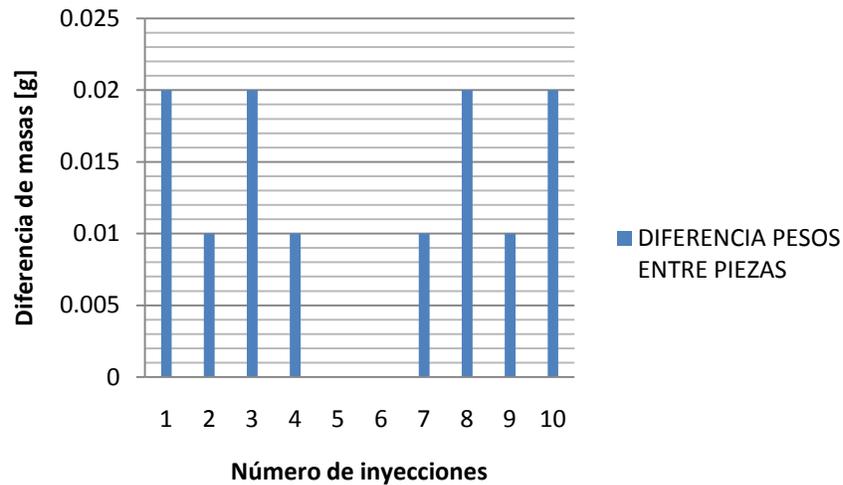


Figura 4.28 Diferencia de masas por cavidad después de la corrección en compuerta de la cavidad formadora de la paleta

Para el caso del balanceo de cavidades. De la tabla 4.18 y la figura 4.28 se observa que la corrección aplicada al molde fue adecuada, pues el porcentaje de error disminuyó del 9% al 2%, estando dentro del rango de error para piezas con tolerancias cerradas como lo dice moldeo científico. Se recomienda el balanceo de cavidades como procedimiento fundamental para la validación de moldes de inyección, inclusive, para moldes de una cavidad, cuando esta contenga más de una compuerta o punto de inyección, las posiciones de los puntos de inyección deberán ser simétricas entre sí, al igual que la geometría de la pieza a inyectar, el balanceo se hará de manera cualitativa, observando el llenado de la pieza al 50,70 y 90% el cual deberá ser simétrico.

4.6 DETERMINACIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN

Para determinar la caída de presión en cada pieza (paso 3 del moldeo científico), fue necesario considerar el flujo del plástico a través de las secciones de cada pieza, para el caso de la pieza actuador, figura 4.29. Se visualizan los siguientes puntos

1. La boquilla de la máquina.
2. El bebedero, canales y compuerta, es decir la pieza al 60% de su volumen.
3. Superficie superior, pieza al 70% de su volumen.
4. Superficie superior y pared lateral, al 90% de su volumen
5. El final del llenado

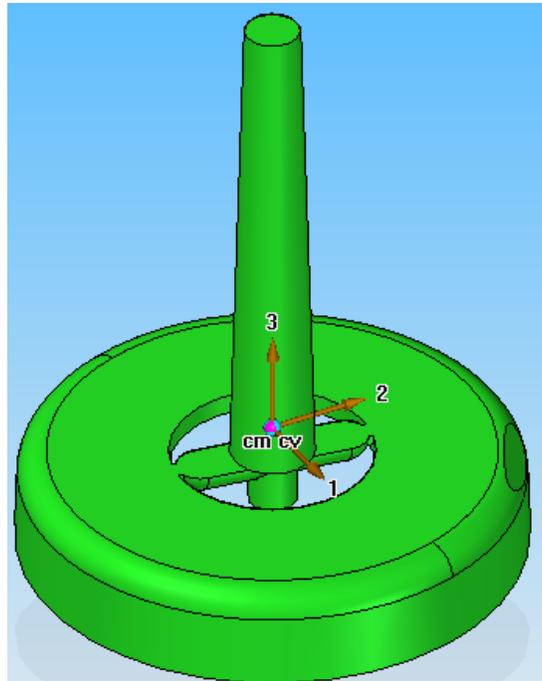


Figura 4.29 Modelo sólido de la pieza actuador del dosificador con colada, pozo frío, canales y compuertas.

Los puntos de experimentación para este estudio son los siguientes:

- Se fijó la máxima presión de inyección disponible en la pantalla de optimización de proceso
- Se hicieron 5 inyecciones o disparos de manera manual con la unidad de inyección desacoplada al bebedero del molde, llamando este procedimiento como disparos al vacío; y se tomaron lecturas de las máximas presiones pico que se requirieron para ello.
- Posteriormente se moldeó el bebedero, canales y compuerta, figura 4.30, mediante el ajuste de la posición de transferencia y se tomó lectura de la máxima presión pico durante 5 disparos.

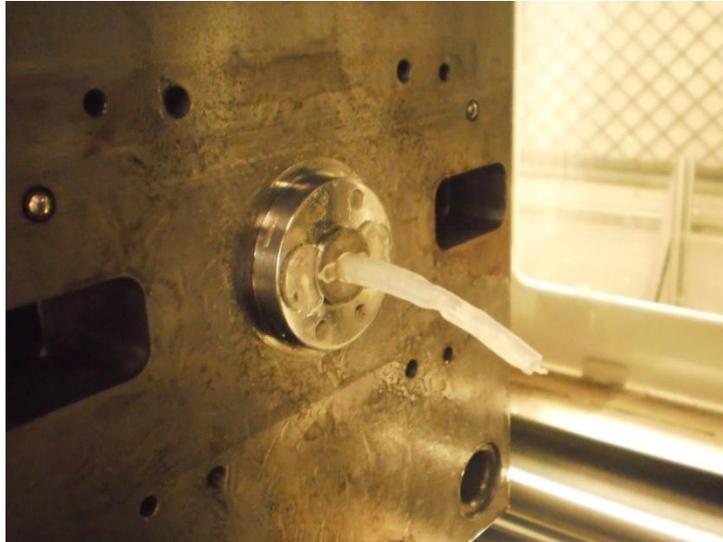


Figura 4.30 moldeo de la pieza actuador al 60% de su volumen.

Cabe señalar que la teoría relacionada al experimento de caída de presión en la cavidad indica, que sea moldeada solo la colada en primera instancia, pero, para el caso de esta pieza, inyectando la mínima cantidad de material, es decir 0.1 [mm] de carrera de husillo equivalente a 2.98 [g] de material PLA, la pieza se formaba al 60% de su volumen. Por esta razón el siguiente punto de experimentación se hace al 70%.

- Se moldeo hasta la superficie superior, es decir, la pieza al 70 % de su volumen, figura 4.29, aumentando la posición de transferencia para inyectar 2.1 [mm] de carrera de husillo equivalente a 4.82 [g] de PLA y se tomo lectura de la máxima presión pico.



Figura 4.31 moldeo de canales primarios

- Posteriormente se moldeo hasta obtener la superficie superior y pared lateral, o sea, al 90% del volumen de la pieza, figura 4.30, con masa de 8.18 [g] correspondiente a 8.8 [mm] de carrera de husillo. Así también se tomo lectura de la máxima presión pico.



Figura 4.32 Llenado de la cavidad hasta el 70% del actuador

- Se moldeo hasta completar la pieza, final de llenado pieza al 100% de volumen figura 4.33, con 9.5[mm] de carrera de husillo y se tomo lectura de la máxima presión pico

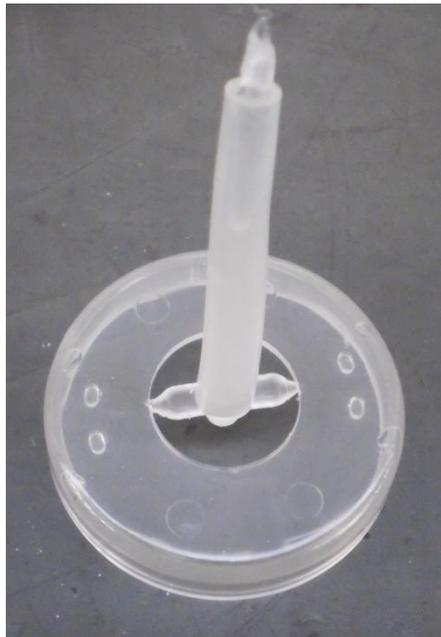


Figura 4.33 Moldeo de la pieza actuador del dosificador completa.

- Con los resultados anteriores, se generó una relación entre las superficies consideradas y su presión pico, como se muestra en la figura 4.34

% De la presión máxima (1800 [bar])

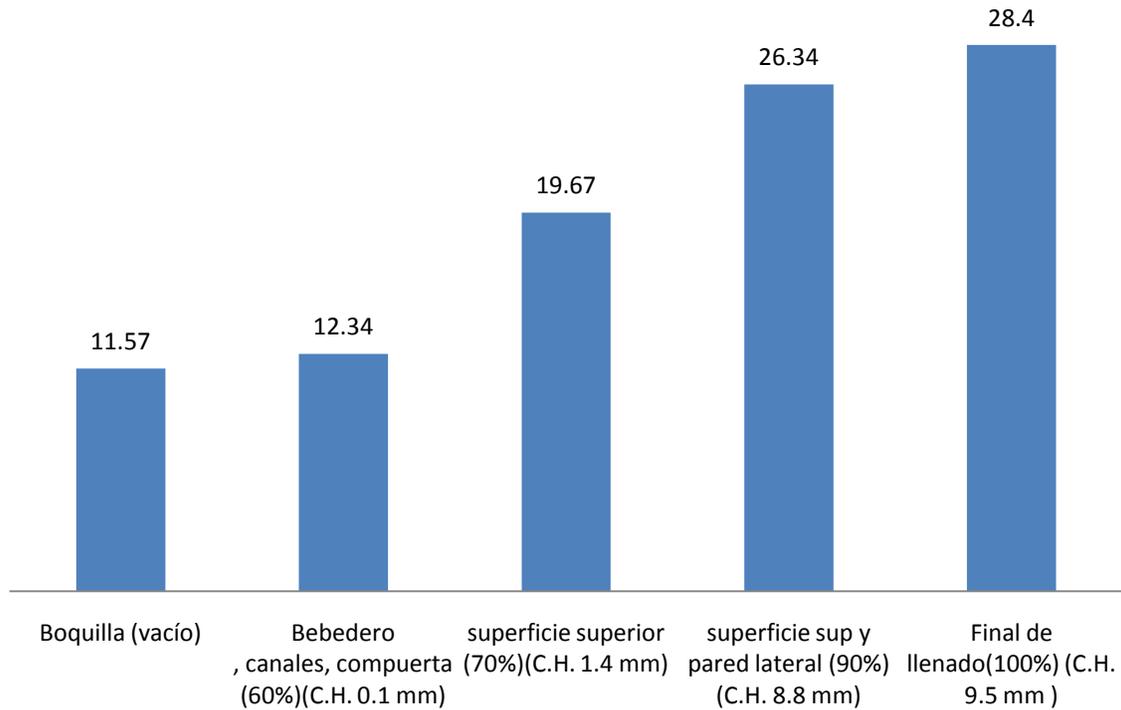


Figura 4.34. Gráfico de área de flujo vs presión pico

Tabla 4.19 Datos de estudio de caída de presión para pieza actuador de dosificador

Área de flujo	Presión pico1 [bar]	Presión pico2 [bar]	Presión pico3 [bar]	Presión pico4 [bar]	Presión pico5 [bar]	Promedio presión pico [bar]	Presión máxima - presión promedio	% de la presión máxima (1800 [bar])
Boquilla (vacío)	228	206	203	203	202	208.4	1591.6	11.57
Bebedero , canales, compuerta (60%)(C.H. 0.1 mm)	219	215	210	223	244	222.2	1577.8	12.34
superficie superior (70%)(C.H. 1.4 mm)	351	353	359	354	354	354.2	1445.8	19.67
superficie sup y pared lateral (90%)(C.H. 8.8 mm)	479	468	471	479	474	474.2	1325.8	26.34
Final de llenado(100%)(C.H. 9.5 mm)	483	509	537	537	490	511.2	1288.8	28.4

De la tabla 4.19 en combinación con la figura 4.34 se puede observar que la presión máxima utilizada en el proceso nunca es igual a la presión máxima disponible en la máquina. Si este fuese el caso, significa que el tornillo necesita más presión para moverse a la velocidad de inyección determinada, y no puede ser esto posible por tratarse de una presión límite de la máquina. Por protección al equipo hidráulico de la máquina de inyección, se debe tener una presión pico máxima del 90% de la presión disponible. Para este caso 511.2 [bar] fue la máxima presión de inyección que se solicitó para inyectar el material y llenar la cavidad, representando el 28.4% de la presión disponible.

Para la pieza base del dosificador mostrado en la figura 4.35; los valores del estudio de caída de presión se presentan en la tabla 4.20 y la figura 4.36

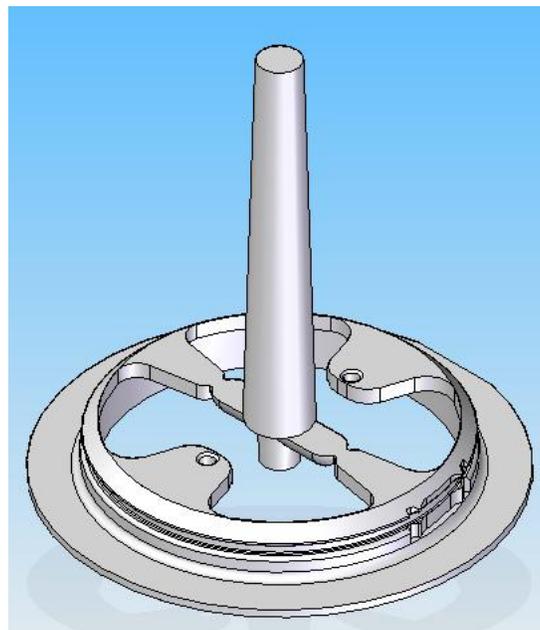


Figura 4.35 Modelo solido de la pieza base del dosificador con colada, pozo frio, canales y compuertas

Tabla 4.20 Datos de caída de presión para la pieza base del dosificador

Área de flujo	Presión pico1 [bar]	Presión pico2 [bar]	Presión pico3 [bar]	Presión pico4 [bar]	Presión pico5 [bar]	Promedio presión pico [bar]	Presión máxima - presión promedio	% de la presión máxima (1800 [bar])
Boquilla (vacío)	161	161	163	161	163	161.8	1638.2	8.98
Bebedero , canales, compuerta (60%)(C.H 0.1 mm)	158	160	152	151	151	154.4	1645.6	8.57

superficie lateral (70%)(C.H 2.1mm)	240	241	229	238	237	237	1563	13.16
superficie inf y pared lateral (90%) (C.H 4 mm)	380	392	372	398	378	384	1416	21.33
Final de llenado (P.D 4.3 mm)	472	496	456	466	447	467.4	1332.6	25.96

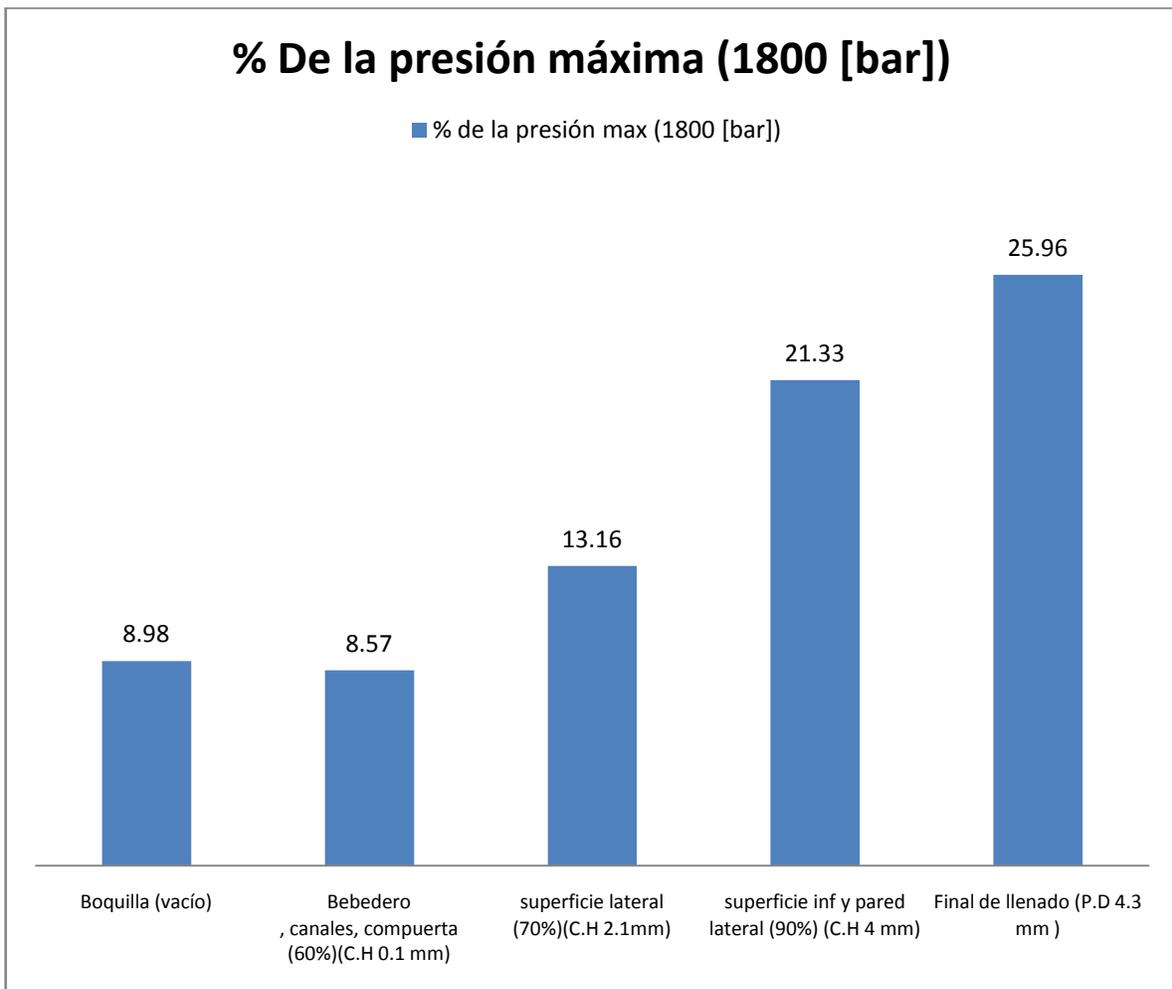


Figura 4.36 Gráfico de área de flujo de la base del dosificador vs presión pico

De la tabla 4.20 y la figura 4.36 se observa que la presión de inyección necesaria para completar la pieza base del dosificador es de 467.4 [bar] equivalente al 25.96% de la presión máxima proporcionada por la máquina.

Para las piezas paletas del dosificador presentes en la figura 4.37, los valores del estudio de caída de presión se muestran en la tabla 4.21 y la figura 4.38.

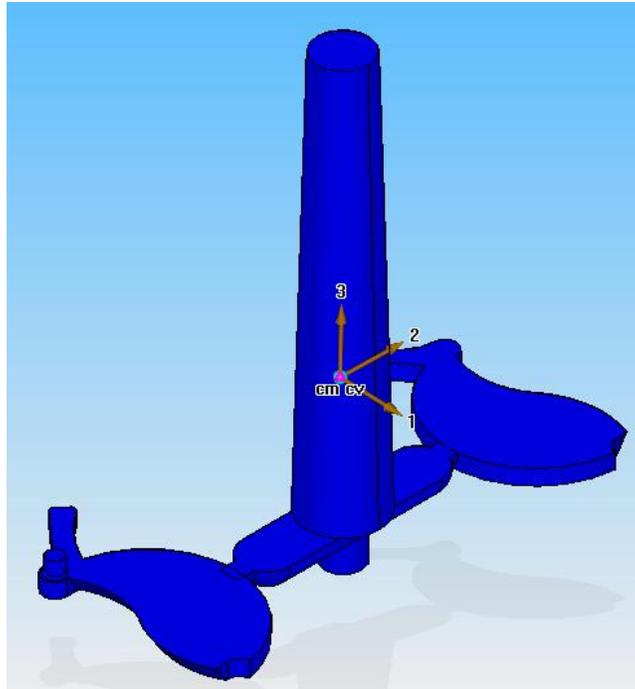


Figura 4.37 Modelo sólido de las piezas paletas del dosificador con colada, pozo frio, canales y compuertas.

Tabla 4.21 Datos de caída de presión para las paletas del dosificador

Área de flujo	Presión pico1 [bar]	Presión pico2 [bar]	Presión pico3 [bar]	Presión pico4 [bar]	Presión pico5 [bar]	Promedio presión pico [bar]	Presión máxima - presión promedio	% de la presión máxima (1800 [bar])
Boquilla (vacío)	160	140	138	130	133	140.2	1659.8	7.78
Bebedero , canales, compuerta (70%)(C.H 0.3 mm)	166	152	164	163	168	162.6	1637.4	9.03
Paletas (80%)(C.H 0.8mm)	149	164	165	168	169	163	1637	9.05

paletas al (95%) (C.H 1.3 mm)	203	169	141	166	155	166.8	1633.2	9.26
Final de llenado (C.H 2.3 mm)	177	178	180	180	180	179	1621	9.94

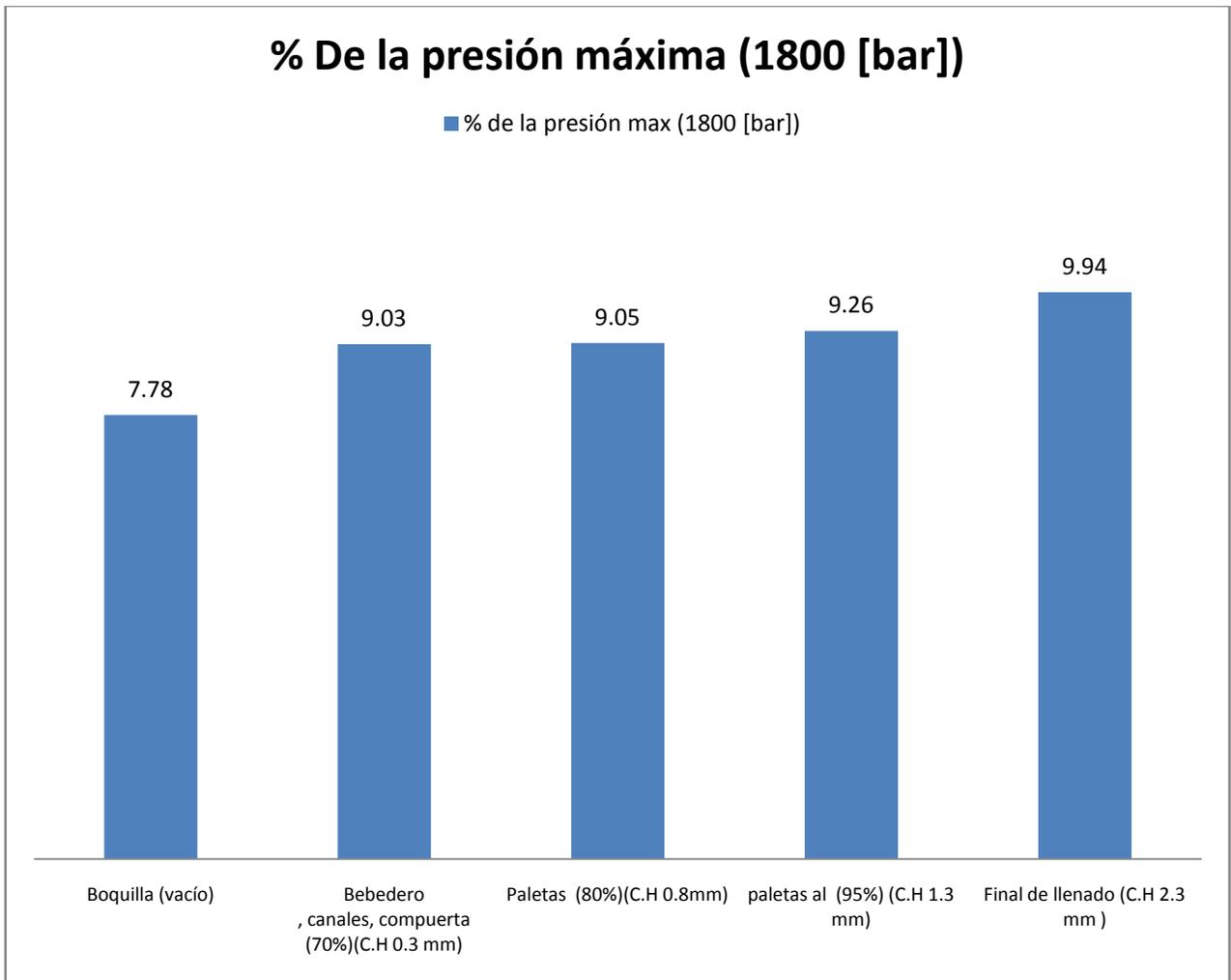


Figura 4.38 Gráfico de área de flujo de la base del dosificador vs presión pico

De la tabla 4.21 y la figura 4.38 se ve que la presión de inyección necesaria para completar las piezas paletas del dosificador fue de 179 [bar] equivalente al 9.94%

Las presiones de inyección requeridas por las piezas del ensamble dosificador se resumen en la tabla 4.22, la cual incluye los resultados de la simulación previa.

Tabla 4.22 Resumen de la experimentación y simulación de la caída de presión en las cavidades.

Pieza de ensamble	Presión experimentada [bar]	Presión simulada [bar]	Diferencia [bar]
Actuador del dosificador	511.2	93.02	418.18
Base del dosificador	467.4	193.23	274.17
paletas del dosificador	179	64.9	114.1

Se observa que la simulación ofrece datos inferiores a los obtenidos por la experimentación teniendo diferencias de hasta 418 [bar], queda claro que la simulación es una herramienta para el diseño y da una aproximación a los valores reales.

4.7 DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN DE MANTENIMIENTO Y OBTENCIÓN DE LA VENTANA DE PROCESO

Con la presión de mantenimiento en la ventana de proceso, se puede determinar la facilidad de manufacturar el material durante la formación de piezas por inyección. Ventanas de proceso estrechas indica que los intervalos operativos en los parámetros son reducidos, y por ende hay un menor margen de manejo de los mismos. Lo contrario es lo deseable.

Los pasos realizados para la determinación de la presión de mantenimiento y obtención de la ventana de proceso (pasos 4 y 5 de moldeo científico) son los siguientes:

1. Se fijó el perfil de temperaturas del barril en los valores más bajos posibles de procesamiento según el proveedor del material, tabla 4.12.

Se prosiguió a buscar las temperaturas por debajo de las proporcionadas por el fabricante, para tratar de obtener una amplitud en la construcción de la ventana de proceso. Tabla 4.23

Tabla 4.23 Iteraciones para la búsqueda de perfil de temperaturas mínimo

Iteración	Temperatura de fundido [°C]	T. Garganta de alimentación [°C]	T. Zona de alimentación [°C]	T. Sección de compresión [°C]	T. Sección de dosificación [°C]	T. Boquilla de inyección [°C]
1	162	20	156	172	178	178
2	147	20	146	162	168	168

El criterio de determinación de temperatura mínima de procesamiento, fue disminuir el perfil de temperaturas en 10°C por observación cualitativa del material plastificado. Cuando el material plastificado comenzaba a mostrar una tonalidad blanquecina y fluía con

dificultad a través de la boquilla de inyección, se dedujo la imposibilidad de procesamiento bajo estas condiciones, según la iteración 2 de la tabla 4.23.

Se tomo el perfil de temperaturas inmediato superior como perfil de temperaturas mínimo de procesamiento.

La temperatura del fundido a la salida de la boquilla fue medida con un Termómetro digital OMEGA modelo HH81 rango -160 a 1372 [°C] resolución de 0.1 [°C].

2. Se estableció la velocidad de inyección en el valor obtenido de la curva experimental de viscosidad, es decir en 70 [mm/s]
3. Se fijaron las presiones y tiempos de mantenimiento en cero.
4. El tiempo de enfriamiento se incremento al doble del valor que se había empleado en los procedimientos anteriores. El tiempo de enfriamiento se había manejado en 9[s] se duplicó quedando en 18[s]. Sin embargo, por la geometría de la pieza actuador y el tipo de expulsión, con el tiempo de enfriamiento o refrigeración impuesto las piezas se fragmentaban, por lo tanto se fue disminuyendo el tiempo de refrigeración hasta que las piezas no sufrían fracturas, este tiempo se estableció en 8[s].
5. Se procedió a moldear y ajustar la posición de transferencia a manera de obtener una pieza entre el 95 y 98% de su totalidad esto se logro con una posición de transferencia de 8.7 [mm] y cojín de masa de 4.7 [mm] y presión de mantenimiento en cero.
6. Se espero a que el proceso y la temperatura de moldeo se estabilizara haciendo 8 disparos.
7. Posteriormente se colocó el tiempo de sostenimiento o mantenimiento en un valor arbitrario de 5 [s], esperando que el punto de inyección solidificara a este tiempo de acuerdo a la experiencia.
8. Se aumentó la presión de sostenimiento en incrementos de 10[bar], hasta que se observo que la pieza fuese completa y sin rebabas y se tomó lectura de esta presión, presión de sostenimiento de 46[bar] como el punto de inicio para la construcción de la ventana del proceso, este punto formará la esquina inferior izquierda, llamada “punto de baja temperatura-baja presión”.
9. Se continuó aumentando la presión de sostenimiento en incrementos de 10 [bar], hasta observar evidencias de inconformidad con la pieza es decir, las piezas se quedaban atoradas en el molde, aparecieron rebabas; se decidió tomar lectura del valor de la presión de mantenimiento de 140[bar], con esta información se procedió a dar forma a la esquina superior izquierda del punto llamado de “Baja Temperatura- Alta presión”

La tabla 4.25 muestra el resumen de los puntos de la ventana de proceso para la temperatura de fundido de 162[°C].

Tabla 4.25 Presiones de mantenimiento de llenado y sobre llenado de cavidad a temperatura de fundido de 162[°C]

Presión de mantenimiento [bar]	Estatus pieza
46	Completa
146	Rebaba

En la figura 4.39 se visualiza el llenado de la pieza, observando que a 46 [bar] la pieza se llena en su totalidad (izquierda) y la aparición de rebaba en la pieza inyectada con 146 [bar] de presión de mantenimiento (derecha).

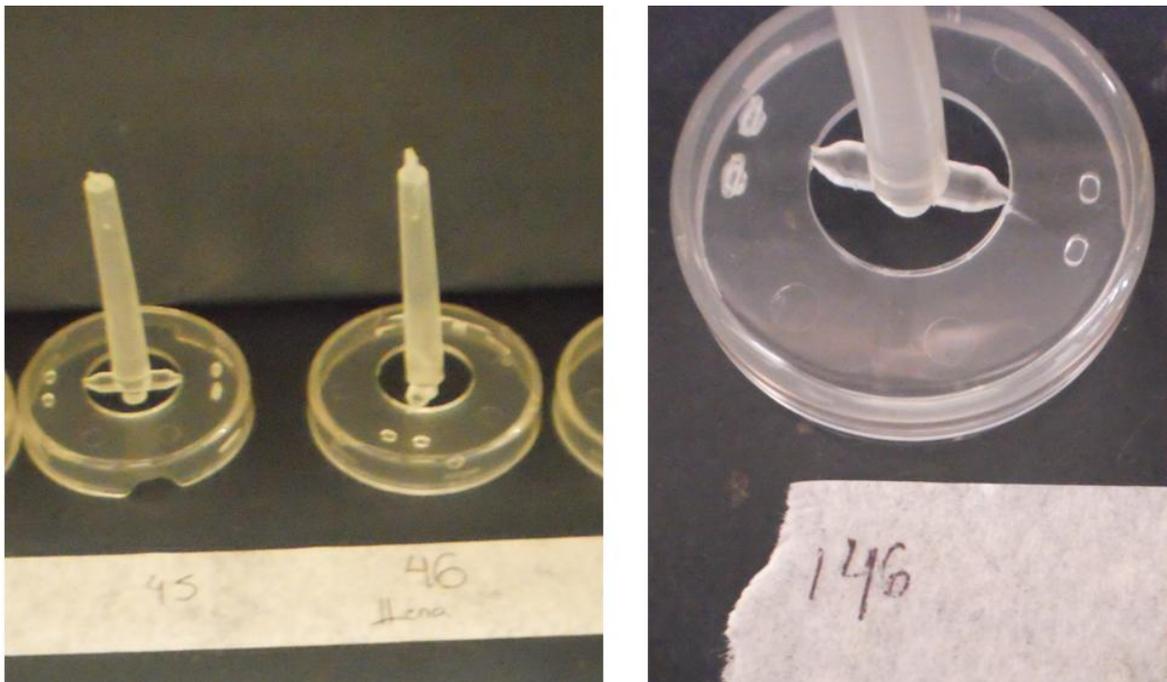


Figura 4.39 Llenado de pieza por acción de la presión de mantenimiento en el perfil de temperaturas mínimas.

- Se incrementaron los valores del perfil de inyección a las máximas para el procesamiento de PLA. El fabricante indica que el perfil máximo debe de ser el que se indica en la tabla 4.21.

Tabla 4.21 Perfil de temperaturas máximas recomendado por el fabricante para procesamiento de PLA a 100 [RPM]

Temperatura de fundido [°C]	T. Garganta de alimentación [°C]	T. Zona de alimentación [°C]	T. Sección de compresión [°C]	T. Sección de dosificación [°C]	T. Boquilla de inyección [°C]
194	20	177	193	205	205

En búsqueda de abrir el rango de temperatura de trabajo, se hacen incrementos del perfil, esperando la aparición de defectos en las piezas moldeadas por exceso de temperatura, el defecto esperado son vacuolas o burbujas, pero en temperaturas de la iteración 2 de la tabla 4.22, las vacuolas no desaparecen, sin embargo se descubre que la presión de mantenimiento se quedo programada en el valor de 146[bar] y una vez que esta presión se reduce a cero las burbujas o vacuolas aparecen.

Tabla4.22 Iteraciones para la búsqueda del perfil de temperatura máximo de trabajo.

Iteración	Temperatura de fundido [°C]	T. Garganta de alimentación [°C]	T. Zona de alimentación [°C]	T. Sección de compresión [°C]	T. Sección de dosificación [°C]	T. Boquilla de inyección [°C]
1	199.5	20	187	203	215	215
2	221	20	197	213	225	225
3	187	20	167	183	195	195
5	170	20	161	180	183	183

En la tabla 4.22 se muestra que hasta la iteración número cinco se obtiene un perfil de temperaturas que permite el moldeo de piezas actuadores sin la aparición de vacuolas o burbujas.

11. Se bajo la presión a 35 bar y se aumentó la temperatura para encontrar el punto de “Alta Temperatura- Baja Presión” de 35[bar], así mismo se estableció el punto de “Alta Temperatura- Alta presión” de 120[bar], manteniendo la temperatura a 170°C para ambos casos. Una vez dibujadas las cuatro esquinas se unieron con una línea y se generó la ventana de proceso para la pieza actuador del dosificador, figura 4.40.

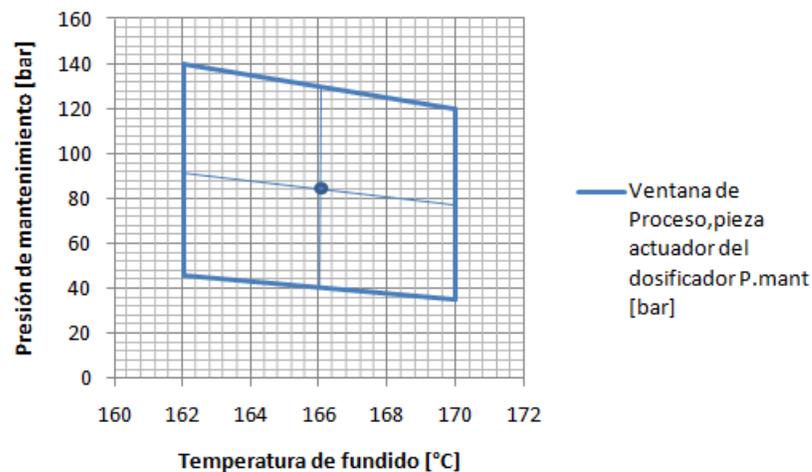


Figura 4.40 ventana de proceso de la pieza actuador del dosificador

A partir de la figura 4.40, se situó el proceso en el centro de la ventana, tabla 4.23.

Tabla 4.23 Centro de la Ventana de Proceso para la pieza actuador del dosificador.

centro de ventana de proceso	
T. Fundido [°C]	P. Mantenimiento[bar]
166	84

Para buscar el centro geométrico de la ventana de proceso, se consideró la forma trapezoidal de ella, ubicando presiones y temperaturas de acuerdo a esa geometría.

Para el caso de la pieza base del dosificador la ventana de proceso se muestra en la figura 4.41,

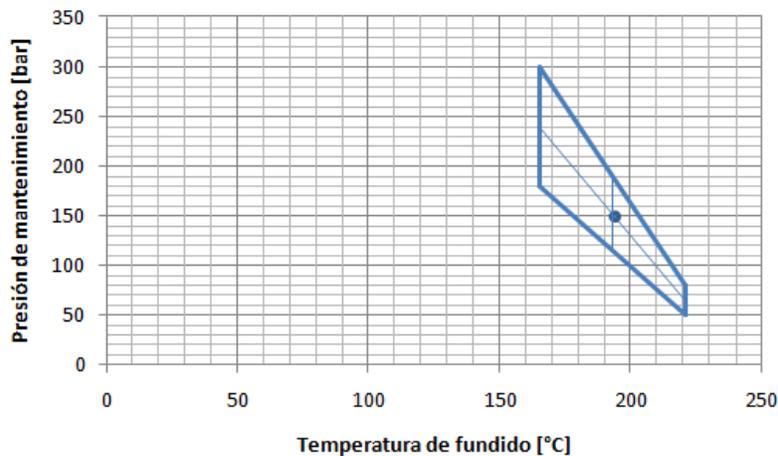


Figura 4.41 ventana de proceso de la pieza base del dosificador

Del gráfico de la figura 4.41 se observa que el centro se encuentra formado por las coordenadas indicadas en la tabla 4.24

Tabla 4.24 Centro de la ventana de proceso de la pieza base del dosificador.

centro de ventana de proceso	
T. Fundido [°C]	P. Mantenimiento [bar]
193	152.5

Las piezas paletas presentan la ventana de proceso que se muestra en la figura 4.42, a partir de esta imagen se puede observar los parámetros del centro de la ventana indicados en la tabla 4.25.

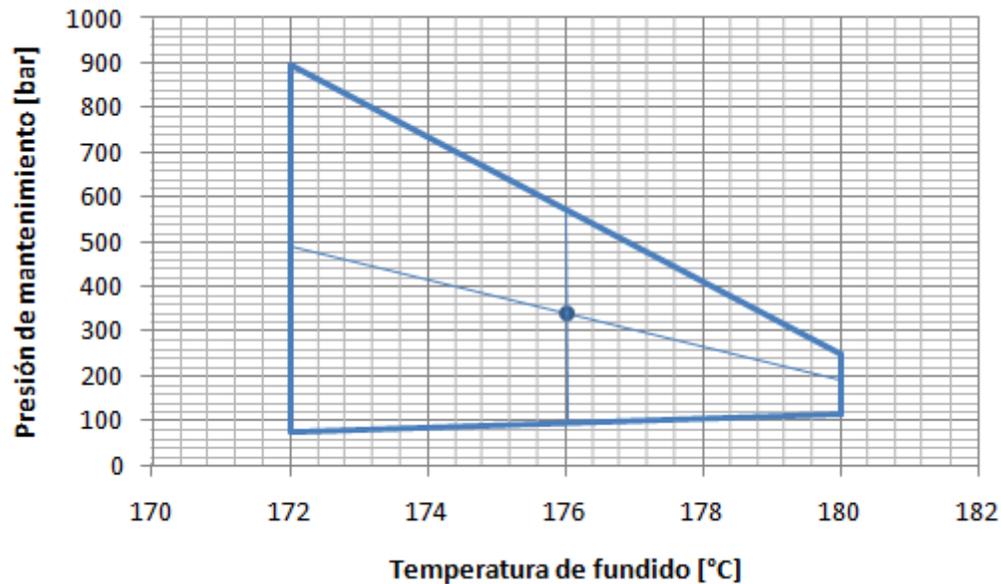


Figura 4.42 ventana de proceso de las piezas paletas del dosificador

Tabla 4.25 Centro de la ventana de proceso de la piezas paletas del dosificador

Centro de ventana de proceso	
T. Fundido[°C]	P. Mantenimiento [bar]
176	337

Las ventanas de proceso son representaciones gráficas que permiten visualizar el campo de maniobra para un proceso de inyección en particular. Son exclusivas del material aplicado, la máquina empleada y el molde de inyección usado; como se demuestra en este trabajo.

Las presiones de mantenimiento mayores se presentaron en la región de “Baja temperatura” para las ventanas de proceso mostradas. Esto quiere decir que, que cuando la temperatura aumenta el material polimérico incrementa su capacidad de fluir y formar rebabas en las líneas de cierre del molde.

Las ventanas de proceso difieren en tamaño y ubicación dentro del campo de temperatura de fundido y presión de mantenimiento, en la figura 4.43 se observan las tres ventanas de proceso de las distintas partes del dosificador.

COMPARATIVO DE VENTANAS DE PROCESO

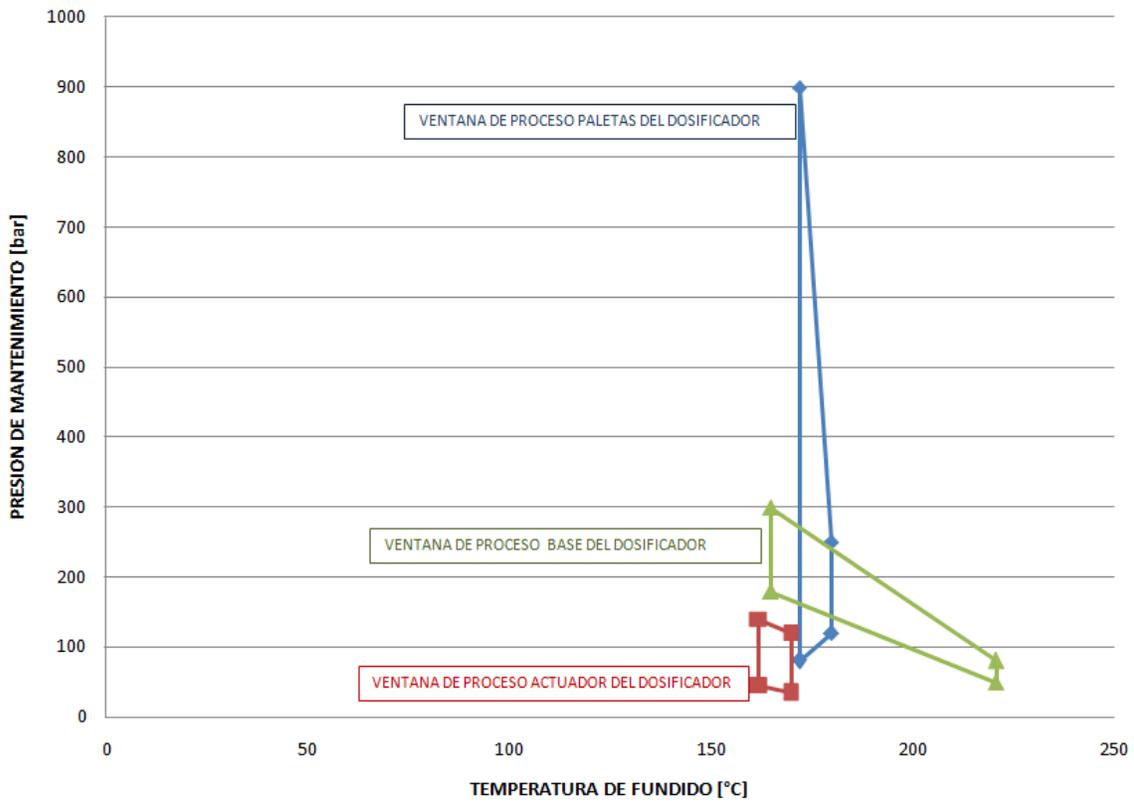


Figura 4.43 Comparativo entre ventanas de proceso obtenidas por moldeo científico

La figura 4.43 muestra que para el análisis de las piezas componentes del ensamble dosificador la región de intersección solo se da entre las ventanas correspondientes a las piezas base y paletas; dicha región es resaltada en la figura 4.44

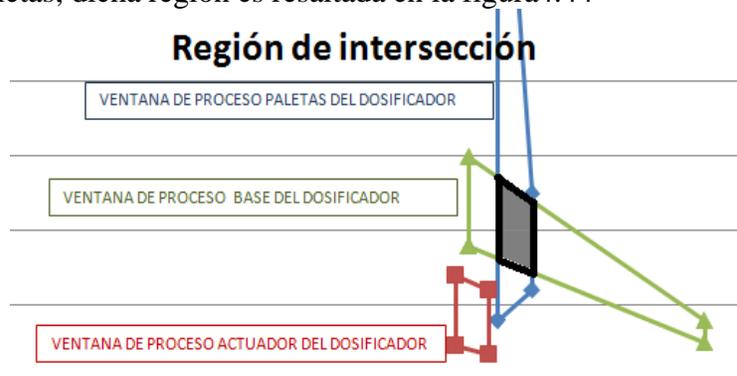


Figura 4.44 Región de intersección extraída de la figura 4.42

La región de intersección mostrada en la figura 4.44 es realizada por el recuadro central el cual tiene como vértices los puntos mostrados en la tabla 4.26.

Tabla 4.26 Coordenadas de los puntos de limitación de región de intersección.

Esquinas de la región de intersección	
T. Fundido	P. Mantenimiento
170	260
180	240
170	160
180	140

Si se requiere fijar los parámetros de temperatura de fundido y presión de mantenimiento comunes a las piezas paletas y base, solo es necesario estar dentro de la región delimitada por las coordenadas mostradas en la tabla 4.26. Como el actuador no cuenta con una ventana de proceso que intercepte con las demás ventanas, los parámetros del proceso se mantienen independientes.

La ventana de proceso sirvió para comprobar la hipótesis de que el proceso no será robusto, ya que por ensayos previos con el material, cuando la temperatura ambiente descendía a los 17[°C] el proceso se veía afectado por contracción excesiva de las piezas alrededor de los insertos, provocando rompimiento de las piezas por efecto de los expulsores.

Las diferencias de las ventanas de proceso, como se muestra en la figura 4.43, son el reflejo de las diferencias entre las condiciones ambientales de experimentación, los moldes de inyección usados, ya que el desgaste del molde fue diferente por cavidad, el tamaño de cavidades, la configuración y número de líneas de cierre en el molde. La ventana correspondiente a la pieza actuador es de área inferior al resto, para el caso de presiones de mantenimiento, la aparición de rebabas se presentaba muy tempranamente al incrementar esta presión, la aparición se explica por el desgaste del molde en cuestión en el área de contacto entre el inserto móvil y fijo, y las correderas. El rango y ubicación de temperaturas de fundido correspondiente a la ventana de proceso del actuador del dosificador difiere de los correspondientes en las piezas base y paletas del dosificador presumiblemente por el cambio en la humedad y temperatura del entorno; cuando se realizó la experimentación la temperatura ambiente en el Laboratorio de Procesamiento de Plásticos descendió de 26[°C] a 16[°C] e incluso la humedad relativa del ambiente en ese momento fue del 60% esta modificación ambiental puede haber repercutido en la humedad relativa del material.

Resultaría inadecuado el uso indistinto de la ventana de proceso de alguna pieza analizada, en otra (así sea usando el mismo equipo de inyección y el mismo lote de material), conociendo las ventanas de proceso particulares a cada pieza, es posible determinar una región de intersección donde las condiciones de proceso sean comunes a las piezas en cuestión. El manejo adecuado de las 8 variables que trata el protocolo de moldeo por inyección permite la identificación de aciertos y fallas de los procesos creativos para la obtención de una pieza polimérica, brindando información útil para validación de moldes de inyección y corrección de variables del proceso de inyección.

4.8 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO PARA LA SOLIDIFICACIÓN DE LA COMPUERTA

Cuando solidifica la compuerta o punto de inyección los efectos de presión de mantenimiento actúan como fuerzas aplicadas sobre la pieza, de esta forma, fue necesario determinar el tiempo adecuado de aplicación de la presión de mantenimiento, (paso 6 de moldeo científico) esta acción se realizó del siguiente modo para la pieza actuador del dosificador:

1. Se ubicó la velocidad de inyección en el valor estable obtenido del estudio de la curva de viscosidad de :

$$V = 70 \left[\frac{mm}{s} \right]$$

2. Se fijó la presión de mantenimiento (Pm) y temperatura de fundido al valor central de la ventana de proceso analizada en la figura 4.39.

$$Pm = 84 [bar]$$

$$Tf = 166 [^{\circ}C]$$

3. El tiempo de enfriamiento se colocó al valor de 6[s] lo cual aseguraba que la pieza se expulsaba de manera completa y sin fractura por acción del enganche existente entre el actuador y el inserto de la placa móvil.
4. Se disminuyó el tiempo de mantenimiento (tm) a cero y se comenzó el moldeo. Se hicieron 5 disparos para estabilizar el proceso, posteriormente se midió la masa de una pieza moldeada en estas condiciones.
5. Se incrementó el tiempo de mantenimiento en intervalos de un segundo y se midió la masa de las piezas moldeadas en la Balanza de precisión scout pro 400x 0.01 [g], ver tabla 4.27.

Tabla 4.27 Intervalos de tiempo de mantenimiento y comportamiento de la masa del actuador del dosificador por disparo realizado.

Tiempo de mantenimiento [s]	Masa 1 [g]	MASA 2 [g]	MASA 3 [g]	MASA 4 [g]	MASA PROMEDIO [g]
0	8.37	7.89	8.31	7.78	8.08
1	9.22	9.21	9.22	9.22	9.21
2	9.3	9.32	9.3	9.31	9.30
3	9.38	9.38	9.37	9.37	9.37
4	9.44	9.42	9.42	9.42	9.42
5	9.45	9.45	9.45	9.44	9.44
6	9.46	9.47	9.47	9.47	9.46
7	9.48	9.47	9.49	9.49	9.48
8	9.48	9.48	9.48	9.48	9.48

A partir de la tabla 4.27 se construyó la gráfica de la figura 4.45, de la cual se puede determinar el tiempo adecuado de mantenimiento.

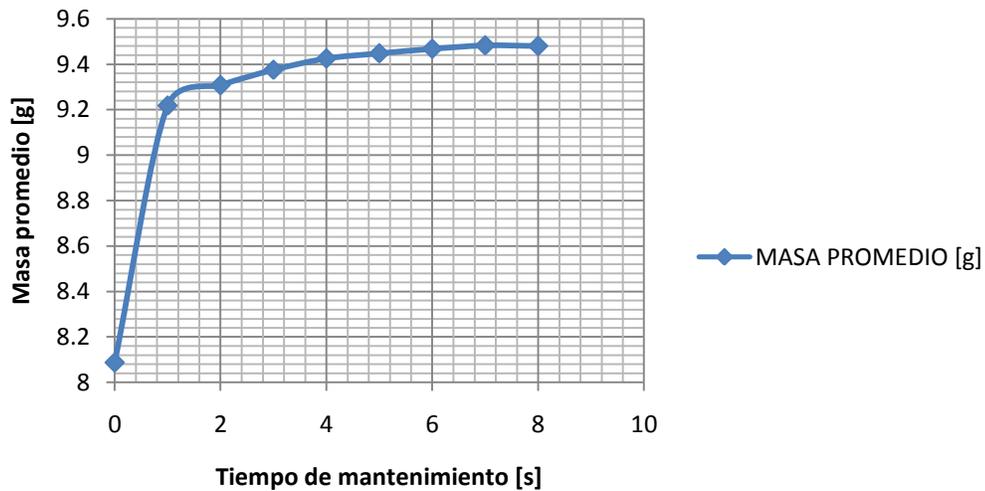


Figura 4.45 Tiempo de mantenimiento vs masa promedio de la pieza actuador del dosificador

La figura 4.45 muestra el comportamiento de la masa del actuador cuando se incrementa el tiempo de mantenimiento. Se observa que la masa tiene valores constantes a partir de 9.48 [g] promedio, de esta manera, se fijó el tiempo de mantenimiento en 7[s].

Se observa que el tiempo de mantenimiento impacta directamente en el comportamiento de la pieza al ser expulsada, ya que contribuye al aumento del tiempo de refrigeración, de esta manera se fue ajustando el tiempo de refrigeración conforme se iba aumentando el tiempo de mantenimiento.

El valor máximo de la masa que se alcanza a obtener es de 9.49 [g] mediante la aplicación de moldeo científico, en comparación con la masa de diseño que es de 9.00 [g], se tiene una variación de 5.16%

Para el caso de la pieza base del dosificador la tabla 4.28 y figura 4.46 muestra el comportamiento de la masa debido al aumento del tiempo de mantenimiento.

Tabla 4.28 Intervalos de tiempo de mantenimiento y comportamiento de la masa de la pieza base del dosificador por disparo realizado

Tiempo de mantenimiento [s]	Masa 1 [g]	Masa 2 [g]	Masa 3 [g]	Masa 4 [g]	Masa promedio [g]
0	5.68	5.87	5.84	5.87	5.815
1	5.96	6	5.99	6.01	5.99
2	5.96	6.08	6.04	6.14	6.05
3	6.15	6.13	6.08	6.08	6.11
4	6.09	6.1	6.09	6.13	6.10
5	6.09	6.12	6.14	6.09	6.11

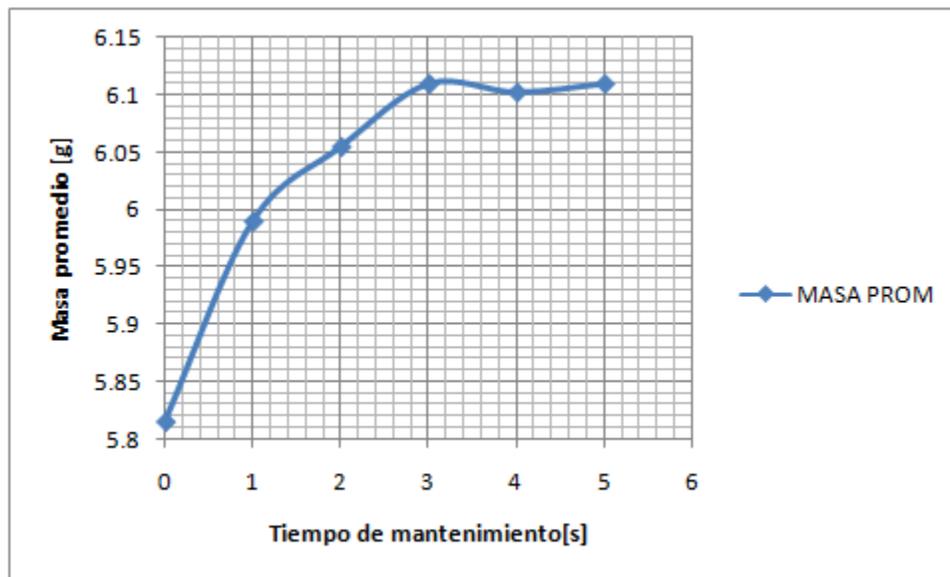


Figura 4.46 Tiempo de mantenimiento vs masa promedio de la pieza base del dosificador

De la figura 4.46 se determinó que el tiempo de mantenimiento fue de 4[s], tiempo en el cual la masa comenzó a tener valores constantes de 6.11[g] promedio.

El valor máximo de masa que se alcanza a obtener es de 6.14 [g] mediante la aplicación de moldeo científico, en comparación con la masa de diseño que es de 6.00 [g], se tiene una diferencia de 2.28%

De igual manera, se estableció el tiempo de mantenimiento durante el moldeo de las paletas a partir de la tabla 4.29 y la figura 4.47.

Tabla 4.29 incremento de tiempo de mantenimiento y comportamiento de la masa de las paletas del dosificador por disparo realizado

Tiempo de mantenimiento [s]	Masa 1 [g]	Masa 2 [g]	Masa 3 [g]	Masa 4 [g]	Masa promedio [g]
0	4.69	4.69	4.69	4.67	4.68
1	4.83	4.81	4.81	4.81	4.81
2	4.84	4.82	4.85	4.84	4.83
3	4.84	4.86	4.85	4.86	4.85
4	4.87	4.86	4.9	4.9	4.88
5	4.91	4.91	4.9	4.92	4.91
6	4.92	4.92	4.91	4.94	4.92
7	4.93	4.95	4.94	4.91	4.93
8	4.92	4.92	4.93	4.95	4.93

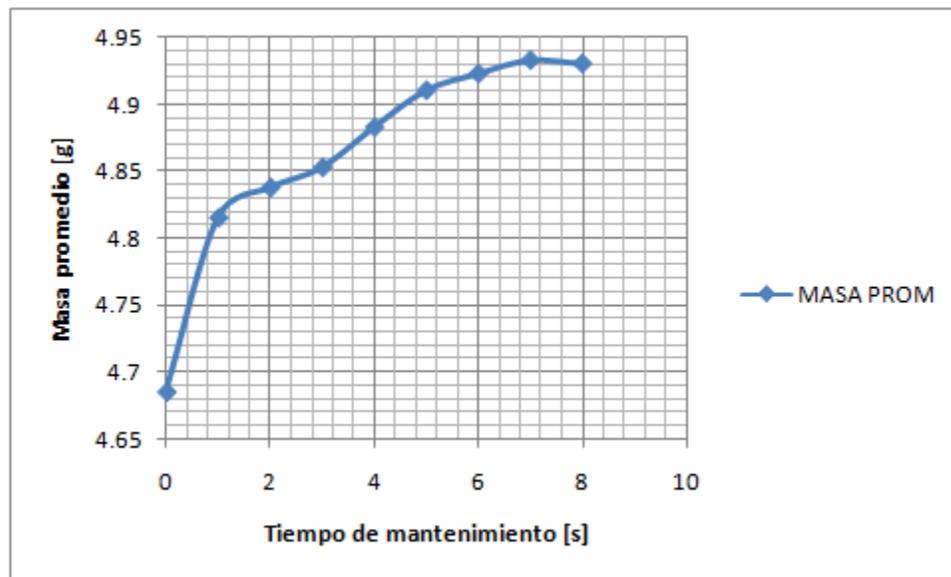


Figura 4.47 Tiempo de mantenimiento vs masa de la piezas paletas del dosificador

La figura 4.47 muestra el comportamiento de la masa de las piezas cuando se incrementó el tiempo de mantenimiento, quedando este en 7[s], tiempo que corresponde al inicio de estabilización de la masa promedio en el valor constante de 4.93 [g].

La masa máxima que se alcanza a obtener de la pieza es de 4.95 [g] mediante la aplicación de moldeo científico, en comparación con la masa de diseño que es de 5.00 [g], se tiene una variación del 1%

A excepción de la pieza actuador (diferencia de 5.16%), las variaciones de masa requerida contra masa obtenida son inferiores al 5%, los cuales son aceptables por el cliente ya que la máxima desviación impuesta por ellos es del 10 %. En este caso las piezas están en conformidad con el cliente.

4.9 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE ENFRIAMIENTO.

El tiempo de enfriamiento es un parámetro fundamental en el moldeo por inyección ya que un manejo adecuado de él repercute en la no aparición de defectos tales como contracciones excesivas y deformaciones o exceso de fragilidad; es un parámetro que impacta directamente en el tiempo de ciclo que traducido en tiempo máquina y operario repercuten económicamente en el costo del producto.

Según el procedimiento de moldeo científico, (paso 6) se deben realizar 5 disparos, es decir inyectar 5 piezas con tiempos de enfriamiento diversos (aleatorios) para medir las dimensiones críticas de las piezas obtenidas, sin embargo, para realizar este punto se hicieron las siguientes consideraciones

- a) Para el caso del actuador, se definieron dos zonas críticas, en la figura 4.48 se observan las dimensiones de esas zonas:

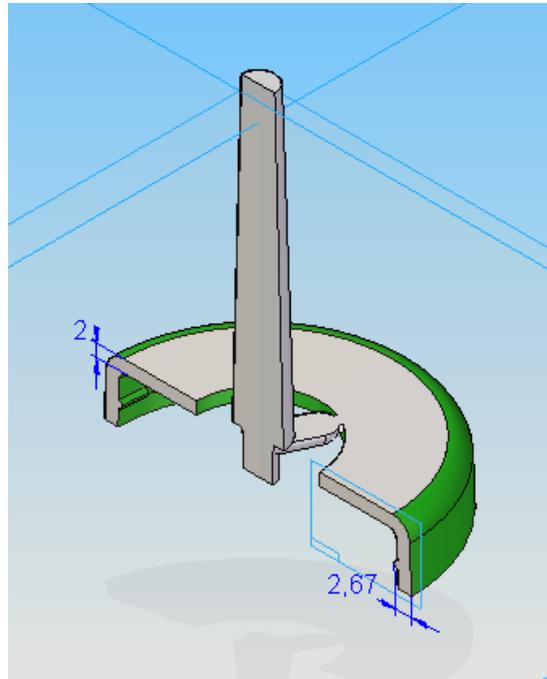


Figura 4.48 Dimensiones críticas para la pieza actuador del dosificador.

Las dimensiones mostradas son en resumen las necesarias para la determinación del tiempo de enfriamiento pues se estima que estas cambiarán con la contracción del material. Una de las zonas críticas es el espesor de 2[mm] de la cara superior, la otra zona corresponde al espesor lateral que incluye las protuberancias internas distribuidas alrededor de la pieza en 4 secciones.

Se seleccionó el espesor de la cara superior por estar en dirección del flujo de inyección y por ser la primera zona en llenarse. Se parte de la hipótesis que por estar en dirección del flujo y llenarse primero, esta zona tendrá una contracción constante a lo largo del tiempo de enfriamiento.

La siguiente dimensión elegida como crítica es la de las protuberancias internas con el espesor de la pared lateral esto es debido a que son las causantes de mantener el ensamble entre el actuador y la base funcionando. Las protuberancias internas crean un trinquete con la pieza base del dosificador. Si la dimensión de las protuberancias no se controla se corre el riesgo que el ensamble no se acople de manera adecuada o en su caso ni siquiera se acople y por lo tanto no cumpla con su función.

- b) Se realizaron inyecciones, en las cuales se aumentó el tiempo de enfriamiento desde el valor de cero en incrementos de un segundo. Por cada pieza inyectada se hizo la medición de las dimensiones consideradas como críticas y se vaciaron en la tabla 4.30.

Tabla 4.30 Tiempos de enfriamiento y dimensiones críticas de la pieza actuador del dosificador.

Tiempo enfriamiento [s]	Espesor de la superficie superior [mm]	Protuberancia 1 [mm]	Protuberancia 2 [mm]	Protuberancia 3 [mm]	Protuberancia 4 [mm]
0	2.1	2.28	2.26	2.37	2.4
1	2.14	2.56	2.28	2.4	2.66
2	2.1	2.54	2.34	2.4	2.36
3	2.2	2.33	2.32	2.38	2.3
4	2.15	2.52	2.27	2.33	2.64
5	2.14	2.37	2.3	2.3	2.4
6	2.14	2.26	2.63	2.31	2.38
7	2.16	2.54	2.4	2.4	2.42
8	2.12	2.55	2.36	2.36	2.43
9	2.12	2.58	2.35	2.36	2.63
10	2.14	2.55	2.33	2.3	2.7

De la tabla 4.30 se tomaron los valores para construir gráficas que relacionaran el tiempo de enfriamiento y las dimensiones críticas y encontrar así la consistencia del proceso respecto al tiempo de enfriamiento, tal como se muestra en las figuras 4.49-4.53.

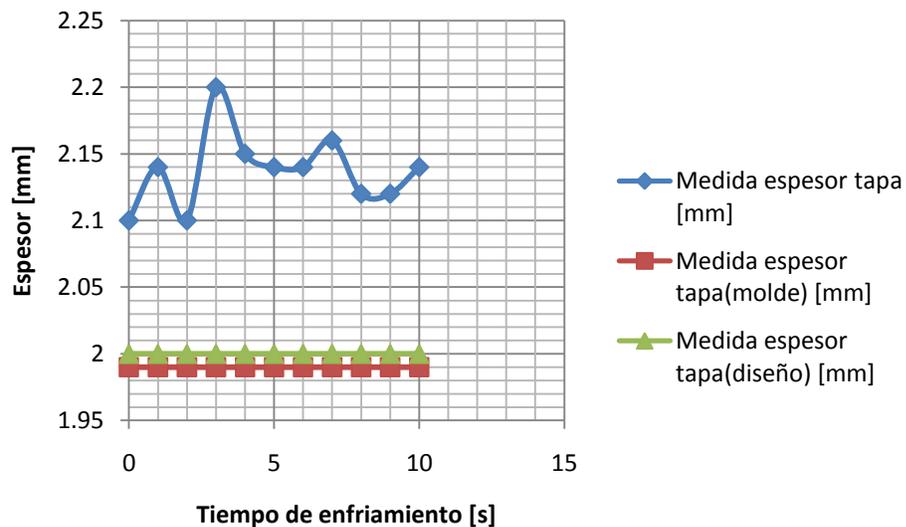


Figura 4.49. Comparativo entre la medida de diseño, molde y el comportamiento de la dimensión, espesor de la superficie superior, con respecto al tiempo de enfriamiento.

La figura 4.49 muestra la medida de diseño, 2 [mm], molde, 1.99 [mm] y las variaciones en el espesor de la superficie superior con respecto al tiempo de enfriamiento, este comportamiento presenta picos que van desde los 2.1 [mm] a 2 s hasta 2.2[mm] a 3 s,

En la figura 4.50 se observa la medida de diseño, 2.67 [mm], molde, 2.7 [mm] y el comportamiento de la dimensión de la protuberancia 1 con respecto al tiempo de enfriamiento, a diferencia del espesor de la tapa, el borde 1 muestra una variación mayor que va de 2.26 mm en un tiempo de enfriamiento de 6 s, hasta 2.58 s en 9 s.

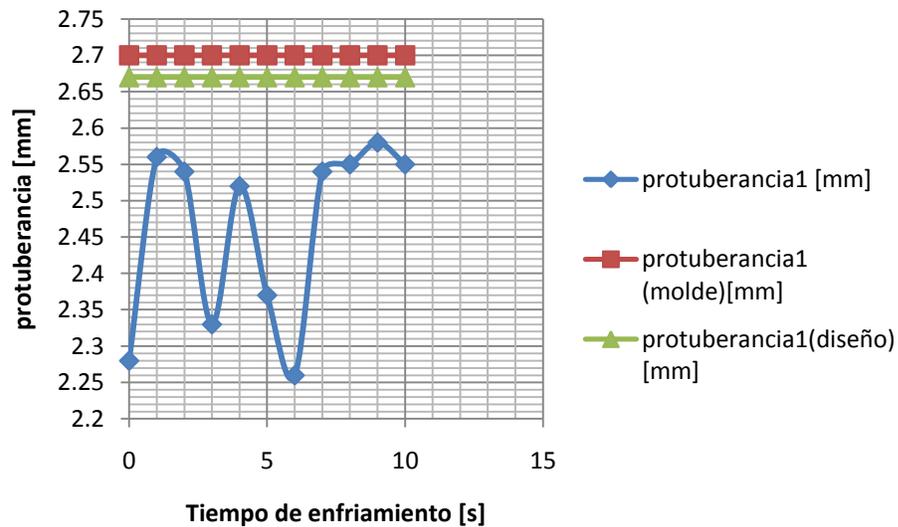


Figura 4.50. Comparativo entre la medida de diseño, molde y el comportamiento de la dimensión, de la protuberancia 1, con respecto al tiempo de refrigeración.

El gráfico de la figura 4.51, muestra la medida de diseño, 2.67 [mm], molde, 2.5 [mm] y el comportamiento de la medida de la protuberancia 2, el cual tiende a crecer, que si se considera el pico más alto despreciable, el intervalo de medidas estaría entre 2.26 mm a 4 s y 2.4 mm a 7 s.

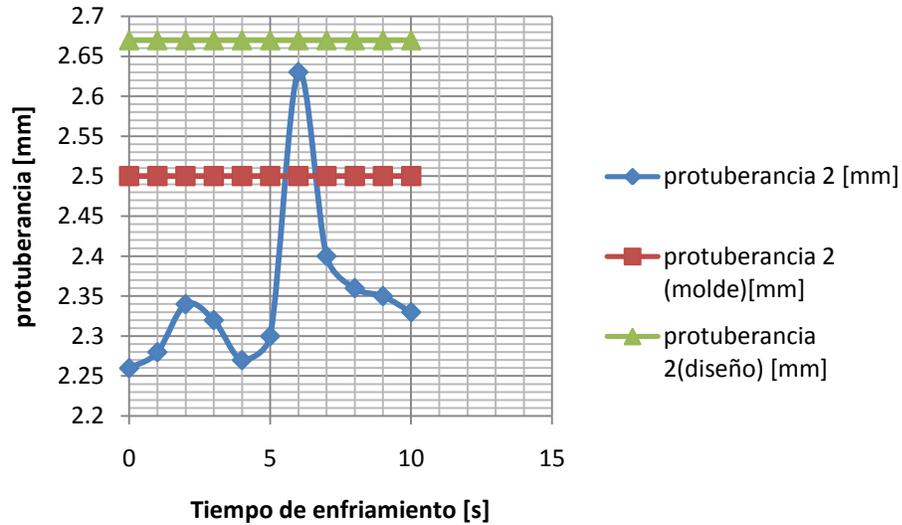


Figura 4.51 Comparativo entre la medida de diseño, molde y el comportamiento de la dimensión, de la protuberancia 2, con respecto al tiempo de refrigeración.

La figura 4.52 muestra la medida de diseño, 2.67 [mm], molde, 2.5 [mm] y el comportamiento de la protuberancia 3, en su dimensión, que tiene una variación entre 2.3 mm a 5 s y 2.4 mm a 7 s.

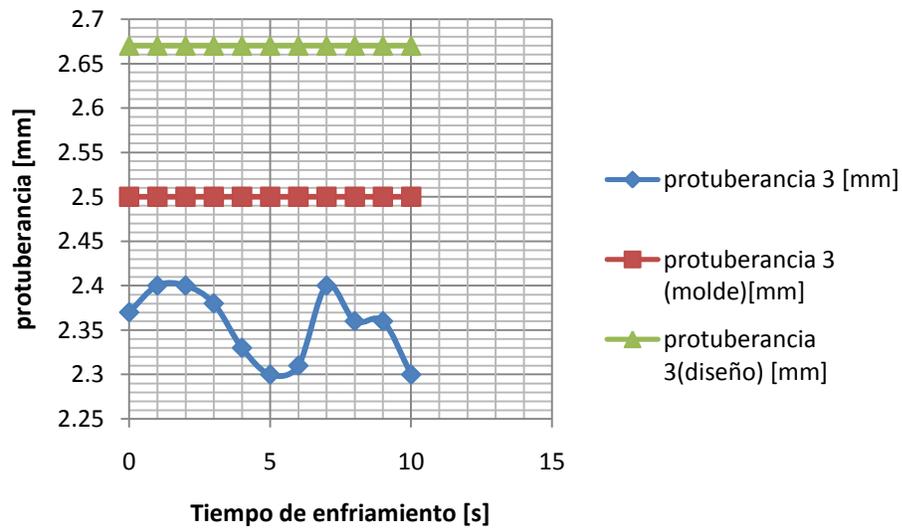


Figura 4.52 Comparativo entre la medida de diseño, molde y el comportamiento de la dimensión, de la protuberancia 3, con respecto al tiempo de refrigeración.

La figura 4.53 muestra la medida de diseño, 2.67 [mm], molde, 2.5 [mm] y como se comportó la dimensión de la protuberancia 4 con respecto al tiempo de enfriamiento, se puede observar que la variación de su dimensión fluctúa entre 2.3 mm a 3 s hasta 2.7 mm en 10 s.

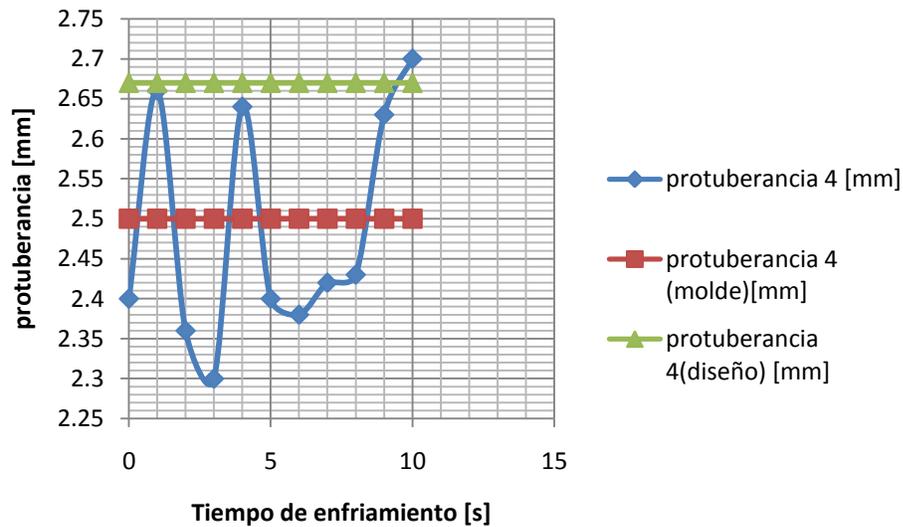


Figura 4.53 Comparativo entre la medida de diseño, molde y el comportamiento de la dimensión, de la protuberancia 4, con respecto al tiempo de refrigeración..

En resumen, la relación de los tiempos de enfriamiento y las dimensiones críticas consideradas se muestran en la tabla 4.31:

Tabla 4.31 resumen de las dimensiones críticas afectadas por el tiempo de enfriamiento

Parte crítica	Intervalo (mm)	Diferencia (mm)	Intervalo del tiempo de enfriamiento (s)	Diferencia (s)
Espesor superficie superior	2.1-2.2	0.1	2-3	1
protuberancia 1	2.26-2.58	0.32	6-9	3
protuberancia 2	2.26-2.4	0.14	4-7	3
protuberancia 3	2.3-2.4	0.1	5-7	2
protuberancia 4	2.3-2.7	0.4	3-10	7

Se puede observar que las dimensiones del espesor de la superficie superior y de las protuberancias 1,3 y 4 tienen un comportamiento constante a diferencia de la dimensión de la protuberancia 2 la cual tiende a incrementar. El criterio para seleccionar el tiempo de enfriamiento consistió en tomar el tiempo en el cual la dimensión que es variable a lo largo de él, se aproxima a la dimensión del molde. Bajo este criterio y con los resultados de la tabla 4.31 se determina que el tiempo de enfriamiento para esta pieza es de 7[s]

Para el caso de la pieza base del actuador

a) Se definieron tres dimensiones críticas, sobre la base del dosificador figura 4.54:

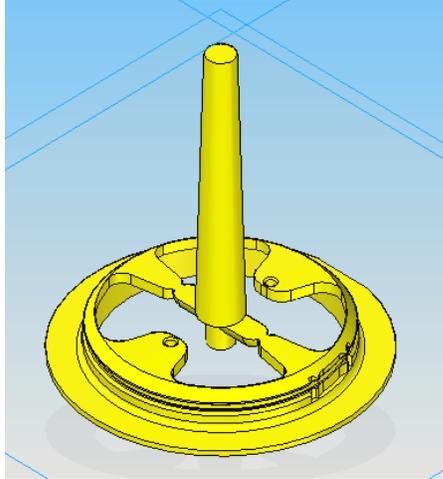


Figura 4.54 Dimensiones críticas para la pieza base del dosificador.

La figura 4.54 muestra las dimensiones críticas sobre el modelo sólido de la base del dosificador, las dimensiones mostradas son las necesarias para la determinación del tiempo de enfriamiento.

1.- Altura de la base figura 4.55.

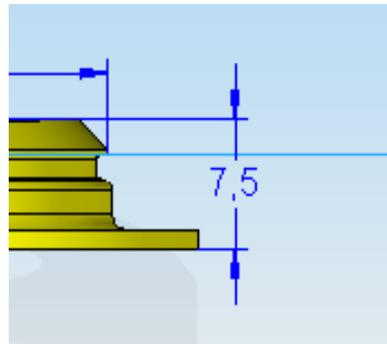
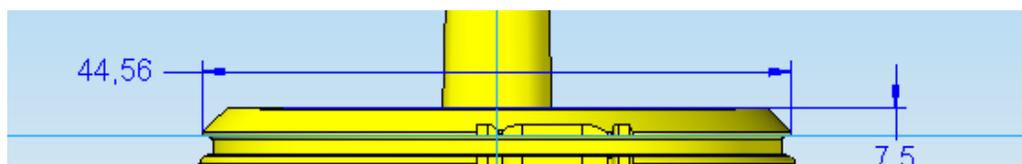


Figura 4.55 Altura de diseño de la pieza base del dosificador.

Se selecciono esta dimensión por estar en dirección del flujo de inyección y porque de ella depende el espacio donde trabajarán las piezas paletas interviniendo en el ajuste general del ensamble.

2.- Diámetro de enganche y 3.- Distancia entre barrenos, figura 4.56 (superior e inferior respectivamente)



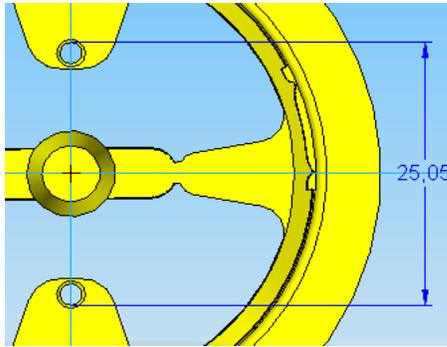


Figura 4.56 Dimensiones de diseño para el diámetro de enganche (superior) y distancia entre barrenos (inferior) para la pieza base del dosificador.

El diámetro de enganche se considera dimensión crítica ya que es la causante de mantener el ensamble entre el actuador y sus protuberancias internas mediante un trinquete. La distancia entre barrenos se considera dimensión crítica debido a que si esta permanece constante las piezas paletas permanecerán a una misma distancia pudiendo trabajar libremente.

- b) Se realizaron inyecciones, en las cuales se aumentó el tiempo de enfriamiento desde el valor de cero en incrementos de un segundo. Por cada pieza inyectada se hizo la medición de las dimensiones consideradas como críticas y se vaciaron en la tabla 4.32.

Tabla 4.32 Tiempos de enfriamiento y dimensiones críticas de la pieza base del dosificador.

Tiempo enfriamiento [s]	Altura de base [mm]	Diámetro de enganche [mm]	Distancia exterior entre barrenos [mm]
0	7.92	44.39	24.81
1	7.76	44.6	25.04
2	7.59	44.89	25.06
3	7.72	44.47	24.91
4	7.76	44.67	24.89
5	7.6	44.9	24.86
6	7.7	44.73	24.8
7	7.89	44.76	24.96
8	7.75	44.94	24.81
9	7.74	45.05	24.84
10	7.68	45	24.92
11	7.82	44.98	24.66
12	8.12	44.97	24.65
13	7.85	44.99	24.65
14	7.88	44.92	24.85

15	7.88	44.95	24.72
16	7.84	44.97	24.76
17	7.82	45.05	24.79
18	7.77	44.97	24.75
19	7.83	44.96	24.93
20	8.05	44.96	24.9

De la tabla 4.32 se tomaron los valores para construir gráficas que relacionaran el tiempo de enfriamiento y las dimensiones críticas y encontrar así la consistencia del proceso respecto al tiempo de enfriamiento, tal como se muestra en las figuras 4.57-4.59.

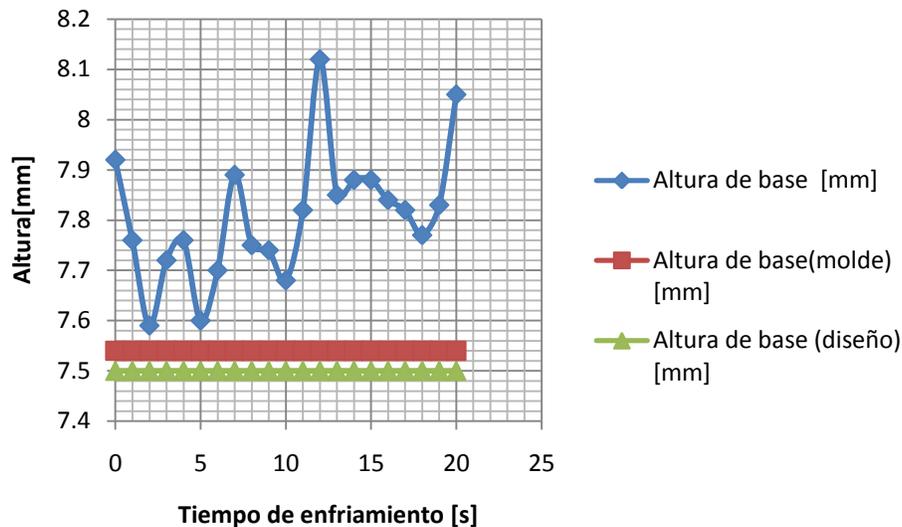


Figura 4.57 Comparativo entre la medida de diseño, molde y comportamiento de la dimensión, altura de base, con respecto al tiempo de refrigeración.

La figura 4.57 muestra la medida de diseño, 7.5 [mm], molde, 7.54 [mm] y las variaciones en la altura de la base con respecto al tiempo de enfriamiento, este comportamiento presenta picos que van desde los 7.59 [mm] a 2 s hasta 8.12 [mm] a 12 s,

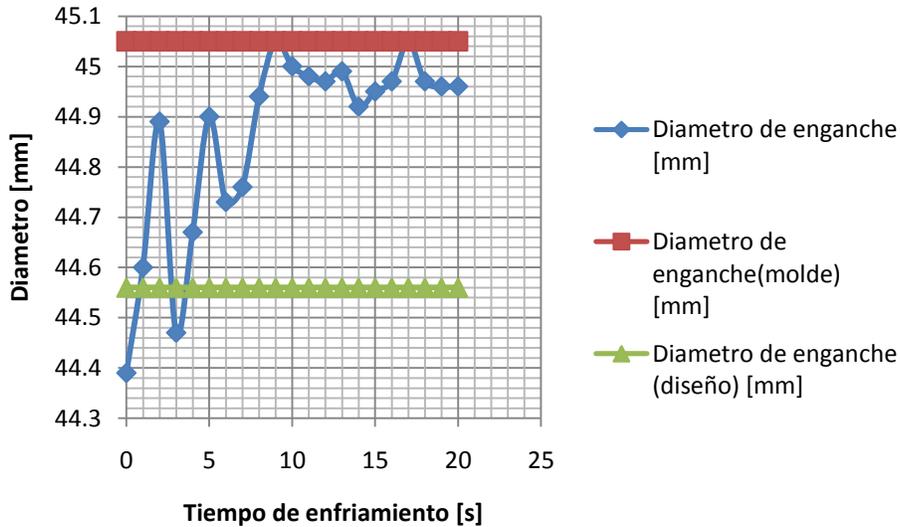


Figura 4.58 Comparativo entre la medida de diseño, molde y comportamiento de la dimensión, diámetro de enganche, con respecto al tiempo de refrigeración

En la figura 4.58 muestra la medida de diseño, 44.56 [mm], molde, 45.05 [mm] y el comportamiento del diámetro de enganche con respecto al tiempo de enfriamiento, muestra una variación que va de 44.39 [mm] en un tiempo de enfriamiento de 0 [s], hasta 45.05 [mm] en 9 [s].

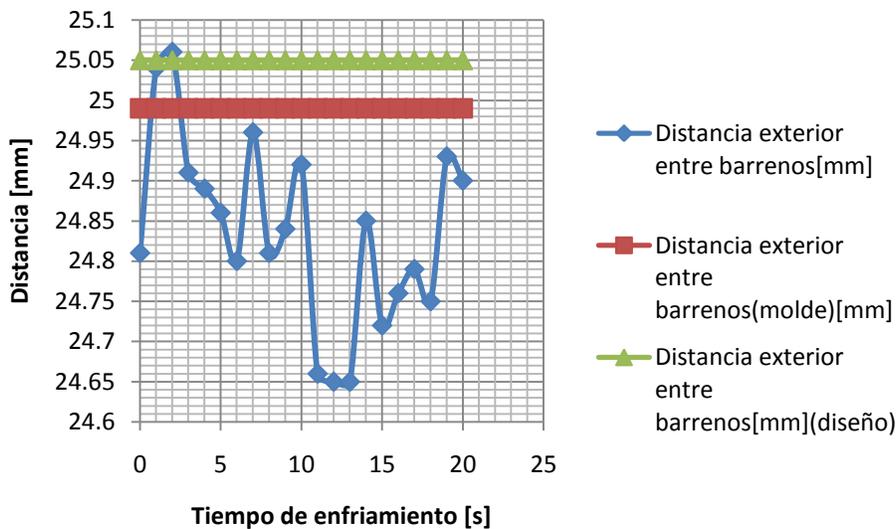


Figura 4.59 Comparativo entre la medida de diseño y el comportamiento de la distancia exterior entre barrenos con respecto al tiempo de refrigeración

La figura 4.59 muestra la medida de diseño, 25.05 [mm], molde, 24.99 [mm] y como se comportó la distancia exterior entre barrenos con respecto al tiempo de enfriamiento, se puede observar que la variación de su dimensión varía entre 24.65 [mm] a 12 [s] hasta 25.06 [mm] en 2 [s].

Tabla 4.33 Resumen de las dimensiones críticas afectadas por el tiempo de enfriamiento

Parte crítica	Intervalo (mm)	Diferencia (mm)	Intervalo del tiempo de enfriamiento (s)	Diferencia (s)
Altura de la base	7.59-8.12	0.53	2-12	10
Diámetro de enganche	44.39-45.05	0.66	0-9	9
Distancia exterior entre barrenos	24.65-25.06	0.41	12-2	10

El tiempo de enfriamiento adecuado para la pieza base del dosificador se determinó aplicando el mismo criterio usado para el tiempo de enfriamiento en la pieza actuador, resultando en 9[s], tiempo en el cual la dimensión diámetro de enganche se encuentra próxima a la dimensión del molde e incluso, a partir de ese tiempo, la dimensión permanece consistente sobre la dimensión del molde.

Para el caso de las piezas paletas del dosificador.

a) Se definieron ocho dimensiones críticas, figura 4.60:

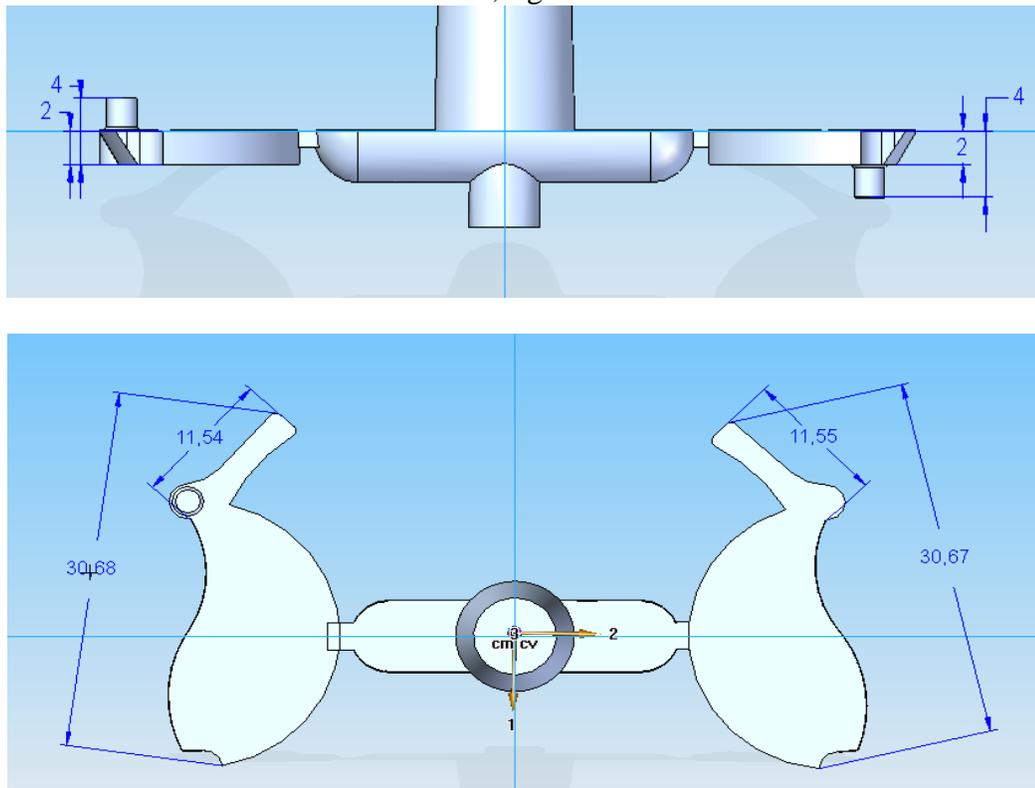


Figura 4.60 Dimensiones críticas para la pieza paleta X (izquierda) y paleta Y (derecha) del dosificador, unidades en [mm]

La figura 4.60 muestra las dimensiones críticas sobre el modelo solido de las paletas del dosificador, longitud paleta X, longitud paleta Y, longitud palanca paleta X, longitud palanca paleta Y, espesor paleta X, espesor paleta Y, espesor mas altura del perno de la paleta X ; y el espesor mas altura del perno de la paleta y. Estas dimensiones son en resumen las necesarias para la determinación del tiempo de enfriamiento.

- b) Se realizaron inyecciones, en las cuales se aumento el tiempo de enfriamiento desde el valor de cero en incrementos de un segundo. Por cada pieza inyectada se hizo la medición de las dimensiones consideradas como criticas y se vaciaron en la tabla 4.34.

Tabla 4.34 Tiempos de enfriamiento y dimensiones críticas de las piezas paletas del dosificador.

Pieza								
Tiempo enfriamiento [s]	Longitud paleta x	longitud paleta y	Longitud palanca paleta x	Longitud palanca paleta y	Espesor paleta x	Espesor paleta y	Espesor + altura perno paleta x	Espesor + altura perno paleta y
0	31.4	31.28	11.71	11.36	1.92	1.94	3.85	4
1	31.52	31.02	11.4	11.57	1.97	1.93	3.82	3.98
2	31.51	31.21	11.68	11.59	1.96	1.94	3.81	3.96
3	31.22	31.25	11.51	11.7	1.98	1.92	3.92	3.98
4	31.23	31.2	11.66	11.68	2	1.95	3.82	3.94
5	31.5	31.25	11.78	11.48	1.99	1.94	3.82	3.95
6	31.32	31.24	11.55	11.51	1.94	1.9	3.87	3.97
7	31.45	31.22	11.46	11.48	1.96	1.93	3.85	3.94
8	31.53	31.18	11.4	11.78	1.96	1.96	3.83	3.96
9	31.28	31.3	11.64	11.81	1.94	1.92	3.93	3.84
10	31.48	31.12	11.32	11.52	1.97	1.97	3.94	3.92
11	31.33	31.14	11.58	11.62	1.96	1.98	3.84	3.94
12	31.52	31.25	11.53	11.33	1.95	1.94	3.87	3.94
13	31.55	31.1	11.7	11.4	1.96	1.96	3.82	4
14	31.56	31.2	11.47	11.63	1.98	1.94	3.89	4
15	31.32	31.26	11.54	11.57	2	1.95	3.85	3.98
16	31.43	31.16	11.62	11.36	1.99	1.95	3.82	3.96

De la tabla 4.34 se tomaron los valores para construir gráficas que relacionaran el tiempo de enfriamiento y las dimensiones críticas y encontrar así la consistencia del proceso respecto al tiempo de enfriamiento, tal como se muestra en las figuras 4.61-4.68.

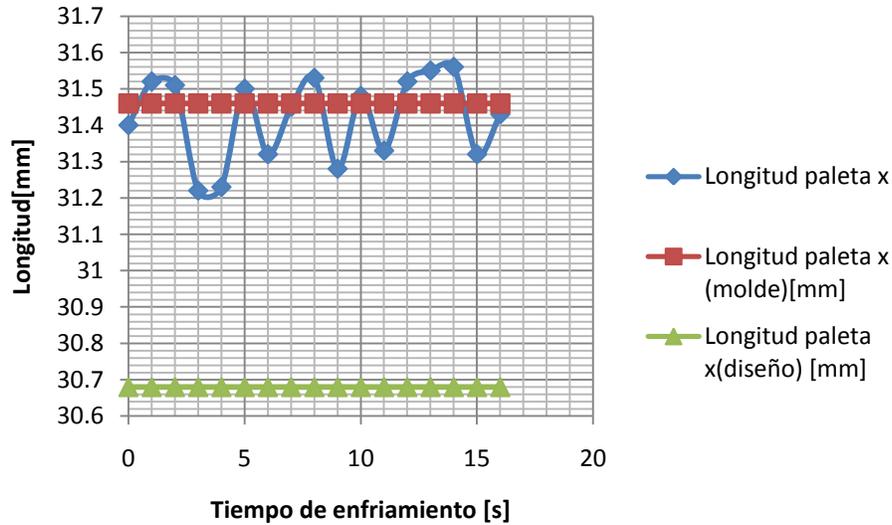


Figura 4.61 Comparativo entre la medida de diseño, molde y el comportamiento de la longitud de la paleta x con respecto al tiempo de refrigeración

La figura 4.61 muestra la medida de diseño, 30.68 [mm], molde, 31.46 [mm] y el comportamiento de la dimensión de la longitud de la paleta X, [mm], con respecto al tiempo de enfriamiento, se puede observar que la variación de su dimensión varía entre 31.23 mm a 4 s hasta 31.56 mm en 14 s.

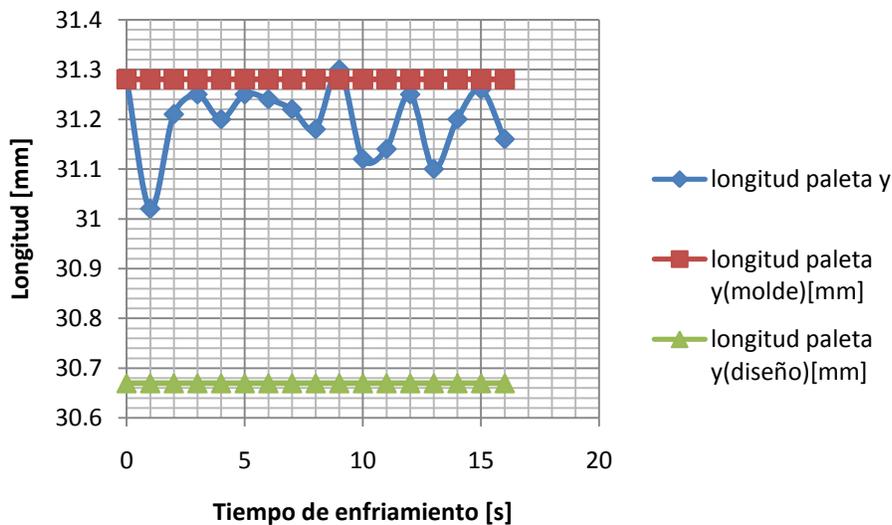


Figura 4.62 Comparativo entre la medida de diseño y el comportamiento de la longitud paleta Y, con respecto al tiempo de refrigeración

La figura 4.62 muestra la medida de diseño, 30.67 [mm], molde, 31.28[mm] y el comportamiento de la dimensión de la longitud de la paleta Y, con respecto al tiempo de enfriamiento, se puede observar que la variación de su dimensión fluctúa entre 31.02 [mm] a 1 [s] hasta 31.3 [mm] en 9 [s].

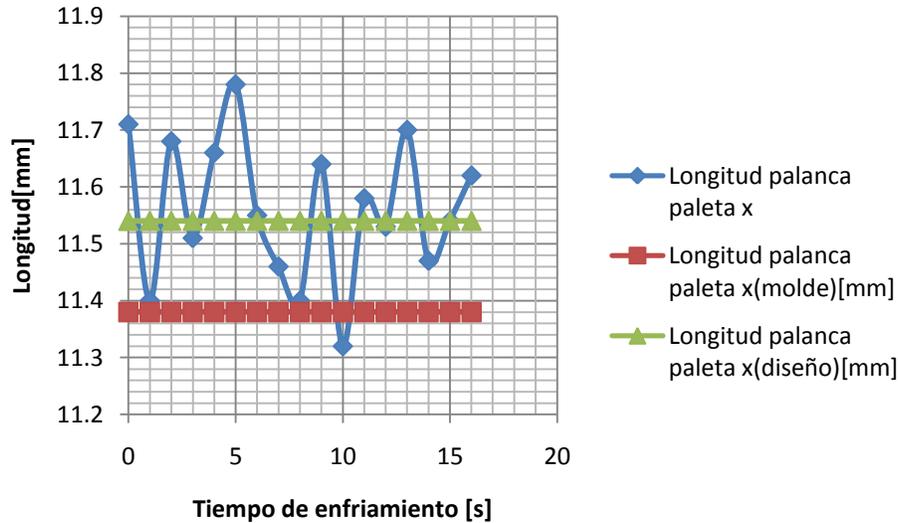


Figura 4.63 Comparativo entre la medida de diseño, molde y el comportamiento de la longitud de la palanca de la paleta X, con respecto al tiempo de refrigeración

La figura 4.63 muestra la medida de diseño, 11.54 [mm], molde, 11.38[mm] y el comportamiento de la dimensión de la palanca de la paleta X, con respecto al tiempo de enfriamiento, se puede observar que la variación de su dimensión está entre 11.4 [mm] a 1 [s] hasta 11.78 [mm] en 5 [s].

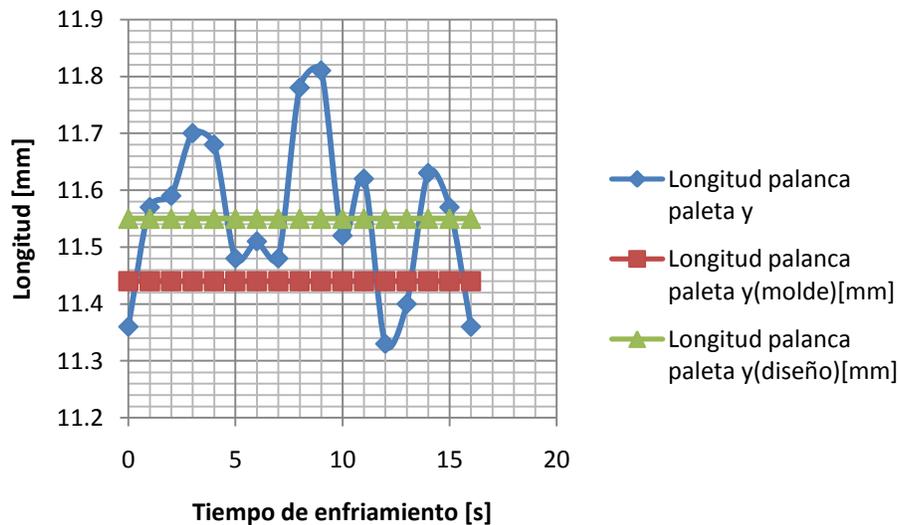


Figura 4.64 Comparativo entre la medida de diseño, molde y la longitud de la palanca de la paleta Y, con respecto al tiempo de refrigeración

La figura 4.64 muestra la medida de diseño, 11.55 [mm], molde, 11.44 [mm] y el comportamiento de la dimensión de la longitud de la palanca de la paleta Y con respecto al tiempo de enfriamiento, se puede observar que la variación de su dimensión varía entre 11.33 [mm] a 12 [s] hasta 11.81 [mm] en 9 [s].

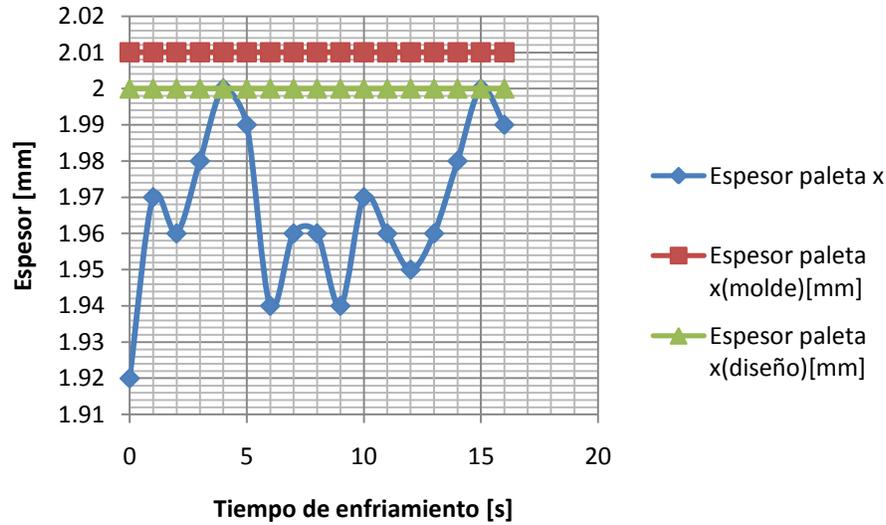


Figura 4.65 Comparativo entre la medida de diseño, molde y el comportamiento del espesor de la paleta X, con respecto al tiempo de refrigeración

La figura 4.65 muestra la medida de diseño, 2 [mm], molde, 2.01 [mm] y el comportamiento del espesor de la paleta X, con respecto al tiempo de enfriamiento, se puede observar que la variación de su dimensión se encuentra entre 1.92 [mm] a 0 [s] hasta 2 [mm] en 4 [s].

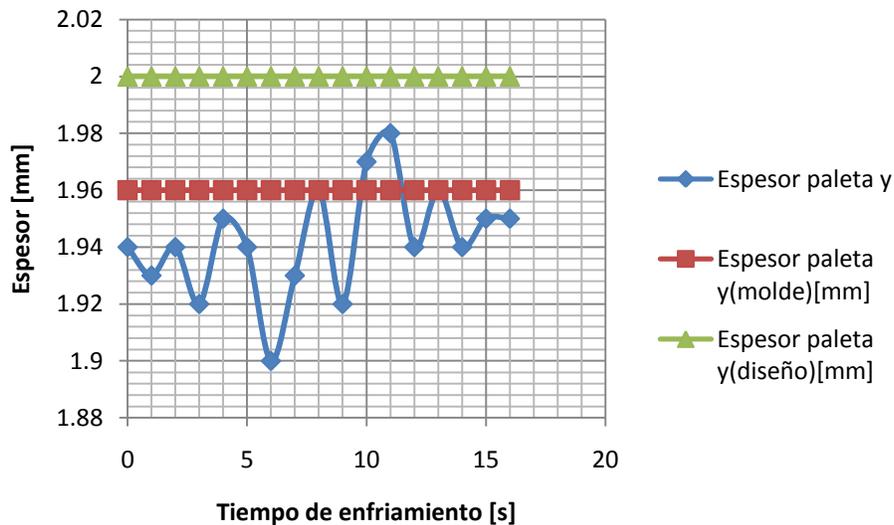


Figura 4.66 Comparativo entre la medida de diseño, molde y el comportamiento del espesor de la paleta Y, con respecto al tiempo de refrigeración

La figura 4.66 muestra la medida de diseño, 2 [mm], molde, 1.96 [mm] y el comportamiento del espesor de la paleta Y, con respecto al tiempo de enfriamiento, se puede observar que la variación de su dimensión fluctúa entre 1.9 [mm] a 6 [s] hasta 1.98 [mm] en 12 [s].

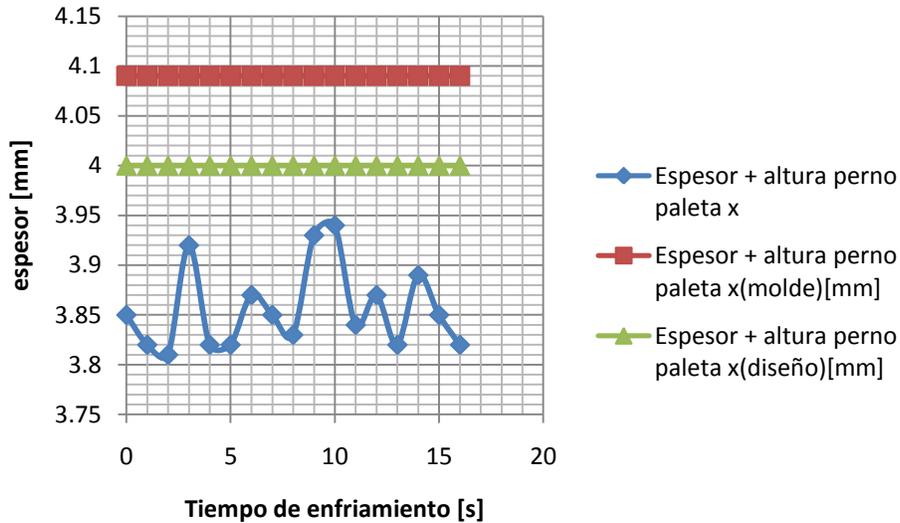


Figura 4.67 Comparativo entre la medida de diseño, molde y el comportamiento del espesor más la altura del perno de la paleta X, con respecto al tiempo de refrigeración

La figura 4.67 muestra la medida de diseño, 4 [mm], molde, 4.09 [mm] y el comportamiento de la dimensión que corresponde al espesor más la altura del perno de la paleta X, con respecto al tiempo de enfriamiento, se puede observar que la variación de su dimensión está entre 3.81 [mm] a 3 [s] hasta 3.94 [mm] en 10 [s].

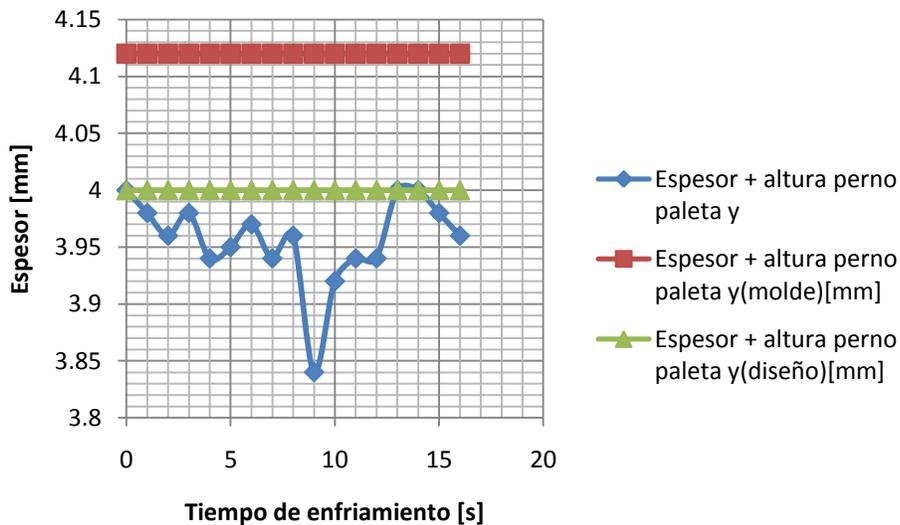


Figura 4.68 Comparativo entre la medida de diseño, molde y el comportamiento del espesor más altura del perno de la paleta Y, con respecto al tiempo de refrigeración

La figura 4.68 muestra la medida de diseño, 4 [mm], molde, 4.12 [mm] y muestra como se comportó la dimensión que corresponde al espesor mas la altura del perno de la paleta Y, con respecto al tiempo de enfriamiento, se puede observar que la variación de su dimensión fluctúa entre 3.84 [mm] a 9 [s] hasta 4 [mm] en 0 [s].

Tabla 4.35 Resumen de las dimensiones críticas afectadas por el tiempo de enfriamiento

Parte crítica	Intervalo [mm]	Diferencia [mm]	Intervalo del tiempo de enfriamiento [s]	Diferencia [s]
Longitud paleta X	31.23-31.56	0.33	4-14	10
Longitud Paleta Y	31.02-21.3	0.28	1-9	8
Longitud palanca paleta X	11.4-11.78	0.38	1-5	4
Longitud palanca Y	11.33-11.81	0.48	12-9	3
Espesor paleta X	1.92-2	0.4	0-4	4
Espesor paleta Y	1.9-1.98	0.08	6-12	6
Espesor + altura perno X	3.81-3.94	0.13	3-10	7
Espesor + altura perno Y	3.84-4	0.16	9-0	9

El tiempo de enfriamiento óptimo para la producción de las piezas paletas del dosificador se establece en 8[s], tiempo en el cual la dimensión del espesor de la paleta Y incrementa manteniéndose próxima y consistente alrededor de la dimensión del molde.

4.10 VALIDACIÓN DE LA PARAMETRIZACIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN PARA LA FABRICACIÓN DEL ACTUADOR

Finalmente se implementó una producción de 1000 piezas con los parámetros establecidos por el moldeo científico los cuales se presentan en la tabla 4.36. Esta producción tiene el fin de validar la parametrización realizada.

Tabla 4.36 Parámetros establecidos mediante la aplicación del moldeo científico para la obtención de la pieza actuador del dosificador.

Velocidad angular de husillo [RPM]	Velocidad de Inyección [mm/s]	Presión máxima de inyección [bar]	Temperatura de fundido [°C]	Presión de mantenimiento [bar]	Tiempo de mantenimiento [s]	Tiempo de enfriamiento [s]
100	70	511.2	166	84	7	7

Se inicia la producción colocando el retroceso del husillo en 19 [mm], requiriendo una parada de dosificación de 18[mm] y solicitando una posición de transferencia de 14[mm] para obtener un cojín de masa de 9.1 [mm]. La temperatura de enfriamiento proveniente del chiller fue de 7[°C]. Cuando el molde tenía una temperatura cercana a la proporcionada por el chiller, la vela de la colada quedaba del lado de la platina fija, ver figura 4.69



Figura 4.69 Vela de la pieza dosificador retenida en bebedero del molde.

En los siguientes 5 ciclos de inyección, las piezas presentan líneas de flujo y las piezas se rompían al ser expulsadas, figura 4.70.



Figura 4.70 Líneas de flujo y fractura en la pieza actuador.

Se deshabilita el chiller para subir la temperatura en el molde; se manipularon los parámetros de expulsión de tal manera que la salida de los expulsores fuera lenta (10% de la velocidad de expulsión disponible) y con una presión de expulsión de 30 [bar], con este cambio, las piezas dejaban de fragmentarse, sin embargo, se sigue presentando la aparición de fisuras, figura 4.71;

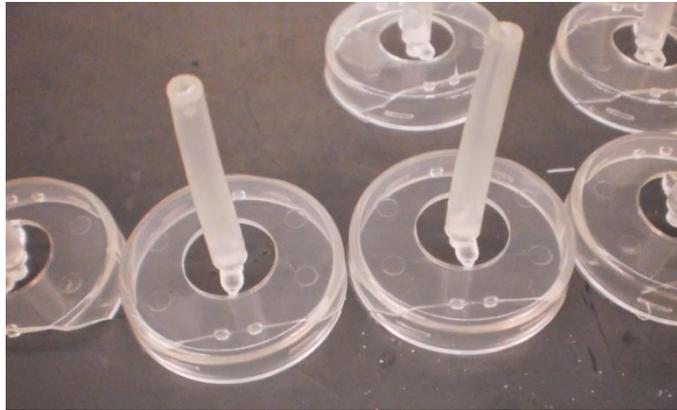


Figura 4.71 Fisura en la pieza actuador debido al enganche de los bordes internos con el inserto “macho” del molde.

Se determina que para minimizar el efecto de las fisuras era necesario reducir el tiempo de enfriamiento para aprovechar la flexibilidad del material. El tiempo de enfriamiento se reduce a $T_e=6$ [s]. Se procede a inyectar la pieza número 20 y se mide la temperatura en molde $T_m=20$ [°C]. En la pieza número 23 siguen apareciendo fisuras en el material por lo que se descende el tiempo de enfriamiento a 5 [s]. Con este tiempo de enfriamiento las fisuras siguen apareciendo en las piezas, por lo tanto se decide reducir la presión de los expulsores a 9[bar] y su velocidad se incrementa al 99%, intentando con esto expulsar rápidamente la pieza antes de que, por efecto de enfriamiento, endurezca y fragilice. Se observa, también, que las líneas de flujo desaparecen en las piezas pero los bordes internos y los pernos del actuador, ahora, se desgarran y fracturan.

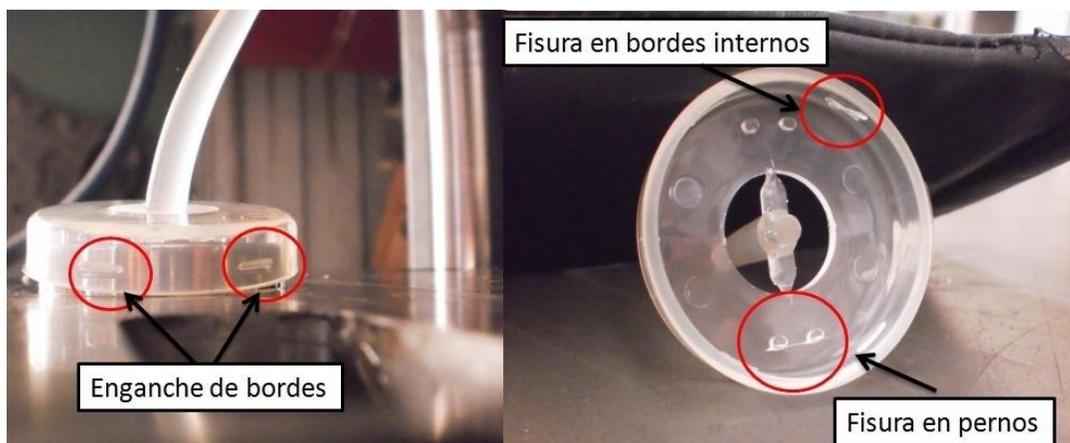


Figura 4.72 Enganche de la pieza actuador en el inserto por parte de los bordes internos (izquierda). Fisura sobre los pernos y bordes internos de la pieza actuador (derecha).

Debido a este comportamiento, se disminuye el tiempo de enfriamiento a 3.5 [s]. Se procede a medir la temperatura en molde la cual es de $T_m=23$ [°C]. La fractura de los pernos internos desaparece y la fisura en la parte superior de la pieza actuador disminuye de 9.7 [mm] al valor mínimos de 3.24 [mm], figura 4.73.



Figura 4.73 Reducción máxima de fisura en la pieza actuador del dosificador.

Se disminuye el tiempo de enfriamiento a 3 [s], el resultado en el momento de la expulsión muestra la desaparición de la fisura y la deformación de la pieza por acción de los expulsores, 4.74.



Figura 4.74. Deformación de la pieza debida al empuje de los pernos expulsores en combinación con la flexibilidad excesiva del material por falta de tiempo de refrigeración.

Se determina usar el tiempo de enfriamiento en 3.5 [s] obteniendo piezas sin deformación provocada por expulsores y con fisura en la parte superior de 3 [mm]. Se ajusta la apertura de molde a 91[mm] para reducir el tiempo de ciclo, para una pieza actuador de dosificador, a 19[s]. En la tabla 4.37 se muestran los parámetros finales de optimización de proceso.

Tabla 4.37 Parámetros establecidos para optimización de proceso de inyección de la pieza actuador.

Temperatura de molde [°C]	Indicador flujo canal 3	Indicador de flujo canal 4	Temperatura salida de frimold [°C]	Presión de salida de expulsores [bar]	% de velocidad en salida de expulsores	Tiempo de enfriamiento [s]	Apertura de molde[mm]	Tiempo de ciclo [s]
23	0.5	0	7	9	99	3.5	91	12

De los parámetros mostrados en la tabla 4.37 se obtuvo una producción de 100 piezas para el actuador, de las cuales se observó que 15 de ellas se obtuvieron sin defectos visibles de fisuras, fracturas, rechupes, vacuolas (burbujas), líneas de flujo y rebabas. En contraste 85 de ellas presentaron defectos de fisuras en la superficie superior y fracturas en los bordes internos.

De igual manera, con el fin de validar la experimentación se procedió a realizar una producción de 100 piezas “base del actuador”. Los parámetros empleados se resumen en la tabla 4.38.

Tabla 4.38 Parámetros establecidos mediante la aplicación del moldeo científico para la obtención de la pieza base del dosificador.

Velocidad angular de husillo [RPM]	Velocidad de Inyección [mm/s]	Presión máxima de inyección [bar]	Temperatura de fundido [°C]	Presión de mantenimiento [bar]	Tiempo de mantenimiento [s]	Tiempo de enfriamiento [s]
100	45	496	193	152	4	9

Tabla 4.39 Parámetros establecidos para optimización de proceso de inyección de la pieza base del dosificador.

Temperatura de molde [°C]	Indicador de flujo canal 3	Indicador de flujo canal 4	Temperatura salida de frimold [°C]	Presión de salida de expulsores [bar]	% de velocidad en salida de expulsores	Tiempo de enfriamiento [s]	Apertura de molde[mm]	Tiempo de ciclo [s]
20	3.5	2	7	9	99	9	120	14.5

La tabla 4.39 indica los parámetros de optimización del proceso, como esta pieza no presenta problemas para su expulsión el tiempo de enfriamiento no se modifica. La figura 4.75 muestra la pieza base del dosificador.



Figura 4.75 Obtención de la pieza base del dosificador

La validación de las piezas paletas del dosificador consistió en la aplicación de los parámetros obtenidos, los cuales se muestran en la tabla 4.40.

Tabla 4.40 Parámetros establecidos mediante la aplicación del moldeo científico para la obtención de las piezas paletas del dosificador.

Velocidad angular	Velocidad de	Presión máxima	Temperatura de fundido	Presión de mantenimiento	Tiempo de mantenimiento	Tiempo de enfriamiento

de husillo [RPM]	Inyección [mm/s]	de inyección [bar]	[°C]	[bar]	[s]	[s]
100	50	180	176	900	7	7

Tabla 4.41 Parámetros establecidos para optimización de proceso de inyección de las piezas paletas del dosificador.

Temperatura de molde [°C]	Indicador flujo canal 3	Indicador de flujo canal 4	Temperatura salida de frimold [°C]	Presión de salida de expulsores [bar]	% de velocidad en salida de expulsores	Tiempo de enfriamiento [s]	Apertura de molde[mm]	Tiempo de ciclo [s]
23	3	1	7	9	99	7	120	15.5

Estas piezas no presentan problemas en su expulsión, de esta manera, el tiempo de enfriamiento no se modifica, en la figura 4.76 se muestra la pieza inyectada.



Figura 4.76 Obtención de las piezas paletas del dosificador

Una vez obtenidas las piezas se procede al ensamble de ellas, el cual se muestra de manera esquemática en la figura 4.77

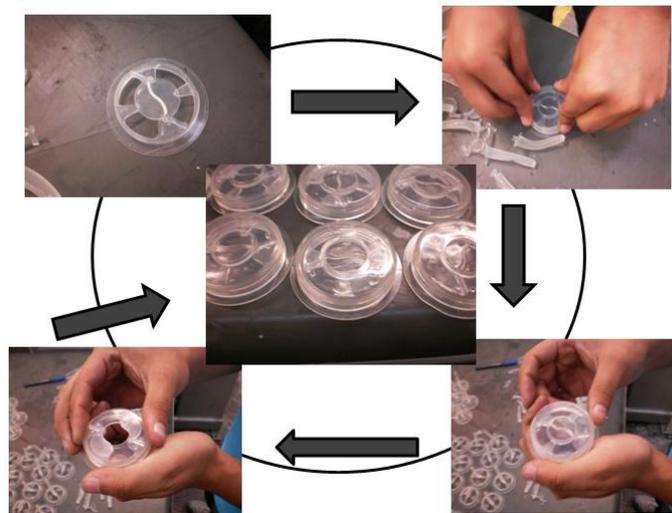


Figura 4.77. Ensamble del dosificador de gránulos.

4.11 TOLERANCIAS Y CONTRACCIONES

Las tolerancias dimensionales lineales para las piezas inyectadas [23] se generaron a partir de la diferencia entre la dimensión del modelo sólido y la medida sobre la pieza inyectada después de 24 horas de su manufactura. Las dimensiones de las cuales se obtuvieron las tolerancias son las críticas para el funcionamiento del ensamble. La contracción se establece mediante el cociente de la diferencia de las dimensiones de la pieza inyectada y su contraparte en el molde, entre, la dimensión de la contraparte en el molde; y se expresa en unidades longitudinales sobre unidades longitudinales ([mm/mm]) En la tabla 4.42 se visualizan las desviaciones de la pieza con respecto a lo solicitado y su contracción.

Tabla 4.42 Tolerancias y contracciones de las paletas

Dimensión crítica	Modelo sólido[mm]	Pieza[mm]	Diferencia[mm]	Molde[mm]	Dif. molde pieza[mm]	Contracción pieza[mm/mm]
Longitud paleta X	30.68	31.33	-0.62	31.36	0.03	0.0009
Longitud paleta Y	30.67	30.66	0.01	31.28	0.62	0.01
Longitud palanca paleta X	11.54	12.31	-0.77	11.38	-0.93	-0.08
Longitud palanca paleta Y	11.55	11.21	0.34	11.44	0.23	0.02
Espesor paleta X	2	2.05	-0.05	2.01	-0.04	-0.01
Espesor paleta Y	2	2.02	-0.02	1.96	-0.06	-0.03
Espesor + altura perno paleta X	4	3.98	0.02	4.09	0.11	0.02
Espesor + altura perno paleta Y	4	4.1	-0.1	4.12	0.02	0.004

De la tabla 4.42 se obtiene que la máxima diferencia va desde -0.77 a 0.34 [mm]. La tolerancia de la longitud de la paleta X es de -0.62[mm]. Se observa que la contracción va desde a -0.08 a 0.02 [mm/mm] la contracción negativa indica una expansión de la pieza en la dirección de la dimensión, esta contracción es 1500% superior a la reportada por el fabricante, se recomienda usar la contracción aquí determinada para el dimensionamiento del molde de inyección de producción

Tabla 4.43 Tolerancias y contracciones de la base

Dimensión crítica	Modelo sólido[mm]	Pieza[mm]	Diferencia[mm]	Molde[mm]	Dif. Molde pieza [mm]	Contracción pieza[mm/mm]
Altura de base	7.5	7.47	0.03	7.54	0.07	0.009
Diámetro de enganche	44.56	45.02	-0.46	45.05	0.03	0.0006
Distancia exterior entre barrenos	25.05	24.87	0.18	24.99	0.12	0.004

De la tabla 4.43 se obtiene que la máxima diferencia va desde -0.46 a 0.18 [mm]. La tolerancia del diámetro de enganche es -0.46 [mm]. Se observa que la contracción va desde 0.0006 a 0.009[mm/mm] esta contracción es 80% superior a la reportada por el fabricante, se recomienda usar la contracción aquí determinada para el dimensionamiento del molde de inyección de producción.

Tabla 4.44 Tolerancias y contracciones del actuador

Dimensión crítica	Modelo sólido[mm]	Pieza[mm]	Diferencia[mm]	Molde[mm]	Dif. Molde pieza[mm]	Contracción pieza[mm/mm]
Espesor tapa	2	2.11	0.11	1.99	-0.12	-0.06
Protuberancia 1	2.67	2.53	0.14	2.7	0.17	0.06
Protuberancia 2	2.67	2.59	0.08	2.5	-0.09	-0.03
Protuberancia 3	2.67	2.60	0.07	2.5	-0.01	-0.004
Protuberancia 4	2.67	2.57	0.1	2.5	-0.07	-0.02

De la tabla 4.44 se obtiene que la máxima diferencia va desde 0.07 a 0.14 [mm]. La tolerancia de la protuberancia1 es 0.14 [mm]. Se observa que la contracción va desde -0.004 a 0.06 [mm/mm] de aquí se puede observar que el molde excede la desviación recomendada por el fabricante en un 1100%. Se recomienda usar la contracción aquí determinada para el dimensionamiento del molde de inyección de producción.

5.-CONCLUSIONES

Se entregaron mil dosificadores ensamblados, hechos de material biodegradable PLA, con apariencia transparente, textura lisa, sin defectos visuales, con tolerancias de la longitud de la paleta X de -0.62 [mm], diámetro de enganche -0.46 [mm], protuberancia 0.14 [mm], con lo cual se cubrieron los requerimientos del cliente.

Para ello se diseñaron de manera reológica, mecánica y económica tres moldes prototipo de inyección, los cuales comparten las piezas de un portamoldes.

El diseño reológico se basó en el uso del simulador de flujo para definir la posición de los puntos de inyección que permitieran un llenado equilibrado de las cavidades, obtener una estimación del tiempo de llenado requerido para cada pieza, obtener la estimación de la presión de inyección necesaria para moldear las piezas y obtener la estimación de rechupes presentes en cada pieza.

El diseño mecánico y económico se enfocó principalmente en generar las cavidades que permitieran moldear las geometrías requeridas y asegurar su expulsión. Se diseñaron moldes cuya forma de ejecución es la más sencilla posible (dos placas). Resultando en moldes con una línea de partición (paletas y actuador) y con dos líneas de partición (base), el molde de la base tiene sistema de correderas que liberan la pieza al momento de la expulsión. Los sistemas de colada no cuentan con calefacción, contienen un pozo frío por colada. El tiempo de entrega del molde fue de tres meses con un costo de \$130,000.00 MXN.

Se definieron los parámetros de procesamiento del material PLA en cada molde, los cuales se encuentran en las hojas de procesamiento en el apartado de anexos. Estos parámetros se obtuvieron al realizar el moldeo científico el cual permitió hallar diferencias de hasta 418 [bar] en la presión de inyección requerida, mostrada por el simulador, y la presión de inyección requerida por la inyectora, siendo esta última mayor. Por otro lado, las velocidades de inyección se encuentran entre 59 [mm/s] y 70 [mm/s] estando en la región de media a alta velocidad de inyección, en la inyectora usada, como lo indica la ficha técnica del material, sin embargo la simulación indica tiempos de inyección de 1.08 [s] a 3.42 [s], estos tiempos de inyección para las geometrías requeridas se logran con velocidades bajas cercanas a 1 [mm/s] en la inyectora usada.

En el balanceo de cavidades se encontró que el molde de paletas se encontraba desbalanceado, de la tabla 4.18 y la figura 4.28 se observa que la corrección aplicada al molde fue adecuada, pues el porcentaje de error disminuyó del 9% al 2 %, estando dentro del rango de error para piezas con tolerancias cerradas, como indica [2]. Se observó que el balanceo de cavidades es un procedimiento fundamental para la validación de moldes de inyección, inclusive, para moldes de una cavidad, cuando esta contenga más de un punto de inyección, las posiciones de los puntos de inyección deberán asegurar que el llenado se hará de manera equilibrada, observando el llenado de la pieza al 50,70 y 90%.

En la fase de validación para la pieza actuador se hicieron ajustes en los parámetros de las hojas de proceso. Para el caso de la pieza actuador el ajuste tuvo lugar en el tiempo de enfriamiento, el incremento y decremento de las dimensiones en piezas plásticas se debe principalmente a la contracción del material. Se esperaba contracción en la zona de bordes en la pieza actuador, sin embargo se presentó una expansión de 0.03[mm/mm]. Sin embargo algunas piezas se obtenían con la ausencia de bordes por el tipo de expulsión aunado a la rigidez del material PLA, se concluye que el diseño de molde en el inserto “macho” debió de haber tenido la capacidad de colapsar para permitir la libre expulsión de la pieza. Se recomienda el rediseño del elemento inserto “macho” del molde del actuador por el diseño conocido como corazón colapsable. La imposibilidad de formar los bordes en el actuador repercute en un ensamble inadecuado con la pieza base del dosificador. Con base en esto se concluye que la hipótesis de poder manipular al material caliente para su expulsión, no se cumple.

Se presentaron problemas de ensamble de las paletas con la pieza base, ya que los pernos de las paletas quedan ajustados. Para la corrección de este problema se requiere las tolerancias de ajuste o de holgura según requiera el cliente. La longitud de la paleta X difiere de su longitud de diseño 0.62 [mm] y la longitud de la paleta Y difiere de su longitud de diseño 0.01 [mm], esto se refleja en un cierre inadecuado de las paletas afectando la funcionalidad del ensamble. La causa raíz de este problema fue el dimensionamiento de la cavidad de la paleta X y no haber solicitado la corrección al proveedor del molde en el momento de la recepción del mismo. La solución de este problema radica en el maquinado de la cavidad con un nuevo dimensionamiento. Se concluye que la aplicación del moldeo científico no tiene la capacidad de corregir detalles de diseño y manufactura.

Finalmente siendo un molde prototipo, el número de ciclos de inyección que soportó antes de someterse a mantenimiento correctivo fue de 1500 aproximadamente, lo que supera las expectativas iniciales de 1000 ciclos.

La recomendación para los moldes de producción es la de cambiar el material por uno grado herramienta se sugiere un acero H13, aumentar el número de cavidades en función de la producción deseada y las máquinas de inyección disponibles, y si se justifica usar un sistema de canal caliente para minimizar las pérdidas de material así como el trabajo de triturar las coladas y canales para el reprocesamiento. En cuanto al diseño, se recomienda exigir las tolerancias de las piezas en cuanto a su función dentro del ensamble, diseñar tres moldes independientes para cada geometría, se recomienda cambiar el sistema de expulsión de la pieza actuador, se recomienda usar los valores de contracción aquí mostrados.

El molde se libera con las especificaciones de proceso ubicadas en los anexos de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]<http://biopol.free.fr/?p=282>(2013)
- [2]S.Kulkarni, *Robust Process Development and Scientific Molding*, 1ra ed. Hanser,2010
- [3]IMPI, *Enciclopedia del Plástico*, Vol 1, 2da ed. Centro Empresarial del Plástico, 1999
- [4]N.Board, *The complete book on Biodegradable Plastics and Polymers*, 1ra ed.Asia Pasific Buisness Press.Inc,2012
- [5]<http://www.inap.org.mx/portal/images/RAP/29%20el%20desarrollo%20sustentable%20nuevo%20paradigma.pdf> (2013)
- [6]http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05-06/medicina/polimeros_biodegradables.htm (2013)
- [7]http://www.eis.uva.es/~biopolimeros/monica/aplicaciones_del_pla.html(2013)
- [8]<http://www.quimicaorganica.net/enantiomeros.html>(2013)
- [9]L.T. Lim , R. Auras y M. Rubino. Processing technologies for poly(lactic acid). *Progress In Polymer Science* 33, (2008): 820-852. *ScienceDirect*, EBSCOhost (accessed April 3, 2012).
- [10]<http://www.dow.com/polyethylene/la/es/fab/molding/improcess.htm>(2013)
- [11]M.P.Groover, *Fundamentos de Manufactura Moderna*, 1ra ed. Prentice Hall,1997
- [12]M. Trujillo B.*Seminario de Capacitación Inyección de Plásticos*, México D.F,2011
- [13]A.Routsis A, *Injection Molding Reference Guide*, Routsis Training, 2012
- [14]G.Menges,P. Mohren, *How to Make Injection Molds*, 2da ed.,Hanser, 1983,.(Translated by R.J.Kahl,Trans.Rev.Ed.,2 ed.).
- [15]<http://www.scientificmolding.com/objective.aspx>(2013)
- [16]ISO 9000:2005
- [17]J.Rios,A.Vizán *Ingeniería concurrente en el diseño de moldes de Inyección*, Universidad Politécnica de Madrid 2005
- [18]H. Grastrow, *Moldes de inyección para plásticos 100 casos prácticos*, 2da ed., Hanser, 1998.
- [19]O.Muñoz, O.Zumaya *Diseño de un sistema de cerrado resellable y compostable para empaques con diferentes aplicaciones* 2012
- [20]S.Ruiz, V.Borja, J.Guevara, N.Tores, O.Zumaya, O.Muñoz, A.Ramírez.(2011).MX.Patente No.MX/E/2011/071875. México.
- [21]http://www.controlplastics.com/injection_molding/HealthcareEdu/SABIC-PLA-5745-ES_Processing+Guide.pdf(2013)
- [22]R.Gava.*Determinacion del tamaño del molde*. Fundación Ascamm, Queretaro 2003
- [23]A.Ayala. *Normas para dibujo mecánico e industrial* Dpto. Publicaciones de la Facultad de Ingeniería UNAM, 2007
- [24] <http://www.matweb.com/> 2013

ANEXOS



HOJA DE PROCESO

FOLIO 1

Identificación

Molde Actuador dosificador
 Máquina Demag 50-270
 Material PLA

Proceso previo

Secado material SI Tiro IND Tiempo [h] 4
 Temperatura °C 80

Molde

Tipo colada FRIA Temperatura[°C] 23
 Numero cavidades 1

Procesamiento

Perfil temperaturas[°C]

Garganta	Alimentacion	Compresion 1	Compresion 2	Dosificacion	T. Fundido
	20	158	176	181	182

Velocidad iny.[mm/s] 70
 P. Mantenimiento[bar] 84
 T. Mantenimiento[s] 7
 T. Enfriamiento[s] 3.5
 RPM 100
 Contrapresion[bar] 3.5
 Parada dosificacion[mm] 18
 punto conmutacion por
 carrera de husillo[mm] 14
 cojin masa[mm] 4
 Notas y observaciones _____



HOJA DE PROCESO

FOLIO 2

Identificación

Molde	Base dosificador
Máquina	Demag 50-270
Material	PLA

Proceso previo

Secado material	SI	Tiro	IND	Tiempo [h]	4
		Temperatura °C			80

Molde

Tipo colada	FRIA	Temperatura[°C]	25
Numero cavidades	1		

Procesamiento

Perfil temperaturas[°C]

Garganta	Alimentación	Compresión 1	Compresión 2	Dosificación	T. Fundido
	20	161	177	190	193

Velocidad iny.[mm/s]	50
P. Mantenimiento [bar]	152
T. Mantenimiento[s]	4
T. Enfriamiento[s]	9
RPM	100
Contrapresión [bar]	3.5
Parada dosificación [mm]	17.3
punto conmutación por	
Carrera de husillo [mm]	13
Cojín masa [mm]	4.3

Notas y observaciones _____



HOJA DE PROCESO

FOLIO 3

Identificación

Molde Paletas dosificador
 Máquina Demag 50-270
 Material PLA

Proceso previo

Secado material SI Tiro IND Tiempo [h] 4
 Temperatura °C 80

Molde

Tipo colada FRIA Temperatura[°C] 25
 Numero cavidades 2

Procesamiento

Perfil temperaturas[°C]

Garganta	Alimentación	Compresión 1	Compresión 2	Dosificación	T. Fundido
	20	154	176	176	178

Velocidad iny. [mm/s] 50
 P. Mantenimiento [bar] 337
 T. Mantenimiento[s] 7
 T. Enfriamiento[s] 8
 RPM 100
 Contra presión [bar] 3.5
 Parada dosificación [mm] punto 12.5
 conmutación por
 Carrera de husillo [mm] 10
 Cojín masa[mm] 4

Notas y observaciones _____

Injection Molding Process Guide

is designed for injection molding applications. This polymer grade has a higher melt flow capability than other Ingeo™ resins currently in the market place. 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

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

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™ polymer into the extruder at the operating conditions used in Step one.

Processing Temperature Profile		
Melt Temperature	370-410°F	188-210°C
Feed Throat	70°F	20°C
Feed Temperature	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	

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

5. At shutdown, purge ma-

Table 1 – Typical Material & Application Properties ⁽¹⁾

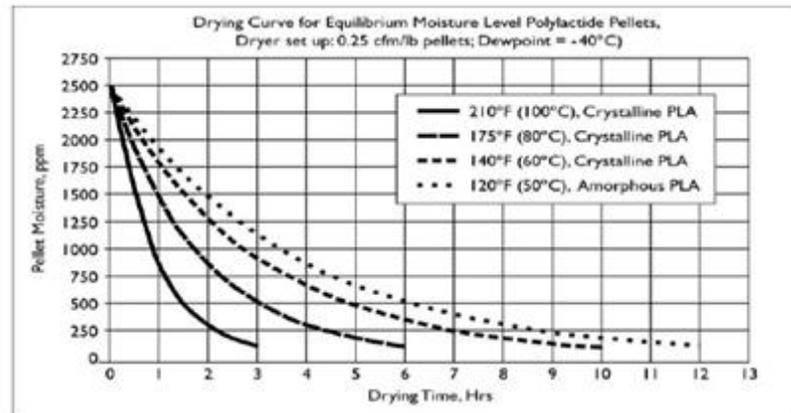
	(General Purpose)	ASTM Method
Physical Properties		
Specific Gravity	1.24	D792
Melt Index, g/10 min (210°C/2.16K)	70-85	D1238
Melt Index, g/10 min (190°C/2.16K)	30-40	
Relative Viscosity	2.5	
Crystalline Melt Temperature (°C)	160-170	D3418
Glass Transition Temperature (°C)	55-65	D3417
Clarity	Transparent	
Mechanical Properties		
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	7,000 (48)	D638
Tensile Elongation, %	2.5	D638
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16.0)	D256
Flexural Strength (MPa)	12,000 (83)	D790

4. Once Ingeo™ polymer has been purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
- chine with high-viscosity polystyrene or polypropylene.

Drying

In-line drying is recommended for 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).



Compostability

Composting is a method of waste disposal that allows organic materials to be recycled into a product that can be used as a valuable soil amendment.

is made primarily of polylactic acid, a repeating chain of lactic acid, which undergoes a 2-step degradation process. First, the moisture and heat in the compost pile attack the polymer chains and split them apart, creating smaller polymers, and finally, lactic acid. Microorganisms in compost and soil consume the smaller polymer fragments and lactic acid as nutrients. Since lactic acid is widely found in nature, a large number of organisms metabolize lactic acid. At a minimum, fungi and bacteria are involved in polymer degradation. The end result of the process is carbon dioxide, water and also humus, a soil nutrient. This degradation process is temperature and humidity dependent. Regulatory guidelines and standards for composting revolve around four basic criteria: Material Characteristics, Biodegradation, Disintegration, and Eco-toxicity. Description of the requirements of these testing can be found in the appropriate geographical area: DIN V 54900-1 (Germany), EN 13432 (EU), ASTM D 6400 (USA), GreenPla (Japan).

This grade of PLA meets the requirements of these four standards with limitation of maximum layer thickness of 1650 µm and for coating layers up to 37 µm thick

FDA Status

U.S. Status-

This is to advise you that 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.cfsan.fda.gov/~dms/opa-fcn.html>. This grade of NatureWorks LLC 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. Again, for any application, should you need further clarification please do not hesitate to contact

European Status

This grade of Ingeo™ Biopolymer complies with EU Plastics Directive 2002/72/EC, which applies to all EU member states. The Plastics Directive is a consolidated version of the "Monomers Directive (Commission Directive 90/128/EEC) and its first 7 amendments. This grade of Ingeo™ Biopolymer is also in compliance with "Bedarfgegenstände Gesetz", which is the German implementation of the EU Plastics Directive 2002/72/EC. Substances used in the manufacturing of this product which are not yet regulated by EU Plastics Directive 2002/72/EC, as amended, are in compliance with appropriate EU national regulations. NatureWorks® LLC would like to draw your attention to the fact that the EU-Directive 2002/72/EC, 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 EU-Directive 2002/72/EC the mi-

