



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO

Determinación de la capacidad de procesamiento por inyección en colada caliente del
PLA para piezas de ensamble

MODALIDAD DE GRADUACIÓN: TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
Víctor Ernesto Hernández Álvarez

TUTOR PRINCIPAL
Dra. Magdalena Trujillo Barragán, DIMEI

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE 2015

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Borja Ramírez Vicente
Secretario: Dr. Ayala Ruiz Álvaro
Vocal: Dra. Trujillo Barragán Magdalena
1^{er.} Suplente: Dr. Velázquez Villegas Fernando
2^{do.} Suplente: M.I. Cruz Morales Miguel Ángel

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: México D.F.

TUTOR DE TESIS:

Magdalena Trujillo Barragán

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis está dedicada a aquellas personas que se nos adelantaron en el camino pero mientras estuvieron aquí nos enseñaron mucho, por ejemplo, a no rendirnos.

Quiero agradecer al Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal, a través del proyecto “Diseño y manufactura de moldes para la inyección de un dosificador biodegradable, (ICYT/197/2012-PICSO12-063)” El apoyo para la realización de esta tesis.

A los futuros ingenieros Gerardo García Zapata y Sergio Correa Torres, por el apoyo y su entusiasmo en la realización de las corridas experimentales en el laboratorio.

A mis compañeros, amigos y hermanos del Laboratorio de Procesamiento de Plásticos LPP por su apoyo amistad y lealtad.

A mis padres, hermanos y a Ady por su infinito apoyo.

ÍNDICE

ÍNDICE	I
ÍNDICE DE FIGURAS	II
ÍNDICE DE TABLAS	III
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	IV
INTRODUCCION	1
ANTECEDENTES.....	3
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	3
OBJETIVO.....	3
HIPÓTESIS.....	3
ESTADO DEL ARTE.....	5
MARCO TEÓRICO.....	13
Consideraciones para el Diseño de piezas de plástico.....	13
Moldeo por Inyección de polímeros termoplásticos.....	14
Diseño de moldes de inyección	19
PLA.....	26
Experiencias del Proceso de inyección para el PLA.....	28
Procesamiento científico.....	29
Diseño de experimentos.....	33
DESARROLLO DE LOS MOLDES DE INYECCIÓN	41
APLICACIÓN DE MOLDEO CIENTÍFICO	55
APLICACIÓN DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS	75
RESULTADOS PRINCIPALES.....	83
CONCLUSIONES	85
BIBLIOGRAFÍA.....	87
ANEXO.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS DE REFERENCIA	i
ÍNDICE DE TABLAS DE REFERENCIA.....	iii
.....	i
ANEXO 1 TABLAS DE REFERENCIA	i
ANEXO 2.....	iv
ANEXO 2 DISEÑO	v
ANEXO 3 MOLDEO CIENTIFICO.....	xxxv
ANEXO 4 DISEÑO DE EXPERIMENTOS	xlix

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Bajo relieve interno (izquierda) y bajo relieve externo (derecha) [19]	10
Figura 2 Patrones de segmentos en corazones colapsables	10
Figura 3 Diferentes zonas de un HPG [34]	15
Figura 4 Ejemplos de moldes de colada fría y colada caliente. Extraídos de [37] y [38] respectivamente.....	17
Figura 5 Ciclo de inyección	18
Figura 6 Variación del perfil de flujo de un plástico en función de exponente de la ley de potencias y la localización del espesor [34]	20
Figura 7 Vigas en cantiléver para ajuste a presión con caras de enganche salientes [41].....	23
Figura 8 Gancho a 90° de la viga ajustadora a presión que impide la expulsión desde el molde [41]	23
Figura 9 Molde con inclinación para facilitar la expulsión de una viga con gancho saliente [41] ...	23
Figura 10 Uso del levantador para expulsión sin flexión de la pieza de plástico [41]	24
Figura 11 Proceso de inyección representado en términos de la presión, volumen y temperatura del material [41]	24
Figura 12 Trayectoria de las reacciones en la producción del Poli(ácido láctico) desde ácido láctico [43]	27
Figura 13 Efecto de la velocidad de corte en la viscosidad de la masa fundida del PLA [42].....	28
Figura 14 Perfiles de temperatura para materiales amorfos y semi cristalinos [36].....	29
Figura 15 Curva de viscosidad típica de un poliéster [36]	31
Figura 16 Procedimiento para calificar las funciones del molde	33
Figura 17 Dosificador de gránulos en modelo sólido e inyectado en PLA [50] y [2].....	42
Figura 18 Modelo sólido del dosificador rediseñado	43
Figura 19 Enfriador de fluido para control de temperatura de moldes y garganta marca friomold y controlador de temperatura para los moldes de inyección, en el Laboratorio de Procesamiento de Plásticos, Facultad de Ingeniería, UNAM CU.	44
Figura 20 Equipo para remoción de humedad de la materia prima.....	44
Figura 21 Máquina de inyección Demag ergotech pro 50-270 en el Laboratorio de Procesamiento de Plásticos, Facultad de Ingeniería, UNAM CU	44
Figura 22 Esquema de las placas de porta molde tomado como modelo y sus dimensiones.	45
Figura 23 Gráfico RGB de resistencia al flujo de plástico en las geometrías del ensamble, Paleta X, paleta Y, base y actuador. El color azul corresponde a la mínima y el color rojo a la máxima resistencia	46
Figura 24 Gráfico RGB de la mejor zona de localización para el punto de inyección según análisis de MFA® en geometrías del ensamble, Paleta X, paleta Y, base y actuador. El color azul representa la mejor región para colocar el punto de inyección, el color rojo representa las zonas donde no se recomienda localizar el punto de inyección.	46
Figura 25 Distribución de cavidades para el molde de actuadores y bases.....	47
Figura 26 Distribución de cavidades para el molde de paletas	47
Figura 27 Propuesta de distribución de canales de refrigeración para los moldes de las piezas del ensamble.....	48
Figura 28 conexiones de refrigeración al molde de las bases	55
Figura 29 Fluxómetros de control para los cuatro canales de refrigeración en el equipo DEMAG ergo tech 50270	55

Figura 30 Controlador de resistencias del sistema de canal caliente, de izquierda a derecha, zona 1 controla la resistencia del bebedero, zona 2 controla la resistencia del distribuidor de plástico, zona 3 controla inyector 1, y zona 4 inyector 2	56
Figura 31 Primera corrida de inyección de la pieza actuador, base y paletas	56
Figura 32 Fijación de los parámetros de inyección iniciales en el moldeo científico	57
Figura 33. Gráfico de la viscosidad aparente en los moldes del ensamble	60
Figura 34 Gráfico del desbalance inicial en el molde de bases	60
Figura 35 Estudio de la caída de presión a diferentes porcentajes de llenado de la pieza.....	61
Figura 36 Dispositivos usados para la toma de temperatura de masa fundida	62
Figura. 37 Piezas cortas y con exceso de material inyectadas en el estudio de la ventana de proceso	63
Figura 38 Ventana de proceso para el molde de bases y el material PLA	63
Figura 39 Sello de punto de inyección para los moldes	64
Figura 40 Dimensiones críticas tomadas del modelo sólido de la pieza base. 1. Diámetro de enganche. 2. Diámetro de riel. 3. Distancia entre perímetros internos. 4. Diámetro barreno 1. 5. Diámetro barreno 2. Valores correspondientes a las dimensiones de diseño	65
Figura 41 Variación de dimensiones críticas de la cavidad 1 con respecto al tiempo de enfriamiento	66
Figura 42 Variación del diámetro de enganche en función del tiempo de enfriamiento para las piezas de ambas cavidades	66
Figura 43 Variación de las dimensiones del diámetro de riel para las piezas obtenidas de las cavidades 1 y 2 respectivamente	66
Figura 44 Variación de la distancia entre perímetros internos para las piezas obtenidas de las cavidades 1 y 2 respectivamente	67
Figura 45 Variación de las dimensiones del diámetro de barreno 1 para las piezas obtenidas de las cavidades 1 y 2 respectivamente	67
Figura 46 Variación de las dimensiones del diámetro de barreno 2 para las piezas obtenidas de las cavidades 1 y 2 respectivamente	68
Figura 47 Comparativo entre cavidades del porcentaje de desviación de las dimensiones en función del tiempo de enfriamiento.....	68
Figura 48 Dimensiones críticas tomadas del modelo sólido de la pieza actuador. Distancia 1 y 2 ..	69
Figura 49 Porcentaje de variación de las dimensiones para las dos cavidades	70
Figura 50 Dimensiones críticas sobre la geometría de paletas. 1. Diámetro base de perno. 2. Diámetro punta de perno. 3. Longitud de ensamble.....	70
Figura 51. Comportamiento de la Distancia 1	71
Figura 52 Ensamble de los dosificadores provenientes de la validación de moldeo Científico.....	73
Figura 53. Gráfico de efectos normal sobre el diámetro de la base del perno para la cavidad X1 de la paleta	77
Figura 54 Gráfico de interacción de los factores BC en la respuesta del diámetro de base de perno para la pieza paleta	78
Figura 55 Ensamblados provenientes de la optimización del DOE	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Aspectos que afectan los puntos de inyección	19
Tabla 2 Proceso de inyección representado en términos de la presión, volumen y temperatura del material [34].	25
Tabla 3 Temperaturas de procesamiento recomendadas por el fabricante de PLA.....	45
Tabla 4 Resultados de simulaciones de llenado considerando la refrigeración para el molde de paletas	49

Tabla 5 Resultados de simulaciones de llenado considerando la refrigeración para el molde de bases	50
Tabla 6 Resultados de simulaciones de llenado considerando la refrigeración para el molde de actuadores.....	51
Tabla 7 Configuración de refrigeración del molde	56
Tabla 8 Volúmenes y masas de los elementos del dosificador y de los canales de alimentación caliente	58
Tabla 9 Porcentaje del tamaño de disparo que guardan las piezas del actuador	58
Tabla 10 Carreras de dosificación estimadas para los diferentes moldes	58
Tabla 11 Parámetros manipulados para lograr disparos cortos en el estudio de la curva de viscosidad.	59
Tabla 12. Resumen de análisis estadístico aplicado sobre las piezas obtenidas con los parámetros del moldeo científico.....	72
Tabla 13. Factores de DOE para la pieza base con sus niveles.....	75
Tabla 14. Factores de DOE para la pieza actuador con sus niveles	75
Tabla 15. Factores de DOE para las piezas paletas con sus niveles.....	75
Tabla 16 Análisis de varianza ANOVA para el diámetro de base de perno	77
Tabla 17 Factores significantes en las dimensiones críticas del ensamble	79
Tabla 18. Factores optimizados en Minitab® que promueven la obtención de dimensiones de diseño de las piezas con tolerancia de $\pm 0.1\text{mm}$	79
Tabla 19. Resumen de análisis estadístico aplicado sobre las piezas obtenidas con los parámetros de la optimización proveniente del DOE	80
Tabla 20 Porcentajes de contracción en las dimensiones críticas predichos por Moldflow y contrastados con los observados de la aplicación de Moldeo científico y DoE	83

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Tiempo de residencia.....	16
Ecuación 2 Tiempo de residencia dentro de un molde de canal caliente	16
Ecuación 3 Porcentaje de tamaño de disparo	16
Ecuación 4 Fuerza de cierre requerida	16
Ecuación 5 Ley de Potencias.....	20
Ecuación 6 Modelo cruzado WLF	21
Ecuación 7 Cálculo del tiempo de enfriamiento de la pieza según la industria del plástico	21
Ecuación 8 Viscosidad aparente.....	31
Ecuación 9 índice de capacidad [45].....	34
Ecuación 10 Porcentaje del tamaño de disparo usado.....	58
Ecuación 11 Determinación de la carrera de dosificación en el equipo de inyección empleado.....	58
Ecuación 12 Diseño de experimentos	76

INTRODUCCION

El siguiente trabajo de tesis presenta cómo se logró obtener el 100% de ensambles conformes de piezas de un plástico biodegradable en moldes de colada caliente y fría. Mediante la combinación de diseño de piezas de plástico, metodología de inyección de plástico, conocimiento de polímeros termoplásticos y el diseño y manufactura de moldes de inyección.

A partir del rediseño de cuatro piezas de plástico biodegradable que conforman un ensamble denominado "*Dosificador de gránulos*" por parte del Departamento de Diseño de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se realizó el diseño del herramental para su moldeo por inyección. El Laboratorio de Procesamiento de Plásticos aportó conceptos y la información técnica para esta labor.

Se realizó la ingeniería de diseño de moldes de inyección sobre la distribución de cavidades, canales de alimentación para colada caliente y fría; ubicación de los mismos; abarcando geometría, dimensiones de los puntos de inyección y sistemas de refrigeración.

Se manufacturaron tres moldes de inyección, dos de ellos fueron ideados para compartir un sistema de canal caliente y el último con sistema de canal frío. Fueron puestos en servicio en las instalaciones del Laboratorio de Procesamiento de Plásticos, en la inyectora marca DEMAG modelo ERGOTECH 50-270 con los equipos periféricos presentes en él.

Se aplicó la metodología de moldeo científico para establecer los parámetros adecuados de inyección para cada molde usando el plástico biodegradable PLA. La metodología de moldeo científico consistió en realizar gráficos de viscosidad versus velocidad de inyección, determinar el balance de los moldes, determinar la caída de presión del plástico en las diferentes zonas del molde, elaborar la ventana de proceso y colocar el mismo al centro de ella, determinar el tiempo de solidificación del punto de inyección en los diferentes moldes y finalmente establecer el tiempo de enfriamiento.

Fue necesaria la aplicación pruebas estadísticas para determinar la capacidad de procesamiento y se corroboró con el ensamble manual de las piezas inyectadas.

Se aplicó diseño de experimentos y análisis de varianza con una réplica para mejorar los resultados de capacidad de proceso.

ANTECEDENTES

Una empresa del sector privado requirió del desarrollo de sistemas de dosificación de material granulado, que pudiesen ser adheridos en bolsas de plástico, el material del dosificador previamente seleccionado, por la empresa, es el polímero termoplástico Poli Ácido Láctico (PLA) marca Ingeo™ 3251D.

El diseño de los componentes de este dosificador fue realizado por un equipo de diseño y plasmado en la tesis de licenciatura de Muñoz et al [1]. El diseño de moldes de inyección prototipo con sistema de colada fría se realizó en el Laboratorio de Procesamiento de Plásticos (LPP) de la Facultad de Ingeniería UNAM en el año 2012.

La manufactura fue supervisada en un taller externo. La validación de los moldes se encuentra detallada en la tesis de licenciatura de Hernández et al [2]. A partir de este trabajo y con apoyo del Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal, a través del proyecto “Diseño y manufactura de moldes para la inyección de un dosificador biodegradable, (ICYT/197/2012-PICSO12-063)” surge como propuesta la manufactura de las piezas del dosificador con moldes que permitan la reducción de la merma de PLA y el aumento de la producción promedio, además de corregir defectos de diseño, en las piezas.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Al menos el 90% de las piezas de plástico son diseñadas para ser parte de un ensamble. Este trabajo no es la excepción. Se tiene la necesidad de manufacturar los elementos de un dosificador de gránulos que al ser ensamblados al menos el 90% de estos funcionen de acuerdo a lo previsto en prototipos impresos en 3D.

Los trabajos de licenciatura de las referencias [1] y [2] presentaron el desarrollo del diseño de las piezas de un ensamble y sus moldes. Posterior a la producción de las piezas y su ensamble, se detectaron problemas tales como: fallas mecánicas y de ensamble. No se cuenta con información estadística que relacione las dimensiones de las piezas con los parámetros de procesamiento. Se desconoce si el proceso para obtener las piezas del ensamble se encuentra estable y bajo control.

OBJETIVO.

Incrementar la cantidad de ensamblados conformes

HIPÓTESIS

Se aplicarán, en primera instancia, las recomendaciones sobre diseño de piezas plásticas para el rediseño del ensamble dosificador. Se trabajará en conjunto con una empresa de manufactura de moldes de inyección, para lograr un diseño adecuado y manufactura de los moldes para las piezas. Con los equipos y materiales disponibles en la Facultad de Ingeniería, se aplicará la metodología de moldeo científico, con el fin de determinar los parámetros de procesamiento adecuados, posteriormente, se realizarán pruebas estadísticas para la determinación de la capacidad de procesamiento de piezas para ensamble y obtener ensamblados conformes. En caso de no obtener éxito, se realizará diseño de experimentos y análisis de varianza para conocer el efecto de las variables de procesamiento en las dimensiones de las piezas y optimizar los parámetros de proceso para mejorar la capacidad de este y por ende obtener los ensamblados conformes.

ESTADO DEL ARTE

En México existen pocas empresas que ofertan la elaboración de productos inyectados en PLA. Los productos hechos por inyección son, básicamente, contenedores y cubiertos para alimentos, más no piezas para ensamble. Ejemplos de estos productos son elaborados por empresas como Plásticos del Futuro, S.A. de C.V, Renovapack® o Nutrigo S.A de C.V. [3]

Fuera del país existen empresas como Nypro que tiene dentro de sus líneas de negocios productos para la industria médica, manufacturados a partir de plásticos biodegradables como el PLA [4], otro ejemplo es la empresa china *Hubei Guanghe Biotech co.,LTD* que hace juguetes de PLA para ser ensamblables, tipo Lego ® [5], la empresa italiana Leoplast oferta lápiz labial y polveras para la industria de cosméticos, los cuales son ensambles de más de dos piezas en PLA [6]. En la literatura se encuentran disponibles fichas técnicas para procesar PLA por inyección, y múltiples estudios para encontrar los parámetros óptimos de procesamiento para cualquier plástico haciendo análisis de varianza y diseño de experimentos. Debido a esta razón se decide hacer una revisión bibliográfica sobre los tópicos mencionados.

Bohn et al 2013 [7] señala que existen diferentes métodos para aproximar cuantitativamente la estabilidad dimensional de piezas de plástico. Una de ellas es análisis por elemento finito y la otra es la abstracción de la geometría en formulas analíticas. La geometría es el puente entre la producción de partes y el manejo de tolerancias. El manejo de tolerancias admite desviaciones aceptables para una parte o un ensamble, considerando el material, proceso de producción y función. Debido a que el proceso de producción de partes muestra desviaciones y cambios en la geometría, es necesario un conocimiento profundo del ensamble de las partes. Los parámetros de influencia en la desviación dimensional son la geometría, propiedades del material, condiciones de proceso, herramientas, tipo de expulsión.

Gamez et al 2012 [8] indica que en piezas plásticas con relación baja de peso/tamaño, la variación dimensional, tras ser inyectadas, puede imposibilitar su uso. A sí la automatización avanzada del proceso de ensamble puede permitir no solo que este pueda llevarse a cabo de forma automática, si no también resolver problemas de fabricación como es la variación dimensional de los componentes a ensamblar. El cliente requiere que el elemento en su conjunto garantice las medidas dimensionales predefinidas. Esta validación se suele realizar a partir de la medición dimensional en una serie de puntos de control distribuidos por toda la pieza. Los fabricantes de faros, por ejemplo, exigen que las dimensiones del faro, estén dentro de valores de tolerancias dimensionales que se fijan por debajo de varias décimas de milímetro, y que deben ser garantizadas en al menos un conjunto de seis a diez puntos, ubicados en el perímetro del mismo y definidas por cada fabricante de vehículos. Cuando se quiere llevar a cabo el ensamble de una pieza sobre otra existiendo interacción entre ellas, una estrategia matemática, consiste en definir una serie de sistemas de referencia asociados a las piezas que se quieren unir, posteriormente se hacen coincidir los sistemas de referencia reales, estimados a partir de la medición de la posición de las piezas, con los deseados. Esto es conocido como formulación mediante sistemas de referencia.

Como señala Lennar et al 2005 [9] Un buen dispositivo es aquel donde “el material correcto está en el lugar correcto”. En muchos casos un producto es la combinación de diferentes partes, en donde todas tienen que trabajar en conjunto para que el producto cumpla su función de manera óptima. Cuando el diseño está hecho con polímeros no comerciales se recomiendan ensayos prácticos para asegurar la calidad. El método de procesamiento se debe de seleccionar y ajustar considerando el diseño de la pieza y la cantidad de producción. El proceso de inyección demanda muchas piezas para hacerlo rentable, por el alto costo de los herramientas. Se recomienda seleccionar el material antes de producir el herramental, ya que los cambios en la herramienta son costosos. Por ejemplo, las

herramientas para moldeo por inyección son de alrededor de €50 000 o más. Por lo tanto es preferible tener contacto cercano con el diseñador de la herramienta desde las etapas tempranas de diseño. Es típico que se requiera de algunos ajustes en el herramental después de las iteraciones de prueba. Posterior a ello es conveniente dar continuidad al producto inyectado, es decir, el seguimiento del producto manufacturado con respecto a los daños, rupturas o fallas, que en ocasiones es ignorado, sin saber que brinda información importante para el desarrollo de nuevos productos, con lo cual se sabe cómo resolver los problemas en el futuro. Con ello se le estaría dando orientación al comprador y un buen soporte post consumo cuando él lo requiera, en otras palabras, él busca garantía, obteniendo de esto, buena imagen de la compañía de producción. La calidad, servicio y productos de acuerdo a los precios dados le dan una buena reputación a la compañía. Para liberar buenos productos al mercado en poco tiempo es importante tener una buena idea sobre todo el proceso desde la idea inicial hasta la destrucción o reciclaje del producto.

También Lennar et al 2005 [9] recomienda a la ingeniería concurrente o ingeniería simultánea como mejora para integrar manufactura y diseño aplicado a un producto de acuerdo al tiempo de vida esperado. Para producir un producto con poco esfuerzo a bajo precio y que tenga los requerimientos de protección ambiental, el camino tradicional de diseño no es suficiente. Algunos conceptos que buscan cumplir el desarrollo de productos modernos son por ejemplo.

1. Diseño para Manufactura y Ensamble DFMA (Design for Manufacture and Assembly)
2. Diseño para Desensamble DFDA (Design for Disassembly)
3. Diseño para Servicio DFS (Design for Service)
4. Diseño para Reciclaje DFR (Design for Recycling)
5. Diseño para Ambiente DFE (Design For Environment)

Además de tomar en cuenta las diferentes técnicas de ensamble para polímeros, ya sea:

Mecánicamente

- ✓ Elementos de engarce (snap fit)
- ✓ Bisagras
- ✓ Ajustes a presión
- ✓ Cuerdas y tornillos

Métodos que incluyen fundición

1. Soldadura
2. Soldadura por fricción
3. Soldadura ultrasónica
4. Soldadura de plato caliente
5. Soldadura por giro
6. Soldadura por vibración
7. Soldadura electromagnética
8. Soldadura por radio frecuencia

Mezclado con adhesivos o solventes

- I. Adhesivos
- II. Solventes

Andersson et al 2014 [10] reportan que el diseño para manufactura DFM es una vía para bajar los costos de manufactura. Sin embargo, después de rediseñar para ensamble automático, muchas firmas han descubierto que el producto rediseñado viene a ser un ensamble manual ya que el ensamble automático no es económicamente factible. La consecuencia de productos no diseñados para manufactura puede ser un costo elevado para el desarrollo y, claramente, para la manufactura. Esto es debido al alto riesgo de crear productos que sean innecesariamente complejos para manufacturarse. También señalan que se tiene que entender cuáles parámetros afectan la manufactura. Debe de haber un vínculo entre el departamento de diseño y manufactura. Juntas entre los departamentos de diseño y producción, las cuales sirven para discutir sobre problemas o sugerencias alrededor de los cambios en el producto. El costo por hacer cambios en el diseño va incrementando en función de que tanto se

avanza en el proceso de un producto. Para hacer una revisión del producto se puede emplear una lista de pendientes para asegurar que los aspectos no esenciales no sean supervisados y que todas las demandas sean cumplidas. El DFM está dividido en tres niveles de organización: estratégico, táctico y operacional. En el nivel estratégico se debe tener en cuenta que el trabajo de DFM debe ser implementado en toda la organización y debe contribuir a la buena coordinación y comunicación entre disciplinas de la compañía. Para el nivel táctico, se debe implementar un equipo de coordinación diseño-producción. Este equipo funcionará como un vínculo entre las diferentes disciplinas de la organización.

A sí la implementación del método DFM se puede hacer en seis etapas, las cuales deben estar sustentadas por documentación.

- a) Dividir las partes del producto en componentes
- b) Investigar las posibilidades de integración
- c) Generar conceptos
- d) Analizar los conceptos.
- e) Seleccionar los conceptos.

Una de las formas más complicadas de diseño se refiere a los elementos de engarce que se cierran por si mismos, Brock et al 2002 [11]. Los elementos de engarce no sólo tienen que cumplir con las reglas de diseño para moldeo por inyección, también deben flexionar respecto a una fuerza para formar la conexión entre dos partes y flexionar de nuevo en respuesta a una fuerza de apertura para separar las partes. Es decir, un elemento de engarce consiste de una estructura tipo cantiléver con un gancho al final de la pieza. Son usados para ensambles complejos de piezas inyectadas en plástico, en aplicaciones donde el espacio es reducido, como interiores de automóviles, electrodomésticos, bloques de construcción. Para sistemas micro electromecánicos se han desarrollado micro elementos de engarce para unir microestructuras 3D.

Chen et al 2012 [12] identificaron como requerimientos clave de diseño para elementos de engarce: la rigidez, resistencia, restricciones, y compatibilidad. Los tres primeros son esenciales en la fase de diseño y se pueden encontrar en guías de diseño; en contraste, la robustez se puede encontrar en la fase de ensamble. La robustez se refiere a la tolerancia de las variaciones dimensionales. Las dimensiones varían de acuerdo a las condiciones de fabricación y de ensamble. Para un snap fit la más crítica variación dimensional es la interferencia entre el gancho del mismo snap fit y la parte a ensamblar. Debido a que el snap fit es un tipo de viga en cantiléver y entre mayor sea la interferencia mayor será la fuerza de acoplamiento. La calidad de un ensamble por snap fit se puede medir por la interferencia; interferencias pequeñas pueden hacer que el ensamble se pierda, interferencias mayores pueden provocar deformación plástica de las piezas involucradas.

De igual manera Chen et al 2012 [12] encontraron que las piezas inyectadas en plástico de pared delgada son usualmente más grandes que los conectores tipo snap fit. Mantener las dimensiones requeridas en las piezas de plástico es más complicado que para los conectores snap fit, Una de las causas comunes de error dimensional es la contracción de la parte después del moldeo. La contracción de plásticos comunes esta entre el 0.5 y 2 % de su tamaño original. Para una interferencia típica, un error dimensional de 0.05 mm es suficiente para afectar la fuerza de acoplamiento. La variación de la interferencia de al menos +/-0.3 mm produce una fuerza de acoplamiento que se puede considerar constante.

Spina 2004 [13] resalta que están involucrados múltiples factores en el proceso de inyección y tienen gran influencia en la calidad final del producto plástico. Se pueden clasificar en cuatro categorías, materiales, máquina de inyección, diseño de modelo y condiciones de procesamiento. Por ejemplo, la producción de partes de pared delgada requiere alta presión de inyección y fuerza de cierre, lo que hace que la fabricación se torne difícil. Por otra parte, múltiples puntos de inyección son usados para

la fabricación de formas complejas, pero causan líneas de soldadura que reducen la resistencia del producto. Por esta razón programas de simulación son ampliamente usados para ayudar a los diseñadores y moldeadores a seleccionar adecuadamente la tecnología de inyección e investigar el desempeño y procesabilidad de un producto. Las simulaciones por computadora realizan evaluaciones numéricas de las condiciones del moldeo con alto nivel de detalle, ya que ofrecen mucha información de predicción que no se encuentra en ensayos experimentales. Muchos cálculos se han generado con interacciones no lineales entre las variables de proceso, que hacen que la identificación del diseño óptimo y la selección de proceso sean complicadas. Las metodologías de optimización se han acoplado al software de simulación para dar soporte a los ingenieros de proceso en la identificación de los parámetros a usar durante el arranque y paro de una máquina de inyección. La integración entre las simulaciones de computación y la optimización del proceso se deben realizar después de haber definido los objetivos claramente.

Javierre et al 2006 [14] y Demirer 2007 [15] coinciden en que uno de los elementos más importantes y básicos en la inyección de plásticos es el sistema de alimentación del molde. Éste lleva el material desde el bebedero hasta los puntos de inyección de la cavidad. Los sistemas de alimentación se pueden dividir en dos tipos, sistemas de canal frío o sistemas convencionales de canales (CRS) y sistemas de canal caliente (HRS). Los sistemas de canal caliente son más caros y complicados en comparación con sistemas de canal frío, pero estos exhiben muchas ventajas: se eliminan las variaciones de temperatura debidas al flujo en canales fríos ya que la temperatura del plástico es controlada, son menores las caídas de presión en los sistemas de alimentación, hay más libertad para colocar los puntos de inyección, existe eliminación del scrap (plástico que no es parte de la pieza y forma parte del sistema de alimentación). Además que la presión de empaquetamiento tiene un efecto importante en la contracción de la pieza moldeada. La contracción disminuye cuando incrementa la presión de mantenimiento e incrementa con el aumento de temperatura del molde.

Javierre et al 2006 [14]y Demirer 2007 [15] señalan que la temperatura del plástico es el parámetro de proceso que tiene más influencia en los cambios dimensionales. Por otro lado, los parámetros que tienen injerencia sobre la deflexión son la presión de mantenimiento, temperaturas de molde, del polímero y el tiempo de mantenimiento, citados en orden de importancia. Javierre et al y Demirer [14], [15], indican que el tiempo de llenado y las dimensiones de la compuerta son factores no significativos. Así mismo, reportan, que la temperatura de molde es un parámetro que tiene influencia sobre la contracción y la deflexión, ya que el polímero dentro del molde baja de alta temperatura a la ambiente en un tiempo largo. Investigaron que el plástico no se puede agregar para compensar la contracción cuando la compuerta o punto de inyección se ha solidificado. Encontraron que tiempos largos de relajación conducen a reducir la contracción y resultan en menor esfuerzo residual. Sin embargo ellos colocan el valor de la presión de empaquetamiento a la mitad de la presión de inyección. En cuanto a otros parámetros, por ejemplo, temperatura de molde, velocidad de inyección y tiempo de ciclo, los colocaron constantes durante todos los experimentos para ambos sistemas de alimentación.

Ellos mismos, Javierre et al 2006 [14]y Demirer 2007 [15] reportan que cuando se usan CRS, el flujo de plástico se vuelve más difícil, por la disipación de calor en los canales. Y si en adición, se incrementa la longitud de flujo se incrementa la fricción y se presentan perdidas de presión. Es decir que reduciendo la presión de inyección se reducen los costos de producción e incrementa el tiempo de vida del molde y máquina de inyección.

Ellos también reportan que los principales factores que intervienen en la contracción de partes inyectadas son el tiempo y magnitud de la presión de mantenimiento. Señalando que la contracción en regiones remotas sobre la parte, desde la vela, es ampliamente atribuida al efecto reducido de la presión de empaquetamiento en esas zonas. Encontraron una relación directa entre la orientación y la

contracción debida al hecho de que las cadenas moleculares son orientadas en línea con la dirección de flujo bajo el efecto de fricción y elongación. Este efecto es más pronunciado, en las zonas alejadas de la colada, donde el material enfría relativamente rápido en comparación con las zonas cercanas a la colada. Por lo tanto, una muestra producida por inyección experimenta más contracción en dirección del flujo. La cual disminuye con el incremento de presión de inyección en cada sistema de canal. Así también encontraron que la presión de empaquetamiento es el parámetro de proceso más importante en la contracción.

Javierre et al 2006 [14]y Demirer 2007 [15] muestran que el pandeo es causada principalmente por esfuerzos residuales dentro de la parte y diferencias de espesores en varias direcciones. El encogimiento progresivo de sección transversal es causado por la deposición de plástico como capa en las superficies frías de la cavidad, conduciendo al incremento de los esfuerzos en dirección del flujo, lo que conlleva a esperar esfuerzos cortantes elevados en el material y orientación molecular, lo que contribuye a la deflexión. Siendo factores con más influencia en la aparición de deflexión: temperatura de molde y masa fundida, diseño de la pieza moldeada y del sistema de enfriamiento, relación alta entre longitud y espesor de la pieza, presión y tiempo de empaquetamiento, tipo de punto de inyección, dimensión y localización. Ellos hacen notar que la deflexión generalmente ocurre en paredes largas de piezas de plástico, después de ser expulsadas del molde. Recomiendan que la deflexión sea medida diez días después de las inyecciones.

También Javierre et al 2006 [14]y Demirer 2007 [15] reportan que la presión de mantenimiento es el parámetro más importante que afecta la densidad de la pieza moldeada. Seguidos de la temperatura de molde y del plástico, mientras que la velocidad de inyección no es significativa. Si la pieza cuenta con vacíos es posible que falle prematuramente por concentración de esfuerzos. En cuanto a control, la presión de mantenimiento y la temperatura del plástico, se pueden manejar más adecuadamente usando sistemas de canal caliente (HRS) que haciendo uso de sistemas de canal frío (CRS). El peso de las partes se mide después de 30 días de haberse inyectado. Encontraron que la densidad de las partes inyectadas es alta a bajas temperaturas en contraste con las inyectadas a altas temperaturas. Demostraron que el uso de HRS permite al proceso desempeñarse a bajas temperaturas y presiones de inyección, en comparación con las manifestadas usando CRS. El incremento de peso y densidad de una pieza inyectada implica que sus propiedades mecánicas serán mejores debido a su estructura densa.

Comercialmente hay varias empresas que ofertan HRS, por ejemplo Mold Masters® [16] afirma que los HRS ofrecen muchas ventajas comparadas con los CRS, como: Variedad de aplicaciones, el costo del desperdicio de coladas puede ser el doble del costo de la pieza, alta productividad debida a la reducción de tiempo de ciclo, con la eliminación de canales fríos no se requiere mano de obra para el manejo de los canales, puntos de inyección, recorte y eliminación de exceso de material (rebaba), reducción de la capacidad de los equipos de enfriamiento y ruido de equipos de triturado de coladas. Mold Master ofrece una herramienta de cálculo para análisis económico del uso de HRS vs CRS. Esta herramienta requiere como datos de entrada, el peso de la pieza moldeada, espesor máximo de pared y el material a procesar (solo está disponible para ABS, acetal, polietileno de alta y baja densidad, poliamidas, PET, policarbonato, polipropileno y poliestireno) brinda graficas donde se compara los volúmenes de equilibrio y costos para HRS y CRS.

Yuehua et al 2009 [17] coinciden con que el pandeo es un defecto serio en las partes moldeadas, especialmente para productos de pared delgada. ¿Cómo reducir el pandeo? es la pregunta clave para mejorar la calidad de la parte. La deflexión se puede reducir cambiando la geometría de las piezas, modificando la estructura de los moldes o ajustando los parámetros de proceso. Indica que la deflexión es una función implícita no lineal de los parámetros de proceso, que puede ser típicamente evaluada por la solución de ecuaciones de elemento finito, en una tarea complicada que envuelve un

enorme esfuerzo computacional. Para reducir el costo computacional en la optimización de la deflexión existen, algunos modelos de sustitución, como lo es regresiones lineales, redes artificiales neuronales y regresión vectorial de soporte. Estos métodos de sustitución fueron usados para construir una aproximación matemática para reemplazar el análisis costoso en la optimización de deflexión.

En relación al sistema de expulsión de las piezas desde el molde, S.B et all 2000 [18] muestran como algunas piezas de plástico tienen bajo relieves para cubrir alguna función o por estética. Siendo algunos ejemplos de bajo relieves los que incluyen proyecciones de cuerdas para enrosque, surcos, barrenos de lado y bolas de retención. Clasifican los bajo relieves como internos cuando están dentro de la pared de la pieza de plástico. Los bajo relieves externos se encuentran por fuera de la pared, figura 1. Todos los bajo relieves obstruyen la extracción de la pieza.

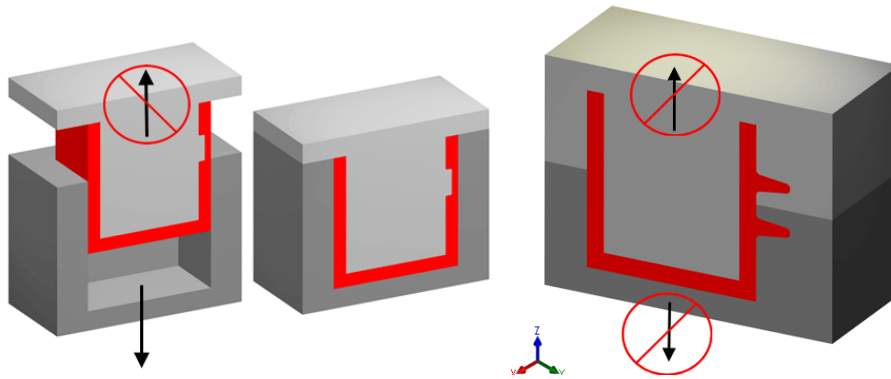


Figura 1 Bajo relieve interno (izquierda) y bajo relieve externo (derecha) [19]

S.B et all 2000 [18] reportan que los bajo relieves exteriores, se pueden conformar usando corazones deslizables o cavidades deslizables y los bajo relieves internos pueden moldearse usando pernos, corazones colapsables y corazones rotativos para desenroscar. Los corazones colapsables son seccionados para que pueden contraer hacia dentro en fases, figura 2.



Figura 2 Patrones de segmentos en corazones colapsables

El diseño de cualquier segmento de corazón colapsable actuado por palanca y que incluya bisagras, tiene cuatro consideraciones cruciales de diseño.

- 1.-Número de segmentos
- 2.-Distancia de retracción de segmentos
- 3.-Eliminación de interferencia entre segmentos
- 4.-Ángulo mínimo de coincidencia de ranura

Tuncay et al 2006 [20] indican que el proceso de inyección comprende plastificación, inyección, empaquetamiento, enfriamiento, expulsión y aplicación del control de proceso/parte. Ellos aplicaron diseño de experimentos DOE, arreglo ortogonal de Taguchi, Mold Flow como software de elemento finito y análisis de varianza ANOVA. Ellos usaron como material en el molde acero P20, con el fin de obtener precisión dimensional, acabado superficial y compatibilidad necesaria para el producto.

El diseño del modelo sólido se realizó en el software Pro/Engineer 2001, para el análisis de flujo se utilizó Mold Flow Plastic Insight 3.0 y para el diseño de experimentos se usó MINITAB 2002 y como herramientas de optimización se usó Matlab.

La investigación de Tuncay et al 2006 [20], en cuanto a la aplicación de ANOVA, indica que la presión de empaquetamiento, temperatura de molde, temperatura del plástico, tiempo de empaquetamiento, tiempo de enfriamiento, tipo de canal de alimentación y localización de punto de inyección, influyen en el pandeo con el 33.7, 21.6, 2.5, 16.1, 5.1, 1.5 y 1.3 % respectivamente. Aseguran que si los parámetros de proceso se pueden ajustar, el pandeo se puede ajustar a un nivel aceptable. Por otro lado, el índice de rechupes aparece como una depresión en la superficie de la pieza moldeada. El índice no afecta la resistencia o la función, pero es percibida como un defecto de calidad. Las piezas con costillas tienen una contracción alta y ocasionan rechupes. Ellos emplearon el método de optimización de Taguchi, creado a partir de la relación S/N y ANOVA, con la finalidad de minimizar la deflexión y el índice de contracción en partes de plástico con costillas de diferente sección transversal.

Oktem et al 2007 [21] Reportan que, basados en ANOVA, la presión de empaquetamiento es el parámetro más importante en la deflexión en un 58% seguido por el tiempo de presión de mantenimiento con un 23% después el tiempo de inyección 15.17% y finalmente el tiempo de enfriamiento con 3.68% respectivamente. También se ha reportado que el tiempo de empaquetamiento tiene un mayor impacto en la contracción con un 84% seguido de la presión de mantenimiento con 7%, tiempo de inyección 5% y el tiempo de enfriamiento 2% consecutivamente. Babur 2009 et al [22] muestran que la presión de empaquetamiento es el factor más importante que afecta la deflexión. Han observado que la localización del punto de inyección y el tiempo de llenado tiene un efecto pequeño sobre la deflexión. Exponen que los estudios en optimización de la deflexión usan los métodos de Taguchi, modelo de redes neuronales, algoritmos genéticos, superficie de respuesta y algoritmo genético, método complejo modificado, ANOVA, modelo de red neuronal y algoritmo genético para partes plásticas de pared delgada, grey –lógica difusa.

Por otro lado, Huang et al 2009 [23] muestra un método innovador de búsqueda para colocar los parámetros de un proceso robusto basado en un modelo de regresión. Este método primero selecciona los principales parámetros que afectan la calidad de la pieza. Después se hace un diseño de experimentos estadístico de dos niveles, frente al mínimo error cuadrado, el método es desarrollado para generar un modelo de regresión entre la calidad de la parte y los parámetros de proceso. Esta innovación tiene dos ventajas: (1) el modelo de regresión usado es simple tanto que la computación numérica es rápida (2) debido a que el modelo es de bajo orden, las corridas experimentales son relativamente rápidas. Como la minimización de la contracción volumétrica fue la meta, se usó simulación en Mold Flow para encontrar los parámetros de proceso robusto, por lo tanto muchos experimentos fueron conducidos para verificar y hacer la réplica.

Pantani et al 2014 [24] reportan que los polímeros biodegradables presentan una muy pequeña ventana de proceso, debido a las temperaturas cercanas a las condiciones de degradación. El PLA es un ejemplo, pues es biodegradable y biocompatible, es un poliéster alifático que ha encontrado muchas aplicaciones en la industria biomédica y de empaque. La ventana de proceso está limitada al rango de temperatura de inyección de 180-220°C debido a su viscosidad alta y a la sensibilidad a degradación térmica, el molde está limitado por la temperatura de transición vítrea (55-60 °C). Reporta, también que el incremento de temperatura en el molde provoca que la rugosidad de la superficie se mejore.

Como lo reporta Pantani et al 2013 [25] El PLA es atractivo porque sigue los estándares internacionales para biodegradación de polímeros. Tiene excelentes propiedades mecánicas y

transparencia que promueven su uso en empaques. Ellos secaron el material, previo a su uso, a 60°C por 8 horas, usaron una máquina de inyección Negri-Bossi de 70 toneladas de fuerza de cierre, en un molde de una cavidad. Las dimensiones del espécimen fueron 120x30x2 mm, el PLA fue inyectado a 200 °C con una presión de inyección de 70MPa y tiempo de mantenimiento de 40 s. El tiempo de residencia del material dentro de la maquina fue calculado en 15 min. Reportan que debido a la lenta cinética de cristalización para el PLA de Natureworks ® 2002D, los especímenes inyectados resultaron completamente amorfos y para recristalizarlos, las muestras se ingresaron a una estufa a 105°C por 8 horas. Encontrando que el PLA semicristalino degrada más rápido que un PLA amorfo.

MARCO TEÓRICO

Consideraciones para el Diseño de piezas de plástico

El proceso de diseño de un producto tiene influencia en un 80% sobre los costos de manufactura, un 50% sobre problemas de calidad, un 50% sobre los tiempos desde el pedido hasta la entrega y un 50% en el tiempo de la complejidad del sistema [26]; es decir, del 70-80% del costo de un producto está en función de la etapa de diseño [27]. Por ello, dividir el producto en componentes resulta una manera atractiva de análisis para reducir los problemas de manufactura y calidad. Una alternativa para realizar dicho proceso es dividir el producto en componentes que interactúen entre sí [28]. Una forma de interacción entre componentes es el ensamble de los mismos [29].

Para abordar el reto en la aplicación de la ingeniería de diseño frente a los requerimientos de un ensamble, es válida la adopción de un modelo prescriptivo, en el que se justifique el tipo de problema de diseño; sea original o nuevo, transitorio o adaptivo e inclusive extensivo o variante.

En el modelo prescriptivo el diseño se lleva a cabo bajo progresión iterativa a través de las siguientes etapas:

- Reconocimiento de las necesidades
- Especificación de los requerimientos
- Formulación de conceptos
- Selección de un concepto
- Creación del diseño a detalle
- Producción, ventas, y mantenimiento.

Las etapas arriba citadas, están fuertemente influenciadas por el estilo de vida, entrenamiento y experiencia del diseñador [30].

Rees [31] indica, que, cuando se diseña un producto cuyos componentes son de material termoplástico, es necesario seguir reglas básicas que, de manera conjunta con el conocimiento de las seis técnicas de transformación de termoplásticos: moldeo por inyección, extrusión, extrusión soplado, termo formado, moldeo rotacional y fabricación de compuestos [32], permitan obtener partes que cumplan los objetivos que el diseñador previó para éste. Las reglas básicas de diseño de piezas moldeadas por inyección buscan tener control sobre: espesor de pared, línea de partición, bajo relieves, orificios, aperturas, venas y proyecciones; además del ángulo de desmoldeo [33].

Kazmer [34] recomienda evitar las variaciones de espesor de pared, debido a que las secciones de pared delgadas y gruesas enfrían a diferentes velocidades. Las diferencias de temperaturas están asociadas a contracción no uniforme lo que resulta en distorsión geométrica de la parte, e incluso se pueden generar vacíos dentro de la pieza debido a una contracción excesiva.

Con respecto al diseño de costillas, la base de la costilla debe ser del 70% del espesor de pared de la parte y la altura de la costilla cuatro veces el espesor de pared de la pieza. Las costillas deben espaciarse diez veces el espesor de parte.

Se deben evitar las esquinas agudas por razones de desempeño de la pieza, diseño de molde y proceso de inyección. En cuanto al desempeño del producto, las esquinas agudas resultan en concentradores de esfuerzo que pueden ocasionar (especialmente en materiales frágiles) falla bajo carga aplicada. Entendiéndose como concentrador de esfuerzos cualquier cambio repentino de sección,

perforaciones, esquinas angulares, muescas, aberturas de cuña, imperfecciones del material, sin importar su naturaleza [35].

En cuanto al diseño del molde, las esquinas agudas dificultan la producción, requiriendo el uso de procesos especiales de maquinado y el uso de múltiples herramientas de corte de tamaño pequeño. Relativo al proceso de inyección, estas restringen el flujo de calor desde el polímero al inserto, el resultado frecuente es contracción no uniforme a través del espesor de la pieza cercana a la esquina, lo que conlleva al pandeo de la parte moldeada, el radio del filete de una esquina externa debe ser de 150% el espesor de pared de la pieza, el filete de una esquina interior se debe fijar en 50% del espesor de pared.

Los chaflanes se emplean a menudo para eliminarle lo agudo a las esquinas, facilitar la entrada de ejes en agujeros, haciendo más sencillo el ensamble, típicamente, estos se hacen con un ángulo de 45°. Muchas veces se hacen de la mitad del espesor de pared para esquinas interiores.

El ángulo de desmoldeo, se refiere al ángulo de inclinación entre las superficies verticales de la pieza moldeada y la dirección de apertura del molde. El ángulo de desmoldeo es normalmente aplicado para facilitar la expulsión de las piezas desde el molde de inyección, suele bastar con 2° como valor del ángulo de desmoldeo, ya que con valores inferiores la pieza puede presentar adhesión excesiva al molde. El ángulo de desmoldeo es una función compleja que envuelve el comportamiento del material, condiciones de procesamiento y acabado superficial. Superficies rugosas y texturizadas requieren 1° adicional por cada 20 μm de rugosidad. Por ejemplo, piezas de policarbonato con 20% de fibra de vidrio y una rugosidad de 12 μm requiere 2° de ángulo de desmoldeo debido a que presenta baja contracción. En contraste, piezas de ABS con rugosidad de 125 μm requieren 7.5° como ángulo de desmoldeo.

Moldeo por Inyección de polímeros termoplásticos

El concepto de moldeo por inyección para plásticos fue adoptado de la industria de metal fundido en la primera mitad del siglo XIX. En 1869, John Hyatt desarrolló un concepto para hacer bolas de billar de nitrato de celulosa. En 1948, el husillo de dos movimientos fue introducido en la industria del moldeo por inyección. La última generación de máquinas, tienen la capacidad para ser conectadas a cualquier computadora en cualquier ubicación del mundo vía internet y ser monitoreadas remotamente. Esto ayuda a la resolución de problemas sin requerir a un ingeniero en el sitio [36].

Kulkarni [36] indica que las máquinas de inyección se pueden clasificar por la posición de sus platinas y nariz:

- Platinas horizontales- inyección horizontal
- Platinas verticales- inyección horizontal
- Platinas verticales- inyección vertical
- Platinas horizontales- inyección vertical

Las máquinas de inyección horizontales con platinas horizontales se especifican por su tonelaje y tamaño de disparo. El tonelaje es la máxima fuerza disponible para mantener el molde cerrado durante el proceso de inyección. El tamaño de disparo es determinado por el máximo peso de Poliestireno de propósito general (PS) que puede moldearse por una sola carrera del husillo de inyección.

Por otro lado es necesario saber el diámetro del husillo y la relación L/D. Esta última es la longitud del husillo dividida por el diámetro de él mismo. El valor L/D es indicador de la capacidad del husillo para homogenizar el plástico, cuando L/D incrementa la homogenización del material también.

La capacidad de plastificación es el peso máximo de PS que puede ser llevado a la temperatura de moldeo y colocado en frente del husillo, es usualmente expresado en unidades de masa sobre tiempo. La presión máxima de plástico, para máquinas hidráulicas, depende de la presión máxima disponible y del factor de intensificación del husillo.

El ensamble husillo- barril es responsable de ayudar a entregar la mejor calidad de plástico al molde. El husillo más común es denominado husillo de propósito general (HPG). El HPG tiene tres secciones o zonas principales, así como características especiales, figura 3.

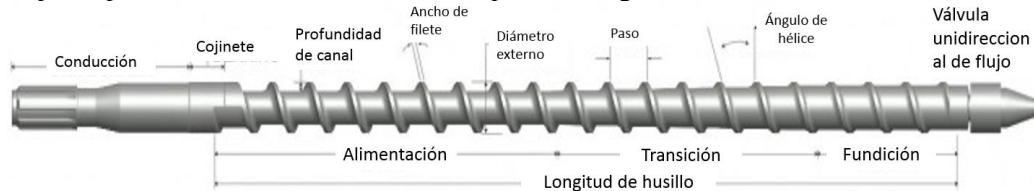


Figura 3 Diferentes zonas de un HPG [34]

Las características de un husillo de propósito general se describen a continuación:

- El diámetro externo es el de un cilindro imaginario que es creado al unir las áreas externas de los filetes.
- El diámetro del husillo, sin considerar los filetes, cambia desde la parte trasera hasta la frontal del husillo, dependiendo de su sección, (diámetro raíz).
- La profundidad de canal es la diferencia entre el diámetro exterior y el diámetro raíz, es la profundidad de alimentación. Desde que el diámetro de raíz cambia, la profundidad de alimentación cambia desde la parte trasera hasta la delantera del husillo
- La zona de alimentación es donde el husillo toma el material desde la abertura de alimentación (base de la tolva) y comienza a ablandarse. El diámetro de raíz permanece constante al igual que la profundidad de canal. El material se transporta por acción de la rotación del husillo a la siguiente zona.
- En la zona de transición (Zona de compresión), el diámetro de raíz aumenta gradualmente, resultando en reducción de la profundidad de canal. Mientras el husillo rota, el material reblandecido comienza a comprimirse y el aire y otros volátiles son forzados a salir, como la profundidad de canal disminuye, el plástico es transportado y mezclado homogéneamente al tiempo que transita por esta zona.
- La zona de fundido es la que está más cerca de la nariz de la máquina, el diámetro raíz permanece constante. En husillos HPG la longitud de las zonas de fundido y transición son la misma y la zona de alimentación es usualmente dos veces la longitud de cualquiera de las dos.
- La relación de compresión es la que existe entre la profundidad de canal en la sección de alimentación y la de la zona de fundido. Los valores típicos de la relación son 1.5:1 a 2.5:1 para plásticos sensibles como el PVC. 2.5:1 a 3.0:1 para husillos de propósito general. Y para husillos de alta compresión 3.0:1 a 5.0:1 para materiales con alta cristalinidad como las poliamidas, PA.
- El ángulo de hélice es el ángulo del filete en relación al plano perpendicular del eje del husillo.
- Para muchos husillos de propósito general, la relación L/D es de 20:1

La selección de la máquina de inyección es uno de los factores que contribuyen a la calidad de una pieza. Si bien es necesario que las dimensiones del molde sean inferiores a la distancia entre barras paralelas de la máquina y que la fuerza de cierre sea suficiente, también es importante conocer el porcentaje del tamaño de disparo requerido para asegurar tanto un adecuado llenado en la cavidad del molde, como el tiempo adecuado de residencia del material en el barril. El tiempo de residencia del

material en la unidad de inyección, es decir el tiempo que tarda el material desde la entrada al barril por la garganta, hasta que sale por la nariz de inyección, se estima con la ecuación 1.

Ecuación 1 Tiempo de residencia

$$\text{Tiempo de residencia} = \frac{(\text{capacidad de disparo de la máquina})}{((\text{Peso de la pieza} \times \text{Numero de Cavidades}) + \text{Peso de canales}) \times \left(\frac{1.06}{\text{Densidad del plastico}}\right)} \times \text{tiempo de ciclo}$$

Cada material tiene un tiempo de residencia recomendado, ya que los plásticos con sensibles al calor y se degradan al sobre exponerse a las temperaturas de proceso. Los tiempos de residencia son provistos por el fabricante del plástico. En el caso de moldes con sistemas de canal caliente, el tiempo de residencia en el distribuidor caliente debe sumarse al tiempo en el barril. Los fabricantes del HRS pueden proveer el volumen del distribuidor caliente y este se puede usar para el cálculo. Kazmer [34] indica que para calcular el tiempo de residencia dentro de un molde con HRS se puede aplicar la ecuación 4.

Ecuación 2 Tiempo de residencia dentro de un molde de canal caliente

$$\text{Tiempo de residencia HRS} = (1 + \text{Numero de vueltas}) \times \text{tiempo de ciclo}$$

Ahora bien, para moldear piezas consistentes, es decir con menor variación de peso, el parámetro más importante a controlar es el porcentaje de tamaño del disparo, que de acuerdo a la ecuación 2, se tiene:

Ecuación 3 Porcentaje de tamaño de disparo

$$\begin{aligned} \% \text{tamaño disparo} &= \left(\frac{((\text{Peso pieza} \times \text{numero de cavidades}) + \text{Peso de canales}) \times \left(\frac{1.06}{\text{Densidad del plastico}}\right)}{(\text{tamaño de disparo de la máquina})} \right) \times 100 \end{aligned}$$

El porcentaje de tamaño de disparo debe estar entre el 20 y 80 % del tamaño de disparo disponible según [36]. Un número inferior al 20% se presentan inconsistencias en la cantidad de plástico inyectada. La presión y velocidad que el husillo necesita ejercer requiere de cierto tiempo para desarrollarse. Si el disparo es muy pequeño, esta fase puede ser inconsistente porque no se alcanzan los niveles de presión y velocidad requeridos. Para el caso de sistemas de canal caliente el tamaño mínimo de disparo debe exceder el 20% dependiendo del volumen que maneja el distribuidor. Los fabricantes de sistemas de canal caliente deben de dar la información del volumen en el distribuidor, este volumen no debe usarse en el cálculo, solo debe usarse para estimar la cantidad mínima requerida del porcentaje de disparo.

En cuanto al tamaño de un molde, éste se define por tres variables.

- ✓ Altura de molde (H): Es la distancia entre los lados del molde en dirección del molde abierto y cerrado cuando el molde es completamente cerrado.
- ✓ Ancho de molde (W): Es la distancia entre los lados verticales del molde, visto desde la dirección de inyección del molde.
- ✓ Longitud del molde (L): Es la distancia entre la base y la parte superior del molde.

El molde no debe ser más pequeño que la platina. Este debe cubrir al menos del 70 a 75% del área entre las barras guía. Si la cavidad no cuenta con una placa de soporte la presión de inyección puede causar deflexión en las placas del molde causando excesos de material (rebaba). Además, es necesario determinar previamente la fuerza requerida para cerrar el molde, y que éste pueda soportar la presión de inyección. Por tanto, la fuerza de cierre puede ser estimada mediante la ecuación 4.

Ecuación 4 Fuerza de cierre requerida

$$\text{Fuerza requerida} = (\text{área proyectada de la pieza} \times \text{numero de cavidades} + \text{área proyectada de canales}) \times \left(\frac{\text{Toneladas}}{\text{in}^2 \text{requeridas}} \text{por el plástico} \right)$$

Típicamente un material semicristalino requiere de 3.5 a 4.5 toneladas por pulgada cuadrada, mientras tanto los materiales amorfos requieren entre 2.5 y 4.0 toneladas de fuerza de cierre [36].

Los moldes pueden ser definidos como moldes de colada fría y moldes de colada caliente. Los moldes de colada fría no cuentan con calefacción en el bebedero y canales, por lo cual estos solidifican junto a las piezas moldeadas. Los moldes de colada caliente cuentan con calefacción en el bebedero y canales hasta el punto de inyección, por lo tanto el plástico en esas regiones permanece con energía suficiente para ser inyectado en el siguiente ciclo de inyección.

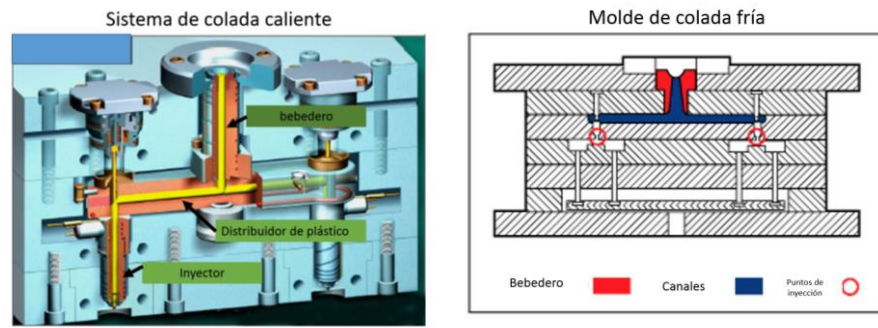


Figura 4 Ejemplos de moldes de colada fría y colada caliente. Extraídos de [37] y [38] respectivamente.

El propósito del sistema de alimentación es conducir el plástico fundido desde la maquina hasta las cavidades del molde. Es posible sobre diseñar el sistema de alimentación en función del volumen de producción, viabilidad de la presión de inyección y nivel de investigación disponible [34]. El diseño del sistema de alimentación se realiza en tres pasos. Primero, seleccionar el tipo de sistema de alimentación, que puede ser de dos placas y canales fríos, de tres placas canal frio o de canal caliente si aún no se tiene seleccionado. Segundo, determinar la ruta del sistema de alimentación a través del molde. Tercero, especificar los diámetros de cada segmento del sistema de alimentación para balancear las caídas de presión, velocidades de corte en función del plástico a moldear.

Los canales estándar o de canal frío (CRS) son directamente maquinados en las placas del molde, que forman la línea de partición. La temperatura a la que se encuentran es la del molde. El fundido permanece en el canal hasta que solidifica y es removido junto con la pieza después de la apertura del molde. Los sistemas de canal frio presentan consumos de presión muy altos, lo que hace que el diseño sea más caro; puede presentar diferencias de temperatura causantes de grandes diferencias en viscosidad con lo cual las condiciones del material, al entrar a la cavidad, no son las mismas [39]. Los sistemas de canal caliente (HRS) pueden verse como una extensión de la nariz de la máquina de inyección en forma de un bloque. Calentadores aíslan el plástico del molde. Los HRS consisten de un bebedero central, canales, puntos de inyección o inyectores [39]. La temperatura de este bloque mantiene fundido el plástico, ofreciendo las siguientes ventajas:

- No hay pérdida de material y requiere de menor energía y trabajo
- Fácil de implementar en una operación automática
- Mejor calidad en comparación con CRS, porque el fundido puede ser transferido a la cavidad en los sitios óptimos
- Ajuste de temperatura más preciso
- Llenado uniforme en moldes multi cavidad
- Mejora la distribución de calor a las piezas
- Mejora las propiedades mecánicas de las piezas
- Reducción de la presión de inyección

Reducción de costos de producción, al eliminar la colada, menor apertura de molde que conducen a la reducción del tiempo de ciclo [15].

Como desventajas los HRS presentan:

- Costos elevados
- Riesgo de degradación térmica y paros de producción en el caso de materiales con poca resistencia térmica
- Problemas de aislamiento del bloque distribuidor (manifold)

Área máxima de cierre es la determinada por las distancias entre las barras guía. Las dimensiones del molde deben de distar al menos 10mm de las barras guía. Las unidades de cierre de las máquinas están diseñadas para una máxima presión de inyección [15].

La distribución de las cavidades tiene como meta brindar un diseño de molde compacto, fácil de manufacturar y que otorgue productividad. Si un molde es de una cavidad, típicamente la cavidad de situará en el centro, a menos que los requerimientos del punto de inyección requieran que se sitúe fuera del centro. Para moldes con múltiples cavidades se tienen tres distribuciones básicas [34].

- ❖ Cavidades a lo largo de una línea
- ❖ Cavidades en retícula
- ❖ Cavidades alrededor de un círculo

Durante el proceso de inyección, el ciclo de éste principia cuando el molde empieza a cerrar figura 5. Una vez que el molde se encuentra cerrado bajo la acción de la fuerza de cierre, la inyección de plástico comienza seguida de la fase de empaquetamiento y la de mantenimiento. Cuando la cavidad se encuentra llena, la pieza se enfría por debajo de la temperatura de expulsión, el molde se abre, y la pieza es expulsada del molde.

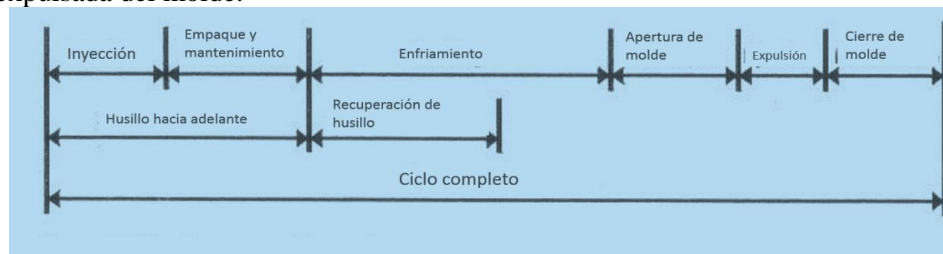


Figura 5 Ciclo de inyección

Durante la fase de enfriamiento, el husillo rota para tomar material nuevo para el siguiente disparo. A esta etapa se le conoce como la fase de recuperación del husillo.

Diseño de moldes de inyección

Diseño conceptual: está integrado por la identificación de la necesidad del cliente, definición del problema y obtención de información sobre el estatus del diseño del producto. Dentro las necesidades del cliente se encuentran las tolerancias, tiempo estimado de ciclo y la producción estimada. Se requiere adquirir información del polímero a moldear tal como lo es su nombre, composición, si contiene algún refuerzo, fibra o partícula; es necesario conocer la morfología, datos de contracción, temperaturas de proceso y las recomendadas para el molde, además de la capacidad térmica del polímero. Por otro lado es necesario obtener las especificaciones de la máquina, los datos necesarios son el tamaño de las platinas y el espacio entre ellas, las dimensiones del anillo centrador, la fuerza de cierre, el tamaño de disparo y la capacidad de plastificación; también se requiere conocer el tipo de montaje, tipo de sistema de eyección y la carrera que tiene.

Es necesario revisar el espesor nominal de la pieza evitando que existan grandes variaciones de este. Las variaciones de espesor de la pieza pueden afectar en el costo y la calidad de la pieza. Los espesores de pared gruesos y delgados enfriarán a diferentes velocidades lo cual se asocia a diferencias de contracción que producirá distorsión geométrica de la parte [34] y que en definitiva se deben considerar durante el diseño de los moldes.

En cuanto al punto de inyección debe ser lo más pequeño posible tal que el polímero no se dañe por exceso de calentamiento por corte, debe ser fácil de desmoldear, que permita la separación automática de los canales y la pieza sin dejar manchas o marcas en ella. Un tamaño óptimo para el punto de inyección no debe dañar el plástico o provocar grandes caídas de presión [39]. Los aspectos que afectan a los puntos de inyección se visualizan en la tabla 1.

Tabla 1 Aspectos que afectan los puntos de inyección

Parte moldeada	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Geometría ❖ Espesor de pared ❖ Dirección de la carga mecánica ❖ Requerimientos de calidad en cuanto a dimensiones, apariencia y resistencia mecánica
Material a moldear	<ul style="list-style-type: none"> a) Viscosidad del polímero b) Temperatura de masa fundida c) Características de flujo d) Inyectores e) Contracción
Generales	<ul style="list-style-type: none"> • Distorsión • Líneas de soldadura • Facilidad de desmoldeo • Separación desde el molde • Costos

La posición del punto de inyección debe considerarse en la sección transversal más gruesa de la pieza. Si el punto de inyección no está en esa posición, se pueden presentar vacíos y marcas conocidas como “rechupes” ya que no será posible aplicar la presión de mantenimiento necesaria, pues solidificará de manera prematura el área de alojamiento del punto de inyección (algunos autores de llaman la compuerta). A sí mismo la posición de la compuerta determina la dirección del flujo del material dentro la cavidad, también llamado orientación, es decir, la alineación de las cadenas poliméricas. Las propiedades a lo largo de las cadenas y perpendiculares a ellas son diferentes. Esto es aplicado a cualquier parte moldeada. Los mejores resultados de resistencia a tracción e impacto son obtenidos en dirección del flujo [39].

El software Moldflow Adviser ® ofrece dos algoritmos para verificar, sobre la geometría, la mejor zona para colocar el punto de inyección, el primero es Gate Region Locator, que usa una combinación de condiciones para determinar la mejor localización del punto de inyección, está basado en la información del material. El segundo es Advanced Gate Locator, el cual considera la resistencia mínima del flujo [40], sin embargo, el comportamiento de un polímero en estado visco elástico puede ser extremadamente complejo, tanto que los índices de fluidez (MFI) no son suficientes para describirlo, ya que estos indican un simple punto en el cual se estima la viscosidad, pero no es representativo del comportamiento del material, que experimenta un amplio rango de velocidades de corte, temperaturas y presiones cuando se moldea. De esta manera múltiples modelos se han desarrollado para el moldeo por inyección de plásticos.

El modelo Newtoniano de viscosidad asume que esta no es una función de la velocidad de corte. Cuando un material no obedece esta ley, es llamado no-Newtoniano. Uno de los modelos más simples y comunes es la Ley de Potencias, en el cual la viscosidad es una función exponencial de la velocidad de corte.

Ecuación 5 Ley de Potencias

$$\eta = k\dot{\gamma}^{1-n}$$

Donde k es el valor de una viscosidad de referencia y n es el índice de la ley de potencia. Cuando $n=1$ la ley de potencias se convierte en el modelo Newtoniano y cuando n disminuye, la viscosidad exhibe engrosamiento del perfil, debido a que el polímero fluye rápido cerca de las paredes. Si n tiende a cero, la viscosidad del plástico tiende a ser constante a través del perfil. Figura 6.

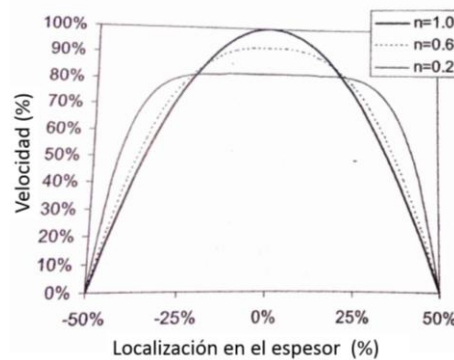


Figura 6 Variación del perfil de flujo de un plástico en función de exponente de la ley de potencias y la localización del espesor [34]

Con la aplicación del modelo cruzado WLF, se puede de modelar la viscosidad η como una función de la velocidad de corte $\dot{\gamma}$, temperatura, T y presión P.

Ecuación 6 Modelo cruzado WLF

$$\eta(\dot{\gamma}, T, P) = \frac{\eta_0(T, P)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}}$$

En este modelo, η_0 es el “límite Newtoniano” en el cual la viscosidad se comporta como constante a muy bajas velocidades de corte, τ^* es el nivel de esfuerzos crítico en el cual la viscosidad da una transición del nivel Newtoniano al régimen de la ley de potencias, n, es el índice de la ley de potencias en el régimen de altas velocidades de corte. Los tres parámetros, η_0 , τ^* y n, del modelo cruzado se pueden estimar directamente de un gráfico log-log de la viscosidad como función de la velocidad de corte. El modelo Cruzado WLF es ampliamente usado en simulaciones numéricas, mas no en análisis manuales [34].

El sistema de regulación de temperatura o de enfriamiento es de suma importancia tanto de forma económica como de operación para el molde, para el primer caso, los tiempos de enfriamiento y de ciclo pueden incrementarse innecesariamente, para el segundo caso, se pueden presentar gradientes de temperatura significativos en el molde, causando contracción y flexión diferenciada en las partes moldeadas [34].

La temperatura de las piezas moldeadas al tiempo de la expulsión es una función del diseño de la parte, diseño de la línea de enfriamiento, propiedades del material y condiciones de proceso. La contracción y deflexión diferenciada en las piezas moldeadas ocurren cuando hay variaciones de temperatura en ellas, tomando en cuenta que la temperatura del plástico en el centro de la pieza es igual a la temperatura inicial de fundido cuando el proceso de enfriamiento inicia, transcurrido cierto tiempo, el plástico en el centro de la pieza comienza a enfriar acercándose a la temperatura del refrigerante del molde. Por ello el molde debe diseñarse para un enfriamiento rápido y uniformemente a un costo adecuado, considerando para ello:

- 1) Calcular el tiempo de enfriamiento requerido
- 2) Hacer una evaluación de la variación de transferencia de calor que pueda existir
- 3) Hacer una evaluación de la variación de flujo del refrigerante
- 4) Establecer el diámetro de la línea de refrigeración adecuada
- 5) Seleccionarla profundidad de las líneas de refrigeración y su distancia

Para determinar el tiempo de enfriamiento durante el ciclo de inyección es necesario establecer un criterio para saber cuándo el plástico es suficientemente rígido para ser expulsado del molde.. La temperatura a la cual el material está suficientemente rígido es conocida como la temperatura de distorsión por calor (HDT) o la temperatura de deflexión bajo carga (DTUL) que está caracterizada por la norma ASTM D648. Según Kazmer [34] para calcular el tiempo de enfriamiento con base en el espesor de la pieza (h) se puede aplicar la ecuación 10.

Ecuación 7 Cálculo del tiempo de enfriamiento de la pieza según la industria del plástico

$$t_c = 2 h^2$$

El refrigerante incrementa su temperatura mientras cruza el molde. La temperatura en el molde debe ser homogénea, de lo contrario se manifestará contracción diferente y deflexión en la pieza moldeada. Kazmer [34] recomienda como diferencia admisible de temperatura 1°C y para piezas de precisión 0.1°C. Para ello el refrigerante debe atravesar el molde bajo un régimen turbulento (Reynolds >4000) asegurando una buena transferencia de calor. La profundidad de las líneas de refrigeración debe estar entre dos y cinco veces su diámetro. La separación entre líneas debe de estar entre uno y dos veces el diámetro de las mismas.

El sistema de expulsión es el responsable de remover las piezas moldeadas desde el molde de inyección cuando este se encuentra abierto totalmente. La complejidad del sistema de expulsión puede variar completamente en función de los requerimientos de la pieza los factores que se deben tomar en cuenta son la necesidad de múltiples ejes de actuación, cálculo de fuerzas de expulsión, tanto en magnitud como en distribución. Kazmer [34] precisa que el diseñador de molde debe trabajar con el diseñador del producto y el encargado de la inyección, para asegurar que el diseño del molde sea adecuado y robusto.

Las fuerzas de expulsión aplicadas deben ser capaces de despegar la pieza de las superficies del inserto o corazón. Estas fuerzas pueden ser aplicadas por múltiples componentes, tales como, pernos de expulsión, perno de expulsión con alojamiento, pernos de expulsión en forma de hoja, levantadores, placas deslizables. El número, localización y diseño de estos elementos debe desarrollarse para que se transmita la fuerza desde la máquina de moldeo hasta la pieza moldeada. Para reducir la distorsión permanente en la pieza de plástico, el número, distribución y diseño de los componentes del sistema de expulsión debe ser tal que permita que la fuerza sea uniforme en toda la pieza. Si se logra lo anterior la pieza será expulsada sin deformación permanente.. El sistema de expulsión se diseña para remover la pieza del molde lo más rápido posible y restablecerse para que el molde cierre y se inicie el siguiente ciclo de inyección. Los componentes del sistema de expulsión pueden interferir significativamente con la transferencia de calor desde la pieza al elemento refrigerante. Por ello, en ciertas aplicaciones se considera el uso de insertos de diferentes materiales. El tamaño del área de contacto de los expulsores y la pieza también tiene influencia sobre la transferencia de calor entre ellos, por lo que a veces se puede optar por el uso de muchos expulsores de diámetro pequeño en vez de usar pocos expulsores de diámetro mayor. Como los expulsores están en contacto con la pieza moldeada, diversos autores recomiendan ubicarlos en superficies no visibles y/o en áreas donde la pieza desarrolle bajos niveles de esfuerzo.

El sistema de expulsión se diseña según los requerimientos de distribución de cavidades o por las líneas de partición. Si el molde no tiene bajo relieves o requerimientos especiales, sólo requiere de una línea de partición. Pero si el molde tiene bajo relieves internos o externos, se tendrán más líneas de partición y será necesario el uso de correderas deslizables y/o insertos que desenrosquen o colapsen.

El costo del sistema de expulsión puede incrementarse si se usan sistemas con correderas deslizables u otro sub ensamble de expulsión. La meta del diseñador de moldes es brindar un diseño simple y económicamente atractivo, no sólo se debe considerar el costo inicial de diseño y herramientas, sino también el costo por operación, mantenimiento y reparaciones por falla.

Cuando una pieza de plástico contiene protuberancias externas, es necesario que se diseñe sobre el molde un sistema de correderas deslizables que sean actuadas por pernos inclinados. Cuando el molde cierra y abre, los pernos inclinados entran en las correderas deslizables, provocando que la corredera se mueva en dirección perpendicular a la de apertura de molde. El ángulo de inclinación de los pernos, Φ_{inc} está limitado a 20° [34].

Cuando se tienen bajo relieve en un inserto del molde, se puede optar por una expulsión que empuje la pieza, lo que puede ocasionar que parte de la pieza se deforme. Si la cantidad de deformación provocada por la expulsión está dentro del límite elástico del material, es posible expulsar la pieza de esta manera evitando el uso de sistemas especiales de expulsión.

El uso de juntas para ajuste a presión conocidos como “snap fit” simplifican y reducen el costo de las operaciones de ensamble, pero, pueden agregar cierta complejidad durante su expulsión ya que las piezas con juntas para ajuste a presión tienen bajo relieve, figura 7. Como resultado, los moldes se deben diseñar para facilitar la expulsión de la pieza y liberarse del bajo relieve.

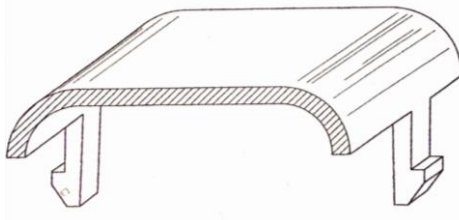


Figura 7 Vigas en cantiléver para ajuste a presión con caras de enganche salientes [41]

El gancho en la viga mostrado en la figura 7 con las caras hacia afuera, es el resultado de un bajo relieve, el que debe liberarse al momento de abrir el molde, por ello, el diseño del molde deberá contemplar un ángulo de sujeción, ya que si el ángulo de sujeción del gancho permaneciera a 90° con respecto a la dirección de apertura del molde, este no podrá expulsarse del molde, figura 8.

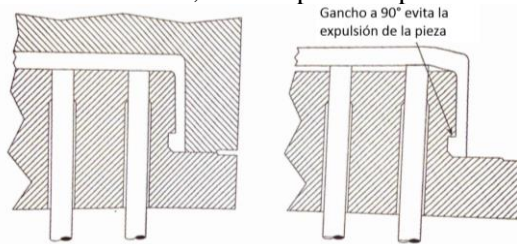


Figura 8 Gancho a 90° de la viga ajustadora a presión que impide la expulsión desde el molde [41]

Si se le reduce el ángulo al gancho tal y como se observa en la figura 9, será posible expulsar la pieza, aunque es probable que la pieza esté sujeta a esfuerzos de tracción y de flexión o que tenga una deformación permanente si se le expulsa por este método. Lo anterior causará que las tolerancias no sean buenas.

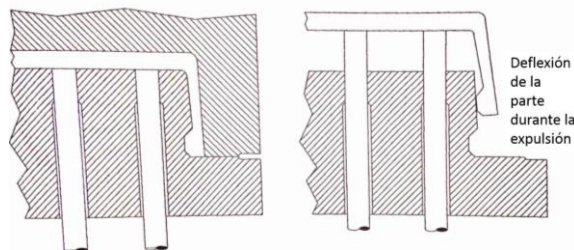


Figura 9 Molde con inclinación para facilitar la expulsión de una viga con gancho saliente [41]

Otra opción para la liberación de la viga antes mencionada es el uso de un levantador [41], figura 9. El levantador es una sección móvil del inserto que libera la pieza para que esta pueda ser expulsada. Es importante que el diseñador de la pieza reconozca que el uso de un levantador limitara en cierto grado el diseño libre. Formas como costillas, alojamiento para tornillos, no se podrán colocar de

manera adyacente a las vigas con gancho. En la figura 10 Se muestra un sistema de expulsión con levantador.

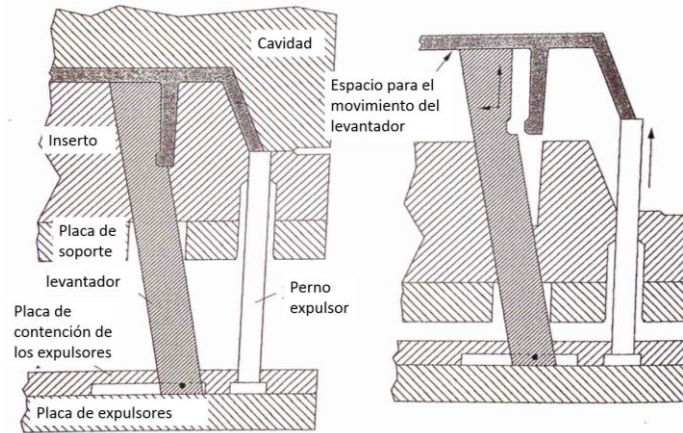


Figura 10 Uso del levantador para expulsión sin flexión de la pieza de plástico [41]

Por otro lado, Kulkarni [36] indica que cuando las piezas moldeadas son expulsadas, están por debajo de la temperatura de expulsión. Se considera esta cuando la pieza es lo suficientemente rígida para ser expulsada del molde. Si la temperatura de una pieza está por arriba de la temperatura de transición vítrea, T_g , las moléculas tienen suficiente energía para moverse y alcanzar el estado de equilibrio. Este movimiento resulta en contracción adicional y por lo tanto en cambios dimensionales de la pieza. Si la temperatura de transición vítrea se encuentra por debajo de la temperatura ambiente, el fenómeno continua hasta el equilibrio entre la temperatura ambiente y la T_g , causando más contracción del material.

Las curvas P-v-T muestran que los materiales plásticos son compresibles a las condiciones de presión y temperatura del proceso de inyección. Por lo tanto las variables como presión de empaquetamiento o presión de mantenimiento tienen gran influencia sobre las dimensiones de la pieza moldeada o la contracción. La contracción volumétrica de una pieza de plástico se puede predecir teóricamente, si se conocen las características del polímero en cuanto a P-v-T y, además, las condiciones de procesamiento, como se puede ver en la figura 11.

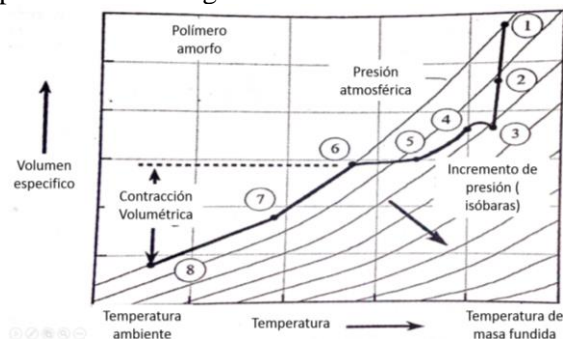


Figura 11 Proceso de inyección representado en términos de la presión, volumen y temperatura del material [41]

Los pasos del proceso de inyección se pueden visualizar en la curva a P-v-T de la figura 11, los que están detallados en la tabla 2.

Tabla 2 Proceso de inyección representado en términos de la presión, volumen y temperatura del material [34].

1	La presión incrementa para que el material entre a la cavidad del molde
1-2	Llenado de la cavidad del molde
2	Instante de llenado
2-3	Fase de empaquetamiento
3	Se alcanza un pico de presión en la cavidad y se inicia la etapa de transferencia para iniciar la presión de mantenimiento
3-4	Termina la aplicación de la presión de mantenimiento, se pierde algo de presión debido a que se regresa un poco de flujo
4	Inicio de la presión de mantenimiento
4-5	Caída de presión debida al enfriamiento e incremento de la solidificación de capas de plástico
5	Solidificación del punto de inyección
5-6	Caída de presión debida a que la parte enfría y contrae son compensación
6	Se alcanza la presión atmosférica indicando que el tamaño de la pieza es igual al de la cavidad y la contracción de la pieza dentro de la cavidad empieza
6-7	Enfriamiento isobárico en el molde
7	Apertura de molde para la expulsión de la pieza
7-8	Enfriamiento isobárico post molde
8	Equilibrio térmico, volumen final de la parte (sin tomar en cuenta los cambios morfológicos o por humedad en la pieza)

Kazmer [34] explica que la contracción volumétrica corresponde a la contracción en las tres dimensiones espaciales de la pieza moldeada, pero si un material muestra las mismas propiedades en cada dirección, (perpendicular y paralela a la dirección del flujo) se dice que es isotrópico, lo que implica una mínima contracción. El trabajar con un molde prototipo, antes de establecer el diseño final del molde, ayudará a dar precisión a las medidas de la pieza incluyendo su contracción; si ello resultara en alto costo, Kazmer [34] recomienda confiar en la información de contracción proveniente de diseños previos de moldes y en la experiencia del quien fabrica del molde.

Otra opción es realizar una simulación en computadora de las etapas de inyección, empaquetamiento y enfriamiento para predecir la contracción lineal en la aplicación de la pieza. Si bien la simulación por computadora utiliza cálculos más avanzados y brinda resultados más detallados que el análisis presentado, la simulación está sujeta a los mismos errores por asumir comportamientos de material y condiciones de procesamiento ideales. Es altamente recomendable que los resultados del análisis de contracción aquí presentado sean validados por la simulación y que sean tomados los resultados de contracción no uniforme a través de la cavidad del molde.

Una práctica común entre los diseñadores es crear y construir un molde sobre dimensionado, esto significa que los insertos y cavidades son diseñados para que se puedan hacer más grandes mediante un desbaste si las medidas del producto están por debajo de las esperadas [34].

La contracción volumétrica y lineal es dependiente de la temperatura de masa fundida y de la presión. La temperatura del molde tiene mayor efecto que la temperatura de barril, ya que controla directamente la temperatura de la pieza hasta su expulsión.

En algunas aplicaciones los cambios de dimensiones debidos a la deformación de una pieza moldeada superan la contracción. La deflexión es causada por diferencias de contracción. La causa más común es un gradiente de temperatura a través del espesor de pared de la pieza. Cualquier diferencia de temperatura a través del espesor de pared de la pieza es traducida como una variación de la contracción. Las diferencias entre la variación en la contracción en las superficies del inserto y la variación en la contracción sobre la superficie de la cavidad, son las causantes de deformaciones en la pieza mientras se enfría. Si las piezas a obtener son empleadas para ensamble, el ajuste entre las piezas es de suma importancia. Por lo tanto las dimensiones de la pieza se deben estabilizar antes del ensamble. Si continúan contrayendo después del ensamble los esfuerzos fácilmente pueden inducir falla prematura.

El procedimiento para medir la contracción según Kulkarni [36]es: dejar que el proceso de inyección se estabilice, usando como indicador la temperatura de molde. Colectar al menos tres piezas que hayan sido expulsadas del molde, y anotar la fecha y hora de cada uno. Después de quince minutos medir la pieza y anotar las dimensiones. Repetir después de 30 minutos, 45 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas, 8 horas, 24 horas y hasta que se observe que las dimensiones se estabilizaron. Por último generar una gráfica de dimensiones contra tiempo. Si el molde es de cavidades múltiples, medir solo las piezas de una cavidad siempre y cuando el molde este balanceado.

PLA

Tin et al [42] precisan que La producción mundial de plásticos se ha incrementado 160 veces en poco menos de 60 años, desde 1.5 millones de toneladas en 1950 hasta 245 millones de toneladas en 2008. La demanda de plásticos para el 2015 esperan sea de 45 kg per cápita.

La posición gubernamental sobre los plásticos, ha precisado que el plástico convencional toma mucho tiempo en degradarse por esa razón la atención se debe centrar, ahora, en polímeros amigables con el ambiente. Estos polímeros son naturalmente degradables cuando son depositados en el ambiente. Por ello, hoy en día se dan apoyos para que estos polímeros sean estudiados.

Los polímeros biodegradables se pueden dividir en dos categorías, polímeros derivados del petróleo, como el Poly (alcohol vinyl) PVOH y polímeros derivados de microorganismos. Estos últimos utilizan la actividad de una bacteria para convertir productos de plantas, como el maíz, en productos iniciales para polimerización. El Poly (ácido láctico) PLA se produce por esta vía. El PVOH y el PLA son los plásticos biodegradables con mayor producción [42].

El PLA fue descubierto cuando Pelouze condensa ácido láctico mediante el proceso de destilación de agua para formar PLA de bajo peso molecular. Posteriormente, el científico Wallace Carothers de DuPont, encontró que calentando el láctido en vacío se producía PLA. En 1997 Cargill y Dow Chemical formaron Cargill Dow Polymer LLC para comercializar PLA, bajo la marca de Igeo™ [42].

El PLA se produce a partir del monómero de ácido láctico (LA). EL PLA se puede producir por dos procesos, vía condensación directa y vía apertura de anillo. El ácido láctico es el bloque básico de la producción del PLA. Químicamente el PLA esta formado por acido 2-hidroxi-propionico con 2 estereoisomeros L(-) y D(+). El ácido láctico natural se encuentra en forma L, mientras que el sintetizado químicamente es una mezcla de D y L. En el cuerpo humano, la generación de ácido láctico y lactano por los músculos durante ejercicio anaeróbico son los causantes de la fatiga y el dolor después del ejercicio deportivo [42].

La lactida es una sustancia intermedia en la producción de PLA mediante la polimerización por apertura de anillo, figura 12. Sin embargo la poli condensación y la apertura de anillo envuelven el paso de producción del pre polímero ácido láctico, la polimerización mediante la formación de lactida se puede realizar sin la necesidad de aplicar agentes acoplantes.

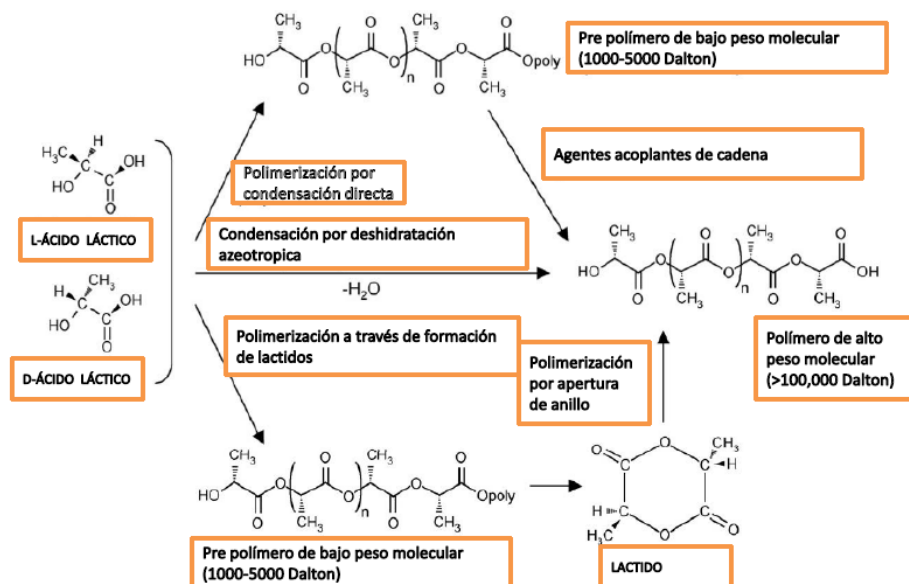


Figura 12 Trayectoria de las reacciones en la producción del Poli(ácido láctico) desde ácido láctico [43]

EL propósito del uso de agentes acoplantes es incrementar el peso molecular del PLA. Siendo el prepolímero PLA de bajo peso molecular ($M=1000-5000$). La polimerización del lactido por apertura de anillo fue realizada en primer instancia por Carothers a mediados de los 1900 y posteriormente patentada por DuPont, quien empezó la producción en masa de PLA.

El PLA puede disolverse en cloroformo, cloruro de metileno, dioxano, acetonitrilo, 1,1,2-tricloroetano y ácido dicloroacético, también es soluble en tolueno, acetona, etil benceno y tetrahydro furano, cuando se calientan a temperaturas de ebullición, siendo su solubilidad limitada a temperaturas bajas. El PLA altamente cristalino PLLA resiste el ataque de la acetona, acetato de etil y el del tetrahydro furano. Mientras que el PLA amorfo como es un copolímero de poli(L-D-lactico), puede disolverse fácilmente en varios solventes orgánicos, como solventes clorados, benceno, acetonitrilo y dioxano.

El PLA es convertido en productos mediante procesos térmicos como lo es extrusión sople, extrusión de perfiles laminares, moldeo por inyección. Para determinar la procesabilidad del PLA, se requiere de un estudio reológico sobre sus características y propiedades, dado que los intervalos de temperatura y presión que éste material puede soportar, son muy estrechos.

Por otro lado, la reología se define como el estudio de la deformación y flujo de un fluido. Es una propiedad importante en un polímero fundido. La reología relaciona la viscosidad con la temperatura y a velocidad de corte, y por lo tanto está ligado a la procesabilidad de un polímero. Muchos polímeros fundidos son clasificados como fluidos adelgazantes al corte, ya cuando existe una variación grande

del cortante, las moléculas del polímero se orientan y el número de enredos entre las cadenas disminuye. Este fenómeno ayuda a que las cadenas del polímero fluyan fácilmente pasando unas y otras entre si mismas, mientras se realiza el proceso de moldeado. La viscosidad disminuye a temperaturas elevadas debido a la alta energía cinética de las moléculas.

El peso molecular del PLA para inyección está en el orden de los 100,000 g/mol. Siendo clasificado como PLA de alto peso molecular. Este tipo de PLA en estado de fundido tiene un comportamiento pseudo plástico, es un fluido no newtoniano; en cambio, bajo condiciones idénticas de procesamiento el PLA semicristalino tiende a poseer mayor viscosidad al corte que su contra parte amorfa. Cuando las velocidades de corte incrementan, la viscosidad disminuye considerablemente. Las conexiones entre las cadenas poliméricas se vuelven más débiles con el incremento de la temperatura, debido a que el PLA tiene amplitud alta de vibración en sus moléculas, lo cual transforma la masa fundida para que fluya suavemente. La velocidad de corte afecta en gran medida a la viscosidad del PLA. Como se observa en la figura 13. La viscosidad η se reduce drásticamente conforme la velocidad de corte incrementa para ambos tipos de PLA. La relación entre η y velocidad de corte no es lineal, pero exhibe un comportamiento típico de seudo plástico. Esto es principalmente debido al hecho de que las cadenas poliméricas se llegan a romper cuando se les aplican altas velocidades de corte. La figura 13 muestra el efecto de la velocidad de corte sobre la viscosidad del PLA.

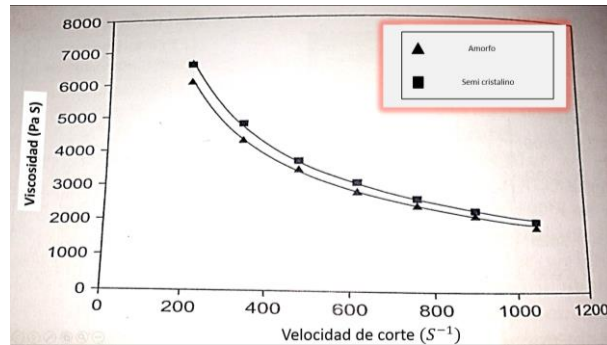


Figura 13 Efecto de la velocidad de corte en la viscosidad de la masa fundida del PLA [42]

Experiencias del Proceso de inyección para el PLA

El portal de internet ptonline.com en 2009 [44] publicó un artículo sobre como procesar bio-polimeros mediante moldeo por inyección, donde, Bob Ameel, director del departamento de HRS de la empresa DME Co. Dice que han encontrado que el PLA requiere más tiempo de enfriamiento que el PS, ya que retiene más calor, el PLA tiende a no fluir bien en paredes delgadas sobre piezas largas y se le tiene que agregar más presión para llenar las cavidades, pero esto incrementa el esfuerzo cortante, lo cual puede ser causa de que se rompan cadenas y la pieza se torne frágil. Además vieron que el PLA es hipersensible a la temperatura.

Por otro lado Stefan Bock, Director de aplicación de tecnología para PET en Suiza, indicó que para hacer las preformas de PLA se pueden usar husillos estándar para PET. “El sistema debe de estar totalmente limpio de PET ya que la temperatura de proceso para el bio-polimero es baja. El PET se procesa como el PVC pero menos difícil. Las personas de manufactura debe mantener la temperatura de proceso en +- 2 °C. Él dice que el HRS se debe modificar para prevenir la fuga, el molde debe trabajar a 24°C para eliminar el condensado.

El PLA se debe moldear a baja velocidad de inyección al principio, de 12.7 a 25 mm/s, después incrementar gradualmente hasta el 95 o 99 % del total de la pieza. Se han encontrado que las presiones de inyección a las cuales trabaja bien el PLA van de 344 a 896 Bar. Para disminuir los tiempos largos

de residencia, no hay que mantener más de 3 o 4 disparos dentro del barril de inyección, se recomiendan 2.

Procesamiento científico

Kulkarni [36] dice que el procesamiento científico engloba el conocimiento de los principios científicos de cada parámetro y la aplicación de estos principios para lograr un proceso robusto y consistente en cuanto a calidad de la pieza. El término de moldeo científico fue acuñado por los pioneros en el moldeo por inyección de plásticos John Bozzelli y Rod Groleau.

Un proceso es considerado robusto cuando los cambios en las entradas tienen un efecto mínimo en la calidad de la pieza. Y se vuelve más robusto en cuanto más cambios en las entradas se pueden presentar sin afectar adversamente el resultado de la calidad de la pieza.

Un proceso es considerado consistente cuando se cumple:

- Todas las variaciones en las salidas del proceso son resultado de solamente causas naturales de variación
- La desviación estándar de la variación se encuentra en un valor mínimo. Siendo esta una medida de dispersión para variables cuantitativas o cantidades racionales y de intervalo. Se define como la raíz cuadrada de la varianza de la variable

En general, con lo que respecta a las temperaturas de proceso, en el caso de materiales amorfos, el rango recomendado es amplio, mientras que para materiales semi cristalinos es pequeño. La temperatura de masa fundida se obtiene directamente del polímero, para ello se aplica el método 30/30 desarrollado por la empresa RJG Associates. La sonda del termopar se calienta 5°C por encima de la temperatura colocada en la nariz de la inyectora. Se detiene el ciclo, la unidad de inyección se retrae, y el plástico se purga. La sonda caliente se pone en la purga durante 30 segundos, la temperatura de masa fundida debe caer en el rango de temperaturas recomendado por el fabricante.

Si se coloca la temperatura de masa fundida por encima de la recomendada, la resina degradará y producirá piezas fuera de aceptación. Si se coloca la temperatura de masa fundida por debajo de la recomendada se puede dañar el equipo de inyección, e incluso romper el husillo.

Los polímeros semi cristalinos requieren energía considerable para ablandarse y fundirse, por lo tanto el incremento de temperatura es típicamente mayor que para materiales amorfos. En el caso de materiales amorfos no es necesario un perfil ya que ellos necesitan menos temperatura para ablandarse y pueden estar más tiempo en el barril de inyección, figura 14. Típicamente las temperaturas de nariz se colocan aproximadamente alrededor de los 5°C de las temperaturas de masa fundida deseadas.

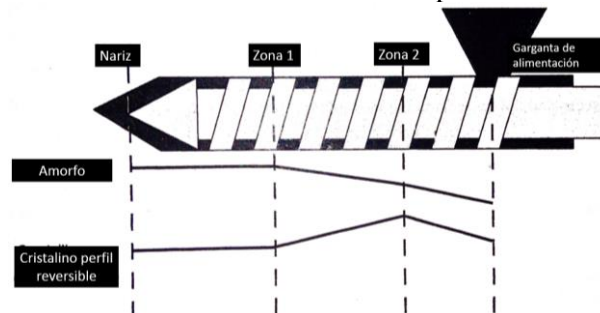


Figura 14 Perfiles de temperatura para materiales amorfos y semi cristalinos [36]

La temperatura del molde es importante porque brinda la energía para que las moléculas en el estado fundido alcancen su equilibrio final, sin ella se forman esfuerzos residuales en la pieza moldeada. Es más crítica para materiales semi cristalinos porque requiere energía para su cristalización, la cual

necesita tiempo y cierto nivel de temperatura. No tanto para los materiales amorfos, ya que estos tienen sus moléculas distribuidas al azar, no se requiere que alcancen el equilibrio.

El proceso para llenar la cavidad durante el ciclo de inyección se divide en tres fases, inyección, empacamiento y mantenimiento. Durante la fase de inyección, la cavidad del molde es completamente llena, el plástico comienza a enfriar tan rápido como toca las paredes y forma una capa fría en su exterior. Mientras sigue la inyección el plástico fluye entre las capas solidificadas. Conforme el plástico enfría las moléculas empiezan a acercarse unas a otras, resultando en contracción. En este punto si no se adiciona plástico, aparecerían rechupes, los cuales son depresiones en la superficie de la parte. Es por eso que se requiere de una fase de empacamiento, donde se requiere de una cantidad de plástico para llenar todo el volumen de la cavidad. Al final de esta fase el peso de la pieza debe ser igual al peso teórico.

El plástico entra a la cavidad por puntos de inyección. Si esta área solidifica, es imposible llenar la cavidad. El punto de inyección debe ser tan grande que permita el llenado de la cavidad en la fase de inyección y de empaquetamiento. Cierta presión se debe continuar aplicando para mantener el plástico dentro de la cavidad. Este balance de presión es llamado presión de mantenimiento y por ende la fase se llama de mantenimiento. La presión debe aplicarse hasta que el punto de inyección se solidifique, este tiempo se llama tiempo de mantenimiento.

Cuando el material se está procesando, el calor otorgado por las bandas calefactoras no es suficiente para hacer fluir los materiales cristalinos. La velocidad de husillo debe de situarse tanto que el tiempo de recuperación de husillo sea menor que el tiempo de enfriamiento. Si el husillo requiere más tiempo que el de enfriamiento, el tiempo efectivo de enfriamiento incrementa ya que el molde permanece cerrado. Se recomienda que el tiempo de recuperación de husillo se termine, al menos, dos segundos antes de que se alcance el tiempo de enfriamiento. Las velocidades de husillo son sugeridas por los proveedores de material.

El husillo se mueve hacia atrás para llevar material plastificado a la parte frontal de este, si no hubiese presión en la parte de atrás del husillo, este se movería erráticamente. Esta pérdida de control puede conducir al que el husillo alcance posiciones de disparo inconsistentes, lo que se traduce en variaciones de disparo a disparo. Ya que el plástico necesita ser compactado para eliminar el aire y gases. Si estos agentes no son eliminados pueden causar vacíos, defectos superficiales como rayas. La contrapresión es entonces necesaria para ayudar a la mezcla homogénea y fundición del plástico. La contrapresión aplicada debe ser la menor posible. La consistencia en la recuperación del husillo es un buen indicador de que la contrapresión aplicada es la suficiente. La variación del tiempo de recuperación no debe variar más allá de $\pm 0.2 - 0.5$ [S] para máquinas de tamaño mediano. El uso de contrapresión excesiva puede resultar en daño del equipo de inyección.

Kulkarni [36] presenta seis pasos para lograr la optimización del proceso de inyección, siendo el primer paso la optimización de la velocidad de inyección.

Todos los plásticos en su forma reblandecida presentan un comportamiento no Newtoniano, esto significa que su viscosidad no permanece constante en un intervalo dado de velocidades de corte. Estrictamente el comportamiento reológico de un plástico es una combinación de los comportamientos no Newtonianos y los comportamientos Newtonianos. En velocidades de corte extremadamente pequeñas, las cuales raramente se encuentran en inyección de plásticos, el plástico presenta un índice de ley de potencias (n) cercano a cero, pero cuando la velocidad de corte incrementa el plástico tiende a exhibir un incremento en el índice de potencias que tiende a 1. Lo que implica que el comportamiento del plástico tiende a ser Newtoniano. Esto es debido a que durante el proceso de moldeo por inyección, el material es sujeto a fuerzas cortantes. Por lo tanto la velocidad de corte es proporcional a la velocidad de inyección. Si el proceso se encuentra en las velocidades de

corte bajas, variaciones pequeñas en la velocidad de corte causarían cambios grandes en la viscosidad aparente, figura 15. Esto se ve reflejado en inconsistencias en el llenado del molde, lo que resulta en inconsistencias de un disparo a otro. Como se puede observar en la figura 15, con velocidades de inyección altas, las velocidades de corte también lo son y el efecto del cambio de esta no es tan significativo en la viscosidad como lo es a bajas velocidades de inyección.

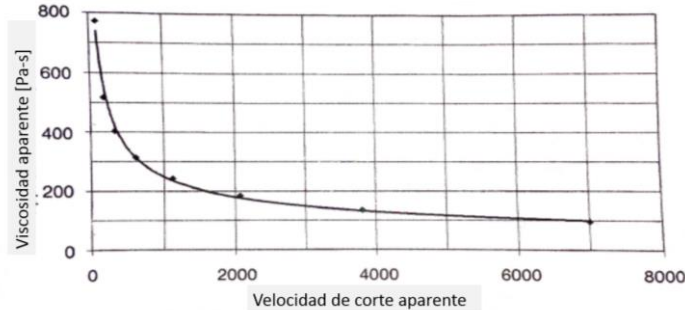


Figura 15 Curva de viscosidad típica de un poliéster [36]

El procedimiento para desarrollar la curva de viscosidad fue propuesto por John Bozelli, quien dijo que la máquina de inyección puede ser tratada como reómetro. Donde el orificio de la nariz es el dado del reómetro y el husillo es el pistón. El procedimiento se encuentra detallado en [2], el valor de la viscosidad promedio se puede obtener a partir de la ecuación.

Ecuación 8 Viscosidad aparente

Viscosidad

= Presión de inyección x tiempo de inyección x factor de intensificación de husillo

Obtenida la curva de viscosidad, la velocidad de inyección se debe seleccionar tomando el valor donde no se pueden observar saltos en la viscosidad y se tiene la mayor consistencia.

Cuando incrementa la presión, el volumen específico del plástico fundido disminuye. Por lo tanto, para el control de dimensiones de una pieza, la presión de empacamiento o de la cavidad debe controlarse. En moldes de cavidades múltiples, si una cavidad llena menos que otra se debe a que la cavidad que llena primero está más presurizada. A este comportamiento se le conoce como desbalance. Las causas del desbalance son:

- ❖ Variaciones del canal de flujo, es cuando los puntos de inyección y canales no son idénticos, entonces se tiene más restricción del flujo en una cavidad a comparación de otra.
- ❖ Variaciones en los venteos, los cuales son dispuestos en el molde para que el aire escape de la cavidad al tiempo que el plástico entra en ella
- ❖ Variaciones de enfriamiento, las temperaturas de molde pueden afectar la cantidad de contracción, si las líneas de enfriamiento son diferentes por cada cavidad, se presentarán variaciones dimensionales.

El procedimiento para determinar el balance de cavidades se encuentra detallado en [2]. Una ventaja de desarrollar este procedimiento, es que se puede saber qué puntos de inyección son iguales, esto pasa cuando inicialmente las cavidades llenan de la misma forma. El desbalance también se puede arreglar abriendo los canales o puntos de inyección. Se debe tener en cuenta que los materiales amorfos pueden tolerar más desbalance que los materiales cristalinos.

Es común que se construyan moldes familiares, en estos casos los puntos de inyección y canales deben ajustarse para balancear el llenado.

Conforme el plástico fluye a través de diferentes secciones, desde la nariz al molde, el frente de flujo del plástico experimenta la pérdida de presión debido a los efectos de arrastre y fricción, ya que las capas de plástico que se van formando en las paredes del sistema de alimentación disminuyen la sección transversal de los canales. Si durante el proceso se conoce la pérdida de presión en cada sección donde transita el plástico, se puede determinar la caída de presión total y en qué zonas es la mayor caída de presión. El sistema de alimentación del molde se puede modificar para reducir la pérdida de presión y lograr mejor consistencia del fluido. En [2] se detalla el procedimiento para determinar la caída de presión. Si el proceso es cercano a la presión límite, este fácilmente puede resultar en tiros cortos y en partes defectuosas. Para moldes con HRS, el procedimiento principia con la nariz y continúa con la sección dentro del molde donde el plástico es primeramente inyectado. La sección del HRS del molde se debe considerar como una sección de flujo y cada sección subsecuente de flujo debe ser analizada.

La presión máxima usada en este proceso nunca debe superar la máxima presión disponible de la máquina, típicamente solo el 90 % de la presión máxima disponible del equipo se debe usar. La presión ideal de empaquetamiento y mantenimiento se determina evaluando la ventana de proceso del molde. Para materiales amorfos la presión de mantenimiento y las temperaturas de masa fundida son las variables que se emplean. Para materiales semicristalinos, debido a que su rango de temperaturas de masa fundida es estrecho, la temperatura de masa fundida es colocada al valor medio recomendado y las variables seleccionadas son presión de mantenimiento y temperatura de molde. Para materiales amorfos, la temperatura de masa fundida tiene mayor impacto comparada con la temperatura de molde, con lo cual las variables seleccionadas son temperaturas de masa fundida y presión de mantenimiento. La ventana de proceso es también llamada diagrama de área de moldeo. Es el área en la cual se moldean piezas estéticamente aceptables. Cuanto más grande sea la ventana, más robusto es el proceso. Siendo un proceso robusto el que tiene ventana de proceso grande y en el cual se absorben las variaciones naturales inherentes al sistema. El procedimiento para determinar la ventana de proceso para materiales amorfos esta detallado en [2].

Los moldes con ventanas extremadamente pequeñas, producen piezas con problemas de dimensiones. Por lo tanto el personal de producción ajusta el proceso continuamente para alcanzar consistencia.

El punto de inyección se considera solidificado cuando el valor de viscosidad del plástico en él y sus alrededores cae hasta que ya no fluye. El tiempo de solidificación es una función del tipo de plástico, tamaño del punto de inyección, diseño del punto de inyección y parámetros de proceso. El estudio de la solidificación del punto de inyección consiste en una gráfica de la masa de la pieza versus el tiempo de mantenimiento. El procedimiento para determinar el tiempo de mantenimiento se encuentra detallado en [2]. El tiempo de mantenimiento debe ser colocado aproximadamente 1 segundo más grande que el tiempo de solidificación del punto de inyección. La colocación del tiempo de enfriamiento inicia al final del tiempo de mantenimiento. El tiempo de enfriamiento es la suma del tiempo de inyección, empaquetamiento y mantenimiento y el tiempo de refrigeración que maneja la máquina de inyección. Es por eso que si el tiempo de mantenimiento se reduce en 0.5 segundos, por ejemplo, este tiempo debe agregarse al tiempo de enfriamiento en la máquina y viceversa.

Como ya se mencionó, una vez que el tiempo de mantenimiento ha terminado, el tiempo de enfriamiento colocado en el equipo comienza a correr. El molde permanece cerrado hasta el final del tiempo de enfriamiento. Antes de que el molde se abra, la pieza debió alcanzar la temperatura de expulsión. Si esta se expulsa antes, la pieza estará blanda, lo que ocasionará que se deforme durante la expulsión. Por otro lado, tiempo excesivo de enfriamiento es una pérdida de tiempo de máquina. El tiempo de enfriamiento debe ser colocado en la maquina tal que las dimensiones de la pieza

permanezcan consistentes y el proceso capaz de realizar piezas aceptables. El procedimiento para determinar el tiempo de enfriamiento se encuentra detallado en [2]. Kulkarni [36] indica que una vez obtenida la gráfica de dimensiones versus tiempo de enfriamiento, se debe analizar los datos para estudiar como las dimensiones críticas de la pieza cambian en función del tiempo de enfriamiento. Posteriormente de debe seleccionar un valor de tiempo de enfriamiento en el cual las dimensiones sean las más cercanas a las requeridas. Finalmente se deben hacer 30 inyecciones con este valor de tiempo y hacer un análisis estadístico para determinar la capacidad de proceso en con ese tiempo de enfriamiento.

Los parámetros de la máquina de inyección se deben colocar para estabilizar el proceso. Una cantidad suficiente de partes deben hacerse para lograr la robustez del proceso y calidad de la parte. Un número estadísticamente aceptable de piezas, 30, deben medirse. Para asegurar que la función del molde es aceptable, Kulkarni [36] recomienda ejecutar el “Procedimiento para calificar las funciones del molde” figura 16.

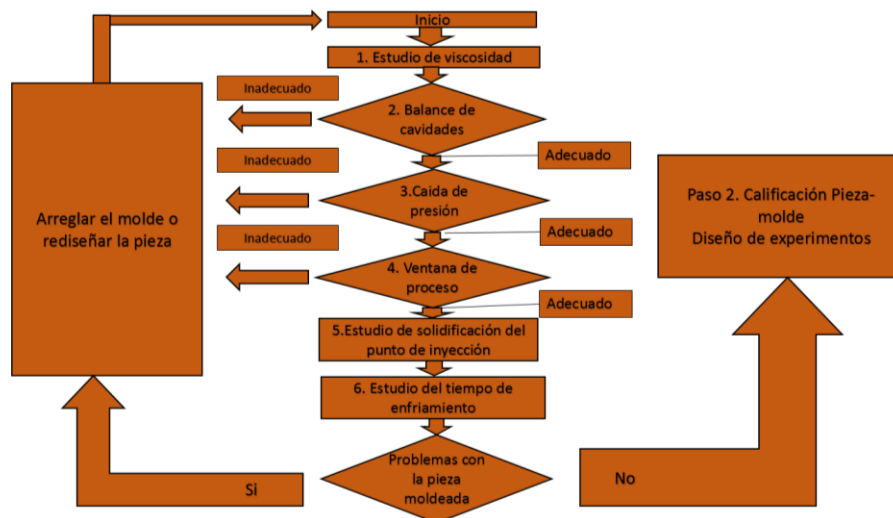


Figura 16 Procedimiento para calificar las funciones del molde

Las dimensiones que no fueron consideradas en este procedimiento deben compararse con las dimensiones de diseño. Si las dimensiones no son aceptables o el proceso no es estable, debido a variaciones grandes, el molde debe ser alterado para encontrar las dimensiones de diseño en la pieza. Estas dimensiones deben considerarse hasta que el proceso haya sido estabilizado. Es importante tener documentados los parámetros de todo el proceso con el fin de poder duplicarlo en ensayos subsecuentes o en la producción final.

Diseño de experimentos

La calidad es el grado de satisfacción de las necesidades de los clientes que presentan los productos o los servicios. Entre los objetivos se incluyen la reducción de defectos, la fabricación de productos conforme a las especificaciones y la estandarización del tiempo de entrega. Los patrones inusuales de datos indican la presencia de una causa especial de variación, es decir, una variación que no es una parte normal del proceso. Con los gráficos de control es posible detectar la variación por causas especiales y evaluar la estabilidad del proceso a lo largo del tiempo. Los gráficos de control muestran estadísticas de proceso. Las estadísticas de proceso incluyen las medias de subgrupos, las observaciones individuales, estadísticas ponderadas y números de defectos. Los gráficos de control muestran una línea central y límites de control. La línea central es el valor promedio de la estadística

de calidad que opta por evaluar si un proceso está bajo control, los puntos varían de manera aleatoria alrededor de la línea central. Los límites de control se calculan según la variación aleatoria esperada en el proceso. El límite inferior de control (LCL) se encuentra 3 veces la desviación estándar por debajo de la línea central. Cuando el proceso está bajo control, todos los puntos del gráfico de control están entre el límite superior e inferior [45].

Se considera que un proceso es capaz si cumple las especificaciones y produce buenos resultados. La capacidad del proceso se determina comparando la dispersión de la variación del proceso con la amplitud de los límites de acuerdo a las especificaciones [45].

Generalmente, el cliente establece las tolerancias que debe cumplir el producto. Un producto fuera de tolerancias es considerado producto sin calidad. La capacidad de un proceso es una característica esencial para elaborar un producto. Los índices de capacidad para un proceso se asocian a periodos de corto y largo plazo, los asociados con la variación a corto plazo se denominan Cp, Cpk, CPU y CPL; mientras los asociados con la variación a largo plazo son Pp, Ppk, PPU y PPL.

El índice de capacidad Cp relaciona las tolerancias y la capacidad, mediante el cociente entre el rango de tolerancias del proceso y la capacidad (intervalo natural de variación) del mismo.

Ecuación 9 índice de capacidad [45]

$$Cp = \frac{\text{intervalo de tolerancias}}{\text{Capacidad}} = \frac{UCL - LCL}{6\sigma}$$

Donde:

UCL es el límite superior de la especificación

LCL es el límite inferior de la especificación

Si $Cp > 1$, se dice que el proceso tiene capacidad de otorgar las dimensiones dentro de las especificaciones, ya que prácticamente todos los productos estarán dentro de las tolerancias requeridas

Si $Cp = 1$. Se está en la frontera de productos de calidad y no conformes.

Si $Cp < 1$. El proceso no tiene capacidad para fabricar el producto.

El Cp es una forma cuantitativa simple para expresar la capacidad de un proceso, pero no toma en cuenta si la media del proceso está centrada con respecto a una distribución normal. El Cp mide la extensión de las especificaciones en comparación con la dispersión 6σ , la magnitud de Cpk respecto Cp es una medida directa de cuan apartado del punto central está operando el proceso. El Cpk es una medida de la capacidad potencial del proceso.

Si $Cp = Cpk$, significa que el proceso está centrado en un punto medio de las especificaciones.

Si $Cp \neq Cpk$, significa que el proceso está descentrado. Ppk es una medida de la capacidad general del proceso [46].

La medida de la capacidad de un proceso se ha hecho desde hace varias décadas, estas se hicieron populares por el ahorro de tiempo y mejora en la eficiencia. Las personas que se han asociado más con el desarrollo de diseño para experimentos (DoE) son G. Taguchi y Ronald Fisher. El campo del DoE es vasto y considerado casi como una especialidad por sí misma.

Tunkay [20] indica que el método de Taguchi es una herramienta fuerte para el diseño de sistemas de alta calidad. El método de Taguchi presenta un mejoramiento sistemático en calidad, desempeño y

costo, el método es simple y efectivo. En el método Taguchi se emplean tres diseños: diseño de sistemas, diseño de parámetros y diseño de tolerancias. El diseño de sistema envuelve la aplicación de conocimiento científico e ingenieril requerido para la manufactura del producto. El diseño de parámetros es empleado para encontrar los valores de proceso óptimos para mejorar las características de calidad. El diseño de tolerancia consiste en determinar y analizar las tolerancias en una serie de conjuntos con valores óptimos recomendados por el diseño de parámetros.

El método Taguchi emplea un diseño especial de arreglos ortogonales para comprender todos los parámetros con un pequeño número de experimentos. Taguchi recomienda el uso de una relación Señal/ Ruido (S/N) para determinar las características de calidad implementadas en los problemas de ingeniería de diseño. Los Arreglos ortogonales en si es un diseño de experimentos cuyo objetivo es el de adquirir información en una línea controlada, tomando información del comportamiento de un proceso dado.

El Diseño de experimentos, llamado DoE es un mejoramiento sistemático para conocer como los parámetros de un proceso o un producto afectan las variables de respuesta como lo es la procesabilidad, propiedades físicas o desempeño de un producto. El DoE es una herramienta matemática que se usa para definir la importancia de las variables específicas tanto de procesamiento como de un producto, y como controlarla para optimizar el desempeño del sistema mientras se maximizan las propiedades de este. El diseño de experimentos es una técnica o procedimiento para generar la información requerida con la cantidad mínima de experimentos, usando lo siguiente [47]:

- Límites experimentales
- Condiciones específicas de experimentación
- Análisis matemático para predecir la respuesta en cualquier punto dentro de los límites experimentales.

Generalmente el DoE se usa para resolver cualquier problema técnico y cuando se requiere entender completamente la respuesta de diferentes variables de un proceso o de un producto que se pudieran cambiar o controlar durante la experimentación [47].

El proceso para llevar a cabo un DoE exitoso se puede dividir en cinco pasos [47].

- Definición del problema
- Planeación del experimento
- Desarrollo del experimento
- Análisis de la información usando métodos estadísticos
- Reporte de los resultados

En primer lugar es necesario verificar que el problema está completamente definido y entendido con claridad. El segundo paso es seleccionar las variables independientes, con sus límites para evaluación y las variables dependientes (respuestas a medir de cada experimento). Las variables independientes son normalmente cuantitativas; es decir, que tienen un valor numérico específico. Sin embargo, en algunos diseños experimentales, las variables independientes son cualitativas, significando que, pueden tener valores alternos “encendido” o “apagado”, “alto” o “bajo” o pueden ser una variable de control, tal como, un “sí” o un “no”. De preferencia se recomienda usar valores cuantitativos.

Cuando se están determinando los límites que se establecerán para el DoE, se requiere hacer una experimentación preliminar para verificar que el experimento se puede realizar físicamente, esto se hace con una prueba usando los valores altos o bajos.

No hay límite para el número de variables dependientes o factores que pueden ser evaluados. Si una respuesta en particular es la misma en todos los conjuntos de condiciones experimentales, significa que no existe un efecto significativo sobre esta propiedad en el intervalo de procesamiento o condición del producto. Si cada valor de respuesta proveniente del análisis de un conjunto de condiciones de procesamiento es el promedio de 10 mediciones, es posible evaluar la desviación estándar para determinar cuáles condiciones generan los resultados que más se pueden reproducir.

El número de puntos evaluados para cada respuesta experimental depende del número de ensayos requerido para que sea estadísticamente significativo, esto puede incluir a la precisión como los valores que se encuentran cercanos entre sí o la exactitud como una medida del acercamiento del valor promedio con el valor real.

Para determinar qué tan grande debe ser la diferencia en las variables de respuesta con un efecto significativo, es necesario determinar por comparación de magnitudes de diferencias entre las respuestas dependientes en varios puntos de la experimentación.

Los experimentos comprendidos en DoE se hacen de manera aleatoria para minimizar el error sistemático que puede conducir a conclusiones equivocadas. En la medida de lo posible, los experimentos se deben hacer en orden aleatorio y no hacer todas las réplicas o duplicar experimentos uno después de otro [47].

Para realizar el análisis de datos proveniente del DoE, se pueden usar programas de cómputo que predicen que factores independientes e interacciones son significantes para una respuesta en particular, estos generan modelos para predecir la respuesta dependiente en cualquier punto de la experimentación, de igual forma, grafican ecuaciones de los modelos para brindar una comparación visual de la información, predicen las condiciones de proceso experimentales donde la respuesta es máxima y predice o define un intervalo experimental operativo donde las propiedades encuentran las especificaciones o valores deseados. Muchos de los programas de cómputo usan el límite del 95% de confianza, que significa que un factor en particular tiene efecto significativo. El valor de confianza se puede variar a un valor deseado. Algunos programas de cómputo son Desing Expert de Stat-Ease, Inc. Stargraphics Plus, S-Matrix, JPM y MiniTab [47].

Además existen tres diseños experimentales: mezcla de experimentos, diseño factorial y superficie de respuesta. Mezcla de experimentos se usa para optimizar formulaciones donde las variables independientes son ingredientes de una mezcla o receta. La optimización de formulación se basa en medir las propiedades de desempeño sobre diferentes composiciones. El diseño factorial se usa para visualizar el proceso y/o variables de un producto con la finalidad de determinar qué factores son significativos en el control de un proceso. El diseño de superficie de respuesta se usa cuando las variables independientes se han identificado y se requiere tener una mejor descripción de las interacciones en el espacio experimental. Una superficie de respuesta es una representación geométrica obtenida cuando una variable de respuesta es graficada como función de uno o más factores independientes cuantitativos. La superficie de respuesta típicamente reemplaza los diseños factoriales de tres niveles, ya que requiere de menos experimentos para obtener la misma información. A continuación se definen algunos términos usados en diseño de experimentos:

- Modelo estadístico, es un modelo basado en las respuestas o variables dependientes, el modelo es basado en observaciones y mediciones de error.
- Observación es el dato obtenido de la respuesta dependiente para cada conjunto de variables evaluadas
- Dato es caracterizado por términos matemáticos los cuales son: media o promedio, rango, desviación estándar, mediana y coeficiente de variación.
- Lista de diseño experimental es la combinación de los experimentos, donde se muestra la aleatorización, replicación y los niveles de los factores independientes dentro del diseño.
- Efecto es la diferencia en la respuesta promedio entre dos niveles diferentes de un factor dado o entre dos corridas de experimentación
- Factor de efecto es la respuesta promedio para un factor independiente en su valor alto comparado con la respuesta promedio para el mismo factor en su valor bajo.

- Espacio experimental es la región definida por los niveles alto y bajo para los factores independientes en un experimento
- Interacciones ocurren cuando la respuesta es diferente dependiendo de los valores de dos factores.
- Ensayos duplicados o replicas se usan cuando un experimento entero o tratamiento de combinación con el mismo nivel de factores es repetido una o más veces para determinar el error inherente.
- Grado de libertad es el número de comparaciones independientes disponibles para estimar un parámetro. Usualmente es el número de parámetros de un modelo menos 1.
- Error proviene de causas asignables o causas aleatorias. Las causas asignables son variaciones debidas a cambios en los factores independientes que son conocidos y se pueden identificar durante la fase de experimentación. Los errores aleatorios son variaciones descontroladas que son inherentes a las técnicas de medición y métodos de ensayo.
- Análisis de varianza (ANOVA) es un procedimiento matemático para comparar la información de respuesta con la información de error para determinar si una variable independiente o interacción es significativa. Cuando se analiza un DoE, ANOVA usa la suma de los cuadrados para comparar los efectos con la varianza del error para determinar la significancia estadística.
- El ensayo F se usa para conocer la significancia de los factores y las interacciones en un nivel de probabilidad dado. El ensayo F está basado en una distribución de muestras que predicen si los resultados son significativos a un nivel de probabilidad dado, basado en una varianza de muestras. En un nivel predefinido de confianza (75%, 90%, 95%, 99%) el ensayo F predice la probabilidad de que el estadístico F es superior al valor F de tablas. Si el valor F es mayor que el de tablas a un determinado nivel de probabilidad, el factor independiente y/o interacción desde el cual F fue calculado tiene un efecto significativo en la respuesta.
- Modelo es una expresión empírica matemática que describe la variable de respuesta en términos de las variables independientes y sus interacciones entre ellas. Típicamente los modelos son lineales, cuadráticos o cúbicos. El número de pruebas experimentales en el diseño debe exceder el número de términos en el modelo para que el modelo prediga la respuesta en cualquier otro punto dentro de la experimentación.

Kulkarni [36] propone un enfoque en experimentación factorial, ya que se ha comprobado que funciona bien para el proceso de moldeo por inyección. Sin embargo hace la aclaración que el uso de cualquier procedimiento, no solo DoE, debe ser respaldado por un entendimiento completo de los principios más importantes, lo cual ayuda no solo en el entendimiento del análisis si no en lo más importante su interpretación.

La aplicación de DoE para moldeo por inyección es simple ya que la relación entre parámetros y las respuestas del sistema son lineales; por ejemplo puede aplicarse para todas las variables relacionadas a la velocidad de inyección, tales como: presión, tiempo y temperatura [36], siempre y cuando el DoE sea de 2 niveles [48].

Cuando se consideran dos parámetros, presión de mantenimiento y temperatura de masa fundida, y su influencia en la longitud, se requiere realizar cuatro experimentos y determinar la longitud en cada combinación de temperatura y presión, es decir. Baja-baja, baja-alta, alta-baja, alta-alta. Si se agrega otro parámetro, por ejemplo temperatura de molde, se deben realizar ocho experimentos; es decir repetir los cuatro anteriores a baja temperatura y luego los mismos cuatro a temperatura alta del molde.

La terminología es importante para mantener la coherencia a lo largo de este trabajo, a continuación se presentan las definiciones de los términos empleados en el diseño de experimentos.

Cualquier entrada al proceso es un factor, todos los parámetros de proceso que son ingresados a la máquina de inyección son factores; de tal manera que:

Factores de control: Son aquellos que se pueden cambiar cuando sea necesario, por ejemplo la temperatura de molde.

Factores de ruido: Son aquellos que no se pueden cambiar a voluntad, por ejemplo la variación de lote a lote de la materia prima.

Factores constantes: Los que no cambian durante el estudio, por ejemplo la presión trasera o contra presión.

Factores cuantitativos: Son los que se pueden cambiar continuamente en incrementos, por ejemplo la presión de mantenimiento.

Factores cualitativos: Los que se pueden cambiar en niveles discretos por ejemplo los lotes de material.

Cualquier salida del proceso es una respuesta y es el resultado obtenido de varios niveles en los cuales los factores cambian durante la experimentación. La respuesta no puede controlarse directamente. Para obtener un valor de respuesta requerido, el valor del factor debe cambiarse. La dimensiones de las piezas, tiempos de llenado, presiones en las cavidades o la cantidad de ráfagas.

Respuesta cuantitativa: Toda aquella representada por números, por ejemplo peso o longitud

Respuesta cualitativa: También llamada atributo, no están representada por números y describe la condición de respuesta, por ejemplo ráfagas o color.

Un nivel es el número de puntos seleccionados para el factor estudiado. Por ejemplo si se seleccionan un valor bajo y un valor alto de presión de mantenimiento, se tienen dos niveles. Si se seleccionan un valor bajo, central, y alto, se tienen tres niveles.

El número de niveles se selecciona con base al tipo de respuesta del factor. En moldeo por inyección, muchas respuestas de los factores son lineales [36]. Significa que cuando se hace un estudio a un nivel alto y a un bajo nivel, la respuesta a nivel medio de esos dos factores se puede predecir siendo el promedio de las respuestas.

Hay ciertas excepciones, tales como el tiempo de enfriamiento, donde una dimensión en particular puede no variar y cambiar súbitamente en un momento dado, en algunos casos, la presión de mantenimiento puede variar a altos valores. Kulkarni [36] indica que en estos casos es de ayuda tener experiencia y conocimientos de ingeniería. En la mayoría de los casos un experimento de dos niveles seguido de un estudio de confirmación satisface la mayoría de las necesidades, con lo que se obtiene un proceso robusto que al hacer varios experimentos, la meta principal es entender el efecto de los factores en la calidad final de la pieza.

El llevar a cabo un gran número de experimentos puede consumir mucho tiempo y puede ser muy caro. Además de consumir más tiempo la inspección de todas las partes y la recolección de la información para el número de dimensiones consideradas. Algunos diseños populares en moldeo por inyección son los denominados experimentos de proyección, como lo son Diseños Taguchi, Plackett-Burman, Box-Behnken. Los experimentos de proyección son usualmente seguidos por experimentos factoriales completos, en moldeo por inyección no es necesario porque hay pocos factores que realmente hacen la diferencia en la calidad de la pieza. Los experimentos factoriales y el método de

Taguchi son los más usados. La metodología de proyección de Taguchi es la más amigable en cuanto a su uso.

Para ello es necesario formar arreglos ortogonales, los cuales deben cumplir con lo siguiente:

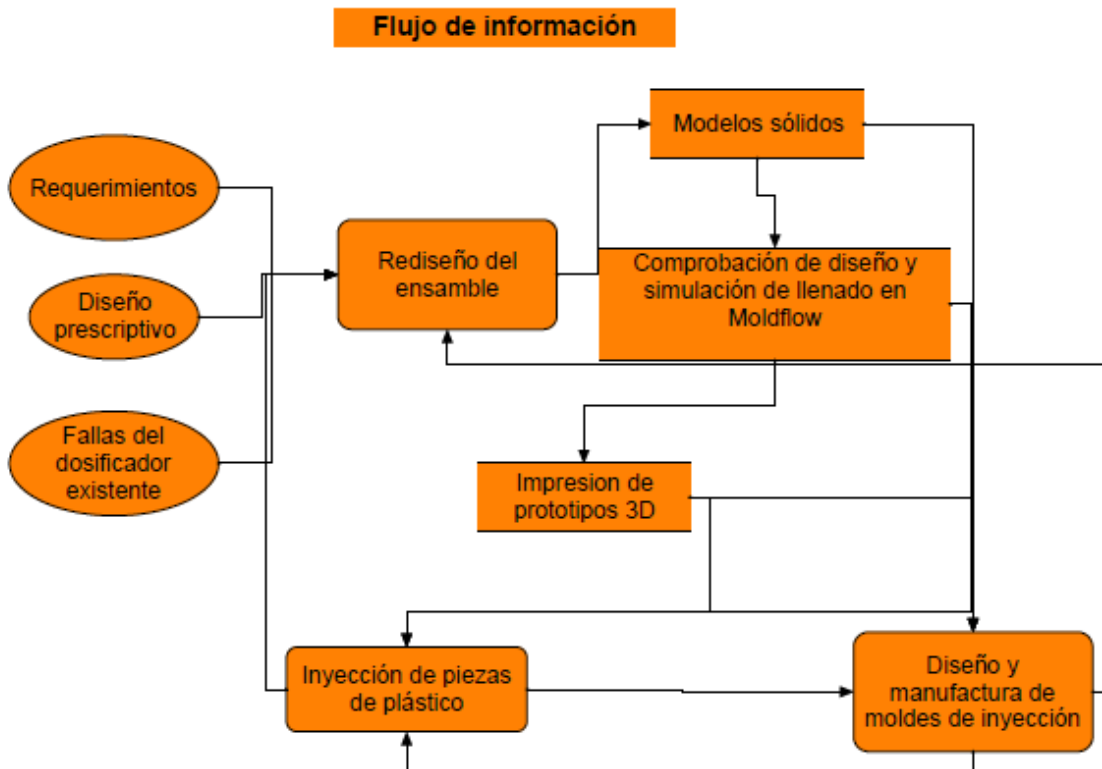
- Para cada factor, se debe experimentar con el mismo número de valores altos y bajos.
- Para cada nivel de factor, se requiere el mismo número de valores altos y bajos.

La importancia de los arreglos ortogonales radica en el hecho de que cada columna y renglón pueden dar un conjunto de información valiosa la cual se puede usar para reducir el número de experimentos a realizar. Mezclando o haciendo experimentos aleatorios se ayuda a dejar fuera efectos externos no controlados.

DESARROLLO DE LOS MOLDES DE INYECCIÓN

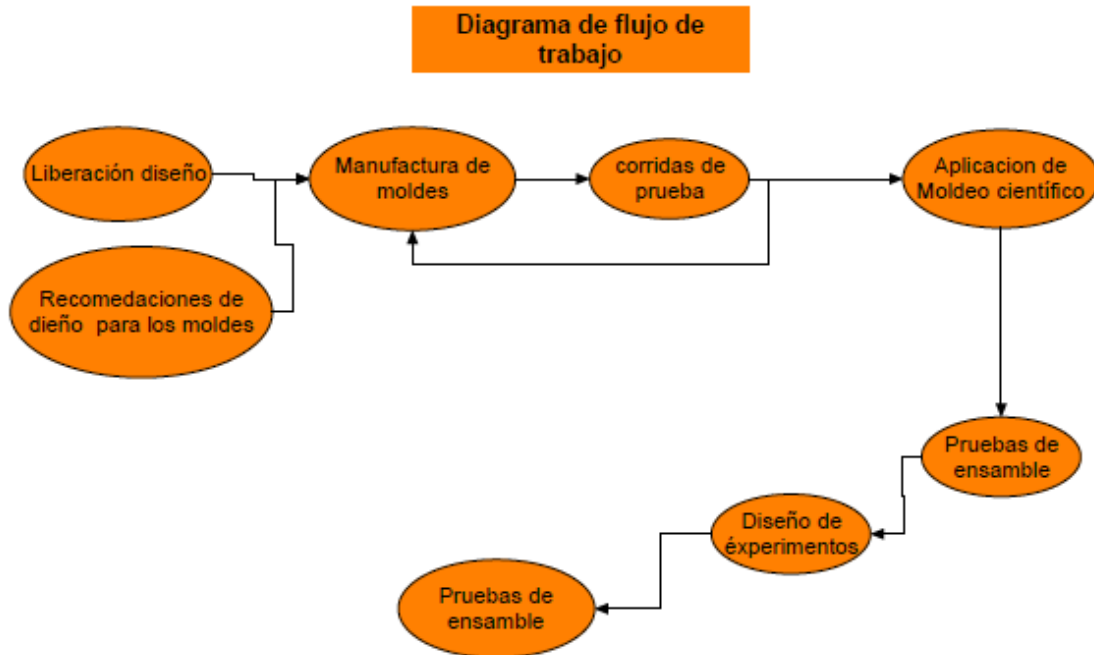
Con la finalidad de ayudar al lector se propone el siguiente diagrama que representa el flujo de información que se presentó durante la realización de éste trabajo. El rediseño del ensamble presentó como entradas los requerimientos del ensamble, conceptos de diseño prescriptivo para piezas de plástico y las fallas del ensamble existente. Además de contar con la realimentación de la empresa de manufactura de moldes y del personal de inyección de plásticos. Las salidas del rediseño fueron modelos sólidos que fueron sometidos a análisis de diseño y de llenado en el software Moldflow Adviser ®. Se realizaron impresiones 3D de los prototipos para evaluaciones de funcionalidad y de ensamble.

Se realizaron reuniones de los equipos de rediseño, inyección y diseño y manufactura de moldes. Se discutieron los resultados de simulación y el comportamiento de los prototipos impresos en 3D. De estas actividades se realizaron cambios al diseño del ensamble hasta su liberación.



En paralelo al rediseño de las piezas se realizó el diseño del molde de inyección, se tomaron como base las geometrías generadas y se realizó el intercambio de información tal como, material a emplear, equipos disponibles para inyección, producción estimada y presupuesto disponible.

La manufactura de los moldes arrancó cuando se liberó el rediseño de las piezas, como lo indica el diagrama de flujo de trabajo. Así mismo se le presentaron recomendaciones de diseño al fabricante del molde. Las recomendaciones basadas en simulaciones de flujo y en la experiencia previa presentada en el trabajo de tesis [2]. Desde esa etapa se dio seguimiento a la manufactura de los herramientas sin interferir en ella hasta las corridas de prueba en el equipo de inyección. Donde los molde fueron reenviados para la corrección de detalles tales como falta de venteos y posos fríos.



Una vez corregidos los detalles de manufactura se aplicó la metodología de moldeo científico para obtener las piezas y conocer la estabilidad y control del proceso. Se realizaron pruebas de ensamble las cuales no fueron satisfactorias. De esta manera fue necesario aplicar diseño de experimentos para conocer el impacto de las variables de proceso en las dimensiones críticas de ensamble y encontrar la combinación de variables que permitieron obtener piezas conformes mediante una segunda etapa de pruebas de ensamble.

El ensamble dosificador, desarrollado en este trabajo, es un mecanismo de apertura y cierre de dos compuertas que van insertadas en una base y accionadas por un actuador o tapa. La idea central de este dosificador fue inspirada en el diafragma de cámara fotográfica, mediante el giro de elementos similares como se presenta en el artículo de la referencia [49]. Debido a que los prototipos moldeados por inyección presentaron problemas de manufactura, ensamble y estéticos presentados en el trabajo de la referencia [2], fue necesario realizar el rediseño del dosificador. Se participó en el rediseño aportando ideas y realizando análisis de diseño con apoyo del software Moldflow Adviser® e impresiones 3D de los modelos sólidos generados, como se encuentra detallado en [50]. En la figura 17 se muestra el ensamble de los modelos sólidos y el dosificador original inyectado en PLA.

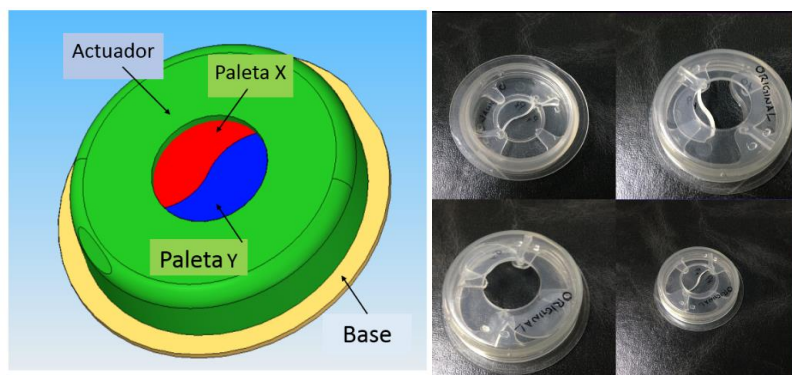


Figura 17 Dosificador de gránulos en modelo sólido e inyectado en PLA [50] y [2]

En la figura 17 se observa la interacción de las piezas. Las paletas (X e Y) son un cuerpo delgado de 2 mm de espesor promedio; cuentan con un ángulo definido entre la superficie superior y el costado lateral. Además, cuentan con una palanca la cual recibe la energía de giro del actuador y la transforma en apertura o cierre del sistema. En el punto de apoyo de la palanca se ubica un perno que se inserta en el barreno de la pieza base. La función de la base es alojar las paletas, mantenerlas en posición perpendicular al eje de salida del producto y además enganchar con la pieza actuador; el sub ensamble paletas-base es introducido en la pieza actuador. La pieza actuador debe conducir la energía de giro, proporcionada por el usuario y transmitirla a las piezas paletas mediante cuatro pernos salientes en su interior. El actuador debe mantenerse enganchado al sub ensamble paletas-base, mediante protuberancias internas acopladas a la geometría tipo canal en la periferia de la pieza base.

Para accionarse, la pieza actuador se debe girar en sentido horario para que muevan las paletas desde la posición de “cerrado” hasta la de “abierto” (figura 17) y se dosifiquen los gránulos provenientes del producto de consumo. El rediseño del dosificador de gránulos se muestra en la figura 18.

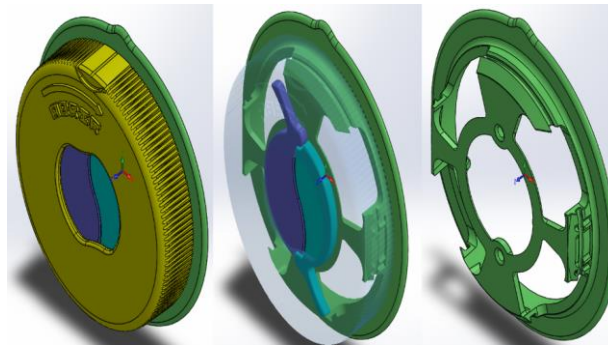


Figura 18 Modelo sólido del dosificador rediseñado

El diseño de los moldes fue realizado teniendo en cuenta que cada uno deberá permitir una producción global de 1,000 ensambles en un mes. El molde deberá ser capaz de formar al dosificador hecho en plástico biodegradable PLA Ingeo Nature Works 3105D. Los moldes con el sistema de alimentación con de canal caliente son el de bases y actuadores, el molde para paletas se alimenta mediante colada fría. Los moldes base y actuadores deben tener capacidad de compartir el sistema de canal caliente. Los moldes deben ser compatibles al equipo de inyección Demag Ergotech 50-270.

Aunque el rediseño de las piezas que conforman al dosificador, fue presentado en la tesis de licenciatura de Nacar [51], se contribuyó en el diseño de los moldes de inyección para las piezas mostradas en la figura 18, recolectando información, proponiendo distribuciones de cavidades, tamaño de sistema de alimentación, sistemas de refrigeración y propuestas de expulsión.

Los equipos disponibles a usarse durante el moldeo de las piezas fueron, un enfriador de fluido para control de temperaturas de moldes y garganta de alimentación, capacidad de 3.5 toneladas de refrigeración y caudal máximo de 30 [l/min], el rango de temperaturas del fluido refrigerante es de 11-7 °C. Un controlador para cuatro resistencias eléctricas, con capacidad máxima de 240[V] y 3600 [W], figura 19.



Figura 19 Enfriador de fluido para control de temperatura de moldes y garganta marca friomold y controlador de temperatura para los moldes de inyección, en el Laboratorio de Procesamiento de Plásticos, Facultad de Ingeniería, UNAM CU.

Para la remoción de humedad del PLA se emplearon los equipos generador de aire seco marca Luxor 50 y la tolva de secado BS 60 marca Motan ® figura 20.



Figura 20 Equipo para remoción de humedad de la materia prima

La figura 21 muestra el equipo de inyección donde los moldes deben de operar. La fuerza de cierre de la máquina de inyección de plásticos es de 500 KN, el husillo con el que cuenta es uno de propósito general de 35mm de diámetro, la presión máxima de inyección es 1800 Bar, el tamaño máximo de disparo es de 128 g de PS. El equipo Demag cuenta con platinas estándar, de acuerdo con la norma europea de maquinaria para plásticos y cauchos EUROMAP. La distancia entre columnas es de 350mm.



Figura 21 Máquina de inyección Demag ergotech pro 50-270 en el Laboratorio de Procesamiento de Plásticos, Facultad de Ingeniería, UNAM CU

El polímero moldeado en este estudio fue el llamado PLA Ingeo TM Biopolymer 3251D de la empresa NatureWorks® del cual la ficha técnica se encuentra en el apartado de anexos. Algunas características importantes a considerar en este trabajo son: la temperatura de transición vítrea, T_g , cuyo intervalo está entre 55-58°C. El PLA se recristaliza de 95 a 120°C. Los pelles se encuentran con una estructura semi-cristalina pero una vez transformados las piezas presentan morfología amorfa. El material presenta una contracción de 0.004 +/- .001 [in/in], según ficha técnica. Las temperaturas de procesamiento recomendadas por el fabricante se pueden visualizar en la tabla 3:

Tabla 3 Temperaturas de procesamiento recomendadas por el fabricante de PLA

PARÁMETRO	VALOR RECOMENDADO
Temperatura de garganta de Alimentación	20°C
Temperatura de Alimentación	166-177 °C
Temperatura de Compresión	182-193 °C
Temperatura de dosificación	188-205°C
Temperatura de boquilla	188-205°C
Temperatura de molde recomendada	25°C
Temperatura de masa fundida	188-210 °C
Temperatura recomendada de molde	25°C

Se tomó como modelo las dimensiones de un porta molde que opera de manera adecuada en el equipo Demag, con ello se propusieron las siguientes dimensiones, figura 48.

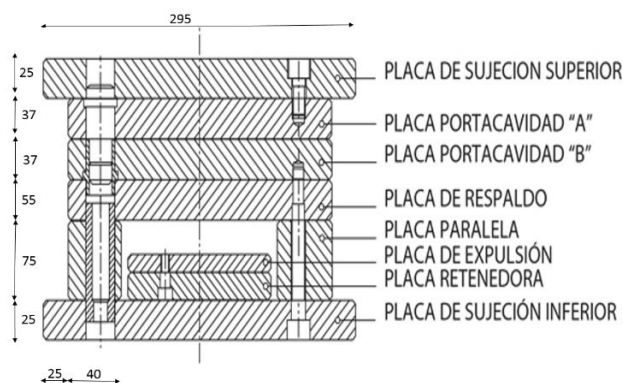


Figura 22 Esquema de las placas de porta molde tomado como modelo y sus dimensiones.

Complementando la información de la figura 22, la geometría de las placas de sujeción, superior e inferior, es un cuadrado de 295[mm] por lado, las placas porta cavidad A y B, y placa de respaldo son cuadradas de 250[mm] por lado, las placas paralelas tienen geometría de prisma rectangular de 40 x 75 x 295 [mm], las placas de expulsión y retenedora de 155 x 295 x 12.5 y 17.5 [mm] respectivamente.

- ✓ Altura de molde (H)=254mm
- ✓ Ancho de molde (W)=295mm
- ✓ Longitud del molde (L) =250mm

Debido a que dos de los moldes tienen contemplado el uso de un sistema de canal caliente, el espesor total se incrementó, al igual que las placas porta cavidades. De esta actividad se obtuvieron las dimensiones sobre las cuales se pueden distribuir las cavidades y se obtuvo una idea del tamaño del sistema de canal caliente.

Se propuso, para cada geometría, un sólo punto de inyección. Mediante análisis en MFA® se estimó la mejor zona para colocar el punto de inyección, es decir la región, en la geometría de la pieza, que ofrece menor resistencia al flujo de plástico y con mayor espesor.

En la figura 23 se puede observar en color azul la mínima resistencia que presenta cada geometría y en color rojo la máxima, las zonas donde la pieza ofrece menor resistencia son las recomendadas para poseer el punto de inyección. La ubicación de los puntos de inyección recomendadas por MFA® se presentan en la figura 24, la cual es un gráfico RGB que basado en los resultados de la resistencia del flujo indica las mejores regiones de inyección. Estos análisis están basados en el algoritmo avanzado de localización de punto de inyección de MFA®. Este localiza las regiones óptimas mediante la minimización de la resistencia al flujo y no requiere que se le especifique parámetros de proceso.

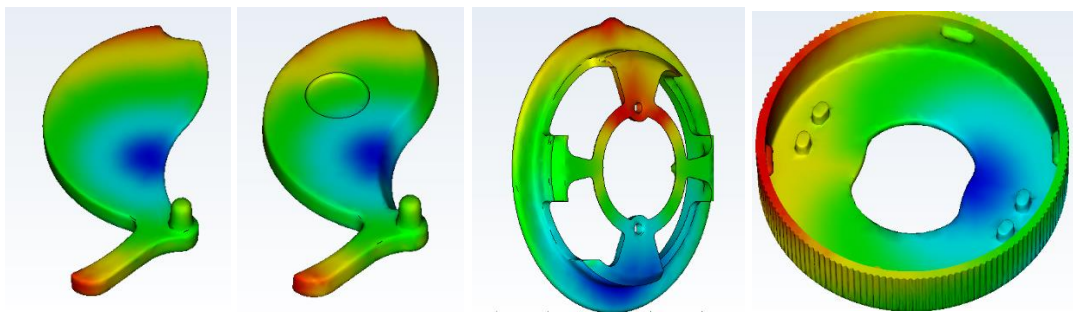


Figura 23 Gráfico RGB de resistencia al flujo de plástico en las geometrías del ensamble, Paleta X, paleta Y, base y actuador. El color azul corresponde a la mínima y el color rojo a la máxima resistencia

A partir del análisis presentado en la figura 24, las paletas pueden ser inyectadas por el centro de su geometría. Para el caso de la pieza base, la mejor región de inyección es en cualquiera de las paredes perpendiculares a las superficies donde se encuentran los barrenos para las paletas. Es conveniente que el punto de inyección se encuentre en la superficie superior, cercana al círculo de dosificación.

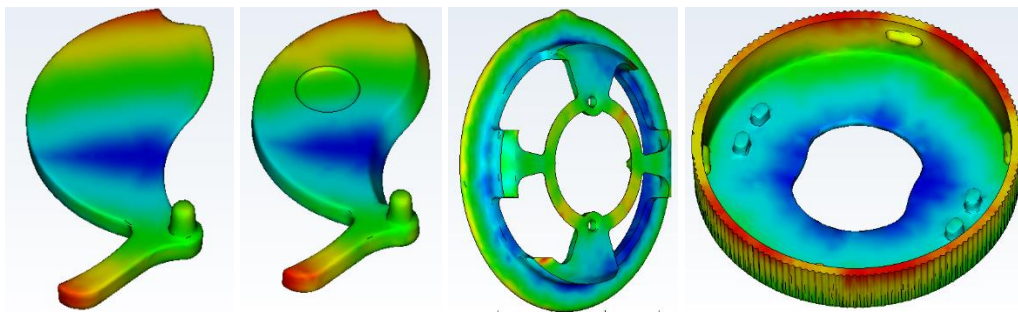


Figura 24 Gráfico RGB de la mejor zona de localización para el punto de inyección según análisis de MFA® en geometrías del ensamble, Paleta X, paleta Y, base y actuador. El color azul representa la mejor región para colocar el punto de inyección, el color rojo representa las zonas donde no se recomienda localizar el punto de inyección.

Debido al tamaño de las platinas porta molde, que los moldes son prototipo y por recomendación de la empresa de manufactura de moldes, se decidió que el número de cavidades para el molde de paletas sea de 4; es decir, dos cavidades para paletas X y dos cavidades para paletas Y. Por el tamaño de las piezas se calculó que el molde para bases fuese 2 al igual que el de actuadores. Para el molde de bases y de actuadores se propuso que el inyector quedara justo en las cavidades.

Basado en los sistemas de colada caliente (HRS) comerciales, para 2 inyectores, se usó como modelo el distribuidor de plástico, marca EWIKON-L2X-TE, el cual tiene como distancia entre puntos de inyección 68 mm, (ver anexo). Este sistema cuenta con diámetro de canal igual a 6mm. El diámetro de bebedero y de los inyectores se fijó en 6mm. Del catálogo de inyectores de HASCO® se obtuvo el valor promedio de diámetro para el punto de inyección, que va desde 0.5-1 mm, se seleccionándose el valor de 1 mm. Con esta información se realizó la distribución de cavidades en MFA®. Figura 25.

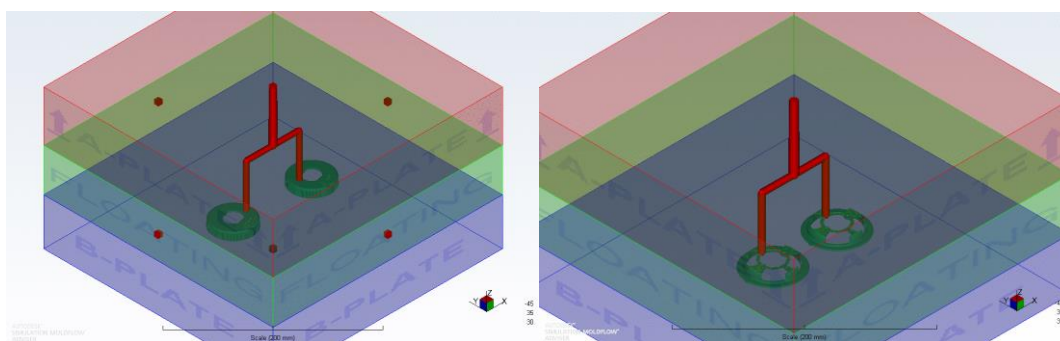


Figura 25 Distribución de cavidades para el molde de actuadores y bases

En la figura 25 se muestra la distribución de cavidades con los diámetros y longitudes propuestas, las placas tienen las dimensiones del porta molde usado como base.

Para el molde de paletas se propuso como diámetro de bebedero 6mm, para el canal principal y secundario 4mm. La propuesta del diámetro de los puntos de inyección fue de 3mm y 2mm de longitud. La distribución de cavidades para el molde de paletas se presenta en la figura 26.

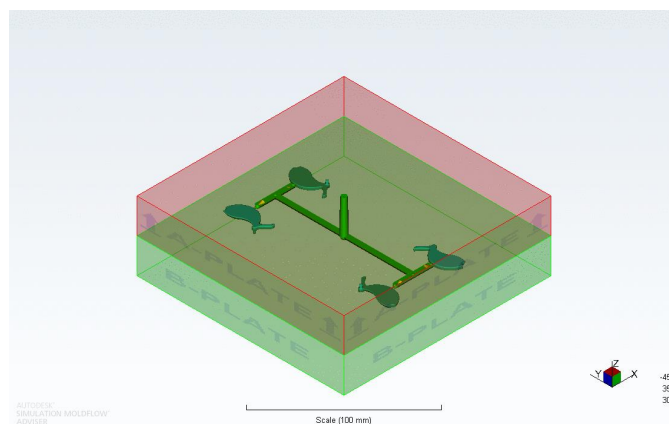


Figura 26 Distribución de cavidades para el molde de paletas

Posterior a la propuesta de distribución y tamaño de los sistemas de alimentación. Se procedió a realizar simulaciones de llenado en las cavidades por medio del simulador Moldflow Adviser (MFA) ® con el fin de verificar que la presión de inyección requerida no superara a la máxima disponible en el sistema. Además se verificó el balanceo de las cavidades y el perfil del flujo plástico dentro de las mismas. Con la simulación del flujo, se localizaron las líneas de soldadura y las zonas donde el aire tiende a atraparse. Se analizó, en primera instancia, la propuesta para el molde de actuadores. Se utilizó el análisis 2D, el material empleado de la base de datos de MFA® fue Nature Works 3251D, de acuerdo al simulador, el parámetro de temperatura de masa fundida se estableció en 190°C, la temperatura de molde 25°C, la presión máxima de inyección se estableció en 180 MPa, el tiempo de inyección seleccionado fue automático, el MFA ® hizo la conmutación de velocidad de inyección a presión de mantenimiento al 90% del llenado de la pieza. Para la simulación se usó como material del molde el acero para herramienta P-20.

Las imágenes y resultados de las simulaciones se encuentran en el apartado de anexos al final de este documento, estos resultados mostraron que las piezas se pueden inyectar en el equipo disponible, pues no excedieron la presión de inyección disponible, ni la fuerza de cierre.

El diseño de la refrigeración se realizó haciendo uso de la herramienta de MFA®. Para ello se decidió que la profundidad de los canales estuviera a 2 veces el diámetro de los mismos. El diámetro de los canales de refrigeración se propuso en 10 mm, de esta manera la profundidad de ellos fue de 20 mm, con lo cual los espesores de las placas porta cavidades se ajustaron a 40 mm, para que la línea de refrigeración estuviera a la mitad del espesor. Los parámetros de la simulación fueron, flujo del refrigerante de 3.4 l/m, temperatura de 11°C, se tomó como refrigerante agua pura. Las configuraciones de los canales de refrigeración se muestran en la figura 27 y los resultados emanados de la simulación se encuentran en el apartado de anexos.

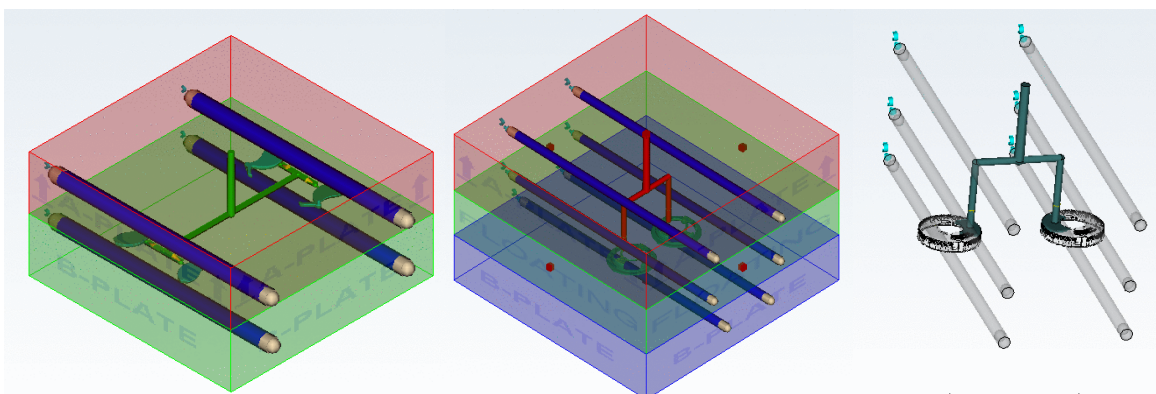


Figura 27 Propuesta de distribución de canales de refrigeración para los moldes de las piezas del ensamble

Como se puede apreciar en la figura 27, el molde de paletas cuenta con dos canales de refrigeración por placa de cavidades, colocados sobre las cavidades justo al centro de ellas. Las entradas de los canales se dispusieron en el mismo lado del molde. Para el molde de bases, se dispusieron dos líneas de refrigeración para la placa anterior que contiene el HRS, de igual manera las placas porta cavidades

tienen dos líneas. Las entradas se encuentran en el mismo lado. Las líneas de refrigeración para el HRS tienen las mismas características, pues este sistema se diseñó para ser común al molde de bases y actuadores. La tabla 4 muestra el resumen de los resultados obtenidos en la simulación para el molde de paletas.

Tabla 4 Resultados de simulaciones de llenado considerando la refrigeración para el molde de paletas

Respuesta de la simulación MFA ®	Valor
Tiempo de llenado	0.89 s
Presión de inyección	551.5 Bar
Fuerza de cierre máxima durante el ciclo	4.698 toneladas
Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión	6.178 s las piezas y 25.01 s la vela
Tiempo de ciclo	40.73 s
Tiempo de mantenimiento	10 s
Calidad del enfriamiento	Las piezas tendrán problemas grandes con el enfriamiento y puede causar problemas con la expulsión. El refrigerante es muy frío (11°C) para la temperatura objetivo del molde (25°C). No se alcanzó la temperatura objetivo del molde.
Gradiente de temperatura en las líneas de refrigeración	0.16 °C
Número de Reynolds en el circuito	5618.2
Máxima contracción volumétrica	8.349%
Contracción en diámetro de perno paleta x	4.26%
Contracción en diámetro de perno paleta y	4.26%
Deflexión nominal máxima	0.75mm
Deflexión longitud de ensamble (reducción) tomando como referencia el punto de inyección	0.3mm

En la tabla 4 se puede observar que la presión de inyección no excedió la máxima disponible en la máquina. La fuerza de cierre tampoco excedió la disponible en la máquina. De acuerdo a la simulación, el tiempo para alcanzar la expulsión de la pieza es de 6 s, pero la colada no alcanza la

temperatura de expulsión hasta los 25 s, con lo cual se estimó que si se abre el molde antes de este último tiempo, es posible que la colada se rompa interrumpiendo el ciclo. Se puede apreciar que esta es una desventaja de los moldes de colada fría ante los moldes con HRS. El gradiente de temperatura en las líneas de refrigeración es de 0.16 °C, lo cual es un valor aceptable para piezas de plástico de uso convencional, no así para piezas de ensamble donde se recomienda que el gradiente sea máximo 0.1°C [34]. La simulación corrobora que el flujo dentro de las líneas de refrigeración se encuentra en un régimen turbulento, pues el número de Reynolds es de 5618.6. Desde estas simulaciones se pudo hacer la estimación de contracción y deflexión en las regiones críticas de ensamble, que se detallaran más adelante. Para el caso del molde de bases el resumen de los resultados de simulación se encuentra en la tabla 10 en los anexos.

Tabla 5 Resultados de simulaciones de llenado considerando la refrigeración para el molde de bases

Respuesta de la simulación MFA ®	Valor
Tiempo de llenado	0.98 s
Presión de inyección	430.95 Bar
Fuerza de cierre máxima durante el ciclo	8.922 toneladas
Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión	4.19 s las piezas y 16.78 s el punto de inyección
Tiempo de ciclo	35 s
Tiempo de mantenimiento	10 s
Calidad del enfriamiento	Las piezas tienen algunos problemas pequeños y podría no enfriar satisfactoriamente.
Gradiente de temperatura en las líneas de refrigeración	0.19 °C
Numero de Raynolds en el circuito	5618.2
Máxima contracción volumétrica	7.257%
Contracción en diámetro de barrenos	3.18%
Deflexión nominal máxima	0.53mm
Deflexión del diámetro de enganche (reducción)	0.24mm
Deflexión del diámetro de riel (reducción)	0.24mm
Deflexión de la distancia entre perímetros internos (reducción)	0.08mm

Tabla 6 Resultados de simulaciones de llenado considerando la refrigeración para el molde de actuadores

Respuesta de la simulación MFA ®	Valor
Tiempo de llenado	0.81 s
Presión de inyección	262.87 Bar
Fuerza de cierre máxima durante el ciclo	6.19 toneladas
Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión	4.47 s las piezas y 17.9 s el punto de inyección
Tiempo de ciclo	35 s
Tiempo de mantenimiento	10 s
Calidad del enfriamiento	Las piezas tienen algunos problemas pequeños y podría no enfriar satisfactoriamente.
Gradiente de temperatura en las líneas de refrigeración	0.23 °C
Numero de Raynolds en el circuito	5618.2
Máxima contracción volumétrica	6.735%
Contracción en protuberancias internas	3.3%
Deflexión nominal máxima	0.64mm
Deflexión de la distancia 1 (reducción)	0.21mm
Deflexión de la distancia 2 (reducción)	0.26mm

De los resultados presentados en las tablas 4,5 y 6, se puede observar que la presión de inyección es más elevada en el molde de paletas con 551.5 Bar. El cual cuenta con un sistema de colada fría. El molde para actuadores requiere la menor presión de inyección de 262.87 Bar y al igual que el molde para bases cuentan con sistema de canal caliente. Se puede deducir que la implementación de HRS reduce la presión de inyección requerida para moldear piezas incluso con mayor volumen.

Los tiempos de ciclo para los moldes son superiores en el caso del molde de paletas con 40.73 s, ya que los moldes de bases y actuadores presentaron un tiempo de ciclo de 35 s. El incremento del tiempo de ciclo se debió a que para el molde de paletas, la expulsión requiere que la colada se encuentre lo suficientemente fría para su expulsión. Si la vela no se encuentra a la temperatura correcta de

expulsión se fracturará al momento de la apertura de molde, causando un paro de la producción de al menos 5 minutos, según experiencia previa. Sin embargo los tiempos de ciclo son elevados para el número de piezas y su tamaño. El tiempo de ciclo se puede reducir sin alterar la calidad de las piezas, disminuyendo el tiempo de apertura de molde acelerando la apertura y cierre del mismo. Además de ajustar la apertura del molde a la mínima en la cual las piezas puedan ser expulsadas sin posibilidad de quedar atrapadas entre las placas del molde. Con los moldes de HRS es posible reducir la apertura de molde pues las piezas serán expulsadas sin la colada.

Las simulaciones permitieron visualizar desde esta etapa la contracción volumétrica estimada y la deflexión en las regiones de interés. La máxima contracción volumétrica se encuentra manifestada en el molde de paletas 8.349% (colada fría) y los moldes con HRS tienen 7.25% y 6.73 % para el molde de bases y actuadores respectivamente.

Para el caso de las paletas, el diámetro de perno se estimó que contraería el 4.26%, es decir si sus diámetros de diseño son de 1.96mm y 1.72mm el diámetro esperado según MFA® es de 1.87mm y 1.64mm. Estos pernos van ensamblados en los barrenos de la pieza base, los cuales tienen como diámetro de diseño 1.79mm, la contracción en esa región estimada de la simulación fue de 3.18%, el diámetro que tendrán esos barrenos será de 1.73mm. Con lo cual se estimó que los pernos tendrán una holgura de 0.09mm y un ajuste por interferencia de 0.14mm.

El ensamble entre paletas y la pieza base está relacionado con la distancia que guardan los barrenos de la base con la longitud de las paletas. La distancia entre perímetros internos de los barrenos de la pieza base es igual a 21.21mm de diseño, la deflexión de los barrenos estimada por la simulación fue de 0.08mm, es decir la distancia entre perímetros internos de los barrenos será de 21.13mm. Las longitudes de ensamble de las paletas fueron diseñadas a 22.51mm y 22.72mm para la paleta X y Y respectivamente, la simulación manifestó que estas longitudes tienen una deflexión de 0.3mm, con lo cual las longitudes después de la inyección, de acuerdo a la simulación serán de 22.21mm y 22.42mm para las paletas X y Y respectivamente.

Cuando el ensamble del dosificador se encuentra en la posición de cerrado, las paletas tienen un claro entre ellas de 0.29 mm y 0.31 mm (claro 1 y claro 2) respectivamente. Estos claros fueron afectados por la deflexión de las piezas, resultando en 0.51 mm y 0.53mm respectivamente. De tal manera que se estima que no habrá interferencia entre las paletas al cierre del dosificador. Y este permanecerá cerrado por acción del actuador y probablemente por el ajuste de los pernos de las paletas en los barrenos de la pieza base.

El ensamble se diseñó para que al acoplar la pieza actuador a la pieza base existiera un enganche entre las protuberancias internas del actuador y el perfil exterior de la pieza base. Para ello, el diseño indica que la interferencia entre la distancia 1 y 2 de la pieza actuador y el diámetro de enganche de la pieza base sea de 1.19mm y 1.17mm respectivamente. El diámetro de enganche de diseño es de 44.75mm y después de la simulación se estimó el valor del mismo en 44.51mm. La deflexión estimada por MFA® fue de 0.21mm y -0.24mm, con lo cual la distancia 1 y 2, se estima, medirán 43.35mm y 43.82mm. La interferencia estimada entre estas piezas es 1.16mm y 0.69mm para la distancia 1 y 2 respectivamente con el diámetro de enganche. Con lo cual se prevé que el ensamble entre estas piezas será menos enérgico ya que las interferencias disminuyeron con lo que disminuirá la fuerza que se debe aplicar para el ensamble.

Una vez acopladas las piezas actuador y base, el actuador tendrá que girar concéntricamente entorno a la base, para ello el diseño dispuso de unas protuberancias internas en el actuador y un perfil tipo canal en la pieza base. El diseño tiene como diámetro de riel 43mm. Existe un claro de 0.56mm y 0.58mm entre este diámetro y la distancia 1 y 2. La deflexión del diámetro de riel se estimó 0.24mm, por lo cual, el diámetro de riel deflexionado fue 42.76mm con lo cual el espacio entre las piezas deflexionadas es de 0.59mm y 1.06mm, lo que indica que la pieza actuador tenderá a girar holgadamente con respecto a la base.

Del trabajo [2] se tomó el diseño de los sistemas de expulsión para las piezas paletas y bases. El sistema de expulsión para el molde de actuadores fue propuesto por la empresa Dimaq, este consistió en un sistema de levantadores que libera las piezas sin dañar sus protuberancias internas. Se le hizo llegar la información antes detallada a la empresa donde se complementó el diseño de los moldes, con el uso de partes comerciales en el sistema de canal caliente y porta moldes. Las cavidades y demás sistemas fueron maquinados especialmente para cada requerimiento del molde. Cabe señalar que, aunque las empresas dedicadas a fabricar moldes implementan sus diseños propios, en este caso, la empresa tuvo la disposición de apoyar el proyecto, respetando las ideas de diseño original.

APLICACIÓN DE MOLDEO CIENTÍFICO

Una vez que los moldes estuvieron en el Laboratorio de Procesamiento de Plásticos, se procedió a realizar la conexión de las mangueras de refrigeración, figura 28. Este molde requiere refrigeración en la placa de respaldo (PR), placa porta cavidades de lado de inyección (PCI) y placa porta cavidades lado móvil (PCM).



Figura 28 conexiones de refrigeración al molde de las bases

La PR contiene una entrada y una salida para refrigerante, mientras que la PCI requiere dos entradas y dos salidas una para cada inserto porta cavidad, de igual manera para la PCM. El molde requiere de cinco canales de refrigeración, debido a que la máquina empleada sólo cuenta con cuatro, se decide por hacer un puente entre la salida de la cavidad 1 de la PCM (PCM-AL) con la entrada de la cavidad 2 de la PCM (PCM-OP). Los canales disponibles en el equipo de inyección son controlados por fluxómetros para agua, figura 30, con graduación de 0 a 8.



Figura 29 Fluxómetros de control para los cuatro canales de refrigeración en el equipo DEMAG ergo tech 50270

Este caudal de agua es refrigerado por el equipo friomold, que provee enfriamiento a la máquina, la temperatura de trabajo se colocó en 11°C. La configuración de refrigeración se describe en la tabla 7, donde se puede observar cómo se controla la refrigeración de las cavidades a través del flujo de refrigerante que entra a la temperatura de 11°C con el objetivo de mantener la temperatura en las cavidades a 25°C durante el ciclo continuo.

Tabla 7 Configuración de refrigeración del molde

Canal	Placa-cavidad	Valor del fluxómetro	Equivalente del flujo en [l/min]
1	PR	2.5	3.8
2	PCI-OP	1.5	3.58
3	PCM	1.5	3.58
4	PCI-AL	1.5	3.58

Las otras temperaturas a controlar son las de los elementos calefactores del sistema de canal caliente, tales como el bebedero, distribuidor de plástico y los inyectores 1 (AL) y 2 (OP). Para ello se utilizó el controlador mostrado en la figura 30, en él se pueden observar las temperaturas necesarias para que el plástico fluya sin inconveniente a través de las zonas del sistema de colada caliente.



Figura 30 Controlador de resistencias del sistema de canal caliente, de izquierda a derecha, zona 1 controla la resistencia del bebedero, zona 2 controla la resistencia del distribuidor de plástico, zona 3 controla inyector 1, y zona 4 inyector 2

Una vez alcanzadas las temperaturas tanto de la inyectora como del sistema de canal caliente se realizaron tiros o inyecciones de prueba con el material PLA, figura 31. Estas figuras muestran las piezas actuador y base, respectivamente, justo en el momento de la expulsión. Para la validación de los moldes y encontrar los parámetros de procesamiento adecuados para cada pieza se procedió con el análisis mediante moldeo científico.

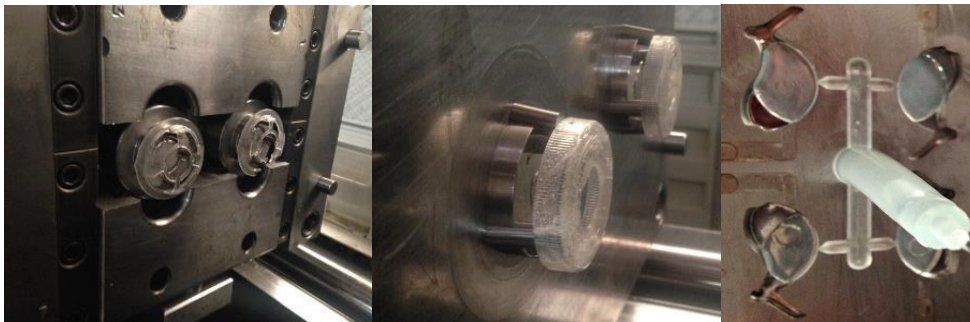


Figura 31 Primera corrida de inyección de la pieza actuador, base y paletas

El primer paso para moldear las piezas, es asegurarse que las temperaturas en el cañón de inyección, garganta, sistema de canal caliente y cavidades son las recomendadas por el proveedor del plástico a emplear. El siguiente paso es cargar la tolva de alimentación con el material previamente deshumidificado, para el PLA el tiempo de secado recomendado por el fabricante es de 7 a 8 horas a

60 °C con un flujo de 0.25 cfm/lb (0.25 pies cúbicos por minuto por cada libra de pellets a secar), es decir $0.937 \frac{m^3}{h Kg}$. Para secar 25Kg de PLA se requiere de $23.44 \left[\frac{m^3}{h} \right]$ de aire @ 60°C durante 7 horas. Se cuenta con el secador de aire seco Luxor 50 ® y la tolva de 60 litros cuyo caudal es de aproximadamente $50 \frac{m^3}{h}$. El caudal del secador es 2.13 veces el requerido, por esta razón el secado del PLA se mantuvo de 3.5 a 4 horas a 60°C.

Una vez cargado el material en la tolva, se fijó el valor de velocidad angular para el husillo en el recomendado por el proveedor, para este caso el PLA requiere de 100 a 200 RPM, se optó por usar el valor intermedio de 150 RPM. Se procedió a llenar el cañón de inyección con el movimiento angular del husillo hasta que el PLA salió libre de partículas sólidas e impurezas y con un aspecto translucido amarillento por la nariz de la inyectora. Posteriormente se acopló la nariz de la inyectora con el bebedero del molde y se repitió la operación de hacer girar el husillo hasta que el material salió por los inyectores del molde de manera consistente.

En la pantalla de control de proceso del equipo de inyección, figura 32, se colocó el valor de velocidad de inyección en el máximo disponible, para este equipo (119 mm/s). El valor de la presión de inyección se fijó en el máximo permitido para la Inyectora DEMMAG, 1800 Bar, el valor de presión y tiempo de mantenimiento se situó en cero, se colocó un tiempo de enfriamiento que permitió realizar la experimentación y fue suficiente para expulsar las piezas rígidas, con base en las simulaciones de MFA ®, se decidió usar el valor de 10 s. Se agregó tiempo de retardo igual a 8 s. Posterior a ello se manipuló la parada de dosificación y punto de conmutación para lograr una pieza al 90% de su volumen.

DEBE		ES	DEBE		ES
TIEMPO CONTROL CICLO [s]	200.0	0.1	RETROCESO SC [mm]	14.0	15.4
TIEMPO DE BLOQUEO [s]	0.00	0.00	PARADA DE DOSIF. [mm]	11.0	11.0
TIEMPO DE PAUSA [s]	0.00		COJIN DE MASA [mm]		5.0
TIEMPO DE INYECCION [s]	0.59	0.59	P. POST. C. DE HUS. [mm]	5.0	5.0
TIEMPO DE DOSIFIC. [s]	0.68	0.68	TIEMPO P. POST. [s]	45.00	0.59
PRESION INVECC. [Bar]	1800	369			
VELOCIDAD INVECC. [mm/s]	119				
TIEMPO PRES. POST. [s]	0.0				
PRESION POST. [Bar]	0	370			
TIEMPO DE ENFRIAM. [s]	10.00		PERFIL DE INVECC. [mm]		
RETARDO DOSIFIC. [s]	8.00		PERFIL PR. POST. [mm]		
REVOLUCION [U/min]	150	0	PERFIL DE DOSIF. [mm]		

Figura 32 Fijación de los parámetros de inyección iniciales en el moldeo científico

La parada de dosificación en la máquina de inyección se calculó, primero, estimando el porcentaje del tamaño de disparo requerido, este porcentaje brindó una idea de la cantidad de plástico a inyectar con respecto a la cantidad máxima disponible por la máquina.

El porcentaje del tamaño de disparo debe estar entre el 20 y 80% del disponible en la máquina [36], si el porcentaje es menor al 20%, se presentarán inconsistencias en llenado, porque la presión y velocidad del tornillo requieren cierto tiempo para desarrollar y alcanzar los valores requeridos de velocidad. Ya que la presión alcanzada es detenida súbitamente y el momentum es impredecible conduciendo a variaciones grandes. Se recomienda estar entre el 30-35% para el caso de sistemas de colada caliente, es un reto transferir la presión aplicada por el husillo a través del canal caliente, ya que la fuente de la fuerza (punta del husillo) está alejada del punto de inyección. Debido a que el plástico está en estado visco elástico es compresible, entonces, la fuerza no se transmite fácil y eficientemente. La tabla 8 contiene la información necesaria para estimar el porcentaje de tamaño de disparo.

Tabla 8 Volúmenes y masas de los elementos del dosificador y de los canales de alimentación caliente

Pieza	Actuador	Base	Paleta x Y	Paleta	Bebedero	Distribuidor	Injectores
Volumen cm³	7.76	4.518	0.91	0.897	1.45	1.87	0.79
Masa g	4.242	2.393	0.618	0.484	1.798	1.87	0.79

Aplicando la ecuación 10.

Ecuación 10 Porcentaje del tamaño de disparo usado

$$\% \text{ tamaño de disparo usado} = \frac{[(\text{peso de la pieza} \times \text{numero cavidades}) + \text{peso de los canales}] \times \left(\frac{\rho_{PS}}{\rho_{PLA}}\right)}{\text{tamaño de disparo de la máquina}}$$

Se obtuvieron los siguientes porcentajes de tamaño de disparo para cada geometría, tabla 9.

Tabla 9 Porcentaje del tamaño de disparo que guardan las piezas del actuador

Pieza	Porcentaje de tamaño de disparo
Actuador	8.64
Base	6.17
Paletas	4.44

Los resultados de la tabla 9, indican que habrá inconsistencias de llenado de las piezas disparo a disparo. Para determinar el valor de la carrera de dosificación se aplicó la siguiente ecuación.

Ecuación 11 Determinación de la carrera de dosificación en el equipo de inyección empleado

$$PD = \frac{Vp}{\frac{\pi r_h^2}{2}}$$

Donde:

PD = carrera de dosificación

Vp = volumen para llenar las cavidades

r_h = Radio del husillo

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 10:

Tabla 10 Carreras de dosificación estimadas para los diferentes moldes

Pieza	Carrera de dosificación [mm]
Actuador	16.13
Base	10.80
Paletas	3.75

La información mostrada en la tabla 10, sirvió de guía durante la determinación de parámetros. En el proceso de inyección es necesario manejar un cojín de masa de al menos 3 mm, por experiencia en el proceso de inyección es necesario incrementar el mismo valor, para el punto de conmutación y el de carrera o parada de dosificación, con este ajuste el cojín de masa se incrementa y se tiene mayor consistencia del proceso.

El primer parámetro que se determinó usando el moldeo científico fue el de velocidad de inyección, que está relacionada con la viscosidad aparente del plástico, para ello se manipulo la carrera de dosificación, retroceso y punto de conmutación, este último refiere al valor en la carrera del husillo donde se deja de aplicar la velocidad de inyección para aplicar la presión y tiempo de mantenimiento. Haciendo uso de los valores de la tabla 10 y se llenaron las cavidades al 90 % de su volumen. La tabla 11 muestra los parámetros establecidos con los que se alcanzó el volumen esperado.

Tabla 11 Parámetros manipulados para lograr disparos cortos en el estudio de la curva de viscosidad.

Parámetro	Bases	Actuadores	Paletas
Carrera de dosificación [mm]	11	14	22
Retroceso [mm]	14	17	22
Cojín de masa [mm]	5	9.5	8.6
Punto de conmutación [mm]	5	10	20

Posteriormente se procedió a realizar 5 inyecciones y tomar el valor promedio del tiempo de inyección y de la presión de inyección requerida, estos valores se multiplicaron por el factor de intensificación de husillo (7.88 para la inyectora DEMAG ERGO TECH 50-270 [2]). El resultado de este producto fue la viscosidad aparente en función de la velocidad de inyección. El proceso se repitió para 10 velocidades, desde 110 mm/s, hasta 1 mm/s. Los valores se representaron en el gráfico de Viscosidad aparente VS Velocidad de inyección, para cada uno de los moldes, como se puede apreciar en la figura 33.

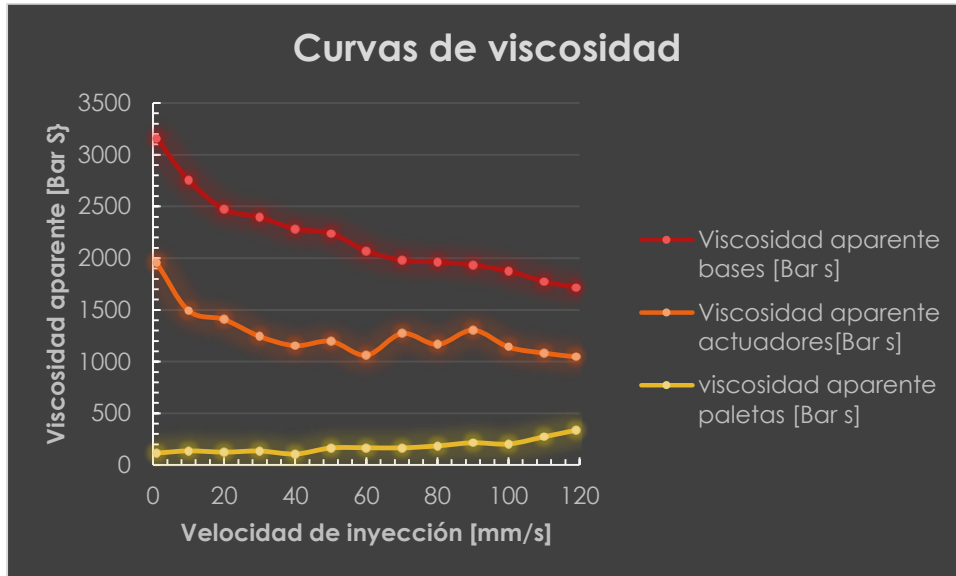


Figura 33. Gráfico de la viscosidad aparente en los moldes del ensamble

En el gráfico de viscosidad aparente, se puede observar que la mínima variación de viscosidad se encuentra en la velocidad de 70mm/s, para el molde de bases, 119 mm/s para el molde de actuadores y a 70 mm/s para las paletas. El comportamiento de las curvas sugiere una convergencia más allá de los 119mm. El comportamiento de la curva de paletas fue aparentemente constante en velocidades bajas e incrementó con el aumento de velocidad, este comportamiento se debió a la carrera de dosificación baja y a que el molde de paletas es de cuatro cavidades y colada fría. Los valores de viscosidad son similares a los reportados en [2], donde se experimentó con el mismo material en un molde de 2 cavidades con canal frío.

Posteriormente se determinó el desbalance de las cavidades, a través del control de la carrera de dosificación; para ello se realizaron inyecciones con diferentes porcentajes de volumen para el llenado de las cavidades, es decir, 10, 25, 50, 75 y 100%. Se realizaron cinco inyecciones por cada porcentaje y se midieron las masas de las piezas, el valor promedio se graficó como se muestra en la figura 34.

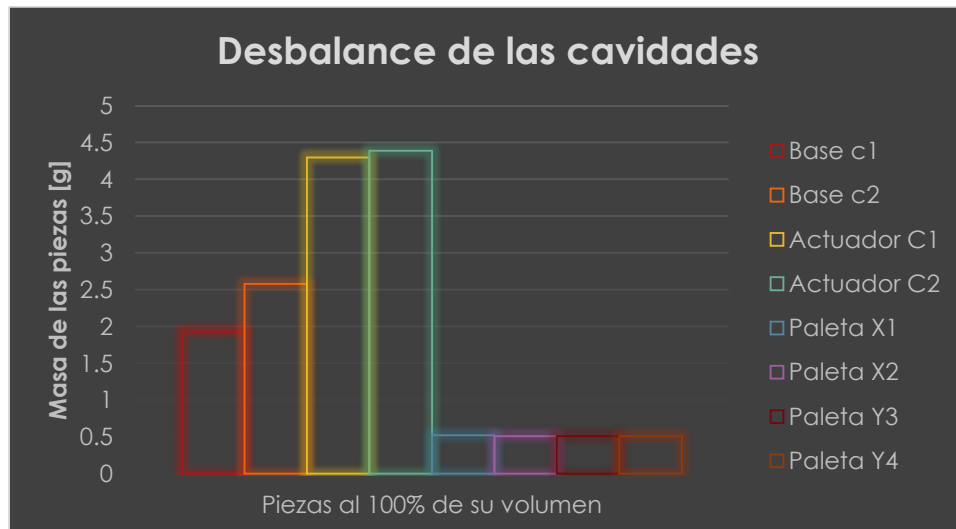


Figura 34 Gráfico del desbalance inicial en el molde de bases

La figura 34 muestra el desbalance entre cavidades de los moldes estudiados, en forma de diferencia de masa, se aprecia que para el porcentaje de 100% la diferencia promedio entre las bases presentó el valor de 0.65 g, aproximadamente 34%. Se detectó que el desbalance se debió a que los flujos de refrigeración de los insertos del lado de inyección eran diferentes, a pesar de que en un principio los fluxómetros fueron calibrados de tal manera que el flujo de refrigerante fuese el mismo y correspondiera con las recomendaciones de MFA®, a lo largo de la experimentación se manifestaron alteraciones, las cuales se fueron calibrando en todo el trabajo. Se procedió a corregir y a colocar el mismo flujo de refrigerante para cada inserto de lado de inyección. Se repitió el procedimiento para determinar el balanceo, se corrigió el problema, se obtuvo un desbalance entre las piezas bases igual a 1.12%.

En cuanto al molde de actuadores, el desbalance fue menor que el manifestado en el molde de bases, debido a que se controlaron las temperaturas en las cavidades y en los calefactores de cada inyector. Se mantuvo bajo vigilancia el comportamiento de los fluxómetros de refrigeración del molde. Especialmente en los niveles de flujo hacia el canal 2 y 4 que refrigeran los insertos del lado de inyección. El desbalance del molde de actuadores fue de 2%.

El porcentaje de desbalance se calculó entre los pares, las piezas x1 y x2 al 100% de llenado, tienen de desbalance de 2% mientras que las piezas procedentes de las cavidades y's tienen 0% de desbalance. De acuerdo con kulkarni [36], los porcentajes de desbalance aquí presentes son aceptables para piezas de ensamble.

El estudio de la caída de presión se realizó para identificar las presiones máximas requeridas para llenar las diferentes zonas de las piezas. Como este estudio requirió de la inyección de piezas cortas a diferentes porcentajes de llenado, se pudo visualizar el patrón de llenado de las piezas.

Para el estudio en cuestión se realizaron disparos cortos desde 25, 50, 75 y hasta completar el 100% de la pieza. Los resultados se encuentran representados en el gráfico de la figura 35.

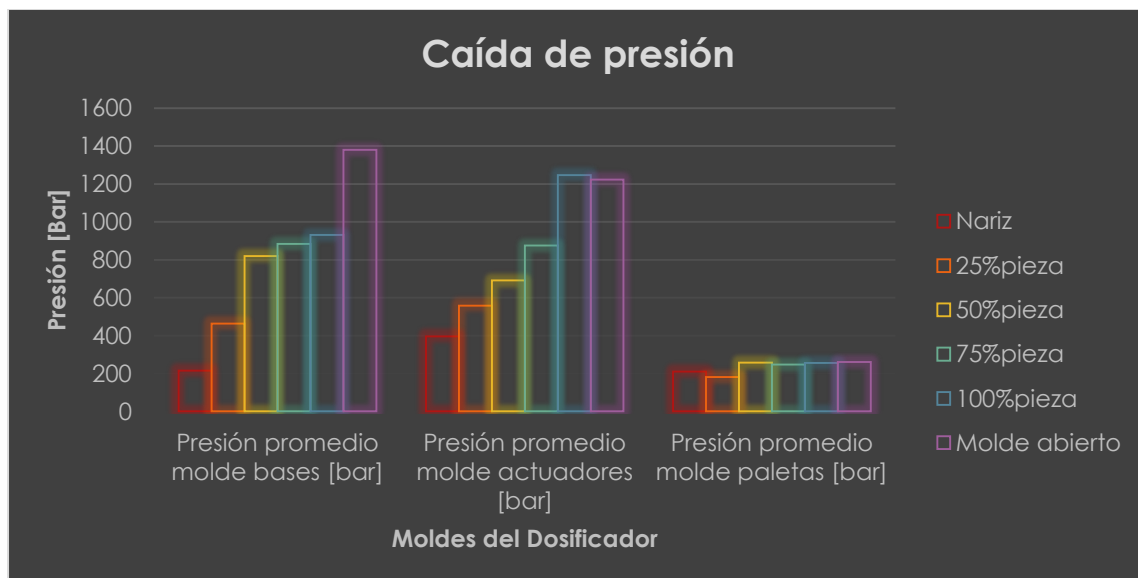


Figura 35 Estudio de la caída de presión a diferentes porcentajes de llenado de la pieza

La figura 35 muestra como la máxima presión de inyección se alcanzó cuando el plástico fue forzado a pasar a través del sistema de canal caliente. Se observó que el incremento de presión es gradual desde que se inyecta el plástico fuera del molde hasta completar el 100% de la pieza. Este aumento

de presión es debido a la restricción impuesta al plástico en cada reducción de diámetro del sistema de alimentación y al diámetro de los puntos de inyección.

La presión máxima alcanzada no rebasa los 1400 Bar. El 77% de la capacidad de la máquina fue requerida para este estudio. Se requirieron 880 Bar de presión de inyección para moldear las piezas actuadores al 100% de su volumen, para ello la máquina fue empleada al 48%.

De este estudio se obtuvo un valor tope de presión de inyección que sirvió para monitorear las corridas de inyección, pues si se observa que el valor de presión de inyección aumenta, es probable que se deba a alguna obstrucción en el sistema de alimentación o cavidades, también se puede deber a que la viscosidad del plástico aumentó, ya sea por algún fallo en los calefactores o en el sistema de refrigeración. Si el valor de presión de inyección se reduce puede ser causa de una reducción de viscosidad en el plástico, ya sea por un exceso de temperatura, cambio en el material o un fallo en el sistema de refrigeración de las cavidades.

Para el molde de actuadores la máxima presión de inyección es la que correspondió al 100% del volumen de la pieza inyectada, la cual fue de 1247 Bar, que correspondió al 69% de la capacidad del equipo de inyección. Posteriormente, la presión con el molde abierto de 1224 Bar. El comportamiento de la presión de inyección fue ascendente para todas las zonas del molde.

La presión de inyección en el molde de paletas fue mínima cuando se inyectó el 30% del volumen de las piezas, la máxima se manifestó al hacer pasar el plástico por el bebedero, donde se tuvo hasta 261 Bar. Cuando se llenó al 100% la pieza, la presión requerida fue de 255 Bar lo cual representó el 14% de la capacidad de la máquina.

La ventana de proceso es un estudio que se realizó para saber qué tan robusto es el proceso para obtener piezas completas sin exceso de material y/o problemas por falta o exceso de temperatura, además sirvió para determinar el valor adecuado de presión de mantenimiento. Para ello se buscó obtener el valor mínimo de temperatura de masa fundida (188°C), recomendado por el proveedor, se colocó en el control de temperaturas de las zonas del barril de inyección en el perfil mínimo recomendado por el fabricante del plástico, se realizaron inyecciones durante 30 minutos hasta que la temperatura del plástico se estabilizó y se procedió a corroborar la temperatura de masa fundida aplicando el método 30/30 desarrollado por RJG Associates [36], adaptado a los instrumentos con los que se contaba en ese momento (sonda de medición de temperatura OMEGA® HH66U y termopar tipo k), figura 36.



Figura 36 Dispositivos usados para la toma de temperatura de masa fundida

La figura 36, muestra del lado izquierdo la sonda para medición de temperatura y del lado derecho los cables del termopar tipo k en la lámina de soporte. La temperatura de masa fundida no correspondió a la solicitada a los calefactores, esto es debido a que no son los únicos elementos que aportan energía al plástico, la temperatura de masa fundida de un plástico trae incluido el efecto de la fricción del husillo con el plástico, fricción del plástico con la pared del barril, además de la calefacción. Por otro lado la temperatura solicitada a las bandas calefactores es tomada por un termo

acoplamiento que generalmente se encuentra cercano al elemento calefactor y en contacto con el barril de inyección. Por lo cual no se tienen considerados los efectos de transferencia de calor y perdidas. Por lo tanto la temperatura de masa fundida fue menor que la usada en las ultimas zonas. Obtenida la temperatura en el plástico y los parámetros ya establecidos, se modificó la carrera de dosificación hasta obtener piezas cortas al 90% de su llenado, figura 37.

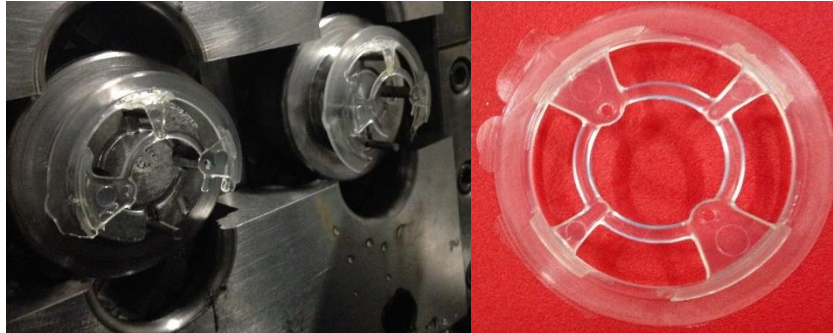


Figura. 37 Piezas cortas y con exceso de material inyectadas en el estudio de la ventana de proceso

Posteriormente se estableció como tiempo de mantenimiento 10 segundos. Y se procedió a inyectar 5 piezas, hasta estabilizar el proceso. Se procedió a realizar 10 disparos y se fue incrementando el valor de presión de mantenimiento hasta obtener piezas completas. En cuanto se obtuvieron piezas completas, se tomó el valor de presión empleado. Se continuó con el procedimiento hasta obtener piezas con exceso de material (rebabas) figura 37.

De igual forma, se tomó nota del valor de presión de mantenimiento en el cual se presentan los excesos de material en la pieza. Posteriormente se modificaron los valores de temperatura en los calefactores del cilindro de inyección para alcanzar el valor máximo de temperatura de masa fundida.

Con este perfil se repitió el procedimiento hasta encontrar los valores de presión de mantenimiento a los cuales la pieza se llenó en su totalidad y se manifestó el exceso de material. Con los cuatro valores de temperaturas de masa fundida y sus respectivas presiones de mantenimiento, se procedió a graficarlos y unir con líneas rectas los puntos, generando de esta forma la ventana de proceso para el PLA que conforma las piezas base, actuadores y paletas, figura 38.

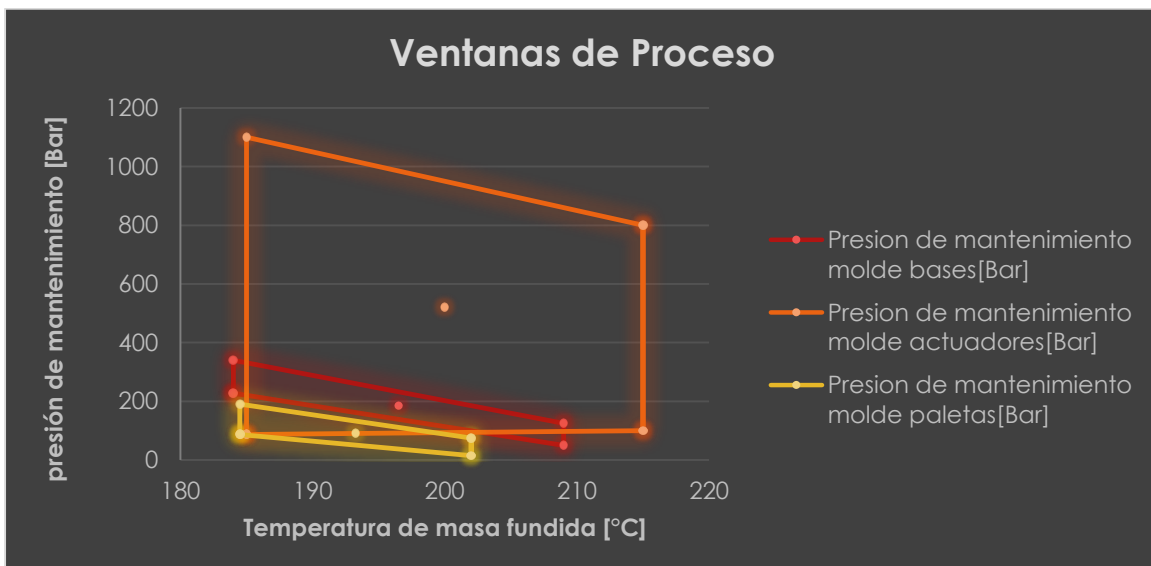


Figura 38 Ventana de proceso para el molde de bases y el material PLA

El proceso de las diferentes piezas se colocó al centro de su ventana correspondiente, figura 38, es decir, se buscó obtener como temperatura de masa fundida 196°C y como presión de mantenimiento 186 Bar, para el molde de bases. Para esa ventana, todas aquellas combinaciones de presión de mantenimiento y temperatura de masa fundida por debajo de la ventana producirán piezas incompletas y con rechupes, y todas aquellas por arriba de la ventana, tendrán excesos de material. Las combinaciones a la izquierda de la ventana producirán piezas frágiles y con vestigios de pellets y las combinaciones a la derecha tendrán vacíos.

La ventana de proceso para el molde de actuadores, figura 38, presentó como coordenadas de centro (200°C, 521 Bar). Los estudios subsecuentes se realizaron a estas condiciones. La figura 42 también muestra que las piezas paletas se obtienen completas, sin excesos de material y libres de vacíos, cuando el centro de su ventana se encuentra a 193°C y 91 Bar.

Se puede observar que la ventana correspondiente al molde actuador es la más amplia de las tres presentadas, esto se debe a que el molde presentó solo una línea de partición por cavidad, con lo cual el plástico fue contenido a pesar de los incrementos de presión de mantenimiento. Por el contrario la ventana del molde de bases fue más pequeña debido a que presentó dos líneas de partición. Con respecto al molde de paletas, este presentó la ventana más pequeña, a pesar de que solo manifestó una línea de cierre, ya que el plástico salió de la cavidad por los venteos. La ventana de proceso del material difiere de la geometría inyectada y el diseño del molde. Se puede observar que las ventanas de moldes con colada caliente son más grandes que la proveniente del molde de canal frío, en este caso los moldes de canal caliente proveen mayor robustez al proceso.

El Tiempo de mantenimiento es el tiempo en el cual se aplicó la presión de mantenimiento, y debe corresponder al tiempo que tarda el punto de inyección en solidificar. Para determinarlo se procedió a inyectar piezas con las condiciones del centro de la ventana de proceso y variando el tiempo de mantenimiento desde cero en incrementos de un segundo. En cada incremento se realizaron 5 inyecciones y se midieron las masas de cada una de las piezas obtenidas, el valor promedio de las masas se graficó, el experimento se detuvo hasta que en el gráfico se visualizó un comportamiento constante de las masas, figura 39.

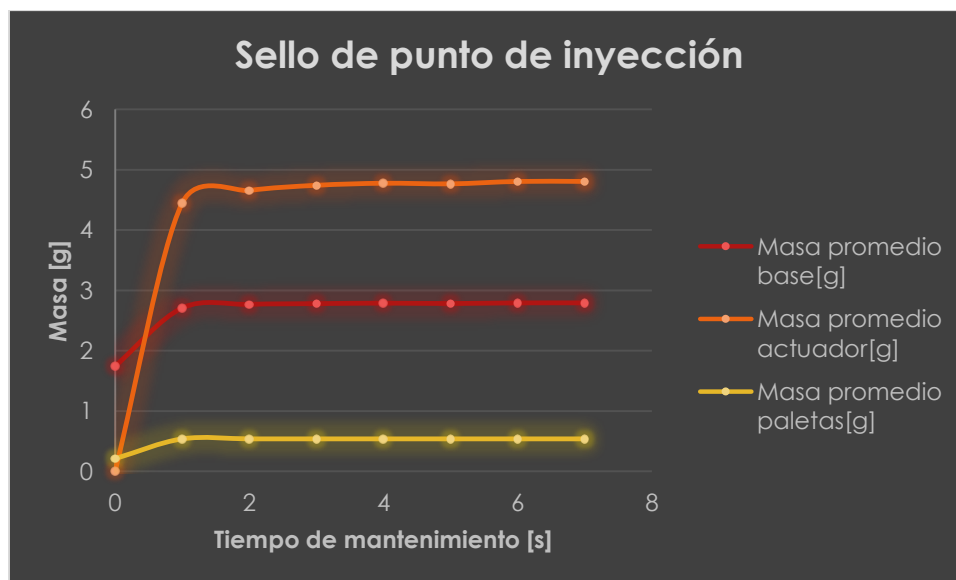


Figura 39 Sello de punto de inyección para los moldes

El molde de bases, como se puede observar en la figura 39, presentó como ascendente el comportamiento de la masa de sus piezas, fue ascendente hasta el tiempo de un segundo, posteriormente presentó incrementos de masa hasta que se estabilizó en 6 segundos, por lo tanto, el tiempo de mantenimiento se estableció en esa cantidad. Si el proceso se maneja con tiempos inferiores a 6 s, se corre el riesgo de que la pieza manifieste contracciones no controladas y rechupes. Por el contrario, si se usan tiempos superiores, la pieza puede presentar sobre empaquetamiento que se manifiesta con exceso de material y sobre carga mecánica.

Para el molde de los actuadores se repitió el proceso. El comportamiento de la masa observado en la figura 40 fue ascendente del tiempo de 1 a 2 segundos, siendo en este intervalo donde se encuentra la mayor variación de masa, de 4.4 a 4.6 g. Para los tiempos subsecuentes, la variación fue menor. El valor de la masa permaneció constante en los tiempos de 6 y 7 segundos. Con base en ello, se estableció 6 segundos como tiempo de mantenimiento para el molde de actuadores.

En el molde de paletas, la masa se estabilizó en 0.54 g a 2 segundos.

El estudio del tiempo de enfriamiento brindó información acerca de las dimensiones de las piezas y su relación con el enfriamiento. El análisis de llenado en MFA ® otorgó el tiempo recomendado para que las piezas pudieran expulsarse, para las bases fue de aproximadamente 4.19 segundos. Por esta razón, el estudio se realizó variando el tiempo de enfriamiento desde 1-5 segundos inyectando cinco veces por cada tiempo seleccionado. Las piezas obtenidas fueron medidas, diferenciando las piezas por cavidad, las dimensiones tomadas en cuenta fueron seleccionadas como críticas para el ensamble y se muestran en la figura 40.

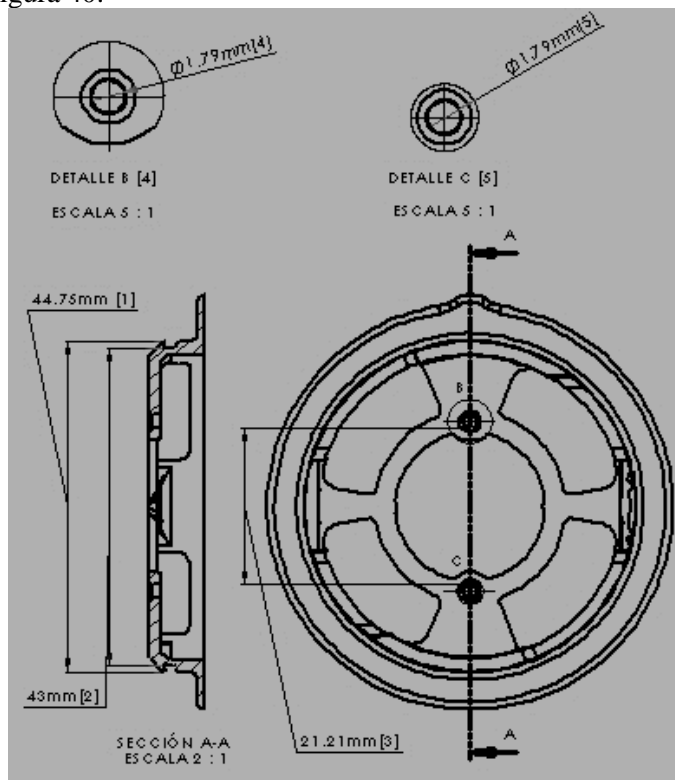


Figura 40 Dimensiones críticas tomadas del modelo sólido de la pieza base. 1. Diámetro de enganche. 2. Diámetro de riel. 3. Distancia entre perímetros internos. 4. Diámetro barreno 1. 5. Diámetro barreno 2. Valores correspondientes a las dimensiones de diseño

Las mediciones de las piezas se realizaron con un calibrador Pie de rey, digital, marca Mitutoyo®, resolución es de 0.01mm. Las piezas fueron medidas 24 horas después de haberse inyectado. La variación de todas las dimensiones en un solo gráfico para las cavidades 1y 2 se muestran en la figura 41.

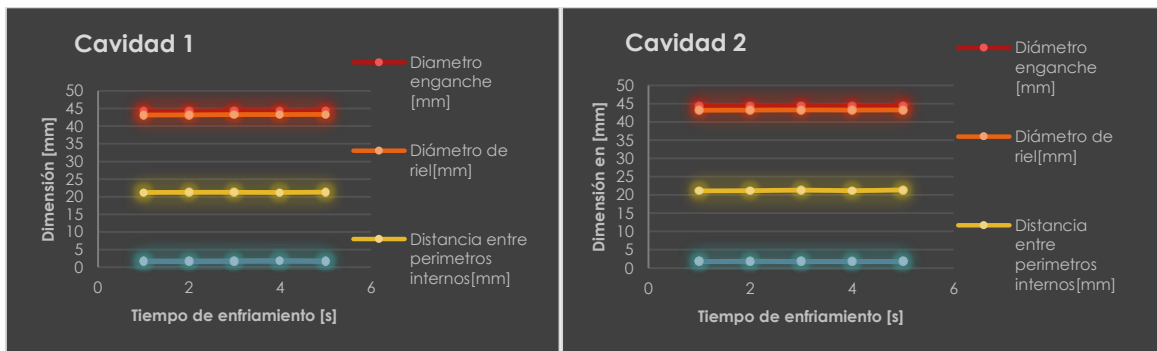


Figura 41 Variación de dimensiones críticas de la cavidad 1 con respecto al tiempo de enfriamiento

En estas imágenes, se aprecia un comportamiento cercano al constante a través del tiempo de enfriamiento, pero si se grafican los comportamientos de manera individual se puede visualizar las variaciones con más detalle. De acuerdo a ello se presenta la figura 42.

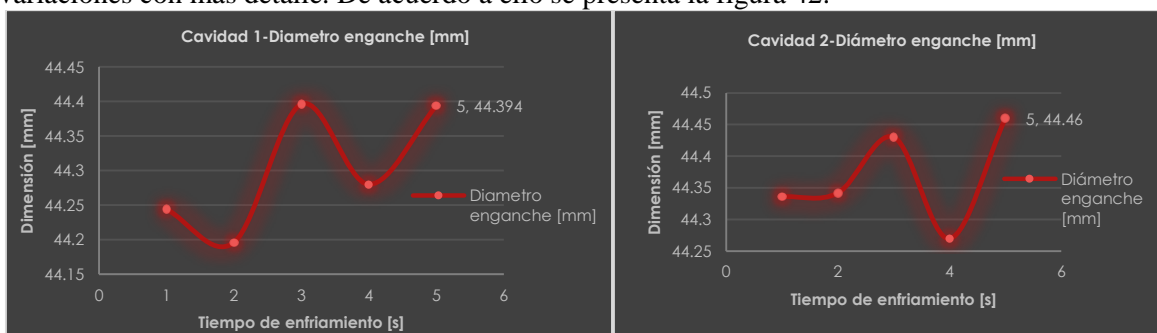


Figura 42 Variación del diámetro de enganche en función del tiempo de enfriamiento para las piezas de ambas cavidades

En los gráficos, de la figura 42, se aprecia que las dimensiones se manifestaron de manera alternante ante el aumento del tiempo de enfriamiento. Siendo el valor mínimo de diámetro de enganche para la cavidad 1 el de 44.19mm y el máximo de 44.39 mm. Para la pieza de la cavidad 2 el valor mínimo fue de 44.27 mm y el máximo de 44.46 mm. La variación en la pieza de la cavidad 1 fue de 0.20 mm y para la pieza de la cavidad 2 de 0.19mm. La dimensión de diseño es de 44.75 mm. Las piezas se encontraron por debajo del valor de diseño 0.36mm y 0.29mm, para las obtenidas de la cavidad 1 y 2 respectivamente.

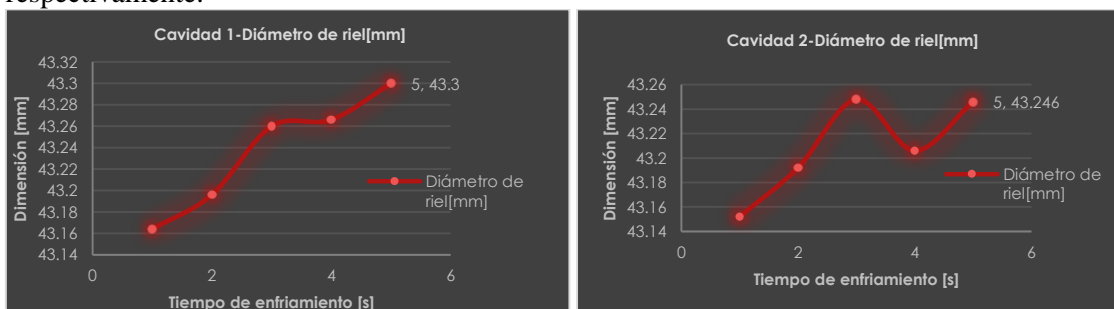


Figura 43 Variación de las dimensiones del diámetro de riel para las piezas obtenidas de las cavidades 1 y 2 respectivamente

La figura 43 muestra que el comportamiento del diámetro de riel fue ascendente para las dos cavidades. El valor máximo de diámetro de riel manifestado por las piezas obtenidas de la cavidad 1 fue de 43.3mm y el mínimo de 43.16mm, se tiene una variación de 0.14mm. Para las piezas provenientes de la cavidad 2, el valor máximo fue de 43.24mm y el mínimo de 43.15mm, la diferencia entre ellas es de 0.09mm. El valor de diseño para el diámetro de riel es de 43mm. Las piezas se encuentran por arriba de la dimensión de diseño en 0.16mm y 0.15mm para la cavidad 1 y 2 respectivamente.

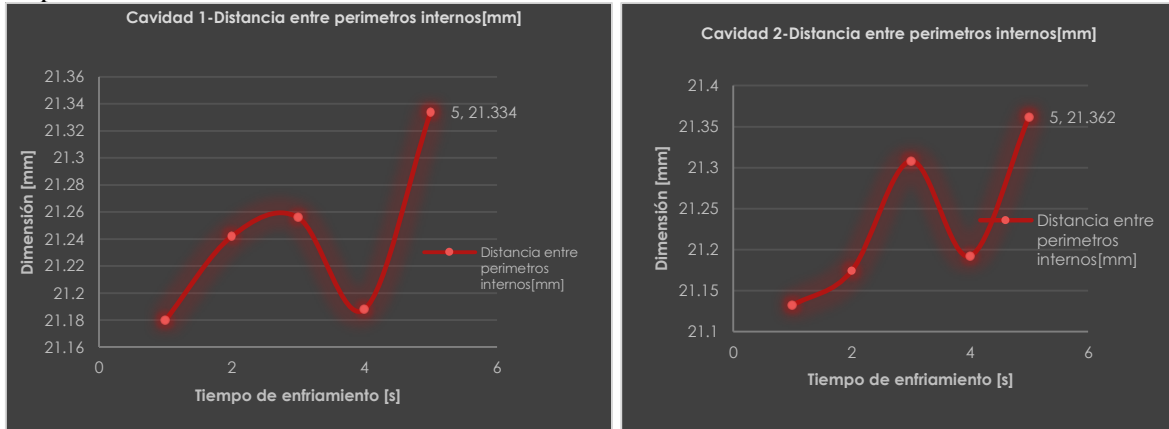


Figura 44 Variación de las distancia entre perímetros internos para las piezas obtenidas de las cavidades 1 y 2 respectivamente

En la figura 44 se observa que la distancia entre perímetros internos también presentó un comportamiento variable en función del tiempo de enfriamiento aplicado. Las piezas obtenidas de la cavidad 1 tuvieron como dimensión mínima 21.24mm y máxima 21.33mm, la variación entre estas dimensiones fue de 0.09mm. Las piezas obtenidas desde la cavidad 2 presentaron como dimensión mínima 21.13mm y 21.36mm como máxima, la variación entre estas fue de 0.23mm. La dimensión de diseño para la distancia entre perímetros internos es de 21.21mm, de tal manera que las piezas obtenidas de la cavidad 1 se encuentran 0.12mm por arriba y 0.03mm por abajo de la medida de diseño. La cavidad 2 está por arriba de la dimensión 0.15mm y 0.08mm por abajo.

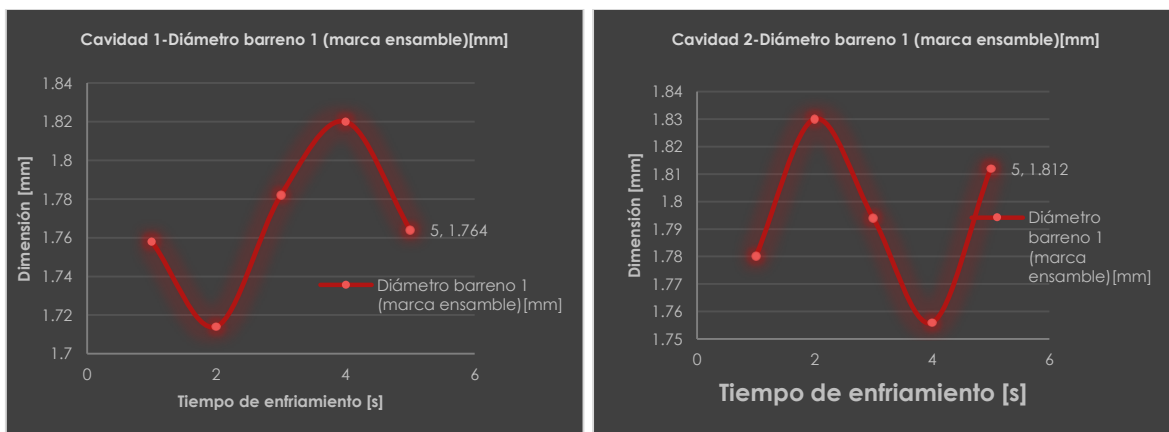


Figura 45 Variación de las dimensiones del diámetro de barreno 1 para las piezas obtenidas de las cavidades 1 y 2 respectivamente

La medida del diámetro de barreno, tanto para las piezas obtenidas de la cavidad 1 como para las provenientes de la cavidad 2, presentaron comportamiento tipo alternante y opuesto entre sí, figura

45. El valor máximo del diámetro de barreno 1 para las piezas de la cavidad 1 se obtuvo al aplicar 4 segundos de tiempo de enfriamiento, siendo el diámetro de 1.82mm, el valor mínimo fue de 1.71mm correspondiente a 2 segundos de tiempo de enfriamiento. Para las piezas de la cavidad 2, el valor máximo fue de 1.83mm a 2 segundos, el mínimo fue de 1.75mm a 4 segundos de enfriamiento. La medida de diseño para el barreno 1 fue de 1.79mm, de tal manera que las piezas provenientes de la cavidad 1 están por debajo de la medida en 0.08mm y 0.03mm por arriba. Para el caso de las provenientes de la cavidad 2, se encuentran por debajo 0.04mm y por arriba 0.04mm.

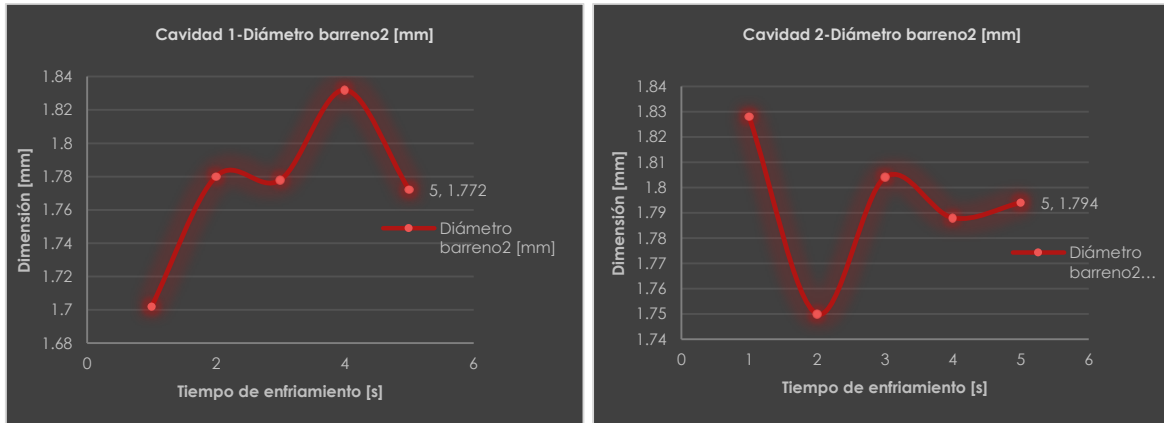


Figura 46 Variación de las dimensiones del diámetro de barreno 2 para las piezas obtenidas de las cavidades 1 y 2 respectivamente

El diámetro del barreno 2 también se vio afectado por los cambios del tiempo de enfriamiento, figura 46, el diámetro varió desde el valor mínimo de 1.70mm hasta el máximo de 1.83mm para las piezas provenientes de la cavidad 1. Para las piezas de la cavidad 2, el máximo diámetro de barreno fue de 1.82mm y el mínimo 1.75mm. Las piezas de la cavidad 1 se encuentran 0.09mm por debajo de la dimensión de diseño (1.79mm) y se encuentran 0.04mm por arriba de esta. Para el caso de las piezas de la cavidad 2, las dimensiones están 0.04mm por debajo de la de diseño, y 0.03mm por arriba de esta.

Se procedió a calcular el porcentaje de desviación de las medidas de las piezas con respecto a las de diseño, las cuales se muestran en un solo gráfico por cavidad analizada, figura 47.

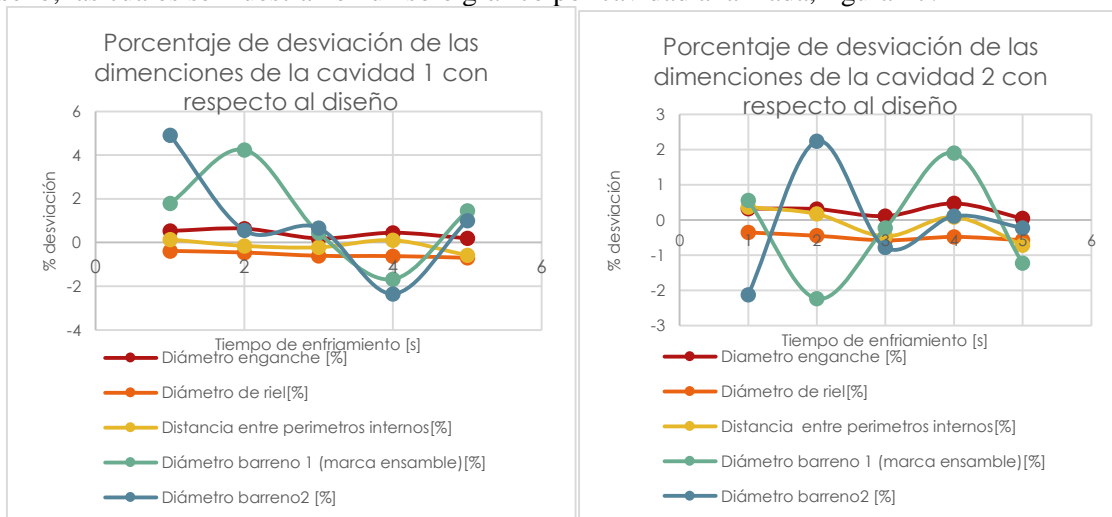


Figura 47 Comparativo entre cavidades del porcentaje de desviación de las dimensiones en función del tiempo de enfriamiento.

En la figura 47, se puede apreciar que las dimensiones con mayor porcentaje de desviación son las correspondientes a los diámetros de barrenos, se presentan variaciones de hasta el 5%. Las distancias entre perímetros internos es la que presenta menor porcentaje de desviación, siendo menor al 1%. El comportamiento en general de las dimensiones y su porcentaje de desviación con respecto a la medida de diseño es tal que a los 3 segundos de aplicación de refrigeración las dimensiones tienden a disminuir su porcentaje de desviación. Con base en ello se procedió a fijar como tiempo de enfriamiento 3 segundos para el molde de bases.

En cuanto al molde de actuadores, el estudio se realizó variando el tiempo de enfriamiento desde 1-8 segundos inyectando cinco veces por cada tiempo seleccionado. Las dimensiones críticas que afectan el ensamble son las distancias entre las protuberancias internas. Como se muestra en la figura 48. La figura 48 muestra el valor de diseño para las distancias 1 y 2, siendo la distancia 2 la que es medida desde la protuberancia interna que está alineada con la marca de ensamble, como se puede apreciar en el detalle A. Se consideraron importantes estas dimensiones ya que deben mantener un claro con el diámetro de riel en la pieza base, además deben de tener interferencia con el diámetro de enganche de la misma.

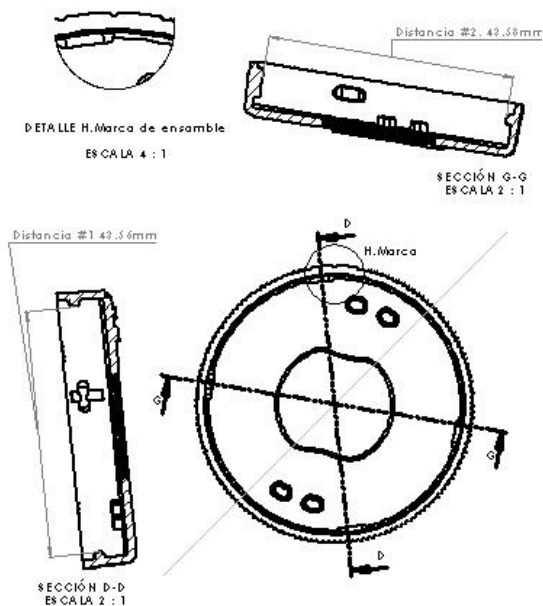


Figura 48 Dimensiones críticas tomadas del modelo sólido de la pieza actuador. Distancia 1 y 2

Las mediciones de las piezas se realizaron con el mismo calibrador empleado para medir las piezas base. La toma de medidas se realizó 24 horas después de la producción de las piezas.

La distancia 1 para la cavidad 1, manifiesta como valor máximo 43.69mm y 43.38 mm como valor mínimo. La diferencia entre el valor máximo y mínimo es de 0.31mm. En cuanto que para la cavidad 2, el valor máximo fue de 43.25mm y el mínimo 43.00mm. La diferencia entre estas cantidades es de 0.25mm.

La distancia 2 para las piezas de la cavidad 1 presentó como valor máximo 43.59mm y 43.38mm para el mínimo, la diferencia fue de 0.21mm. Las piezas obtenidas de la cavidad 2 presentaron como valor máximo, 43.33mm y 43.11mm como mínimo, la diferencia fue de 0.22mm, ver anexo 3.

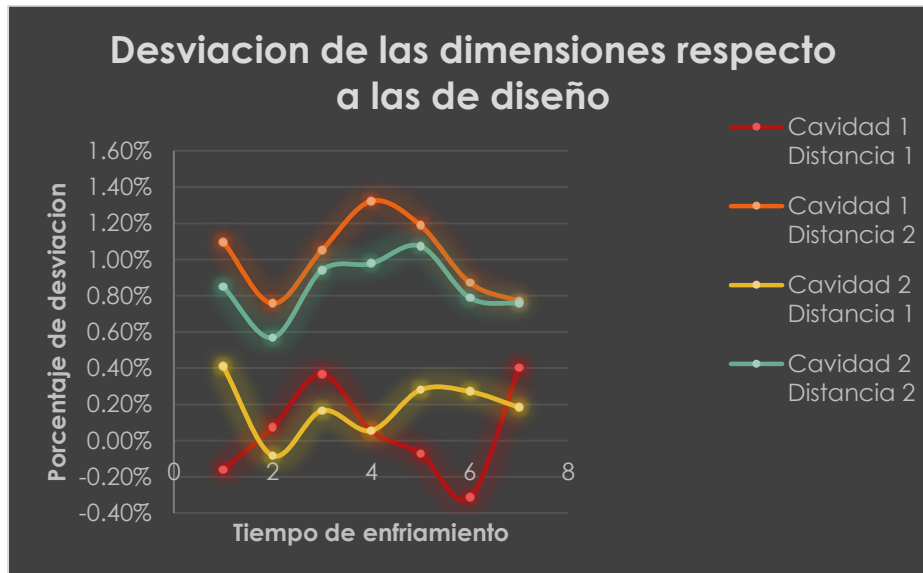


Figura 49 Porcentaje de variación de las dimensiones para las dos cavidades

En la figura 49 se puede apreciar la variación del porcentaje de desviación de las distancias, tanto para la cavidad 1 como para la 2. Las distancias 1 de las cavidades son las que tiene menor porcentaje de error. El error mínimo presente para la dimensión 1 de la cavidad 1 es de -0.31% y el máximo es 0.4%. La misma distancia, pero de la cavidad 2 tiene como porcentaje máximo de error 0.40% y como mínimo de -0.08%. La distancia 2 de la cavidad 1 tiene el porcentaje de error en su valor más alejado de 1.32% y como valor más cercano 0.76%. La distancia 2 de la cavidad 2 tiene como menor porcentaje de error 0.57% y el porcentaje más alejado fue de 1.07%. El tiempo de enfriamiento en donde por inspección, del gráfico de la figura 50, los errores son menores, corresponde a 2 segundos. Se puede observar que las dimensiones críticas del actuador son inferiores a las de diseño para las dimensiones 2.

En cuanto al molde de paletas, el estudio se realizó variando el tiempo de enfriamiento desde 0-40 segundos. Para el molde de paletas, las dimensiones críticas de ensamble son los diámetros de base y punta de los pernos y la longitud de ensamble. Como se muestra en la figura 50.

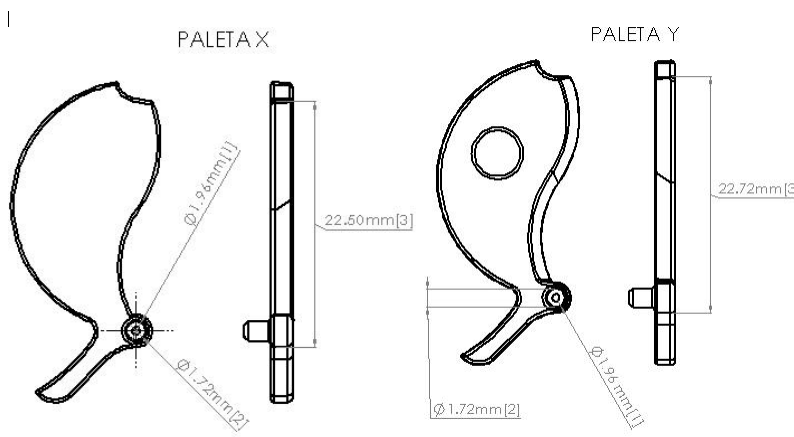


Figura 50 Dimensiones críticas sobre la geometría de paletas. 1. Diámetro base de perno. 2. Diámetro punta de perno. 3. Longitud de ensamble

Las piezas inyectadas fueron dimensionadas 24 horas después de su manufactura. Las variaciones de las dimensiones críticas no cambiaron a más del 5 % durante el tiempo de enfriamiento, ver anexo 3. En las gráficas de desviaciones, se encuentra que las mismas tienden a cero en diferentes tiempos de enfriamiento. No es posible encontrar un valor de tiempo de enfriamiento que favorezca a todas las piezas ya que el comportamiento de las dimensiones en las piezas por cavidad es diferente.

El tiempo de enfriamiento se puede estabilizar con el que permita que la colada se desprenda del bebedero y las piezas se puedan expulsar de sus cavidades y este tiempo puede ser cero segundos o 40 segundos, sin embargo la recurrencia de pegado de la colada en el bebedero fue mayor en las pruebas a 0 segundos que en las de 40, de tal manera que se seleccionó el valor de 20 segundos como tiempo de enfriamiento.

La técnica de moldeo científico sirvió para establecer los parámetros de inyección de una forma ordenada y coherente, sin embargo la teoría no detalla puntos de manejo de maquinaria, y fue necesario echar mano de la experiencia adquirida. Moldeo científico sirvió para conocer los moldes y su desempeño. Permitió corregir errores de manejo de equipos periféricos. El estudio del tiempo de enfriamiento es el único punto que incluye las dimensiones de la pieza, cuando se calculó la desviación entre las medidas promedio y las medidas de diseño, los moldes de actuadores y bases tuvieron convergencia en un tiempo de enfriamiento que provocó que las dimensiones de las piezas tuvieran menor desviación, para el caso del molde de paletas no fue así.

Con los parámetros establecidos del moldeo científico se realizaron inyecciones. Se inyectó un lote de 400 piezas para ensamblar 100 dosificadores. Las piezas fueron dimensionadas y analizadas estadísticamente en el software Minitab ® para determinar la capacidad del proceso de obtener piezas conformes a las medidas del diseño. Se inició el análisis con los actuadores, distancia 1 figura 51.

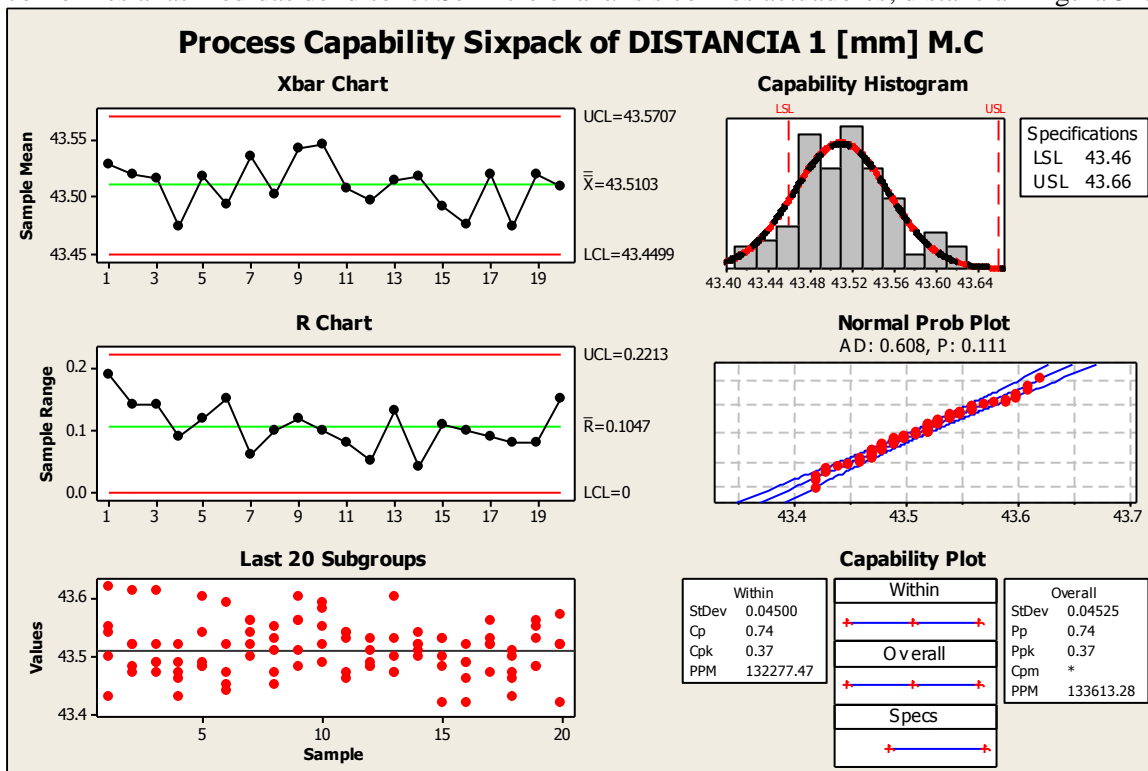


Figura 51. Comportamiento de la Distancia 1

La figura 51 muestra los gráficos X-Barra y R, en donde los puntos tienen un comportamiento aleatorio, que no exceden los límites de control, por lo que se consideró que el proceso está bajo control estadístico. Los puntos del diagrama de los últimos 20 subgrupos forman una nube aleatoria, en la que no se observaron tendencias ni desplazamientos. Ello también contribuyó a considerar que el proceso está bajo control y es estable. El histograma y el gráfico de probabilidad normal permitieron verificar el supuesto de que los datos se distribuyeron según una Normal. El gráfico de capacidad proporcionó información usual de la variabilidad del proceso en comparación con la variabilidad permitida. Se observó que la tolerancia del proceso cae por debajo del límite de la especificación inferior. Lo cual significa que se encontrarán piezas con la especificación mínima de medir 43.46mm. El gráfico de capacidad muestra los valores de los índices, $C_p=0.74$ y $C_{pk}=0.37$ con lo cual se concluye que el proceso no es capaz de obtener la distancia 1 con valor medio de 43.56mm, límite superior de 43.66mm y límite inferior de 43.46mm.

Se realizó el mismo análisis con las dimensiones subsiguientes de las piezas restantes. El resumen de resultados se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Resumen de análisis estadístico aplicado sobre las piezas obtenidas con los parámetros del moldeo científico

Dimensión	Valor diseño[mm]	Tol + [mm]	Tol- [mm]	\bar{x} [mm]	UCL [mm]	LCL [mm]	\bar{R}_{mm}	ULC [mm]	LCL	STDEV [mm]	CP	CPK
DISTANCIA 1	43.56	43.66	43.46	43.51	43.57	43.44	0.1	0.22	0	0.04	0.74	0.37
DISTANCIA 2	43.58	43.68	43.48	43.18	43.29	43.06	0.2	0.43	0	0.08	0.38	-1.13
PX DIAMETRO BASE PERNO	1.96	2.06	1.86	1.98	2.04	1.93	0.09	0.19	0	0.06	0.85	0.59
PX DIAMETRO PUNTA PERNO	1.72	1.82	1.62	1.74	1.83	1.64	0.16	0.34	0	0.06	0.48	0.37
PX LONGITUD ENSAMBLE	22.5	22.6	22.4	22.71	22.82	22.61	0.18	0.38	0	0.07	0.42	-0.49
PY DIAMETRO BASE PERNO	1.96	2.06	1.86	1.95	2.01	1.98	0.1	0.21	0	0.04	0.77	0.73
PY DIAMETRO PUNTA PERNO	1.72	1.82	1.62	1.72	1.8	1.63	0.14	0.31	0	0.06	0.52	0.51
PY LONGITUD ENSAMBLE	22.72	22.82	22.62	22.77	22.95	22.59	0.38	0.65	0	0.13	0.25	0.12
DIAMETRO DE ENGANCHE	44.75	44.85	44.65	44.30	44.46	44.13	0.28	0.60	0	0.12	0.27	-0.94
DIAMETRO DE RIEL	43	43.1	42.9	43.22	43.5	42.94	0.47	1.00	0	0.20	0.16	-0.20
DISNTANCIA ENTRE PERIMETROS INTERNOS	21.21	21.31	21.11	21.12	21.23	21.02	0.18	0.38	0	0.07	0.43	0.08
DIAMETRO BARRENO 1	1.79	1.89	1.69	1.80	1.85	1.75	0.09	0.19	0	0.03	0.85	0.71
DIAMETRO BARRENO 2	1.79	1.89	1.69	1.82	1.87	1.77	0.08	0.18	0	0.03	0.87	0.57

Con base en el criterio de capacidad de proceso, $C_p=1$, y $C_{pk}=C_p$, En la tabla 12 se puede apreciar que el proceso no es capaz de brindar las dimensiones requeridas. Las dimensiones con C_p más cercano a 1 fueron: Diámetro de barreno 1 y 2, y diámetro de base de perno, con $C_p>0.8$. La menor capacidad del proceso se encontró en las dimensiones: Distancia 2, longitud de ensamble paleta Y, diámetro de riel y diámetro de enganche, con $C_p<0.4$.

Se procedió a ensamblar las piezas y tomando las piezas aleatoriamente, figura 52.



Figura 52 Ensamble de los dosificadores provenientes de la validación de moldeo Científico

De los 100 ensambles realizados, 30 funcionaron adecuadamente, el resto presento ajuste excesivo entre las distancias 1 y 2 del actuador, y el diámetro de enganche de la base, impidiendo que el actuador opere. Se ideó agregar un lubricante a base de silicones con el cual los ensambles operaron adecuadamente. El ensamble entre las paletas y la pieza base fue holgado y funcionó adecuadamente. El ensamble entre las paletas y el actuador fue holgado, igual, funcionando adecuadamente.

APLICACIÓN DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Se aplicó el DoE para tener control sobre las dimensiones de las piezas e incrementar la cantidad de ensambles conformes a través de los parámetros de procesamiento, como lo indica Kulkarni [36].

Según Javierre et al [14], Demirer [15], Tuncay et al [20], Babur et al [22] (mediante MFA®) y Oktem et al [21] (mediante experimentación a pie de máquina) indican que los parámetros de inyección que afectan a las dimensiones de las piezas son:

- Presión de mantenimiento
- Temperatura de molde
- Tiempo de mantenimiento
- Tiempo de llenado
- Dimensión del punto de inyección
- Temperatura de masa fundida
- Tiempo de enfriamiento
- Tipo de canal de alimentación
- Localización del punto de inyección

Para los fines de este trabajo y de acuerdo a los elementos disponibles, se consideraron como variables de proceso o factores:

- ✓ Presión de mantenimiento
- ✓ Tiempo de mantenimiento
- ✓ Velocidad de inyección
- ✓ Tiempo de enfriamiento

Para el caso de la pieza base, la tabla 13, muestra los factores usados y sus valores máximo y mínimo (nivel alto y bajo).

Tabla 13. Factores de DOE para la pieza base con sus niveles

Factores/niveles	Presión de mantenimiento [Bar]	Tiempo de mantenimiento [s]	Velocidad de inyección [mm/s]	Tiempo de enfriamiento [s]
Nivel alto	232	6	80	6
Nivel bajo	139	3	70	1

Tabla 14. Factores de DOE para la pieza actuador con sus niveles

Factores/niveles	Presión de mantenimiento [Bar]	Tiempo de mantenimiento [s]	Velocidad de inyección [mm/s]	Tiempo de enfriamiento [s]
Nivel alto	948	6	119	7
Nivel bajo	80	3	100	1

Tabla 15. Factores de DOE para las piezas paletas con sus niveles

Factores/niveles	Presión de mantenimiento [Bar]	Tiempo de mantenimiento [s]	Velocidad de inyección [mm/s]	Tiempo de enfriamiento [s]
Nivel alto	948	6	119	7
Nivel bajo	80	3	100	1

Los valores de los niveles fueron tomados de la experimentación del moldeo científico. Para el caso de la presión de mantenimiento, se tomó como referencia el centro de la ventana de proceso, el valor

alto correspondió al límite superior de la ventana y el valor mínimo el límite inferior. En cuanto al tiempo de mantenimiento, a partir del análisis de los gráficos obtenidos del moldeo científico, se usaron los tiempos en los cuales la masa se estabilizó hasta que la pieza presentó sobre empaque. El criterio para seleccionar los niveles alto y bajo de la velocidad de inyección, se basó en la curva de viscosidad de moldeo científico. Se ubicó el intervalo donde la viscosidad permaneció con menor cambio respecto al resto de la curva. Los niveles de tiempo de enfriamiento fueron los mismos empleados en la experimentación de moldeo científico.

En Minitab ®16.2.3 se creó un diseño factorial completo de dos niveles, con 4 factores y 1 réplica, ecuación 15, con un bloque sin puntos centrales (las tablas de diseño aleatorizado se encuentran en el apartado de anexos):

Ecuación 12 Diseño de experimentos

$$n = l^f$$

Donde:

n → Número de experimentos

l → Numero de niveles, 2

f → Numero de factores, 4

$$n = 2^4 = 16$$

Los experimentos generados en Minitab ® se realizaron en orden aleatorio, se hicieron cinco inyecciones por cada experimento, cada inyección proporcionó dos piezas, en el caso de los moldes de actuadores y bases, y cuatro piezas en el molde de paletas. Todas las piezas fueron dimensionadas 24 horas después de su manufactura, empleando una hoja de cálculo, se vaciaron las lecturas y por cada experimento se obtuvo su valor promedio. El valor promedio de las dimensiones se ingresó a la hoja de trabajo de Minitab® donde se analizó el DOE. Posterior a ello se utilizó la herramienta de análisis de DOE. Se seleccionaron las respuestas o dimensiones críticas para las paletas. Los términos empleados fueron:

A: Presión de mantenimiento

B: Tiempo de mantenimiento

C: Velocidad de inyección

D: Tiempo de enfriamiento

Se empleó un $\alpha=0.05$ es decir la predicción tuvo un nivel de confianza del 95% Se obtuvo de cada dimensión un gráfico de efectos normal.

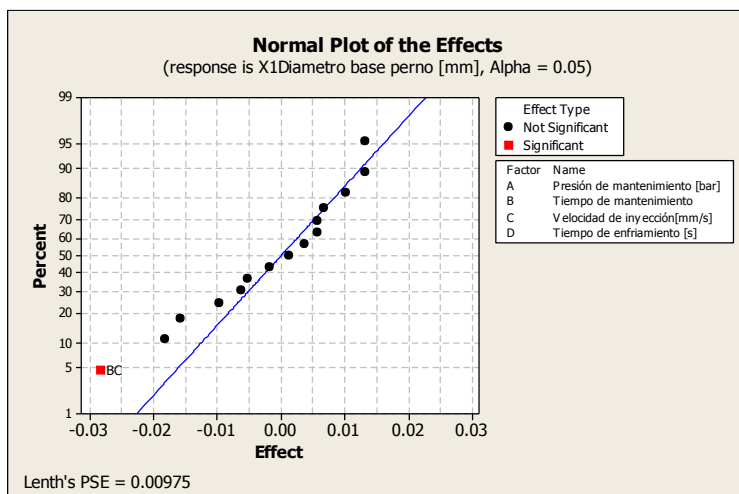


Figura 53. Gráfico de efectos normal sobre el diámetro de la base del perno para la cavidad X1 de la paleta

En el gráfico de la figura 64 se puede observar que el factor significativo fue la combinación de BC, con un efecto cercano a -0.03 al 5 %.

Se realizó el análisis de varianza ANOVA para el diámetro de base de perno como se puede observar en la tabla 16.

Tabla 16 Análisis de varianza ANOVA para el diámetro de base de perno

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Fo	Valor P
A:Presión de mantenimiento	0.00015625	1	0.00015625	0.48	0.5175
B:Tiempo de mantenimiento	0.00018225	1	0.00018225	0.56	0.4862
C:Velocidad de inyección	0.00070225	1	0.00070225	2.18	0.2002
D:Tiempo de enfriamiento	0.00133225	1	0.00133225	4.13	0.0979
AB	0.00070225	1	0.00070225	2.18	0.2002
AC	0.00013225	1	0.00013225	0.41	0.5502
AD	0.00000625	1	0.00000625	0.02	0.8947
BC	0.00319225	1	0.00319225	9.89	0.0255
BD	0.00038025	1	0.00038025	1.18	0.3272
CD	0.00011025	1	0.00011025	0.34	0.5842
Total error	0.00161325	5	0.00032265		
Total (corr.)	0.00850975	15			

A demás se obtuvieron los siguientes valores.

$$R^2 = 81.04\%$$

$$R^2(\text{ajustada a los grados de libertad}) = 43.12\%$$

$$\text{Error estandar} = 0.01$$

$$\text{Error medio absoluto} = 0.008$$

La tabla 16 secciona la variabilidad de la respuesta (diámetro de base de perno) en piezas separadas para cada efecto. La significancia estadística de cada efecto se obtuvo por comparación del cuadrado de la media contra un estimado del error experimental. En este caso, la interacción BC tiene valor P menor a 0.05, indicando que la combinación BC es significativamente diferente y su efecto sobre la respuesta no es influenciado por el azar con un 95% de confianza.

El valor estadístico de R^2 indica que el modelo se ajustó en 81.04% a la variabilidad de la respuesta (diámetro de base de perno). El valor estadístico de R^2 ajustada, el cual es más conveniente para

comparar modelos con números diferentes de variables independientes, es 43.12%. El error medio absoluto es el valor promedio de los residuales en este caso fue 0.008.

En la figura 54 se puede apreciar la interacción entre el tiempo de mantenimiento (factor B) y velocidad de inyección (factor C). Con el factor B y factor C en sus valores mínimos la respuesta mínima es de 1.93mm para el diámetro de base de perno. La respuesta máxima, 1.97mm, se obtiene con la combinación del tiempo de mantenimiento en su valor mínimo y la velocidad de inyección en su valor máximo.

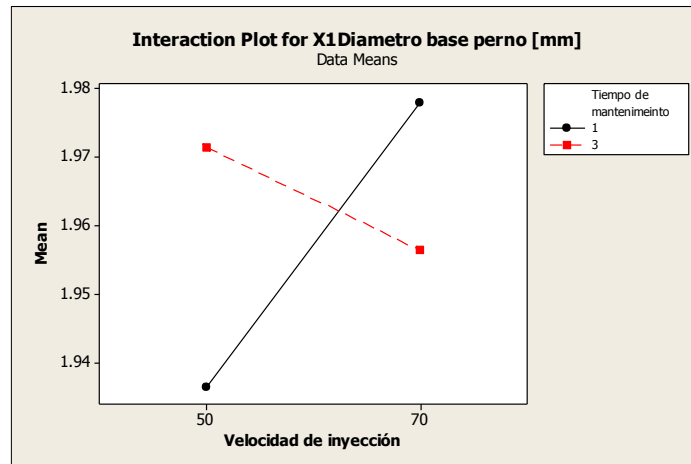


Figura 54 Gráfico de interacción de los factores BC en la respuesta del diámetro de base de perno para la pieza paleta

Los factores significantes así como sus valores P para las dimensiones restantes de las piezas del ensamble se encuentran concentrados en la tabla 17.

Tabla 17 Factores significantes en las dimensiones críticas del ensamble

Dimensión	Factores y combinaciones con efecto significativo	Efecto	%	Valor P
DISTANCIA 1	A	43	95.75	0
DISTANCIA 2	A	43.25	95.85	0
PX DIAMETRO BASE PERNO	BC	-0.028	4.71	0.02
PX DIAMETRO PUNTA PERNO	D	0.04	95	0.01
PX LONGITUD ENSAMBLE	-	-	-	-
PY DIAMETRO BASE PERNO	-	-	-	-
PY DIAMETRO PUNTA PERNO	-	-	-	-
PY LONGITUD ENSAMBLE	-	-	-	-
DIAMETRO DE ENGANCHE	BD, BCD, ACD, AB	-0.074, -0.068, -0.068, 0.060	4.97, 11.59, 17.56, 95.19	0.31,-,-,0.39
DIAMETRO DE RIEL	ABD, ACD, ABCD, BC	-0.05, -0.04, -0.04, -0.04	4.55, 11.11, 18.35, 24.33	-,-,-,0.11
DISNTANCIA ENTRE PERIMETROS INTERNOS	-	-	-	-
DIAMETRO BARRENO 1	B	-0.071	4.60	0.74
DIAMETRO BARRENO 2	-	-	-	-

Se puede ver en la tabla 17 que para las combinaciones de tres y cuatro factores no fue posible calcular el valor P ya que no se encontraron grados de libertad para estimar el error. Se puede observar que las únicas dimensiones con un valor de $P < 0.05$, es decir, afectadas estadísticamente por las variables seleccionadas son la distancia 1 y 2, el diámetro de la base y de la punta del perno en la paleta X.

Se realizó la optimización de parámetros, en la cual se establecieron como medidas objetivo para las dimensiones críticas las presentes en el diseño, y se establecieron como límites superiores e inferiores de dimensión las medidas de diseño ± 0.1 mm. La tabla 18 muestra los parámetros optimizados en Minitab®

Tabla 18. Factores optimizados en Minitab® que promueven la obtención de dimensiones de diseño de las piezas con tolerancia de ± 0.1 mm.

Factor		Paletas	Actuadores	Bases
Presión de mantenimiento [Bar]	de	91	948	185
Tiempo de mantenimiento [s]	de	2	3	4.5
Velocidad de inyección [mm/s]	de	60	119	75
Tiempo de enfriamiento [s]	de	20	1	3.5

Se inyectaron 400 piezas con los parámetros optimizados de la tabla 18, después de 24 horas se dimensionaron las piezas y se analizaron estadísticamente en Minitab®. Con base en el criterio de capacidad de proceso, $C_p = 1$, y $C_{pk} = C_p$, En la tabla 19 se puede apreciar que el proceso sólo es capaz

de brindar las dimensiones requeridas para diámetro de la base del perno para la paleta X, y para el diámetro de barreno 2. Para el resto de dimensiones, el proceso no es capaz. Las dimensiones con Cp más cercano a 1 fueron: Diámetro de barreno 1, CP>0.9 y diámetro de base de perno paleta Y, con Cp>0.8. La menor capacidad del proceso se encontró en las dimensiones: Distancia1 y 2, diámetro de riel y diámetro de enganche, con Cp<0.4.

Tabla 19. Resumen de análisis estadístico aplicado sobre las piezas obtenidas con los parámetros de la optimización proveniente del DOE

Dimensión	Valor diseño[mm]	Tol + [mm]	Tol- [mm]	\bar{X} [mm]	UCL [mm]	LCL [mm]	\bar{R}_{mm}	ULC [mm]	LCL	STDEV [mm]	CP	CPK
DISTANCIA 1	43.56	43.66	43.46	43.60	43.76	43.44	0.27	0.58	0	0.11	0.28	0.16
DISTANCIA 2	43.58	43.68	43.48	43.32	43.45	43.19	0.22	0.47	0	0.09	0.34	-0.52
PX DIAMETRO BASE PERNO	1.96	2.06	1.86	1.89	1.94	1.85	0.07	0.15	0	0.03	1.05	0.41
PX DIAMETRO PUNTA PERNO	1.72	1.82	1.62	1.70	1.77	1.62	0.12	0.26	0	0.05	0.62	0.51
PX LONGITUD ENSAMBLE	22.5	22.6	22.4	22.77	22.92	22.62	0.25	0.53	0	0.10	0.30	-0.53
PY DIAMETRO BASE PERNO	1.96	2.06	1.86	2	2.05	1.94	0.08	0.18	0	0.03	0.87	0.52
PY DIAMETRO PUNTA PERNO	1.72	1.82	1.62	1.73	1.8	1.65	0.13	0.27	0	0.05	0.59	0.52
PY LONGITUD ENSAMBLE	22.72	22.82	22.62	22.79	22.91	22.67	0.21	0.44	0	0.09	0.37	0.10
DIAMETRO DE ENGANCHE	44.75	44.85	44.65	44.38	44.94	43.81	0.97	2.06	0	0.41	0.08	-0.21
DIAMETRO DE RIEL	43	43.1	42.9	43.22	43.45	42.98	0.04	0.86	0	0.17	0.19	-0.23
DISNTANCIA ENTRE PERIMETROS INTERNOS	21.21	21.31	21.11	21.19	21.36	21.03	0.29	0.61	0	0.12	0.27	0.24
DIAMETRO BARRENO 1	1.79	1.89	1.69	1.82	1.87	1.78	0.08	1.17	0	0.03	0.95	0.60
DIAMETRO BARRENO 2	1.79	1.89	1.69	1.84	1.88	1.80	0.06	0.13	0	0.02	1.18	0.55

Se realizó la comparación entre los resultados del análisis estadístico de la tabla 12 y la tabla 19, la comparación muestra que el proceso se volvió más capaz después de la aplicación del DOE. De las 13 dimensiones críticas analizadas, 5 presentan mayor capacidad con los parámetros del molde científico, 8 presentan mayor capacidad debido al DOE. Es decir el DOE mejoró la capacidad del proceso del 68% de las dimensiones críticas.

Se procedió a ensamblar las piezas, de manera manual y tomando las piezas de manera aleatoria. Los 100 ensambles realizados funcionaron adecuadamente, figura 55.



Figura 55 Ensamblados provenientes de la optimización del DOE

RESULTADOS PRINCIPALES

Se indicó la ubicación de los puntos de inyección a partir de análisis de la resistencia al flujo dentro de las piezas usando MFA®. En conjunto con la empresa DIMAQ y en vista de que se trató de moldes prototipo, se estableció el número de cavidades en 4 para el molde de paletas y 2 para los moldes de bases y actuadores. Se diseñó, en conjunto con la empresa DIMAQ, una distribución de cavidades, para el molde de actuadores y bases, que fuese capaz de compartir el mismo sistema de alimentación de plástico por colada caliente.

El sistema de levantadores en el molde de actuadores permitió la expulsión de las piezas completas sin dañar las protuberancias internas. Evitó la deformación plástica de las piezas por acción de los pernos expulsores. Con este sistema se pudo aplicar el tiempo de enfriamiento necesario para que las piezas alcanzaran rigidez necesaria al momento de ser expulsadas

El sistema de correderas deslizables del molde de bases en combinación con los pernos expulsores logró la extracción de las piezas bases completas y sin deformación plástica de sus protuberancias periféricas. El sistema permitió la aplicación del tiempo de enfriamiento necesario para estas geometrías.

El diseño de las distribuciones de cavidades, geometrías, longitudes y diámetros de los sistemas de alimentación fue validado en MFA® previa manufactura. Se propuso el diseño de los sistemas de enfriamiento para el control de temperaturas en los moldes, los cuales fueron evaluados en MFA® previa manufactura. De estas simulaciones se obtuvo que la máxima contracción volumétrica en el molde de paletas fue de 8.34%, de 7.25% para el molde de las bases y 6.73% para el molde de actuadores.

Con porcentajes de tamaño de disparo inferiores al 20%, incluso de 4.4%, se lograron obtener piezas conformes sin inconsistencias disparo a disparo de inyección, esto se logró aumentando el cojín de masa, mediante la manipulación de la carrera de dosificación y el punto de conmutación.

La exactitud de las predicciones de MFA® se pudo medir con los resultados del proceso de inyección estabilizado por la metodología del procesamiento científico y por la optimización basada en DoE, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 20 Porcentajes de contracción en las dimensiones críticas predichos por Moldflow y contrastados con los observados de la aplicación de Moldeo científico y DoE

% de contracción				
Pieza	Dimensión crítica	Moldflow Adviser 2014	Moldeo científico	DoE
Actuador	Distancia 1	0.48	0.68	0.47
	Distancia 2	-0.55	0.91	0.59
Bases	Diámetro de enganche	0.53	0.35	0.17
	Diámetro de riel	0.55	0.71	-
	Distancia entre perímetros internos	0.37	0.37	0
	Diámetro de barreno 1	3.18	11.05	5.26
	Diámetro de barreno 2	3.18	11.05	3.15
Paleta X	Diámetro base perno	4.26	5.58	4.06
	Diámetro punta perno	4.26	-3.40	3.40

	Longitud de ensamble	1.33	0	- 1.65
Paleta Y	Diámetro base perno	4.26	5.58	- 1.52
	Diámetro punta perno	4.26	7.95	1.70
	Longitud de ensamble	1.32	0.70	- 0.04

De la tabla 20 se determinó el porcentaje de desviación que se presentó entre los porcentajes de contracción predichos por MFA®, moldeo científico y DoE. La media de los porcentajes de desviación fueron 62.39% y 52% para moldeo científico y DoE.

El secado del material se hizo a la mitad de tiempo que la recomendada por el fabricante del material debido a que el flujo de aire en el secador disponible, genera 2.13 veces el flujo recomendado.

Los porcentajes de tamaño de disparo fueron inferiores al 10% de la capacidad del equipo. Las variables de proceso estabilizadas por moldeo científico no fueron capaces de brindar las dimensiones de diseño bajo las tolerancias propuestas $\pm 0.1 \text{ mm}$. La mayor capacidad de proceso se encontró en las dimensiones: diámetro de barreno 1 y 2, y diámetro de base de perno con un $Cp > 0.8$. La menor capacidad de proceso se encontró en las dimensiones: distancia 2, longitud de ensamble paleta Y, diámetro de riel y diámetro de enganche con un $Cp < 0.04$.

El 30% de los ensambles realizados con piezas obtenidas de la estabilización de variables de proceso por moldeo científico funcionaron adecuadamente, el 70% de los mismos presentaron fallas por ajuste excesivo entre la pieza actuador y base.

Se realizó la optimización del proceso de inyección mediante DoE, de 9 variables de proceso disponibles, se realizó con cuatro.

- Presión de mantenimiento
- Tiempo de mantenimiento
- Velocidad de inyección
- Tiempo de enfriamiento

Mediante un análisis de varianza ANOVA, se comprobó que las variables seleccionadas para realizar el DoE tuvieron efecto en 4 de las 13 dimensiones críticas.

La selección de factores de DoE se hizo con base en los resultados de moldeo científico. El manejo de datos y la estadística se realizó en el software Minitab 16 ® El DoE fue un diseño factorial completo de dos niveles, 4 factores y una réplica. Aunque los experimentos se realizaron cinco veces y su valor promedio fue el que se ingresó al software para el proceso estadístico. Del cual el valor de $\alpha = 0.05$, es decir, con 95% de confianza.

Se logró que el proceso tuviera la capacidad de producir las siguientes dimensiones: diámetro de la base del perno de la paleta X y para el diámetro de barreno 2 en la pieza base.

De las 13 dimensiones críticas analizadas, 5 presentan mayor capacidad con los parámetros del moldeo científico, 8 presentan mayor capacidad debido al DoE.

Los 100 ensambles realizados con piezas provenientes de la optimización de DoE funcionaron adecuadamente.

CONCLUSIONES

Los resultados de contracción en las dimensiones críticas obtenidos de las simulaciones de llenado, empaquetamiento y enfriamiento, para el ensamble presentado, fueron más cercanos a los resultados obtenidos de la optimización de DoE en un 10%, lo que quiere decir que las simulaciones en MFA fueron confiables y se pueden aplicar con toda confianza al PLA en moldes de canal caliente y frío para piezas de ensamble.

Un sistema de canal caliente puede ser usado para ser compartido por dos moldes cuando la distribución de cavidades de estos sea la misma, geometría y dimensión de los puntos de inyección, además, las piezas deben requerir el mismo material y el volumen en las cavidades debe ser similar.

Si el tiempo de secado de material no se encuentra expresado en el manual del equipo secador, se puede reducir a la mitad siempre y cuando el caudal de aire seco sea el doble que el requerido y la temperatura del mismo sea la requerida por el fabricante del plástico.

Al comparar los gráficos de viscosidad aparente versus velocidad de inyección, se observa que los moldes de bases y actuadores tienen un comportamiento similar con diferentes niveles de viscosidad, sin embargo el gráfico correspondiente al molde de paletas no tiene la misma forma de los moldes anteriores ni la del molde de paletas reportado en [2]. Esto sugiere que para moldes con más de 2 cavidades el comportamiento de la viscosidad aparente será diferente, ya que la diferencia entre estos moldes radica en el número de cavidades. No obstante, el procedimiento se puede utilizar para determinar la velocidad de inyección como lo indica la metodología de moldeo científico, pues en este estudio se logró determinar la zona de menor variación de viscosidad.

El procedimiento que consume mayor tiempo es el establecimiento y medición de la temperatura de masa fundida. Es necesario una modificación a la máquina de inyección para la adición de un sensor de temperatura que esté en contacto con la resina y permita tener mejor control de la variable ya que es una de las principales variables del proceso y se debe de medir con mayor exactitud y precisión.

Las ventanas de proceso en los moldes de colada caliente fueron de mayor tamaño que la ventana de proceso del molde de colada fría. El molde en el cual el proceso puede admitir mayor variación de temperatura de masa fundida y presión de mantenimiento fue el de actuadores, seguido del molde de bases y el molde de paletas. Las ventanas de proceso también se pueden emplear como indicadores de desgaste de moldes, ya que si se realiza el estudio después de cierto número de ciclos, las ventanas deben de verse reducidas, al permitir, que el plástico escape de los moldes con menor presión de mantenimiento.

El procedimiento indicado por la metodología de moldeo científico para determinar el tiempo de enfriamiento no es claro. Ya que según Kulkarni [36] el comportamiento de las dimensiones frente al tiempo de enfriamiento es lineal o constante, y en los análisis realizados se comprueba lo contrario. Es necesario hacer uso de la experiencia en procesos similares, literatura y apoyarse en resultados de simulación para poder establecer el tiempo de enfriamiento.

El moldeo científico sirvió para conocer el desempeño del molde, fallos, y comportamientos del mismo ante diferentes condiciones de proceso haciendo uso del PLA. Se recomienda la implementación de esta metodología cuando tanto el molde como el plástico no se han manejado

antes. Es adecuada para la investigación de nuevos materiales y mezclas de ellos. Así como se recomienda para la corrección de faltas a calidad de las piezas moldeadas.

En este trabajo se estableció la capacidad de procesamiento del PLA bajo los esquemas de colada caliente y colada fría para piezas de ensamble, donde la hipótesis se verificó de manera favorable, pues se aplicaron recomendaciones de diseño de piezas plásticas para el rediseño del ensamble dosificador.

Con este trabajo también se demuestra que el personal de diseño, de procesamiento de plásticos y de fabricación de moldes debe laborar en conjunto desde la concepción del diseño; y que aunque se sabe que los fabricantes de moldes realizan sus propios diseños de herramental; este trabajo demuestra que el personal de procesamiento de plásticos puede contribuir en gran medida a los nuevos diseños.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. Muñoz y O. Zumaya, «Diseño de un sistema cerrado resellable y compostable para empaques con diferentes aplicaciones,» México, 2012.
- [2] V. E. Hernández Álvarez y A. Chavez Álvarez, «Diseño y validacion de un molde prototipo para producto de plástico biodegradable,» México D.F, 2013.
- [3] N. LLC, «NatureWorks Ingeo:naturally advanced materials,» 2014. [En línea]. Available: www.natureWorkslc.com. [Último acceso: 24 11 2014].
- [4] nypro, «Nypro a jabil company,» nypro, 2014. [En línea]. Available: www.nypro.com. [Último acceso: 24 11 2014].
- [5] alibaba, «alibaba.com,» 2014. [En línea]. Available: www.alibaba.com. [Último acceso: 24 11 2014].
- [6] L. Plast, «Leoplast,» 2014. [En línea]. Available: www.leoplastgroup.com. [Último acceso: 24 11 2014].
- [7] M. Bohn y P. Steinle, «Dimensional stability and variance of carbon fiber reinforced plastics-Current state and necessary future developments,» *12 th CIRP Conference an Computer Aided Tolerancing*, n° 10, pp. 283-286, 2013.
- [8] J. Gámez García, Á. Sánchez García, S. Satorres Martínez y J. Gómez Ortega, «Ensamblaje automático de piezas con desviaciones dimensionales,» *Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, n° 9, pp. 383-392, 2012.
- [9] Y. Lennar y Ljunberg, «Materials selection and design for estructural polymers,» *Materials & Design*, n° 24, pp. 383-399, 2003.
- [10] F. Andersson, H. Astrid, E. Sundin y B. Mats, «Design for Manufacturing of Composite Structures for Commercial Aircraft-the Development of a DFM strategy at SAAB Aerostructures,» *Variety Management in Manufacturing*, n° 17, pp. 362-367, 2014.
- [11] J. M. Brock y P. K. Wright, «Design Tool for Injection Molded Snap Fits in Consumer roducts,» *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 21, n° 1, 2002.
- [12] Y.-H. Chen y L. Chao-Chieh, «Design of a constant- force snap-fit mechanism for minimal mating uncertainty,» *Mechanism and Machine Theory*, n° 55, pp. 34-50, 2012.
- [13] R. Spina, «Injection moulding of automotive components: comparison between hot runner systems for a case study,» *Materials Processing Technology*, n° 156, pp. 1497-1504, 2004.
- [14] C. Javierre, Á. Fernández, J. Aísa y I. Clavería, «Criteria on feeding system design: Conventional and sequential injection moulding,» *Journal of Materials Processing Technology*, n° 171, pp. 373-384, 2006.
- [15] A. Demirer, Y. Soydan y A. O. Kapti, «An experimental investigation of the effects of hot runner system on injection moulding process in comparison with conventional runner system,» *Materials & Design*, n° 28, pp. 1467-476, 2007.
- [16] M. M. (R), «Hot Runner Justification Tool,» Mold Master, 2014. [En línea]. Available: <http://moldmasters.com>. [Último acceso: 04 09 2014].
- [17] G. Yuehua y W. Xicheng, «Surrogate-based process optimization for reducing warpage in injection molding,» *Journal of Materials Processing Technology*, n° 209, pp. 1302-1309, 2009.
- [18] T. S.B, L. S.G y H. Chung Yee, «A two-stage collapsible core for injection moulded plastic parts with internal undercuts,» *Machine Tools & Manufacture*, n° 40, pp. 1215-1233, 2000.
- [19] custompart.net, «custompart.net,» [En línea]. Available: <http://www.custompartnet.com/glossary/e>. [Último acceso: 5 09 2015].

- [20] E. Tuncay y O. Babur, «Minimization of warpage and sink index in injection-molded thermoplastic parts using Taguchi optimization method,» *Materials and Design*, n° 27, pp. 853-861, 2006.
- [21] H. Oktem, T. Erzurumlu y I. Uzman, «Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part,» *Materials and Design*, n° 28, pp. 1271-1278, 2007.
- [22] O. Babur y S. Ibrahim, «Warpage and structural analysis of thin shell plastic in the plastic injection molding,» *Materials and Design*, n° 30, pp. 367-375, 2009.
- [23] M. Huang y T. Lin, «An innovative regression model-based searching method for setting the robust injection molding parameters,» *Journal of Materials Processing technology*, n° 198, pp. 436-444, 2008.
- [24] R. Pantani, V. Volpe y G. Titomanlio, «Foam injection molding of poly(lactic acid) with environmentally friendly physical blowing agents,» *Journal of Materials Processing Technology*, n° 214, pp. 3098-3107, 2014.
- [25] R. Pantani y A. Sorrentino, «Influence of crystallinity on the biodegradation rate of injection-moulded poly(lactic acid) samples in controlled composting conditions,» *Polymer Degradation and Stability*, n° 98, pp. 1089-1096, 2013.
- [26] P. Child, R. Diederichs, F. Sanders y S. Wisniowski, «The management of complexity,» *Sloan Management Review*, vol. 1, n° 33, pp. 73-80, 1991.
- [27] H. S. Wang, Y. N. Wang y Y. C. Wang, «Cost estimation of plastics injection molding parts through integration of PSO and BP,» *Neural Network Expert System With Applications*, n° 40, pp. 418-428, 201.
- [28] B. P. Nepal, L. Monplaisir y S. N., «Integrated fuzzy logic-based model for product modularization during concept development phase,» *International Journal of Production economics*, vol. 2, n° 96, pp. 157-174, 2005.
- [29] B. P. Nepal, L. Monplaisir y O. Famuyiwa, «Matching product architecture with supply chain design,» *Europea Journal of Operational Research*, n° 216, pp. 312-325, 2012.
- [30] S. Finger y J. Dixon, «A review of Research in Mechanical engineering Design processes,» *Research in engineering Design*, n° 1, pp. 51-67, 1989.
- [31] H. Rees, *Understanding product Design for injection molding*, Cincinnati OH, 1996.
- [32] M. Kirk y C. Watts, *plastics Processing*, Oxford UK: Oxford, 2011.
- [33] D. Madsen, *print Reading for Engineering & Manufacturing Technology*, NY USA, 2012.
- [34] O. Kazmer, *Injection Mold Design Engineering*, Munich: Hanser, 2007.
- [35] E. J. Hearn, *Resistencia de materiales, Diseño de estructuras y máquinas*, Mexico D.F: Nueva Editorial Interamericana, S.A. de C.V., 1984.
- [36] S. Kulkarni, *Robust Process Development and Scientific Molding*, Cincinnati : Hanser, 2010.
- [37] PolyOne, «PolyOne,» PolyOne Corporation, 2015. [En línea]. Available: http://www.glstpes.com/resources_im_md.php. [Último acceso: 21 09 2015].
- [38] L. Technology, «Mold Design-Runners,» Long Mold Technology Co., Ltd, 03 2005. [En línea]. Available: <http://www.longmold.com/viewnews.php?id=30>. [Último acceso: 21 09 2015].
- [39] G. Menges, M. Walter y P. Mohren, *How to make Injection Molds*, Munich: Hanser, 2001.
- [40] A. Inc, «Autodesk Knowledge Network,» Autodesk, 07 04 2014. [En línea]. Available: <http://Knowledge.autodesk.com/>. [Último acceso: 02 09 2014].
- [41] R. A. Malloy, *Plastic Part Design for Injection Molding*, New York: Hanser, 1994.

- [42] L. Tin Sin, A. Razak Rahmat y W. A. W. Abdul Rahman, *Polylactic acid*, Chennai India: Elsevier, 2013.
- [43] L. T. Lim, R. Auras y M. Rubino, «processing technologies for poly(lactic acid),» *Progress in polymer science*, n° 33, pp. 820-852, 2008.
- [44] G. B. m. Inc, «Plastics Technology,» 04 2009. [En línea]. Available: www.ptonline.com. [Último acceso: 24 11 2014].
- [45] ASTM, *ASTM E2281-03 Standar Practice for process and Measurement Capability Indices*.
- [46] M. Inc, «Minitab(R),» 2015. [En línea]. Available: <http://www.minitab.com>. [Último acceso: 08 06 2015].
- [47] J. R. Wagner Jr., E. M. Mount III y H. M. Giles Jr., *Extrusion (Second edition) The Definitive Processing Guide Handbook*, Misisipi: Elsevier, 2014.
- [48] M. Douglas C., *Diseño y Analisis de Experimentos*, Belmont: Grupo Editorial Iberoamérica, 1991.
- [49] V. Borja Ramirez, A. Ramirez Reivich, S. S. Ruíz Pérez Palacios, O. Zumaya González y O. A. Muñoz Velazquillo, «Desarrollo de un dispositivo resellable para empaques flexibles,» *Memorias del XIX Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 2013.
- [50] V. E. Hernández Álvarez, M. Trujillo Barragán , R. A. Nácar Martínez y V. Borja Ramírez, «Aplicación del diseño prescriptivo para piezas plásticas de ensamble,» *TOMO I. Avances de la Ingeniería Mecánica en Diseño Mecánico Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica A.C.*, Vols. %1 de %2978-607-96746-1-8, pp. 300-310, 2014.
- [51] R. A. Nacar Martínez, *Rediseño de un dispensador para empaques*, Mexico D.F., 2015.
- [52] B. G. Dieter, *materials selection and Desing*, USA: ASM Handbook, 1997.
- [53] D. O. Kazmer, *Injection Mold Design Engineering*, Munich: Hanser, 2007.

ANEXO

ÍNDICE DE FIGURAS DE REFERENCIA

Figura de referencia 1 Modelo comercial EWIKON-L2X-TE 73761-02	vii
Figura de referencia 2. Inyectores comerciales Hasco(R).....	viii
Figura de referencia 3. Tiempo de llenado molde actuadores.....	ix
Figura de referencia 4. Caída de presión molde actuadores.....	ix
Figura de referencia 5. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión molde actuadores	x
Figura de referencia 6. Aire atrapado en molde de actuadores	x
Figura de referencia 7. Líneas de soldadura en molde de actuadores	xi
Figura de referencia 8. Línea de soldadura molde bases.....	xii
Figura de referencia 9. Aire atrapado molde bases	xii
Figura de referencia 10. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión molde bases	xiii
Figura de referencia 11. Caída de presión molde bases	xiii
Figura de referencia 12. Tiempo de llenado molde bases	xiv
Figura de referencia 13. Líneas de soldadura molde paletas.....	xv
Figura de referencia 14. Aire atrapado molde paletas.....	xv
Figura de referencia 15. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión molde paletas	xvi
Figura de referencia 16. Caída de presión molde paletas.....	xvi
Figura de referencia 17. Tiempo de llenado molde paletas.....	xvii
Figura de referencia 18. Contracción volumétrica del perno paleta x.....	xviii
Figura de referencia 19. Contracción volumétrica perno de la paleta Y	xviii
Figura de referencia 20. Deflexión longitud de ensamble paleta Y	xix
Figura de referencia 21. Deflexión longitud de ensamble paleta X	xix
Figura de referencia 22. Contracción volumétrica molde paletas	xx
Figura de referencia 23. Calidad de refrigeración molde de paletas	xx
Figura de referencia 24. Número de Reynolds molde paletas.....	xxi
Figura de referencia 25. Temperatura en el circuito de refrigeración	xxi
Figura de referencia 26. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión molde paletas	xxii
Figura de referencia 27. Caída de presión considerando refrigeración molde paletas	xxii
Figura de referencia 28. Tiempo de llenado considerando refrigeración molde paletas	xxiii
Figura de referencia 29. Deflexión del diámetro de riel y enganche.....	xxiii
Figura de referencia 30. Contracción en las piezas bases	xxiv
Figura de referencia 31. Contracción en la región de barrenos de la pieza base.....	xxiv
Figura de referencia 32. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión considerando la refrigeración	xxv
Figura de referencia 33. Calidad de refrigeración en el molde de bases considerando los canales de enfriamiento	xxv
Figura de referencia 34. Número de Reynolds en el molde de bases.....	xxvi
Figura de referencia 35. Temperatura en el circuito de refrigeración molde bases.....	xxvi
Figura de referencia 36. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión molde bases considerando la refrigeración	xxvii
Figura de referencia 37. Caída de presión molde de bases considerando refrigeración.....	xxvii
Figura de referencia 38. Tiempo de llenado molde de bases considerando la refrigeración.....	xxviii
Figura de referencia 39. Contracción volumétrica en región de las protuberancias internas	xxviii
Figura de referencia 40. Calidad de refrigeración del molde de actuadores	xxix
Figura de referencia 41. Temperatura en los circuitos de refrigeración del molde de actuadores .	xxix
Figura de referencia 42. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión.....	xxx
Figura de referencia 43. Caída de presión molde actuadores.....	xxx

Figura de referencia 44. Tiempo de llenado molde actuadores considerando refrigeración	xxx
Figura de referencia 45. Molde de inyección para las piezas base.....	xxx
Figura de referencia 46. Modelo solido del sistema de canal caliente común a los moldes de bases y actuadores.....	xxx
Figura de referencia 47. Lado de fijo del molde para bases.....	xxx
Figura de referencia 48. Molde de bases lado móvil.....	xxx
Figura de referencia 49. Sistema de expulsión molde de bases	xxx
Figura de referencia 50. Molde de actuadores	xxx
Figura de referencia 51. Molde de actuadores sección vertical.....	xxx
Figura de referencia 52. Inserto macho lado móvil e inserto cavidad lado inyección para molde de actuadores.....	xxx
Figura de referencia 53. Inserto cavidad lado de inyección.....	xxx
Figura de referencia 54. Sistema de expulsión para las piezas actuadores mediante levantadores	xxx
Figura de referencia 55. Estudio del balance de cavidades para las piezas actuadores (patrón de llenado).....	xxx
Figura de referencia 56. Variación de las dimensiones de la pieza actuador en función del tiempo de enfriamiento	xxx
Figura de referencia 57. Desviación de las dimensiones de las paletas en función del tiempo de enfriamiento con respecto a las dimensiones de diseño.....	xxx
Figura de referencia 58 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la distancia 2 obtenida por moldeo científico.....	xli
Figura de referencia 59 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la PX Diámetro de base de perno obtenida por moldeo científico.....	xli
Figura de referencia 60 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la PX Diámetro de punta de perno obtenida por moldeo científico.....	xlii
Figura de referencia 61 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la PX Longitud de ensamble obtenida por moldeo científico.....	xlii
Figura de referencia 62 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la PY Diámetro de base de perno obtenida por moldeo científico.....	xli
Figura de referencia 63 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la PY Diámetro de punta de perno obtenida por moldeo científico.....	xli
Figura de referencia 64 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la PY Longitud de ensamble obtenida por moldeo científico.....	xli
Figura de referencia 65 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de de enganche obtenida por moldeo científico.....	xli
Figura de referencia 66 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de riel obtenida por moldeo científico.....	xli
Figura de referencia 67 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la distancia entre perímetros internos obtenida por moldeo científico.....	xli
Figura de referencia 68 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de barreno 1 obtenida por moldeo científico.	xlii
Figura de referencia 69 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de barreno 2 obtenida por moldeo científico.	xlii
Figura de referencia 70 Gráfico de optimización para las paletas.....	liv
Figura de referencia 71 Gráfico de optimización para actuadores.....	lv
Figura de referencia 72 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la distancia 1 obtenida por DOE.....	lvi
Figura de referencia 73 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la distancia 2 obtenida por DOE.....	lvi

Figura de referencia 74 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de la base del perno de la paleta X obtenida por DOE.	lvii
Figura de referencia 75 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de la punta del perno de la paleta X obtenida por DOE.	lvii
Figura de referencia 76 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la longitud de ensamble de la paleta X obtenida por DOE.	lviii
Figura de referencia 77 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de la base del perno de la paleta Y obtenida por DOE.	lviii
Figura de referencia 78 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de la punta del perno de la paleta Y obtenida por DOE.	lix
Figura de referencia 79 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la longitud de ensamble de la paleta Y obtenida por DOE.	lix
Figura de referencia 80 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de enganche obtenido por DOE.	lx
Figura de referencia 81 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la diámetro de riel obtenido por DOE.....	lx
Figura de referencia 82 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la distancia 1 obtenida por DOE.	lxi
Figura de referencia 83 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de barreno1 obtenido por DOE.	lxi
Figura de referencia 84 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de barreno 2 obtenido por DOE.	lxii

ÍNDICE DE TABLAS DE REFERENCIA

Tabla de referencia 1 información técnica del equipo de inyección DEMAG ERGO TECH 50-270 .	i
Tabla de referencia 2 Dimensiones de platinas	i
Tabla de referencia 3 Hoja técnica PLA	ii
Tabla de referencia 4. Resultados de simulaciones de llenado para el molde de actuadores	xi
Tabla de referencia 5. Resultados de simulaciones de llenado para el molde de bases	xiv
Tabla de referencia 6. Resultados de simulaciones de llenado para el molde de paletas	xvii
Tabla de referencia 7. Perfil de temperaturas para alcanzar la mínima temperatura de masa fundida en el PLA en el molde de actuadores	xxxvii
Tabla de referencia 8. Perfil de temperaturas para alcanzar la máxima temperatura de masa fundida en el PLA en el molde de actuadores	xxxvii
Tabla de referencia 9. Parámetros obtenidos tras la aplicación del moldeo científico en el molde de bases	xxxix
Tabla de referencia 10. Parámetros obtenidos tras la aplicación del moldeo científico en el molde de actuadores.....	xxxix
Tabla de referencia 11 Datos con los cuales se generó la curva de viscosidad aparente en el molde de paletas.....	xl
Tabla de referencia 12. Parámetros obtenidos tras la aplicación del moldeo científico en el molde de paletas.....	xli
Tabla de referencia 13. Diseño de experimento en orden aleatorio	li
Tabla de referencia 14. Diseño de experimento en orden aleatorio	lii

ANEXO 1 TABLAS DE REFERENCIA

Tabla de referencia 1 información técnica del equipo de inyección DEMAG ERGO TECH 50-270

Modelo de Inyectora	Unidad de medida	de ERGOtech pro 50-270
Unida de Cierre	kN	500
Fuerza de Retención	kN	500
Carrera Máxima de Apertura	mm	400
Distancia Max. Entre platos portamoldes	mm	610
Platos portamoldes	mm	540x540
Distancia útil entre columnas	mm	355x355
Carrera del Expulsor	mm	125
Fuerza del expulsor	kN	41,2
Fuerza de retroceso del expulsor	kN	14,9
Diámetro del Husillo	mm	35
Relación L/D		20
Presión de Inyección	Bar	1890
Volumen Desplazado	Cm3	144.3
Peso Pieza Inyectada (Max)	g	128
Carrera Máxima de dosificación	mm	150
Carrera Máxima de Boquilla	mm	250
Profundidad de Inmersión de Boquilla (SVO)	Mm	40
Capacidad de la Tolva	l	35
Capacidad del tanque de aceite	l	135
Potencia eléctrica Total	kW	18,5

Tabla de referencia 2 Dimensiones de platinas

Equipo	Tamaño por lado de platinas porta moldes [mm]	Distancia entre columnas [mm]	Espesor mínimo de molde[mm]	Apertura de máxima de molde [mm]	Diámetro de anillo centrado[mm]
Demag	540	350	230	322	125

Ingeo™ Biopolymer 3251D



Injection Molding Process Guide

Ingeo biopolymer 3251D is designed for injection molding applications. This polymer grade has a higher melt flow capability than other Ingeo resin grades currently in the marketplace. The higher flow capability allows for easier molding of thin-walled parts.

It is designed for injection molding applications, both clear and opaque, requiring high gloss, UV resistance and stiffness.

Processing Information

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

Process Details

Startup and Shutdown

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

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

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

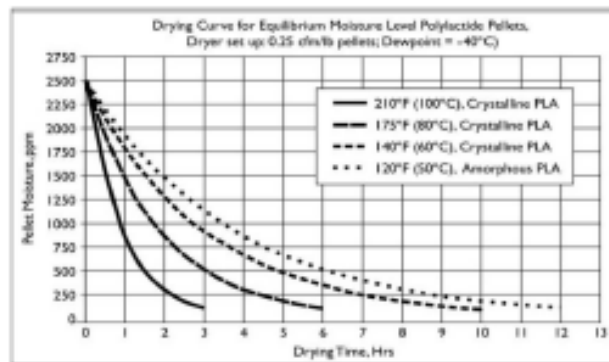
Note: These are starting points and may need to be optimized.

Drying

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

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

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



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. Ingeo biopolymer is made 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 participate in this degradation process. 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 Ecotoxicity. 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 Ingeo biopolymer meets the requirements of these four standards with limitation of maximum thickness 3.2mm.

Food Packaging Status

U.S. Status

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

<http://www.fda.gov/Food/foodinfo/rdm/rdmPackaging/FoodContactSubstances/FCN/ucm116567.htm>

This grade of Ingeo biopolymer may therefore be used in food packaging

materials and, as such, is a permitted component of such materials pursuant to section 201(s) of the Federal, Drug, and Cosmetic Act, and Parts 182, 184, and 186 of the Food Additive Regulations. All additives and adjuncts contained in the referenced Ingeo biopolymer formulation meet the applicable sections of the Federal Food, Drug, and Cosmetic Act. The finished polymer is approved for all food types and B-H use conditions. We urge all of our customers to perform GMP (Good Manufacturing Procedures) when constructing a package so that it is suitable for the end use. Again, for any application, should you need further clarification, please do not hesitate to contact NatureWorks LLC.

European Status

This grade of Ingeo biopolymer complies with Plastics Regulation 10/2011 as amended by 1282/2011. No SML's for the above referenced grade exist in Plastics Regulation 10/2011 as amended by 1282/2011. NatureWorks LLC would like to draw your attention to the fact that the EU-Plastics Regulation 10/2011, which applies to all EU-Member States, includes a limit of 10 mg/dm³ of the overall migration from finished plastic articles into food. In accordance with Plastics Regulation 10/2011 the migration should be measured on finished articles placed into contact with the foodstuff or appropriate food simulants for a period and at a temperature which are chosen by reference to the contact conditions in actual use, according to the rules laid down in Plastics Regulation 10/2011.

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

This grade as supplied meets European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste heavy metal content as described in Article 11. It is recoverable in the form of material recycling, energy recovery, composting, and biodegradable per Annex II point 3, subject to the standards of the local community. Again, for any application, should you need further clarification, please do not hesitate to contact NatureWorks LLC.

Bulk Storage Recommendations

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

Safety and Handling Considerations

Material Safety Data (MSD) sheets for Ingeo biopolymers are available from NatureWorks LLC. MSD sheets are provided to help customers satisfy their own handling, safety, and disposal needs, and those that may be required by locally applicable health and safety regulations, such as OSHA (U.S.A.), MAK (Germany), or WHMIS (Canada). MSD sheets are updated regularly; therefore, please request and review the most current MSD sheets before handling or using any product.

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

Hazards and Handling Precautions

Ingeo biopolymers have a very low degree of toxicity and, under normal conditions of use, should pose no unusual problems from incidental ingestion, or eye and skin contact. However, caution is advised when handling, storing, using, or disposing of these resins, and good housekeeping and controlling of dusts are necessary for safe handling of product. Workers should be protected from the possibility of contact with molten resin during fabrication. Handling and fabrication of resins can result in the generation of vapors and dusts that may cause irritation to eyes and the upper respiratory tract. In dusty atmospheres, use an approved dust respirator. Pellets or beads may present a slipping hazard. Good general ventilation of the polymer processing area is recommended. At temperatures exceeding the polymer melt temperature (typically 170°C), polymer can release fumes, which may contain fragments of the polymer, creating a potential to irritate eyes and mucous membranes. Good general ventilation should be sufficient for most conditions.

Local exhaust ventilation is recommended for melt operations. Use safety glasses if there is a potential for exposure to particles which could cause mechanical injury to the eye. If vapor exposure causes eye discomfort, use a full-face respirator. No other precautions other than clean, body-covering clothing should be needed for handling Ingeo biopolymers. Use gloves with insulation for thermal protection when exposure to the melt is localized.

Combustibility

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

Disposal

DO NOT DUMP INTO ANY SEWERS, ON THE GROUND, OR INTO ANY BODY OF WATER. For unused or uncontaminated material, the preferred options include recycling into the process or sending to an industrial composting facility, if available; otherwise, send to an incinerator or other thermal destruction device. For used or contaminated material, the disposal options remain the same, although additional evaluation is required. (For example, in the U.S.A., see 40 CFR, Part 261, "Identification and Listing of Hazardous Waste.") All disposal methods must be in compliance with Federal, State/Provincial, and local laws and regulations.

Environmental Concerns

Generally speaking, lost pellets are not a problem in the environment except under unusual circumstances when they enter the marine environment. They are benign in terms of their physical environmental impact, but if ingested by waterfowl or aquatic life, they may mechanically cause adverse effects. Spills should be minimized, and they should be cleaned up when they happen. Plastics should not be discarded into the ocean or any other body of water.

Product Stewardship

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

Customer Notice

NatureWorks LLC encourages its customers and potential users of its products to review their applications for such products from the standpoint of human health and environmental quality. To help ensure our products are not used in ways for which they were not intended or tested, our personnel will assist customers in dealing with ecological and product safety considerations. Your sales representative can arrange the proper contacts. NatureWorks LLC literature, including Material Safety Data sheets, should be consulted prior to the use of the company's products. These are available from your NatureWorks LLC representative.

NOTICE: No freedom from any patent owned by NatureWorks LLC or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. NatureWorks LLC assumes no obligation or liability for the information in this document. **NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR USE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.**

NOTICE REGARDING PROHIBITED USE RESTRICTIONS: NatureWorks LLC does not recommend any of its products, including samples, for use as: Components of, or packaging for, tobacco products; Components of products where the end product is intended for human or animal consumption; In any application that is intended for any internal contact with human body fluids or body tissues; As a critical component in any medical device that supports or sustains human life; In any product that is designed specifically for ingestion or internal use by pregnant women; and in any application designed specifically to promote or interfere with human reproduction.

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



 15305 Minnetonka Blvd., Minnetonka, MN 55345

ANEXO 2 DISEÑO

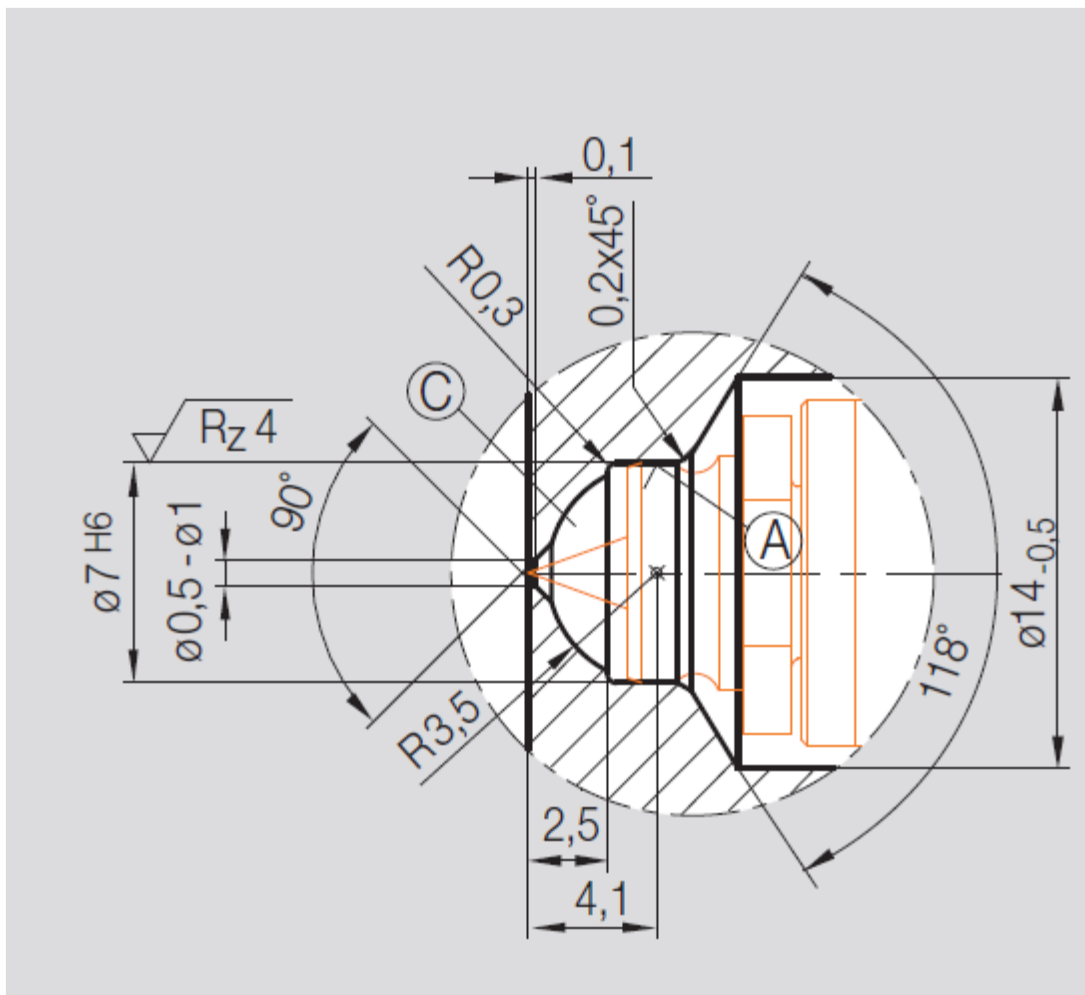


Figura de referencia 2. Inyectores comerciales Hasco(R)

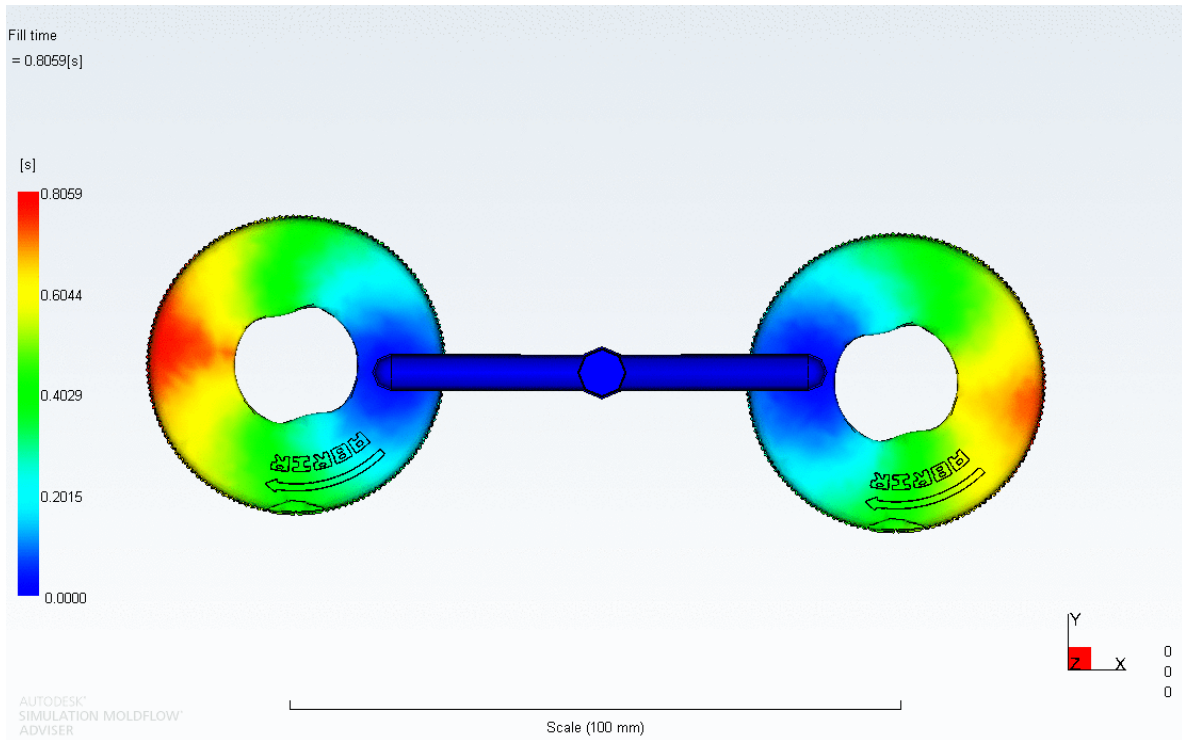


Figura de referencia 3. Tiempo de llenado molde actuadores

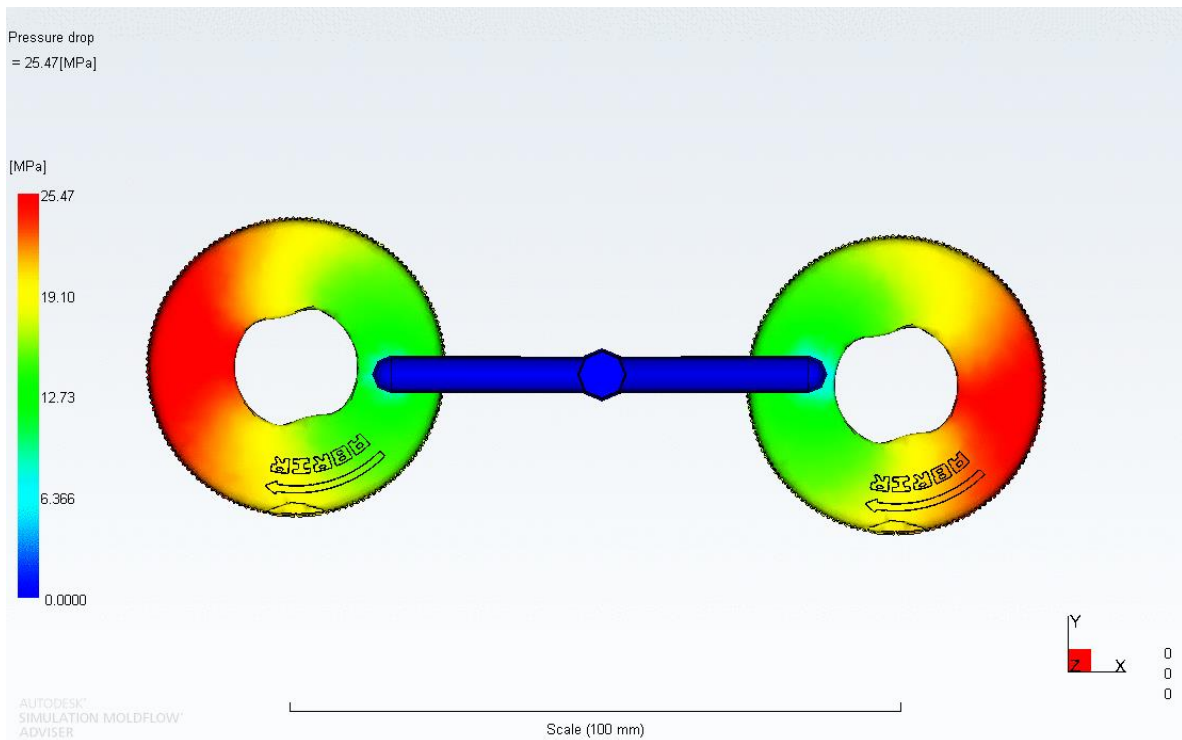


Figura de referencia 4. Caída de presión molde actuadores

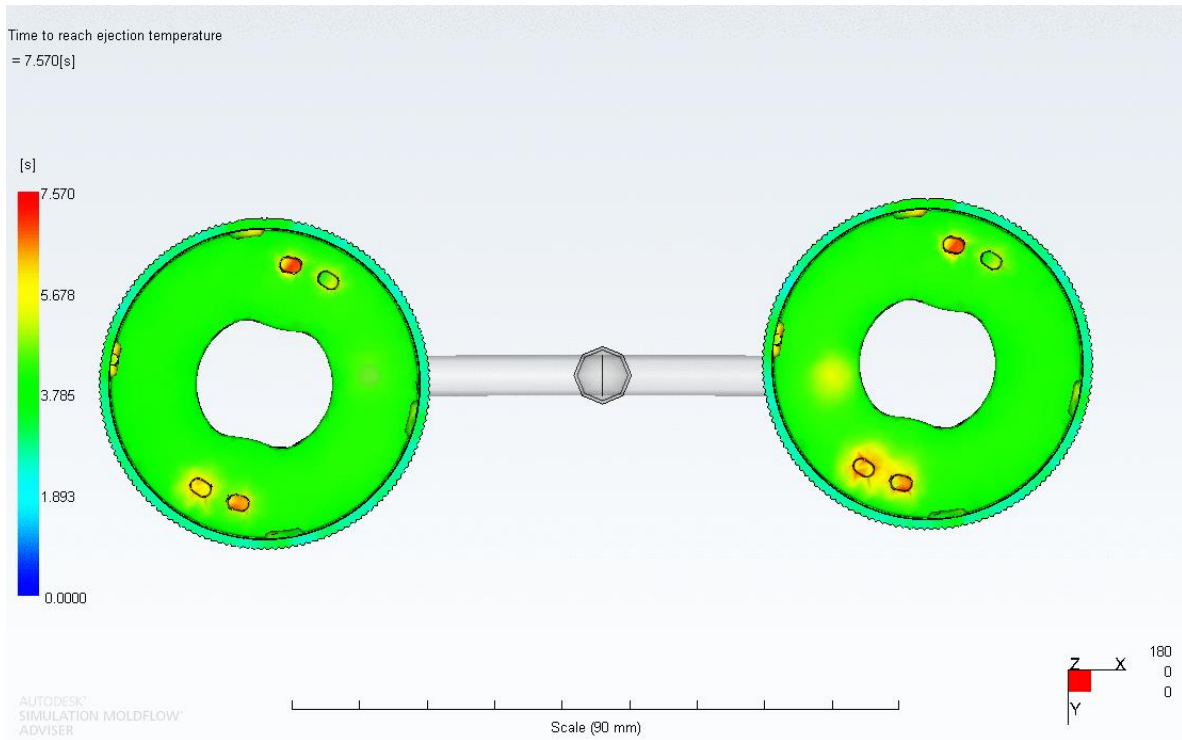


Figura de referencia 5. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión molde actuadores

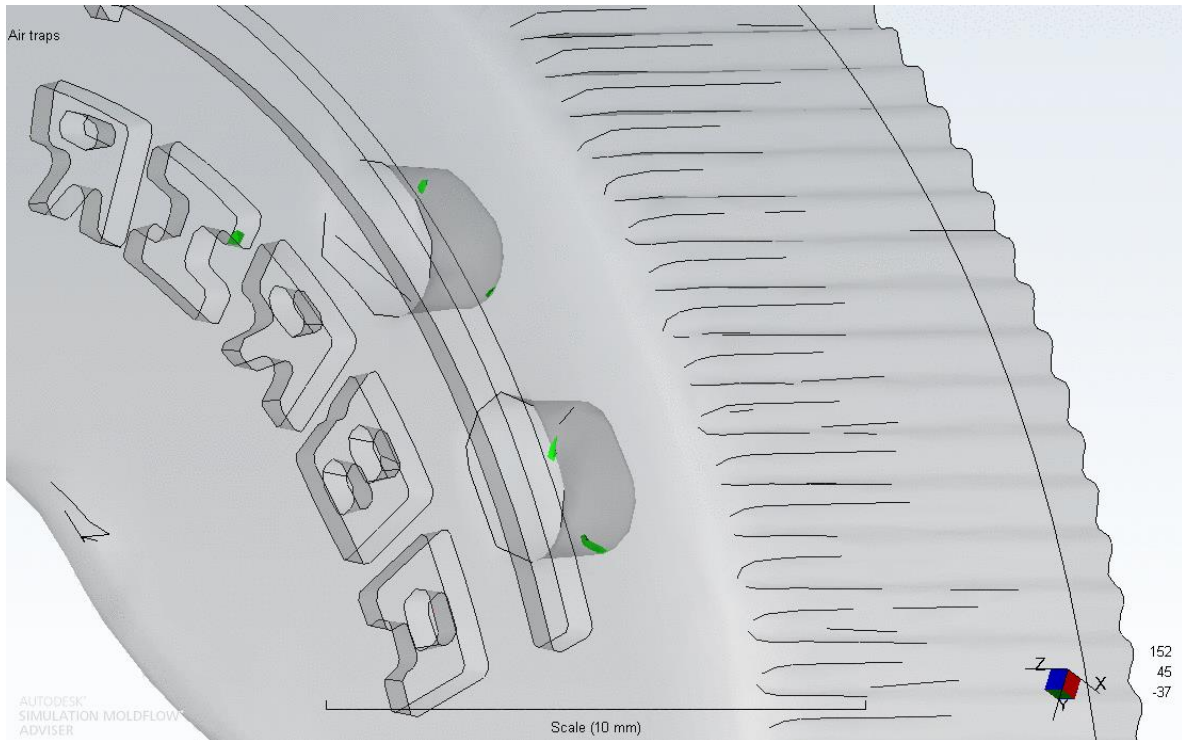


Figura de referencia 6. Aire atrapado en molde de actuadores

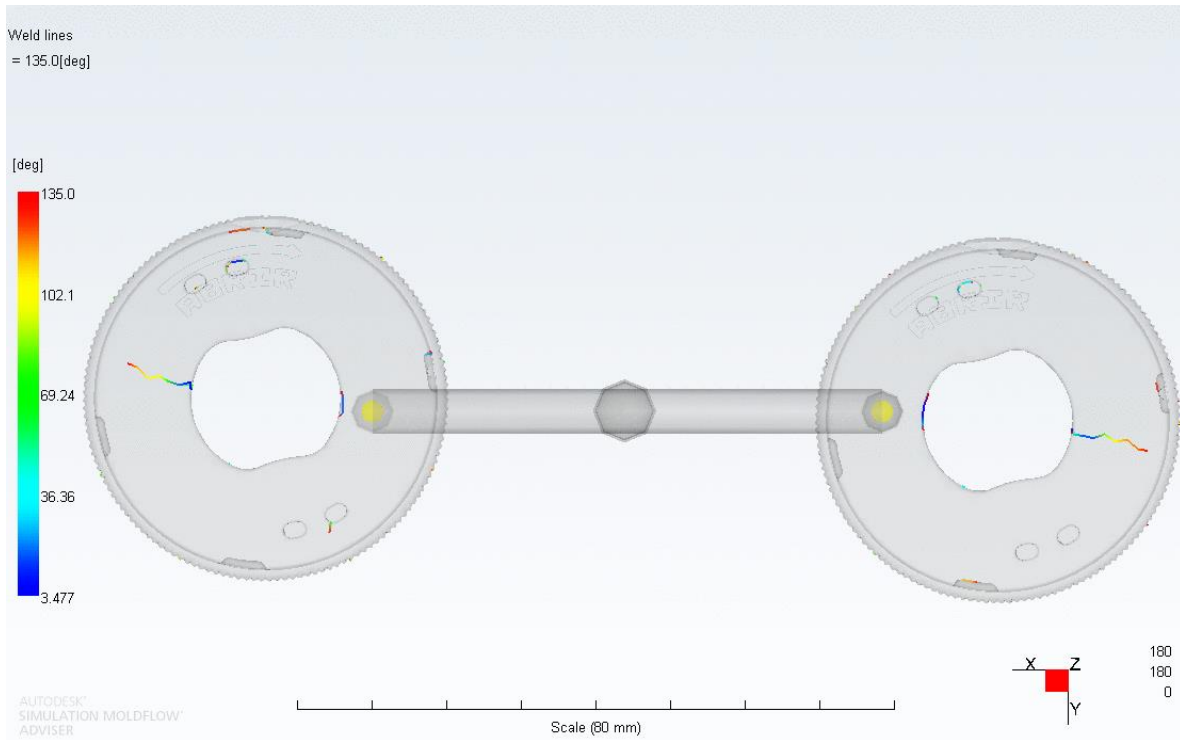


Figura de referencia 7. Líneas de soldadura en molde de actuadores

Tabla de referencia 4. Resultados de simulaciones de llenado para el molde de actuadores

Respuesta de la simulación MFA ®	Valor
Tiempo de llenado	0.81 s
Presión de inyección	254.66 Bar
Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión	7.57 s
Fuerza de cierre estimada al 120% de la presión de inyección	9.9 toneladas
Calidad de la pieza	Puede ser inaceptable

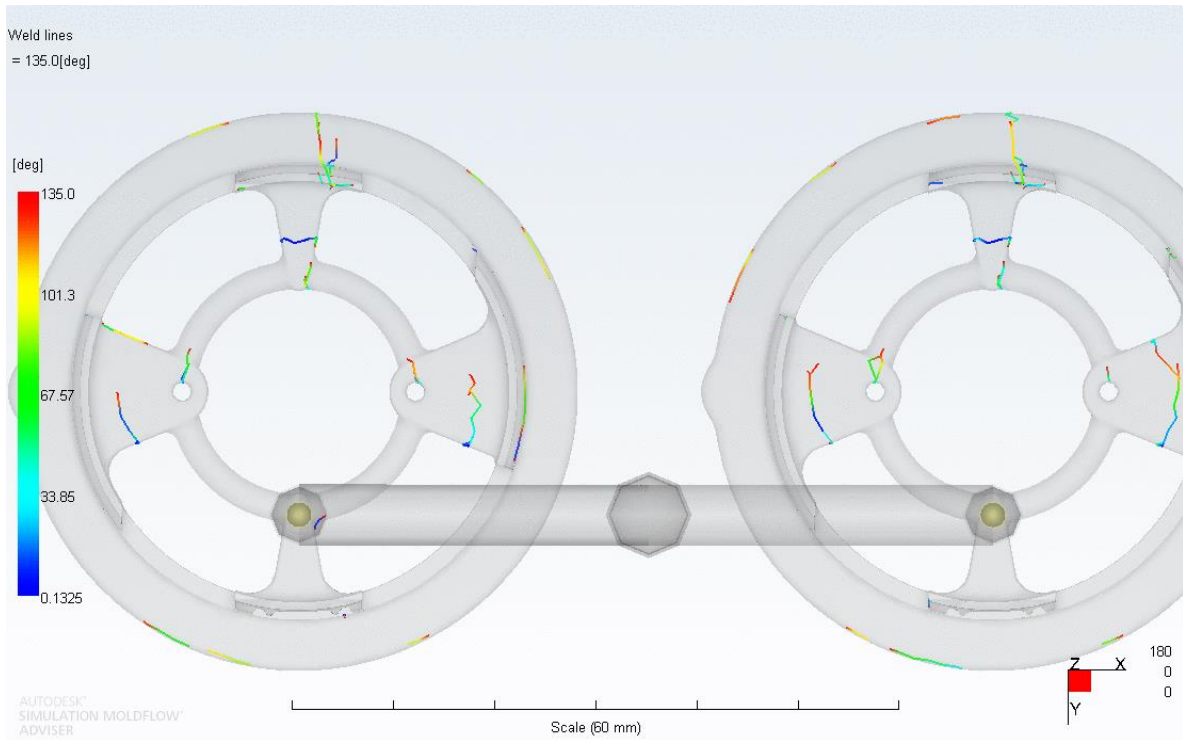


Figura de referencia 8. Línea de soldadura molde bases

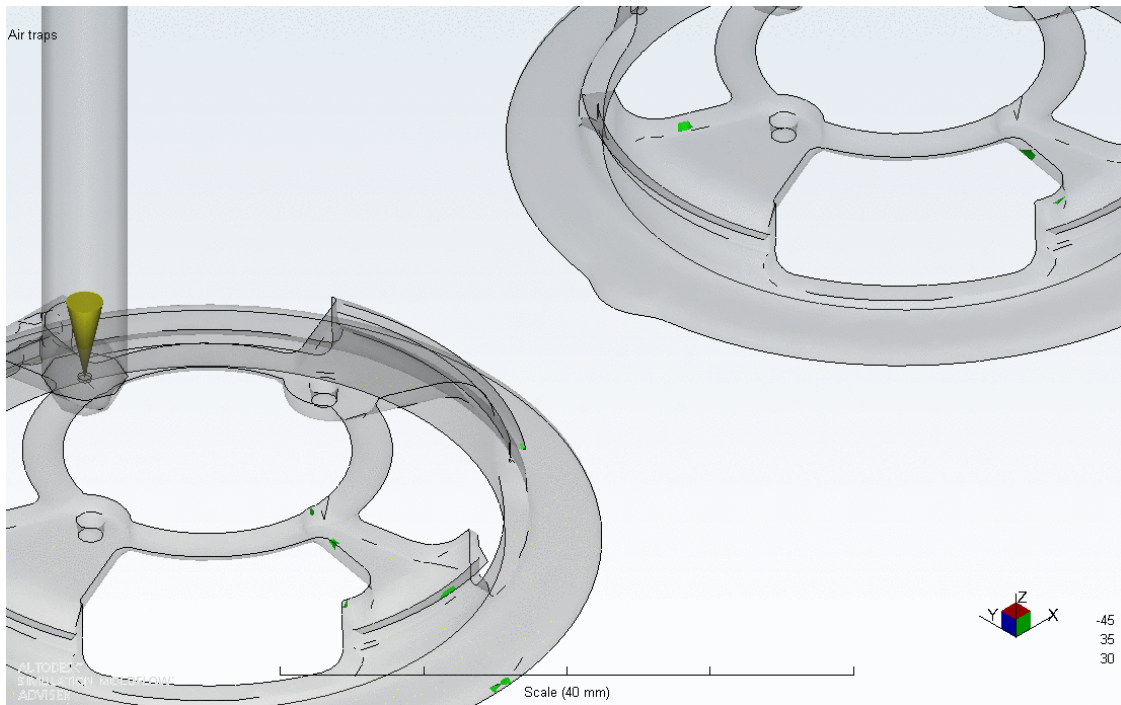


Figura de referencia 9. Aire atrapado molde bases

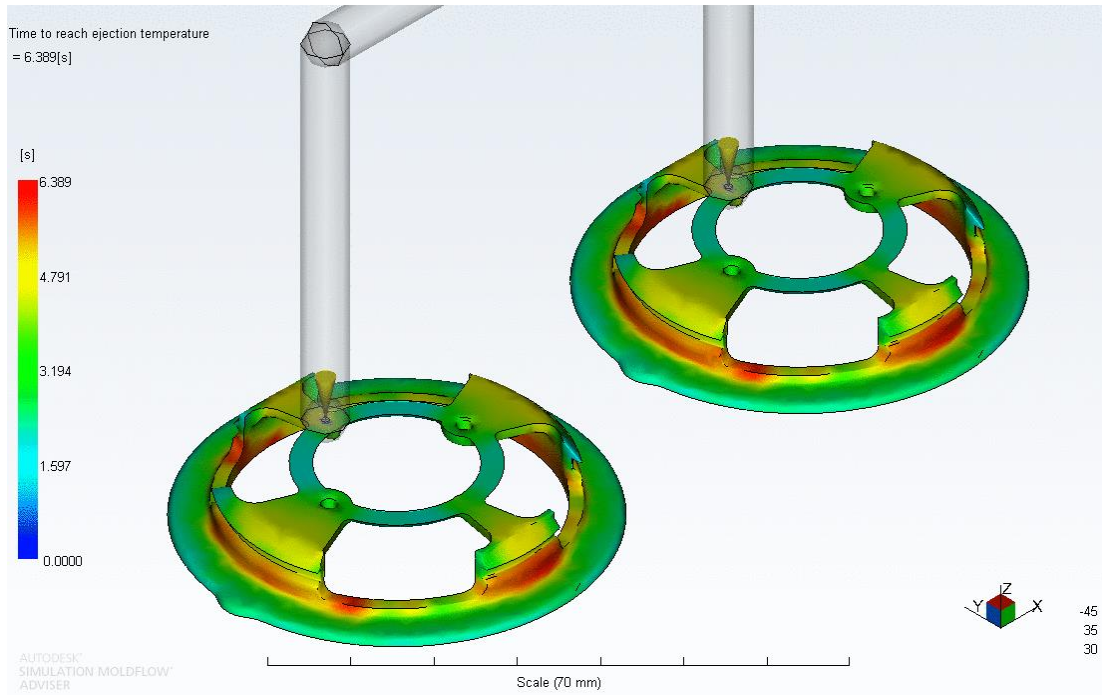


Figura de referencia 10. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión molde bases

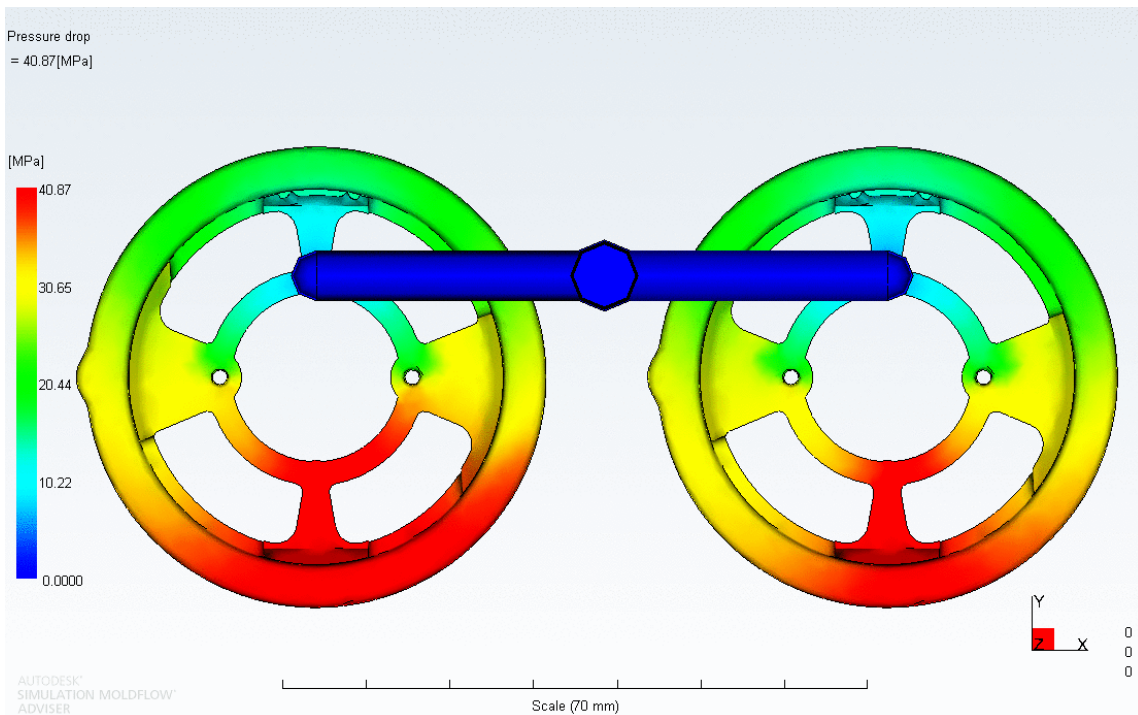


Figura de referencia 11. Caída de presión molde bases

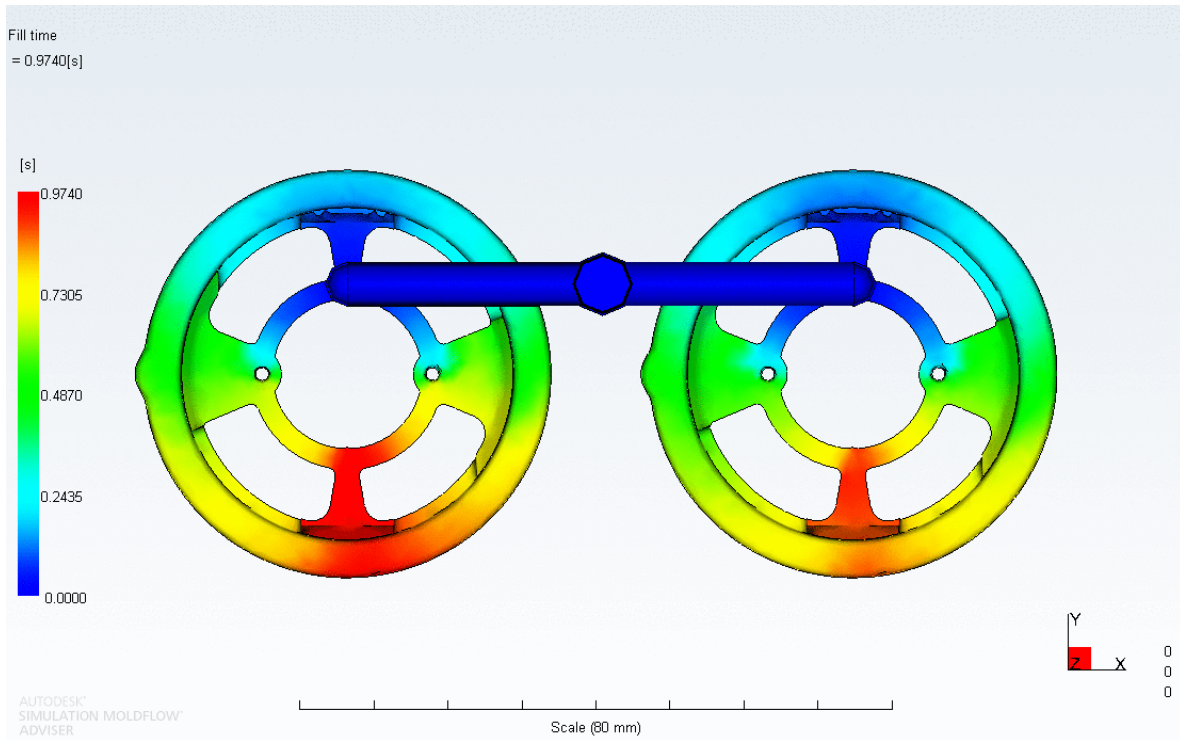


Figura de referencia 12. Tiempo de llenado molde bases

Tabla de referencia 5. Resultados de simulaciones de llenado para el molde de bases

Respuesta de la simulación MFA ®	Valor
Tiempo de llenado	0.97 s
Presión de inyección	408.71 Bar
Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión	6.38 s
Fuerza de cierre estimada al 120% de la presión de inyección	15.45 toneladas
Calidad de la pieza	Puede ser inaceptable

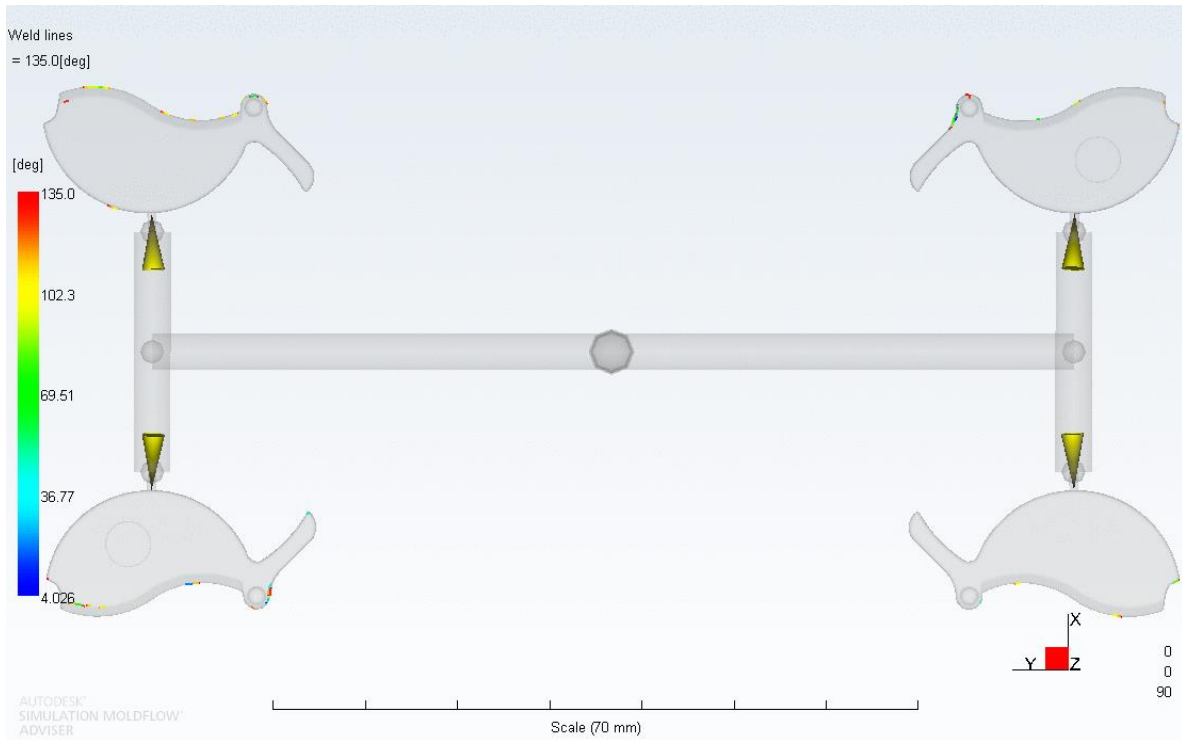


Figura de referencia 13. Líneas de soldadura molde paletas

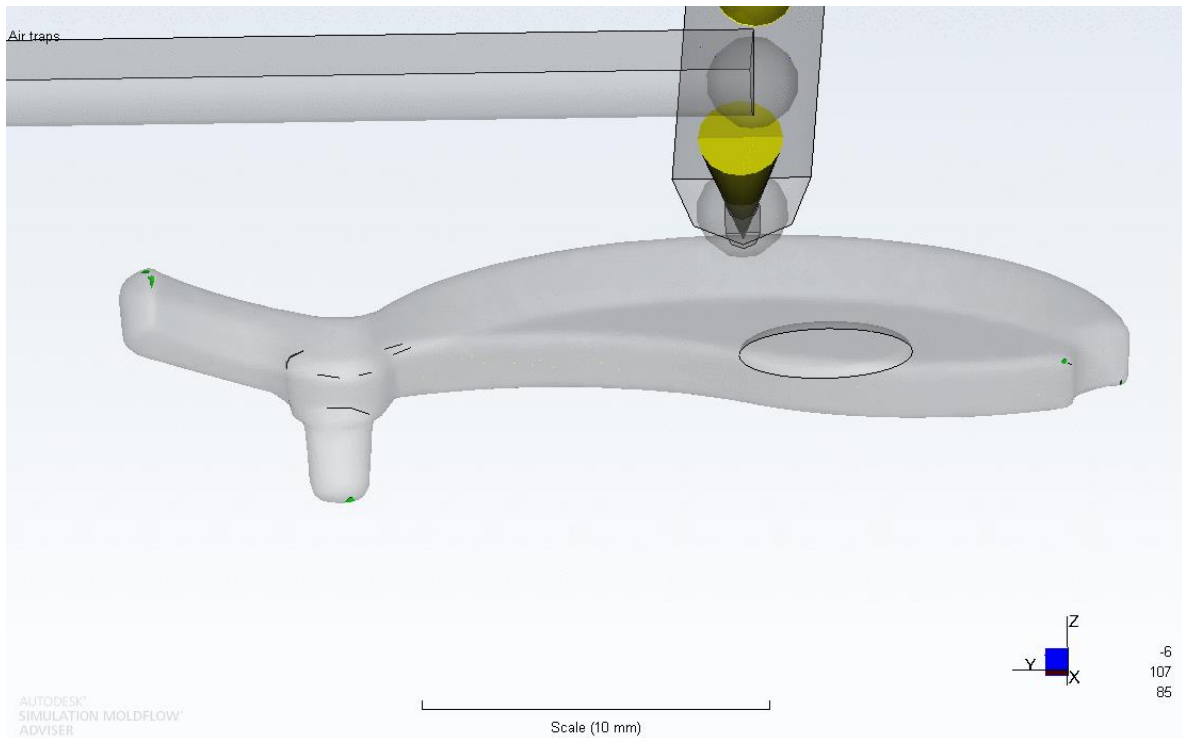


Figura de referencia 14. Aire atrapado molde paletas

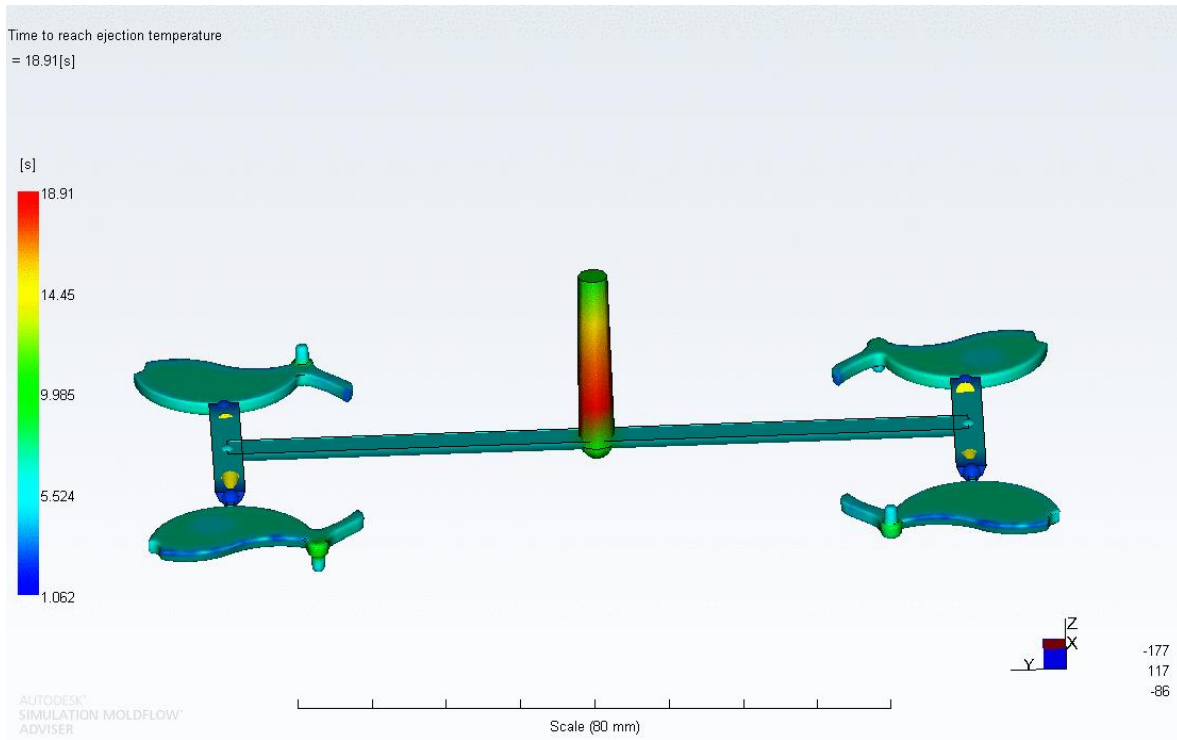


Figura de referencia 15. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión molde paletas

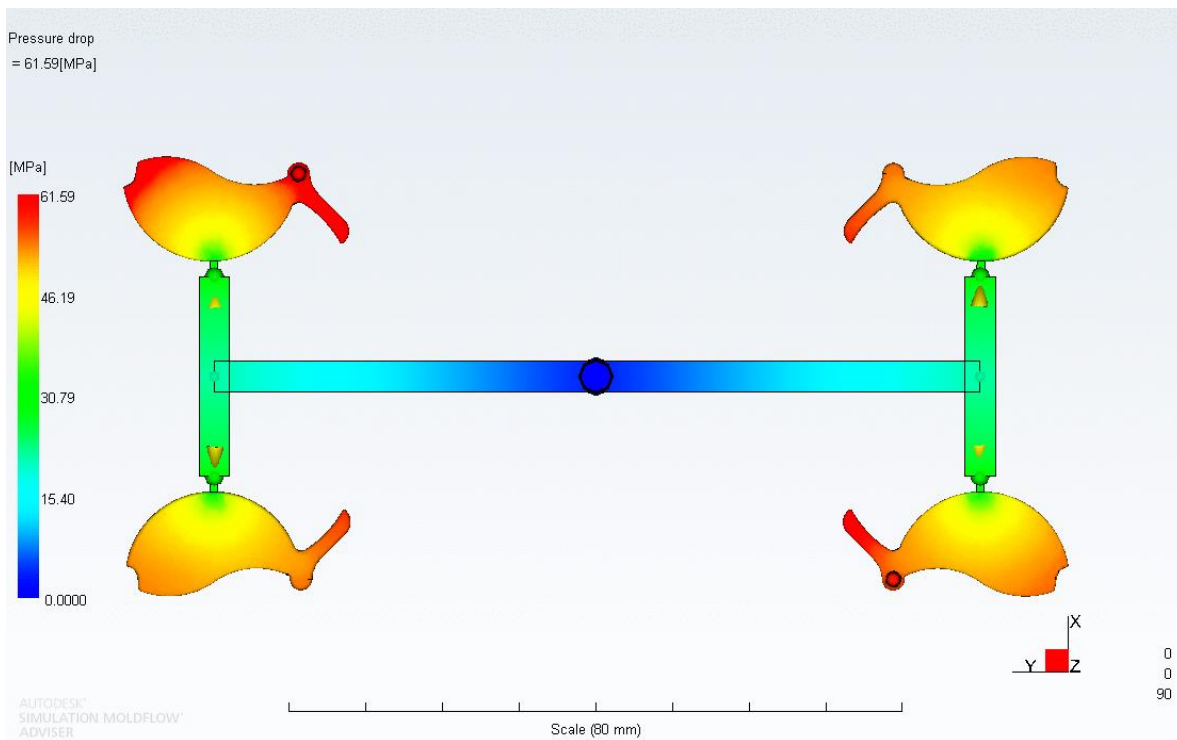


Figura de referencia 16. Caída de presión molde paletas

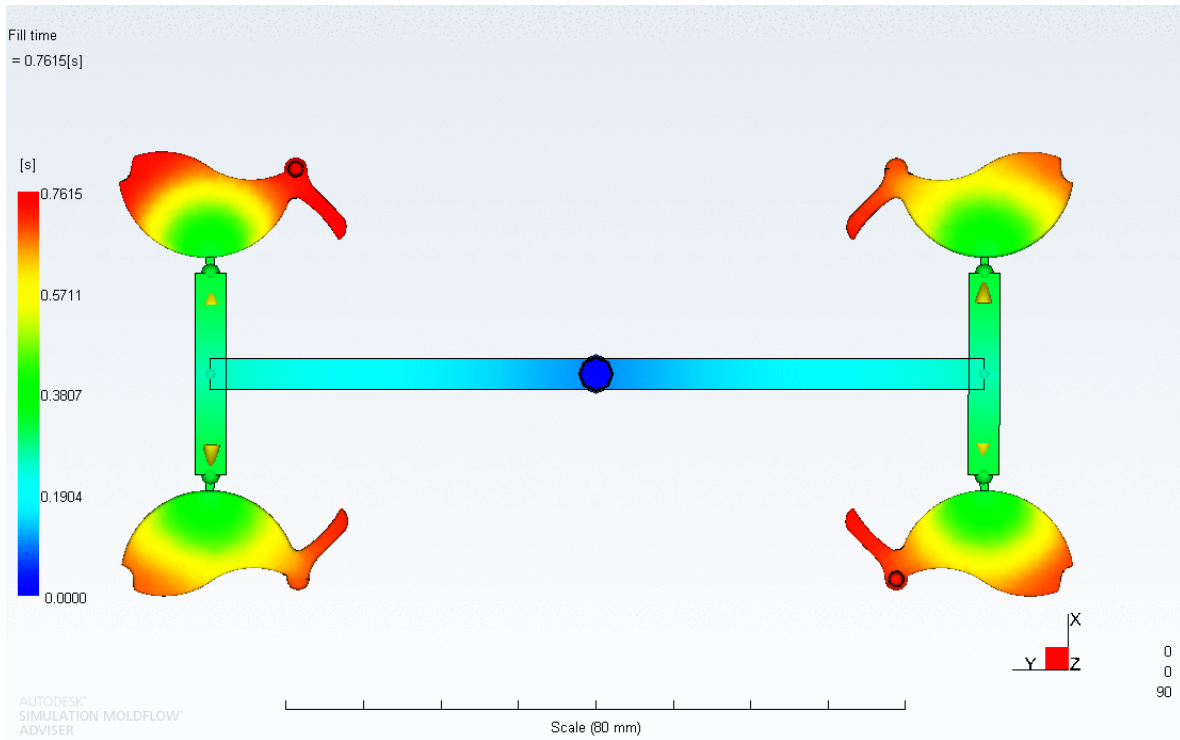


Figura de referencia 17. Tiempo de llenado molde paletas

Tabla de referencia 6. Resultados de simulaciones de llenado para el molde de paletas

Respuesta de la simulación MFA ®	Valor
Tiempo de llenado	0.76 s
Presión de inyección	615.89 Bar
Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión	10 s las piezas y 18.91 s la vela
Fuerza de cierre estimada al 120% de la presión de inyección	10.01 toneladas
Calidad de la pieza	Aceptable

Resultados de la simulación de llenado, empaquetamiento, enfriamiento, contracción y deflexión.

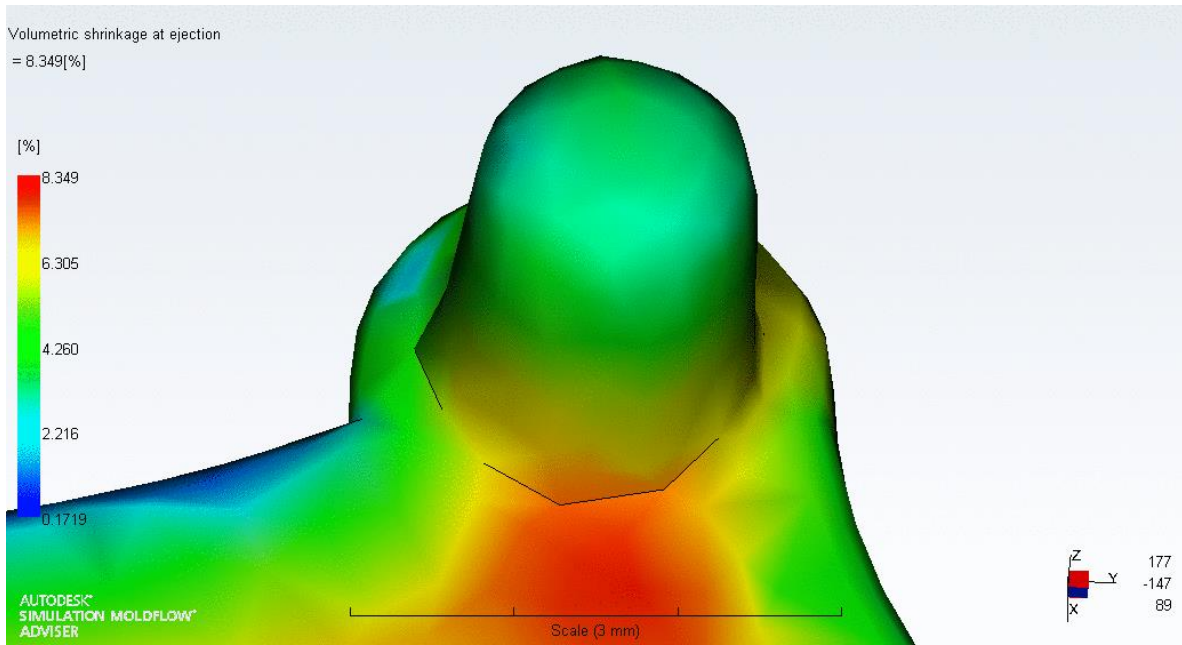


Figura de referencia 18. Contracción volumétrica del perno paleta x

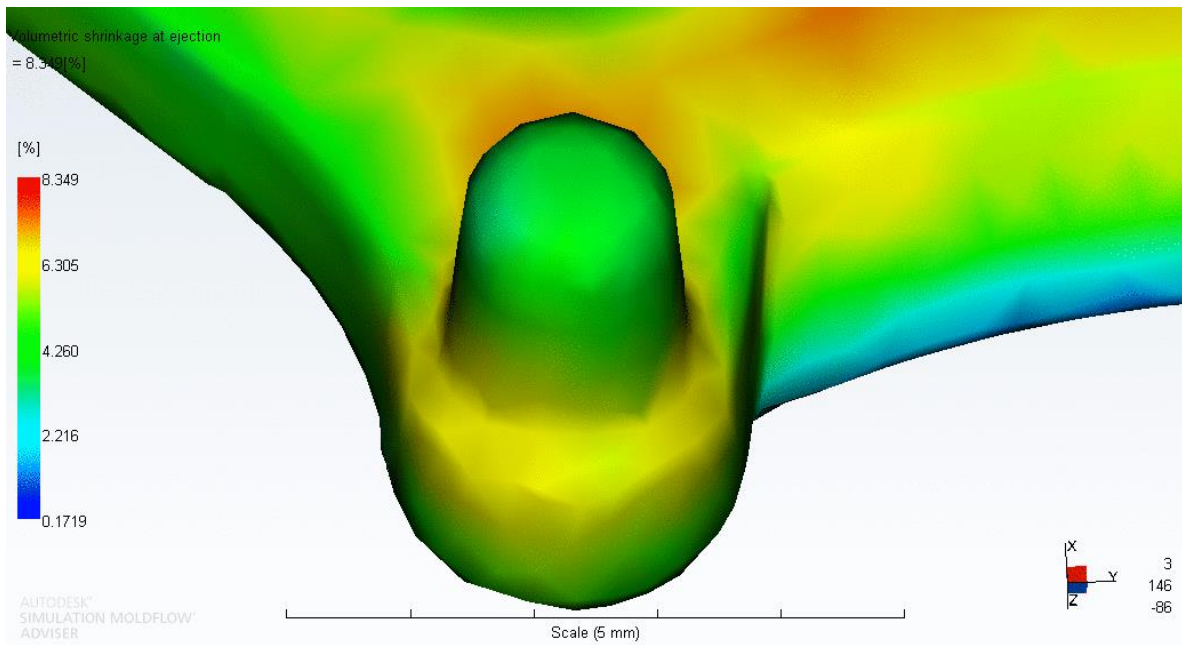


Figura de referencia 19. Contracción volumétrica perno de la paleta Y

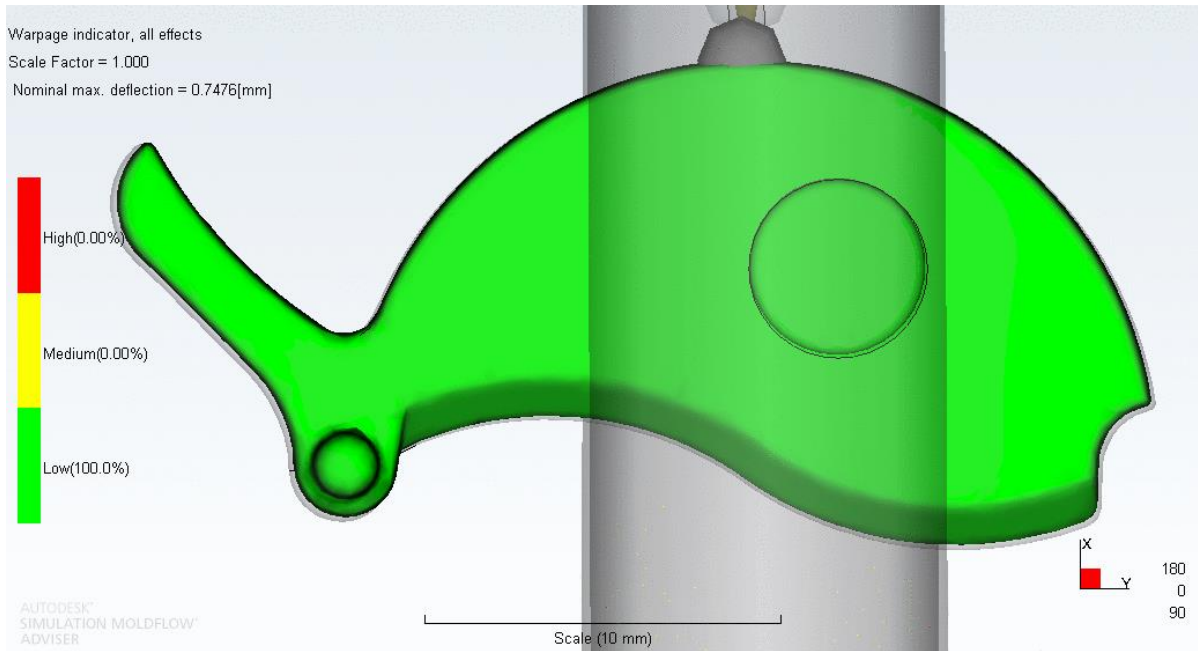


Figura de referencia 20. Deflexión longitud de ensamble paleta Y

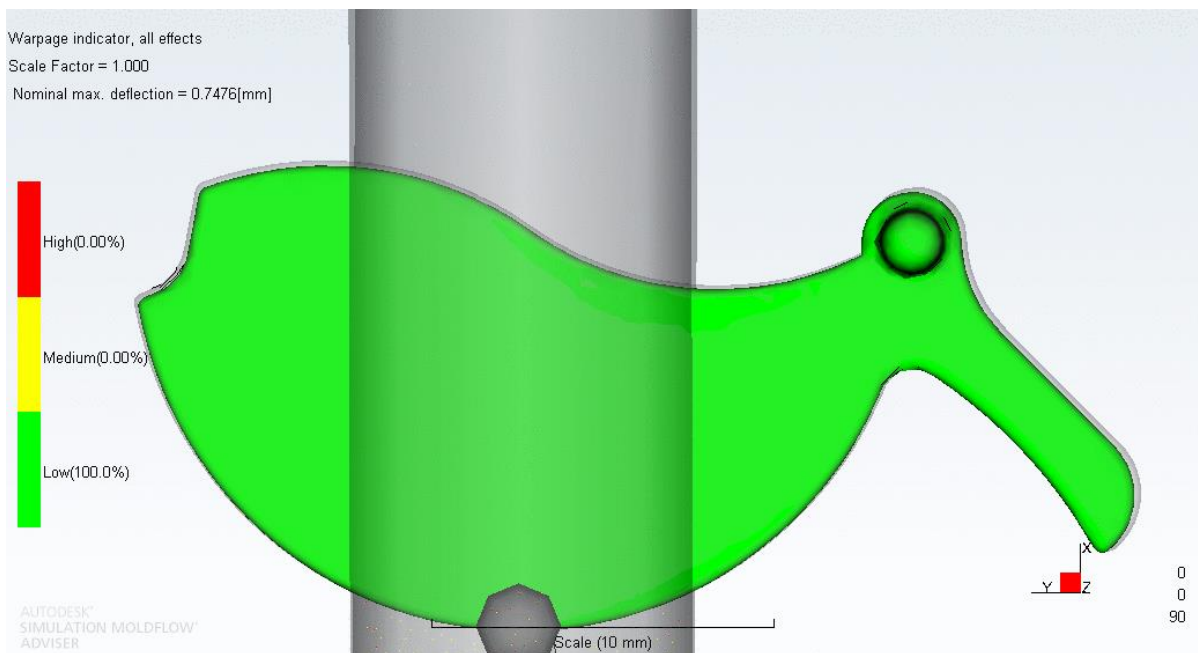


Figura de referencia 21. Deflexión longitud de ensamble paleta X

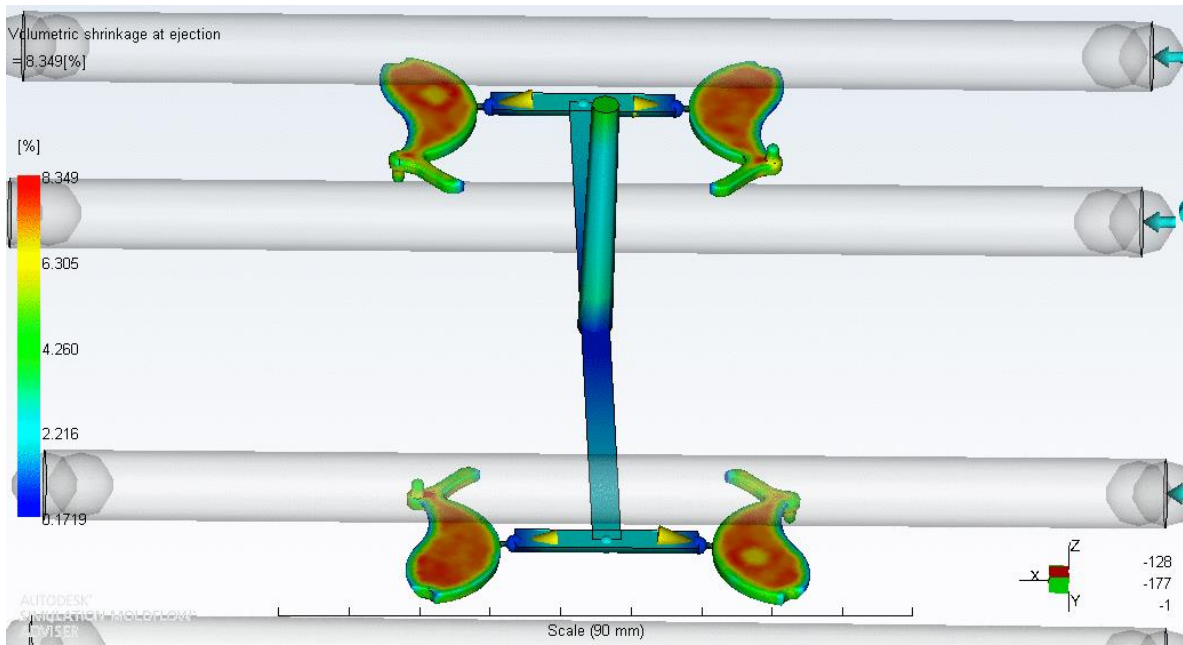


Figura de referencia 22. Contracción volumétrica molde paletas

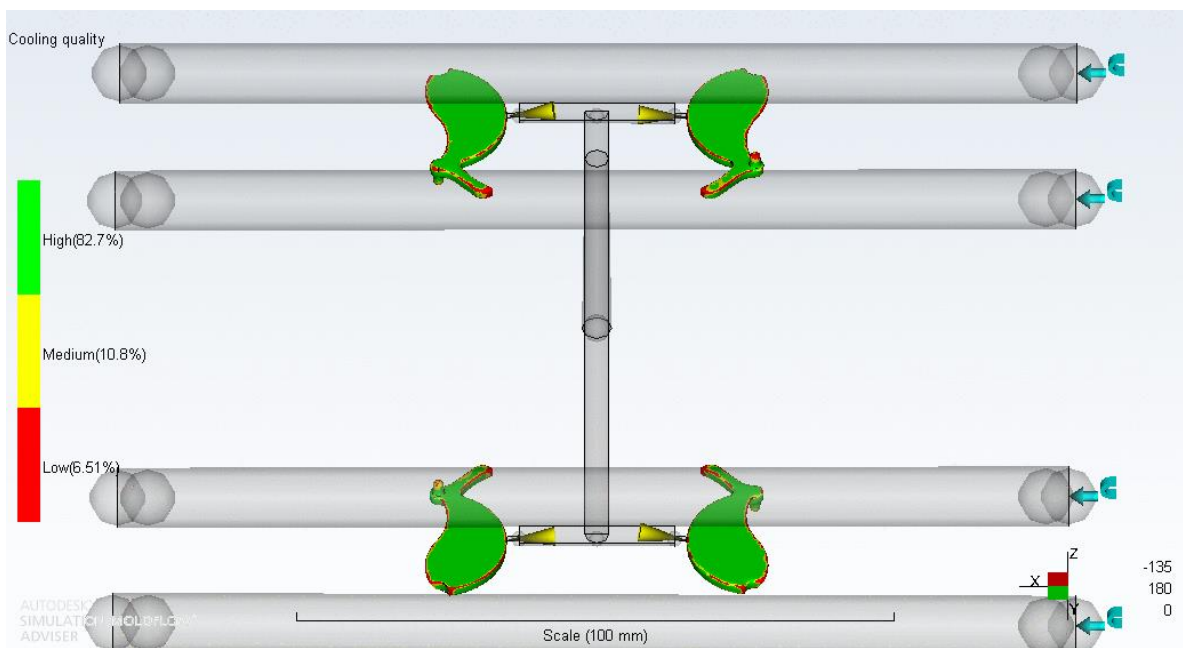


Figura de referencia 23. Calidad de refrigeración molde de paletas

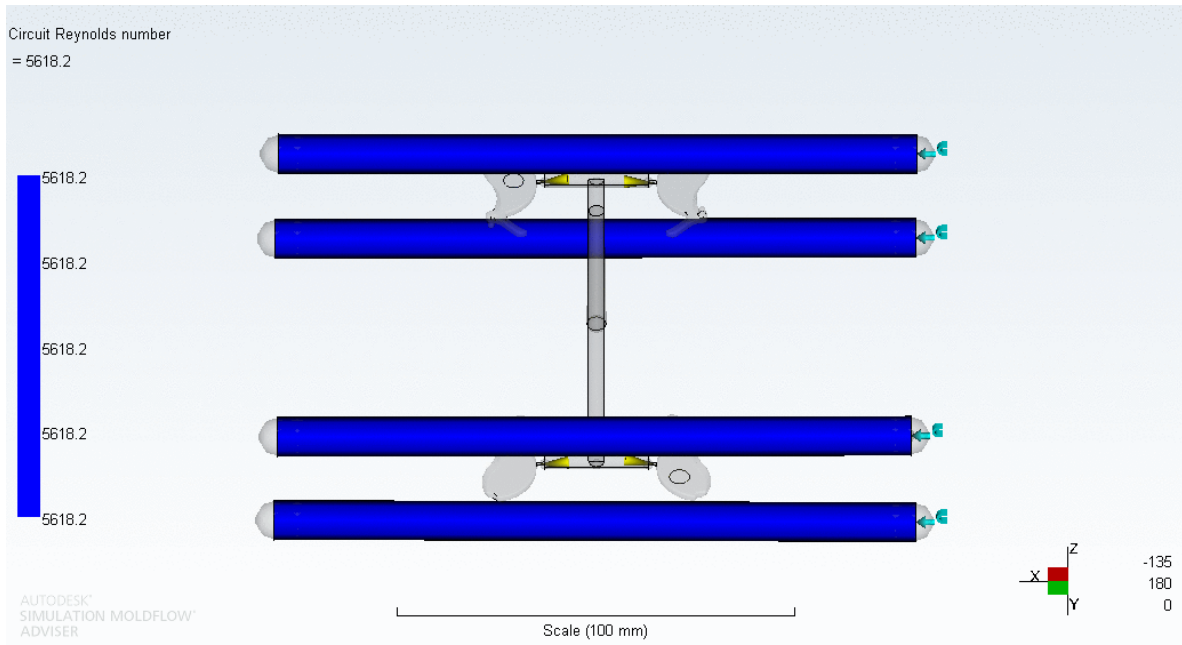


Figura de referencia 24. Número de Reynolds molde paletas

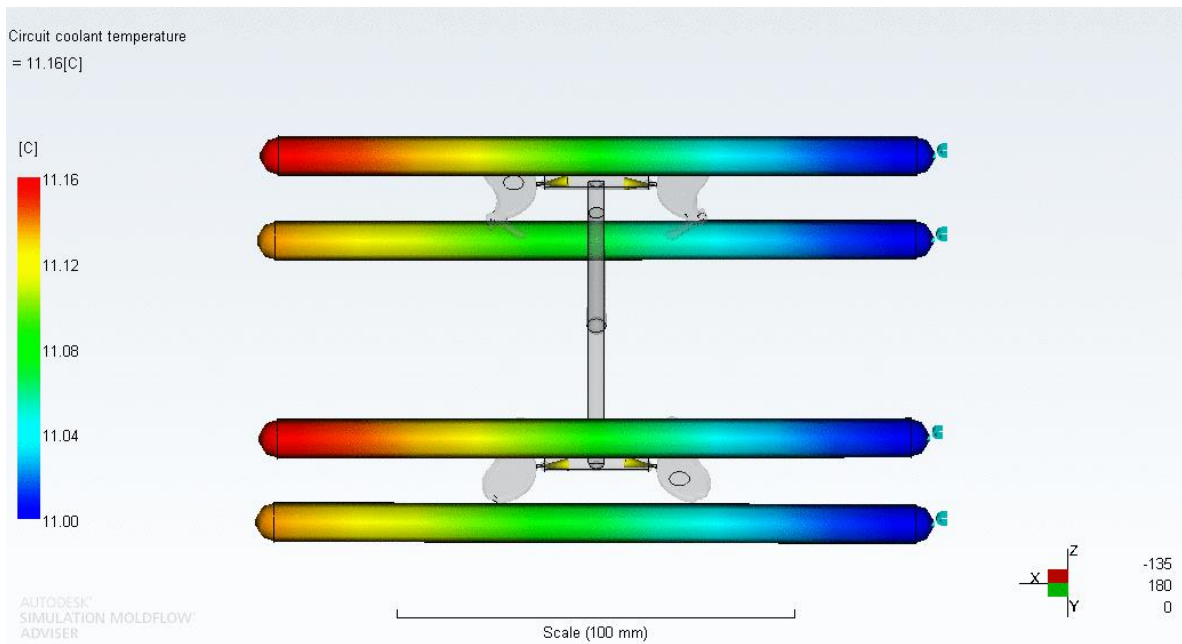


Figura de referencia 25. Temperatura en el circuito de refrigeración

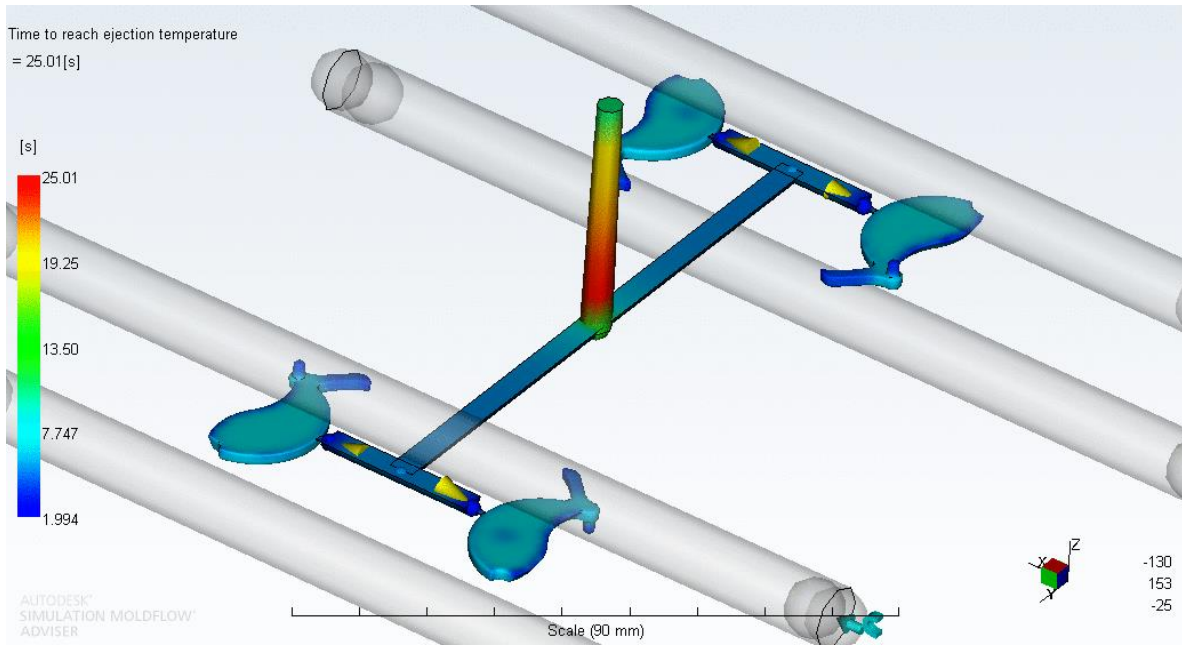


Figura de referencia 26. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión molde paletas

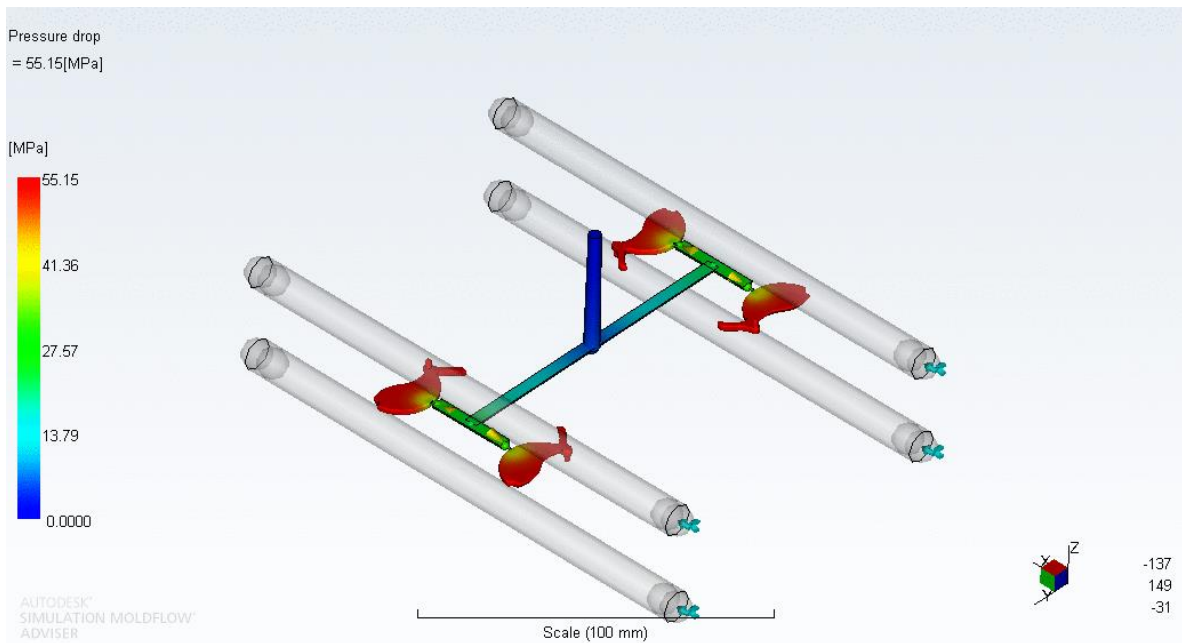


Figura de referencia 27. Caída de presión considerando refrigeración molde paletas

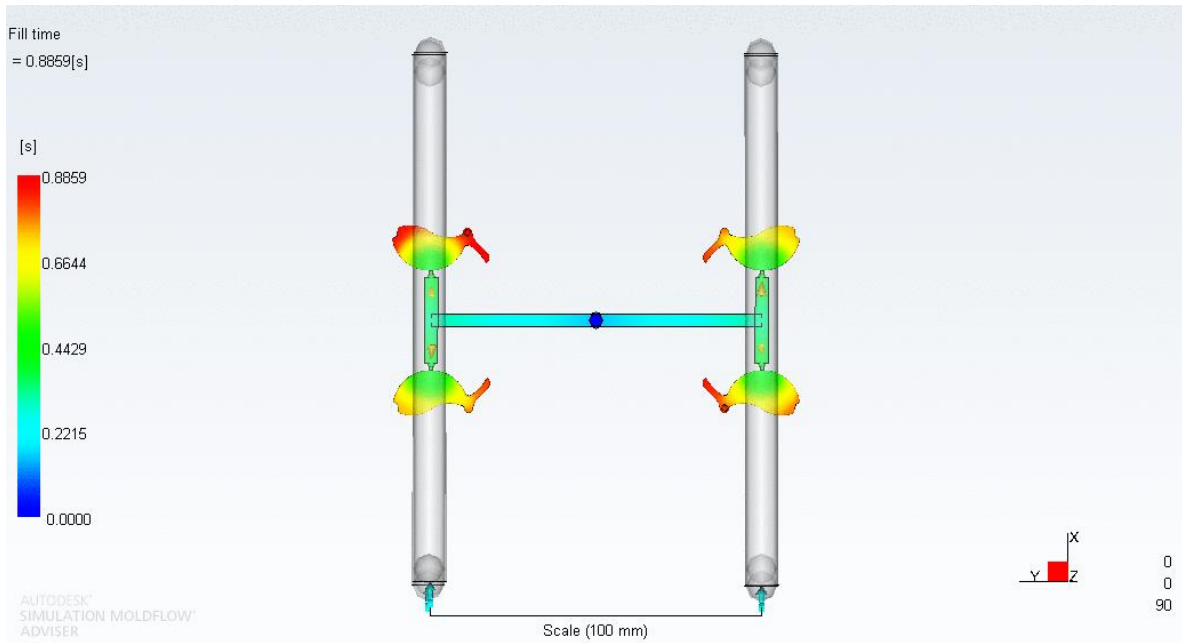


Figura de referencia 28. Tiempo de llenado considerando refrigeración molde paletas

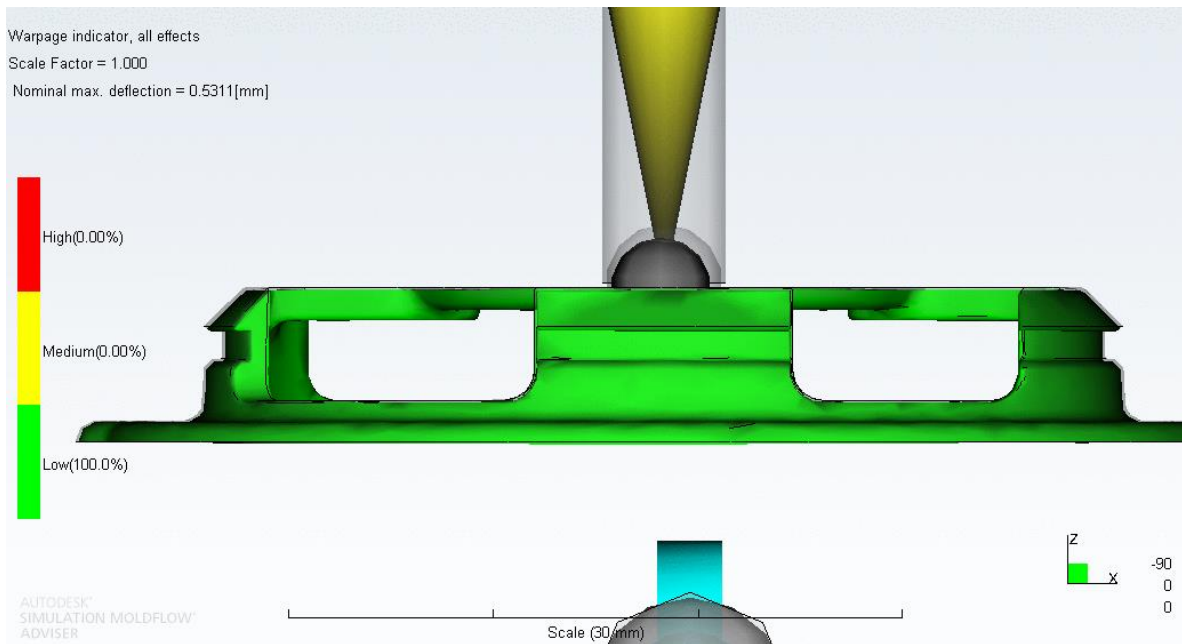


Figura de referencia 29. Deflexión del diámetro de riel y enganche

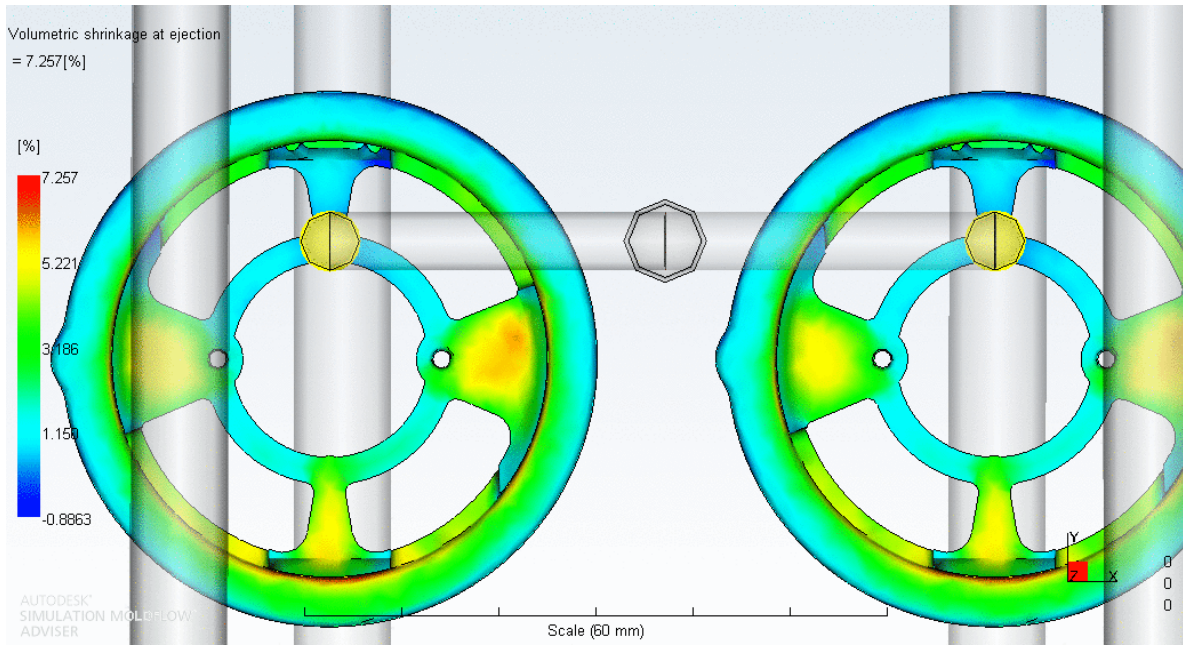


Figura de referencia 30. Contracción en las piezas bases

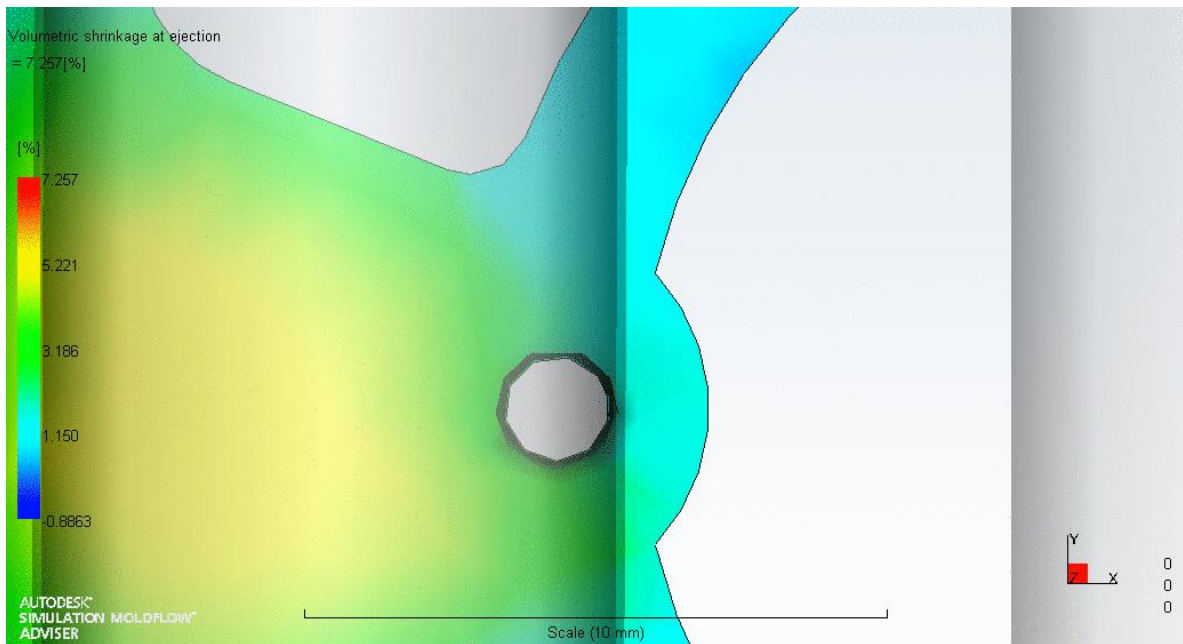


Figura de referencia 31. Contracción en la región de barrenos de la pieza base

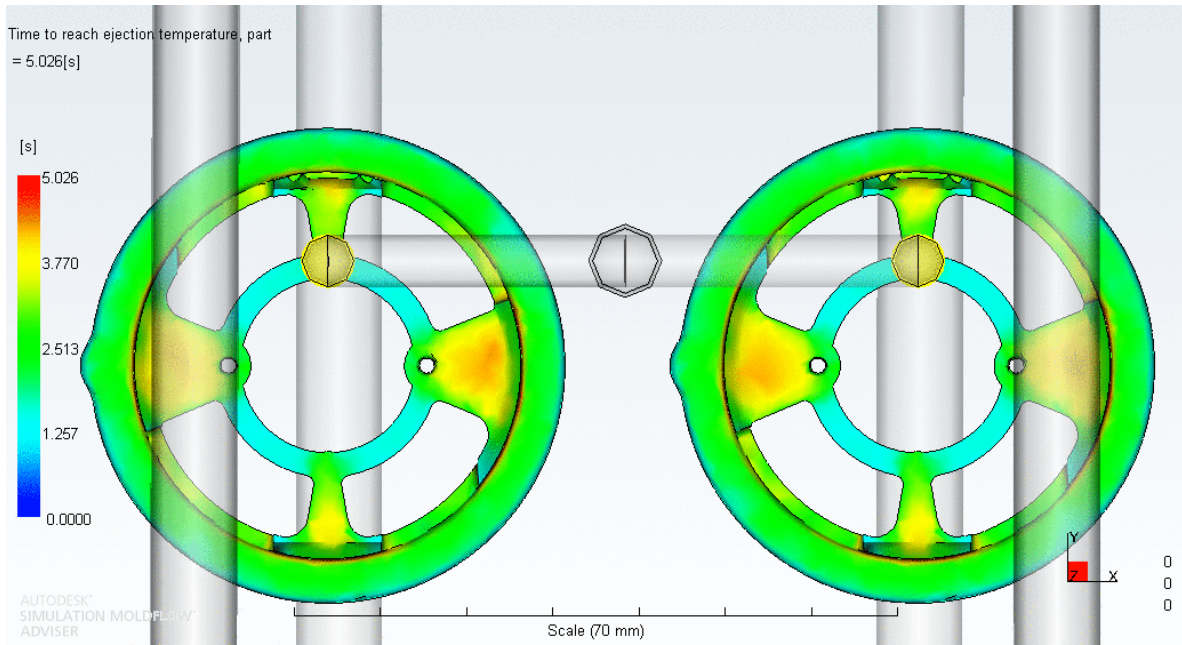


Figura de referencia 32. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión considerando la refrigeración

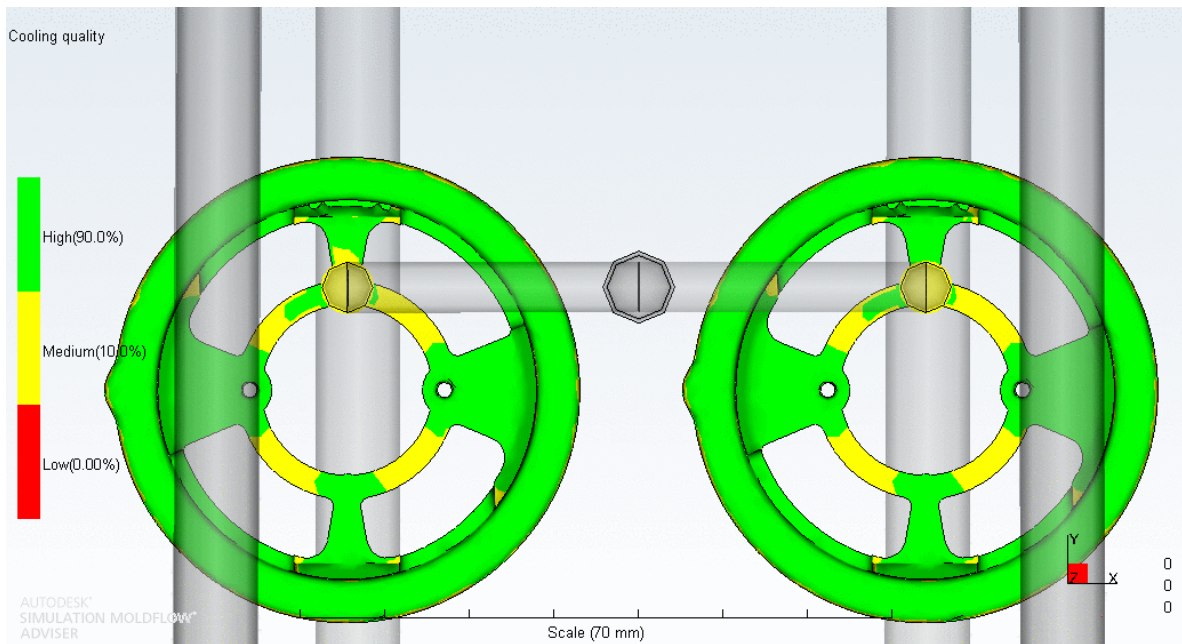


Figura de referencia 33. Calidad de refrigeración en el molde de bases considerando los canales de enfriamiento

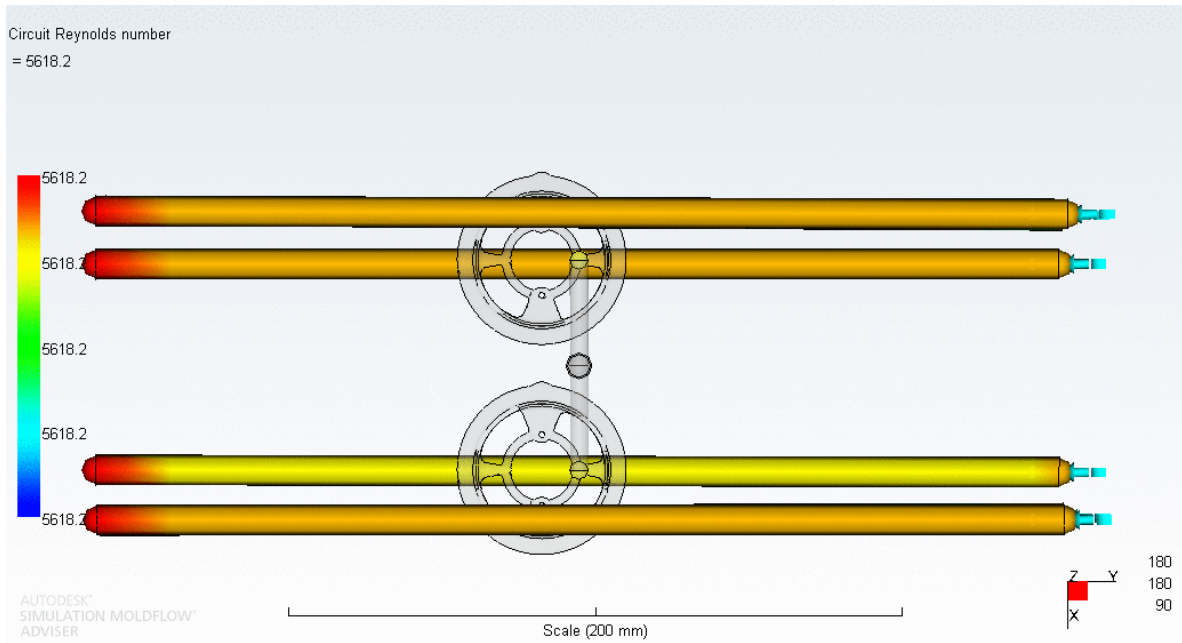


Figura de referencia 34. Número de Reynolds en el molde de bases

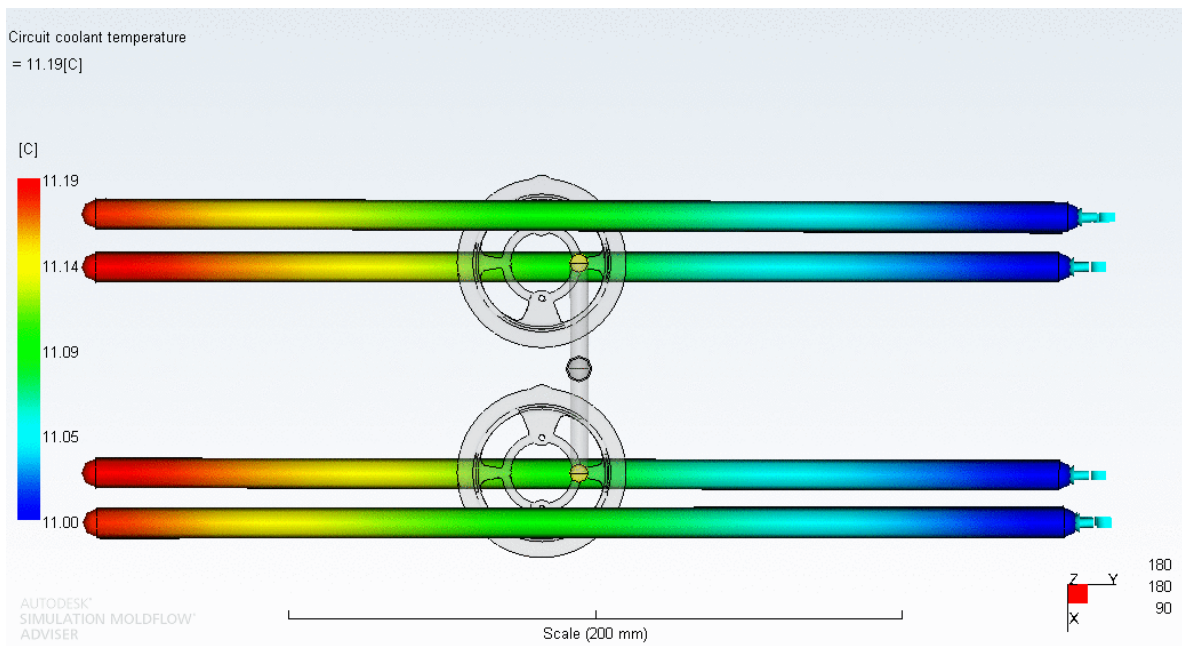


Figura de referencia 35. Temperatura en el circuito de refrigeración molde bases

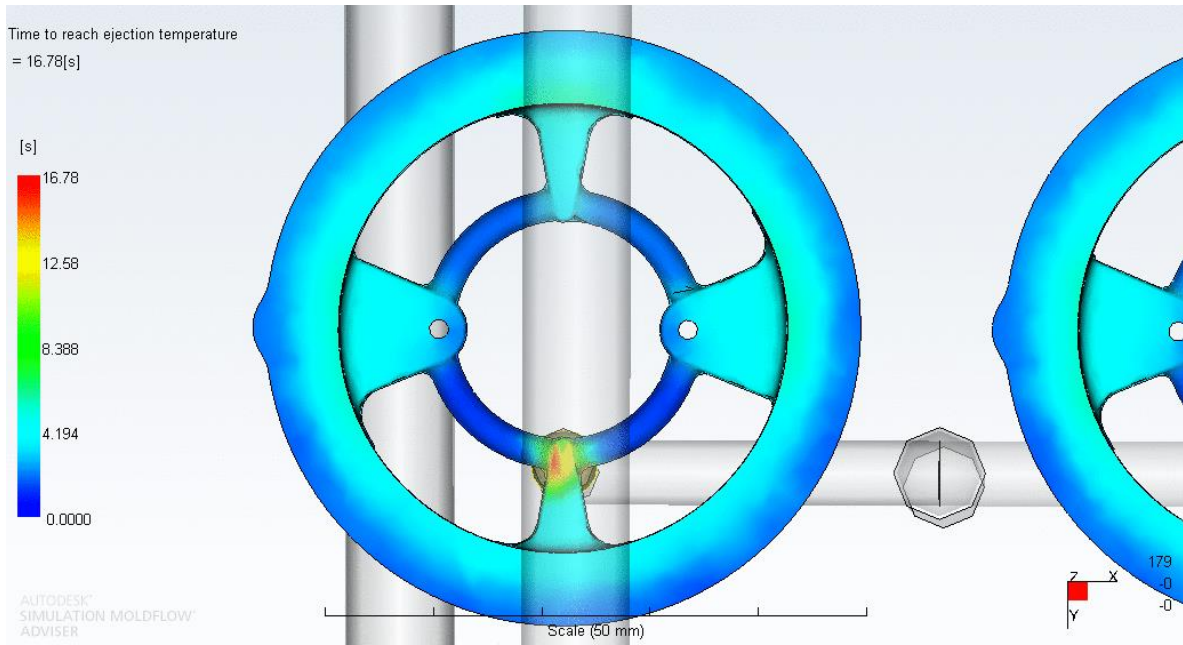


Figura de referencia 36. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión molde bases considerando la refrigeración

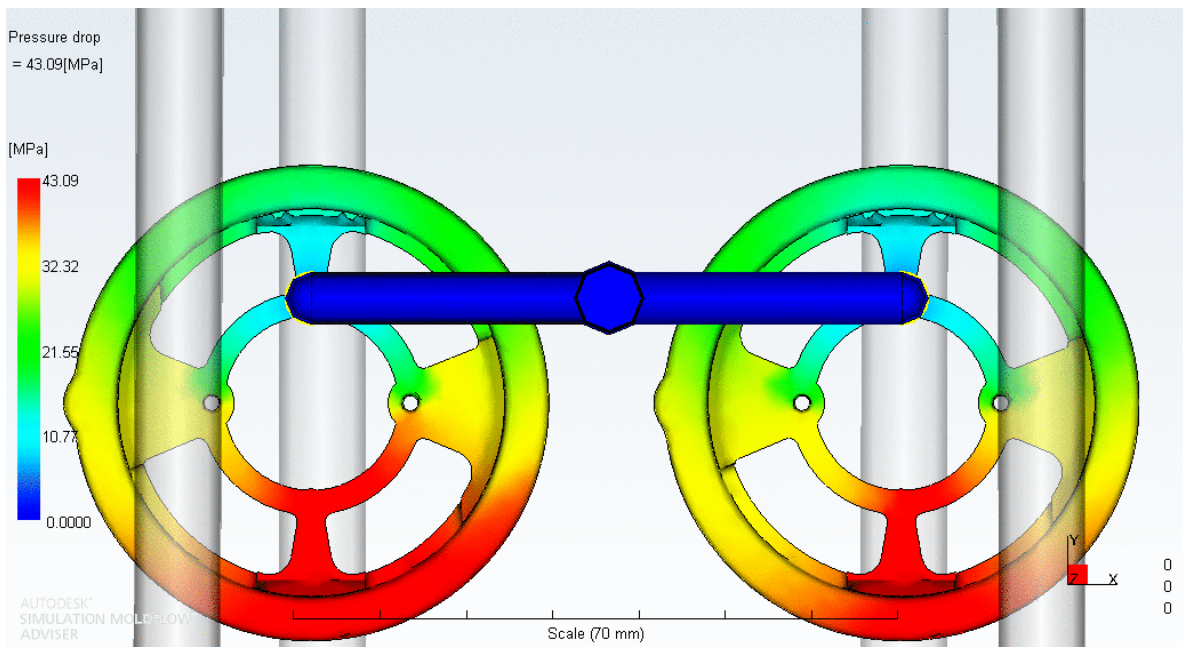


Figura de referencia 37. Caída de presión molde de bases considerando refrigeración

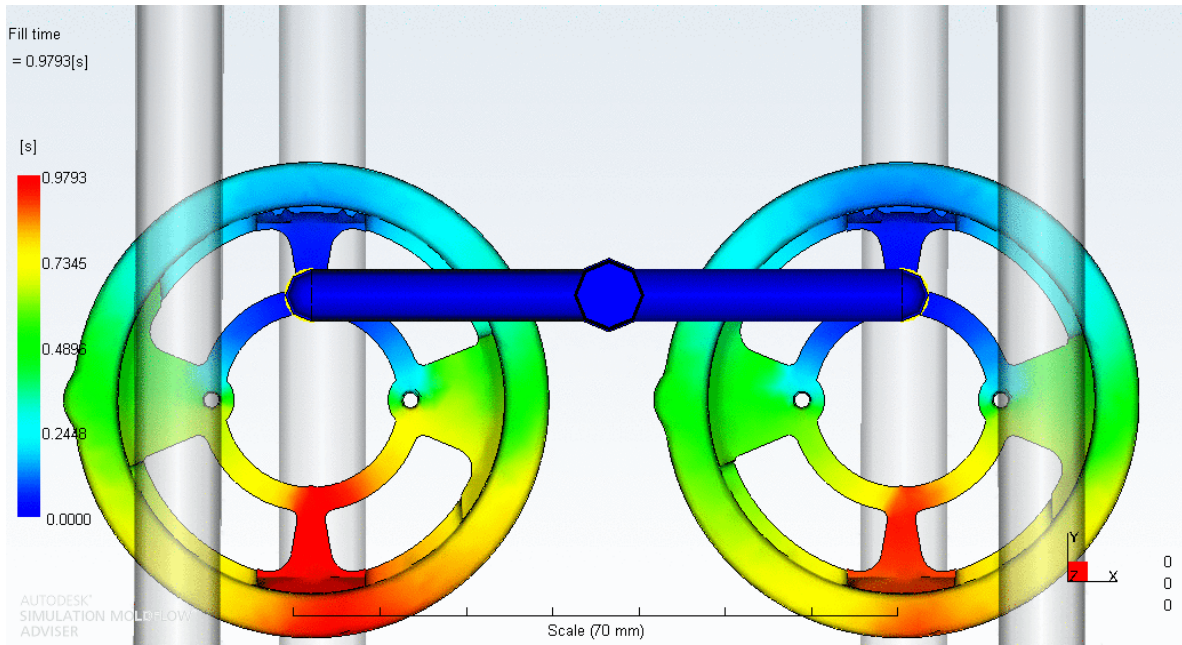


Figura de referencia 38. Tiempo de llenado molde de bases considerando la refrigeración

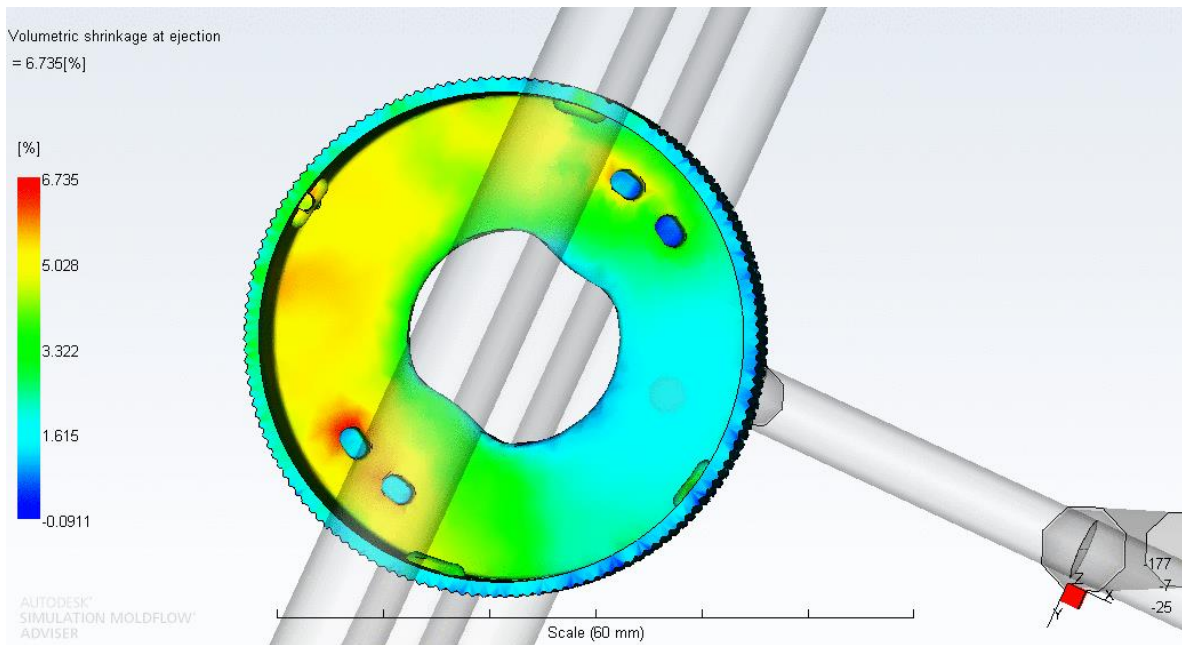


Figura de referencia 39. Contracción volumétrica en región de las protuberancias internas

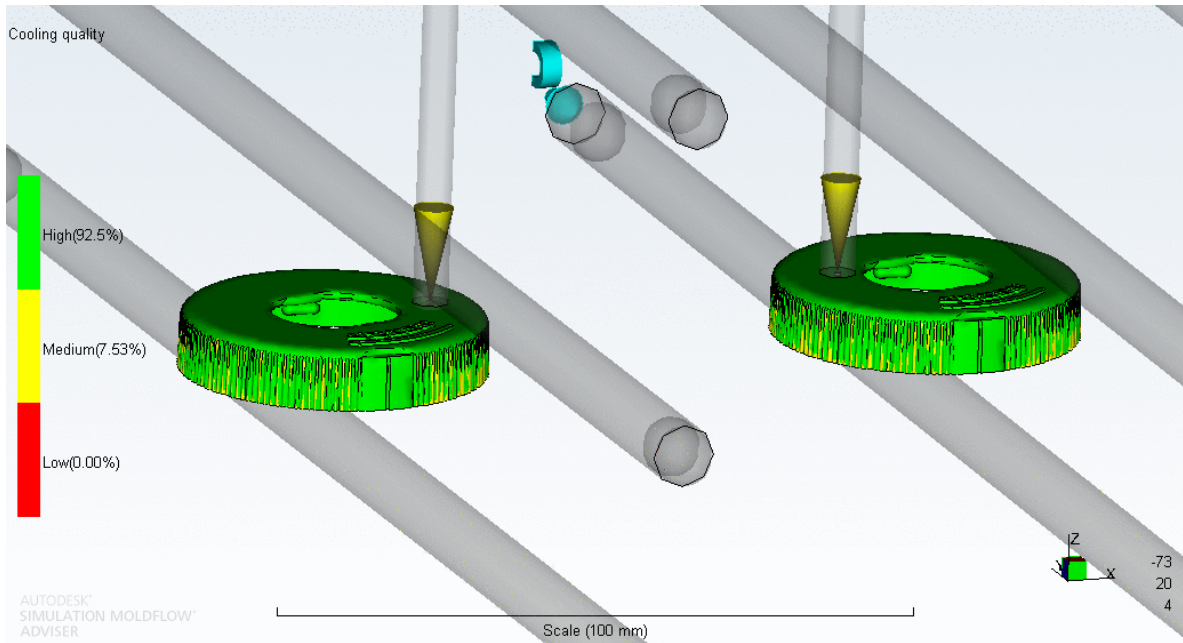


Figura de referencia 40. Calidad de refrigeración del molde de actuadores

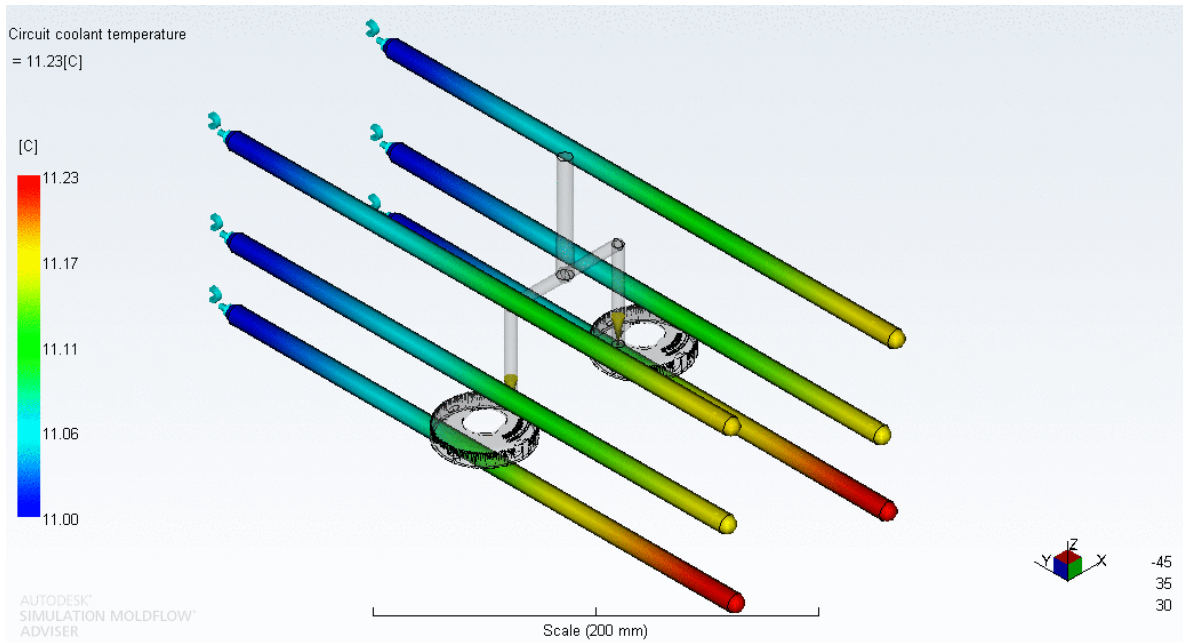


Figura de referencia 41. Temperatura en los circuitos de refrigeración del molde de actuadores

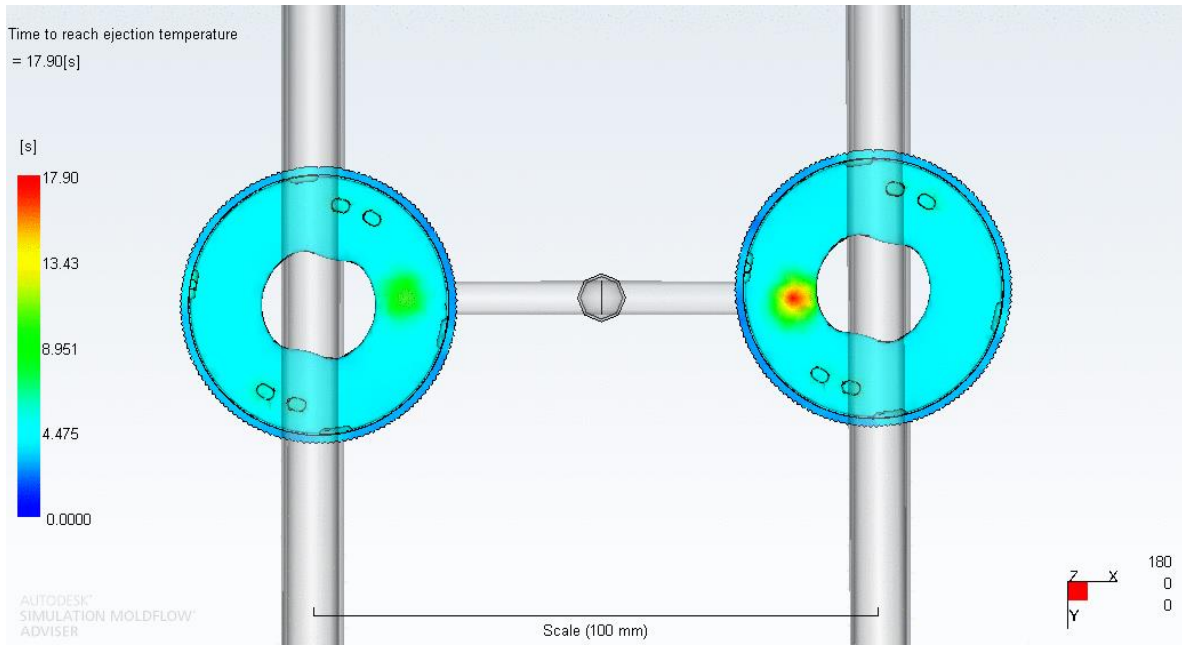


Figura de referencia 42. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión

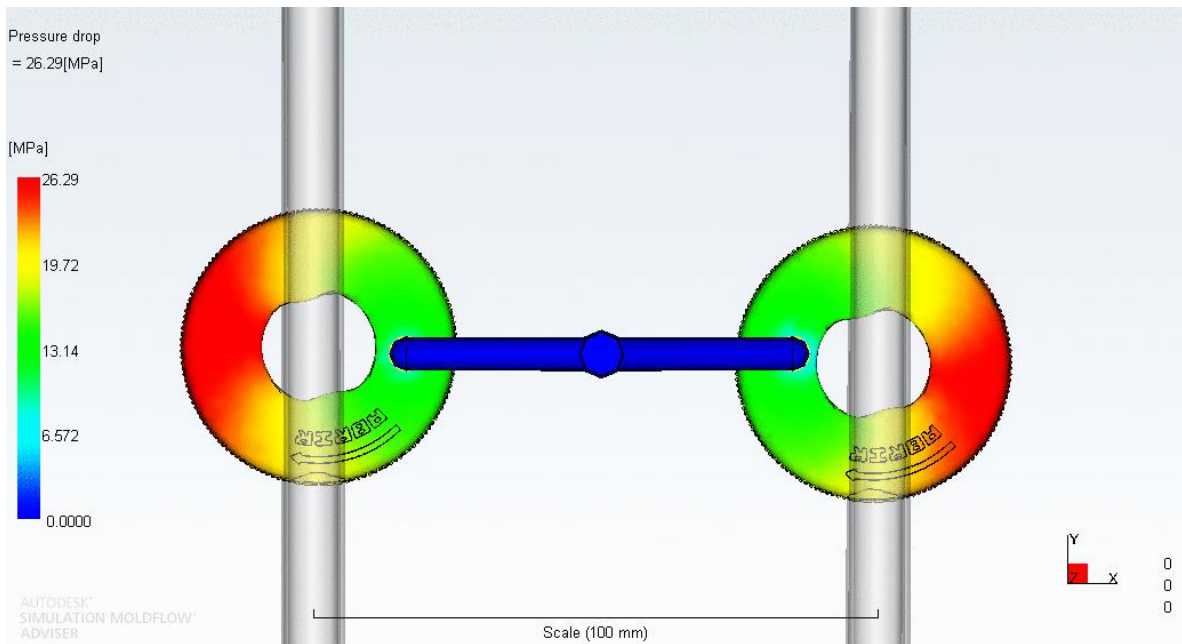


Figura de referencia 43. Caída de presión molde actuadores

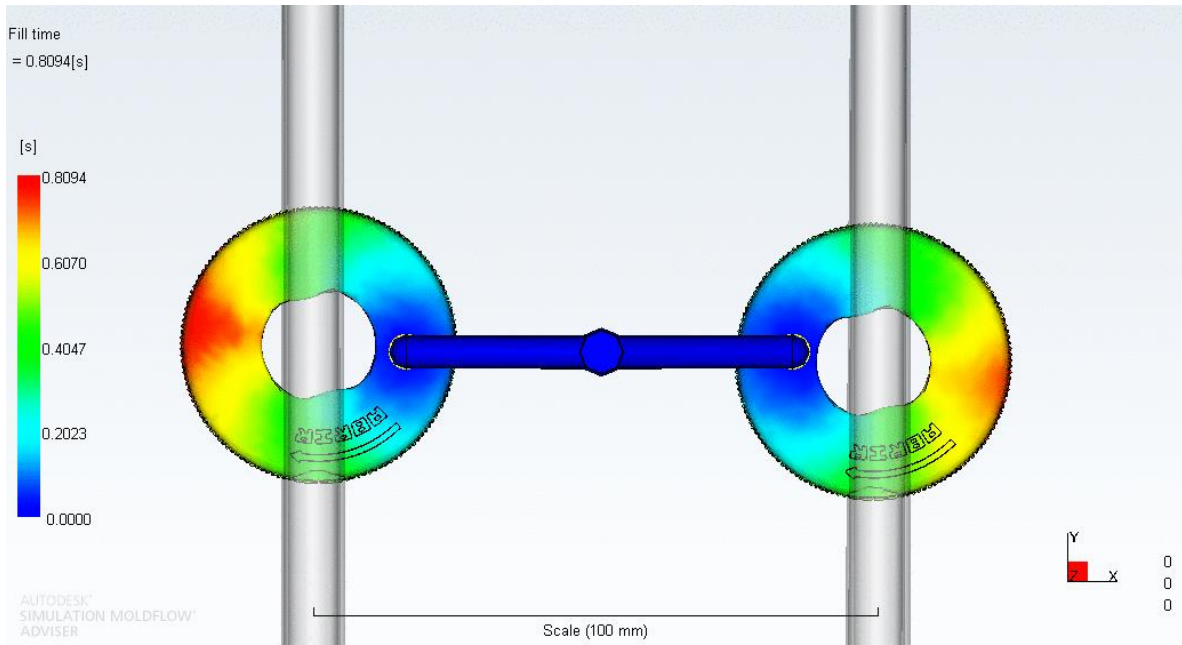


Figura de referencia 44. Tiempo de llenado molde actuadores considerando refrigeración

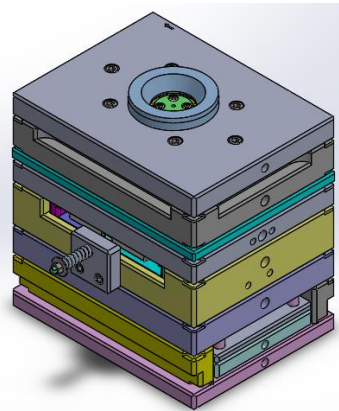


Figura de referencia 45. Molde de inyección para las piezas base

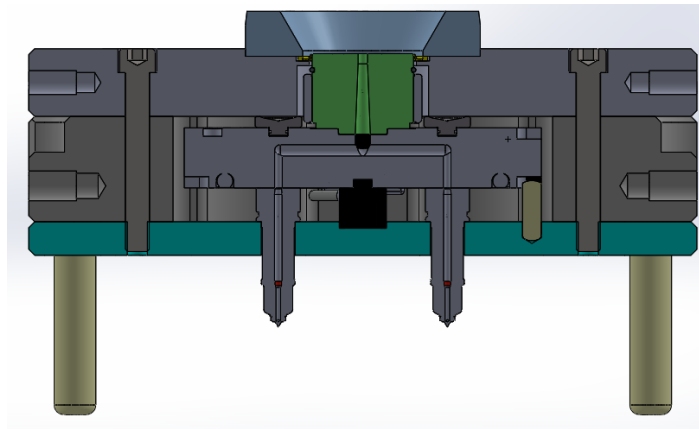


Figura de referencia 46. Modelo solido del sistema de canal caliente común a los moldes de bases y actuadores

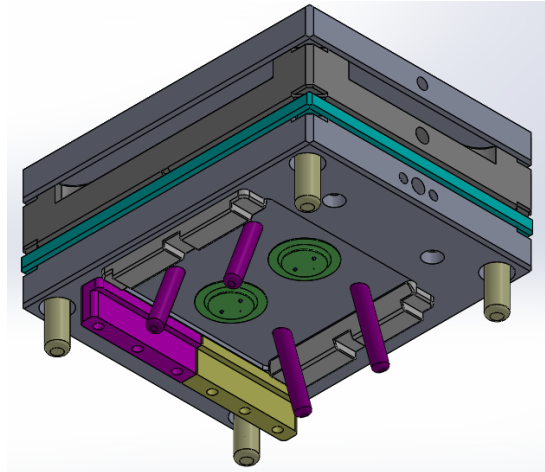


Figura de referencia 47. Lado de fijo del molde para bases

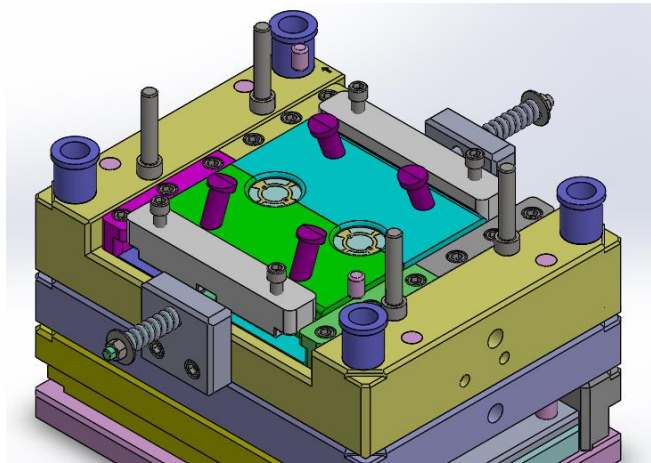


Figura de referencia 48. Molde de bases lado móvil

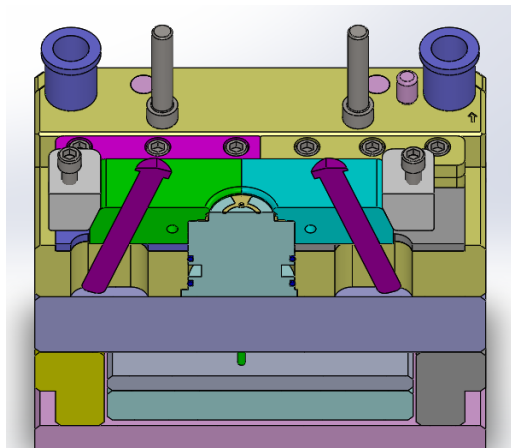


Figura de referencia 49. Sistema de expulsión molde de bases

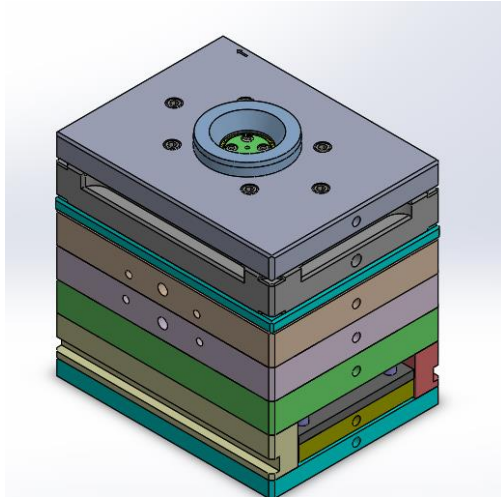


Figura de referencia 50. Molde de actuadores

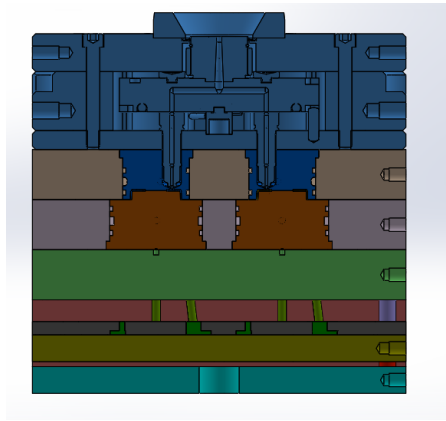


Figura de referencia 51. Molde de actuadores sección vertical

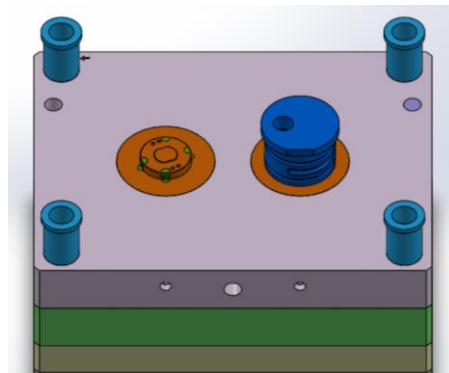


Figura de referencia 52. Inserto macho lado móvil e inserto cavidad lado inyección para molde de actuadores

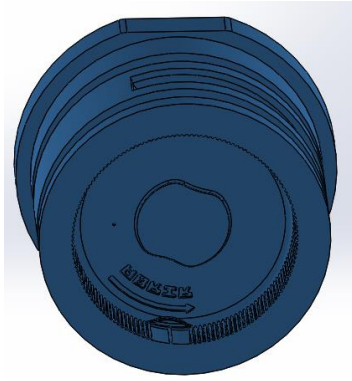


Figura de referencia 53. Inserto cavidad lado de inyección

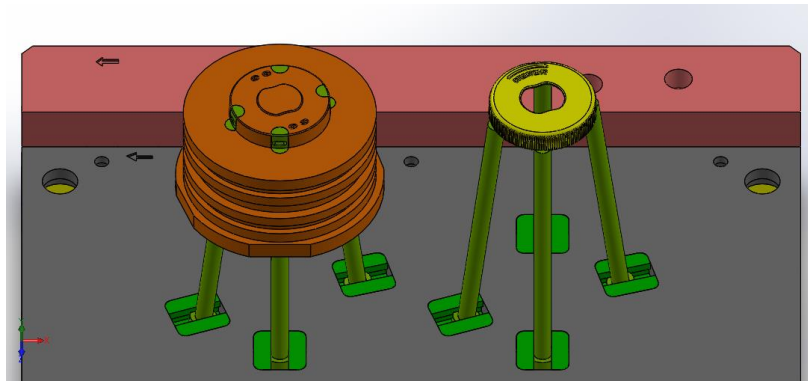


Figura de referencia 54. Sistema de expulsión para las piezas actuadores mediante levantadores

ANEXO 3 MOLDEO CIENTIFICO

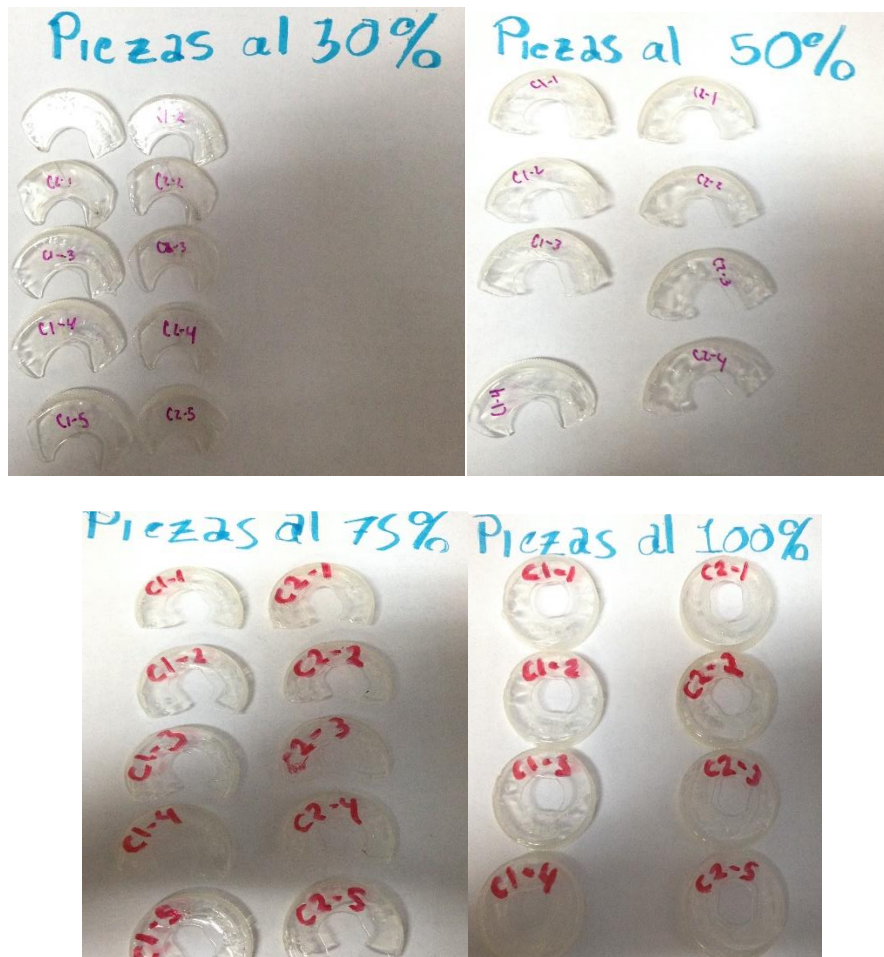


Figura de referencia 55. Estudio del balance de cavidades para las piezas actuadores (patrón de llenado)

Tabla de referencia 7. Perfil de temperaturas para alcanzar la mínima temperatura de masa fundida en el PLA en el molde de actuadores

Zona en el barril de inyección	Perfil de temperaturas [°C]
Garganta	20
Alimentación	176
Compresión	192
Compresión 2	198
Nariz	198
Temperatura de masa fundida promedio	185

Tabla de referencia 8. Perfil de temperaturas para alcanzar la máxima temperatura de masa fundida en el PLA en el molde de actuadores

Zona en el barril de inyección	Perfil de temperaturas [°C]
Garganta	20
Alimentación	180
Compresión	218
Compresión 2	226
Nariz	226
Temperatura de masa fundida promedio	215

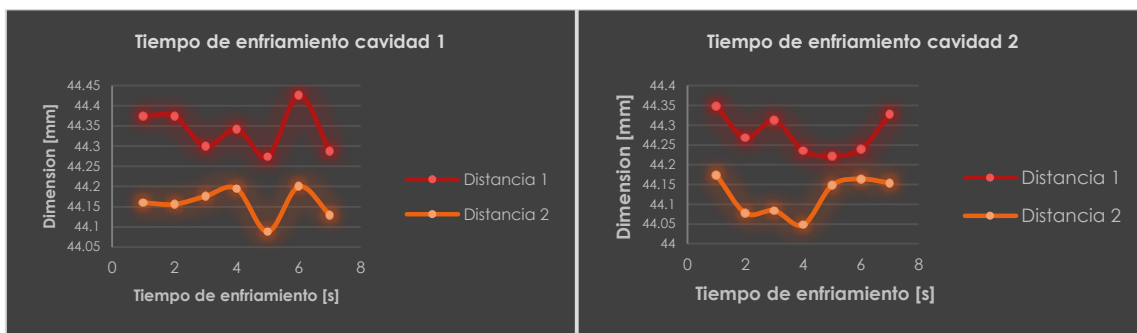


Figura de referencia 56. Variación de las dimensiones de la pieza actuador en función del tiempo de enfriamiento

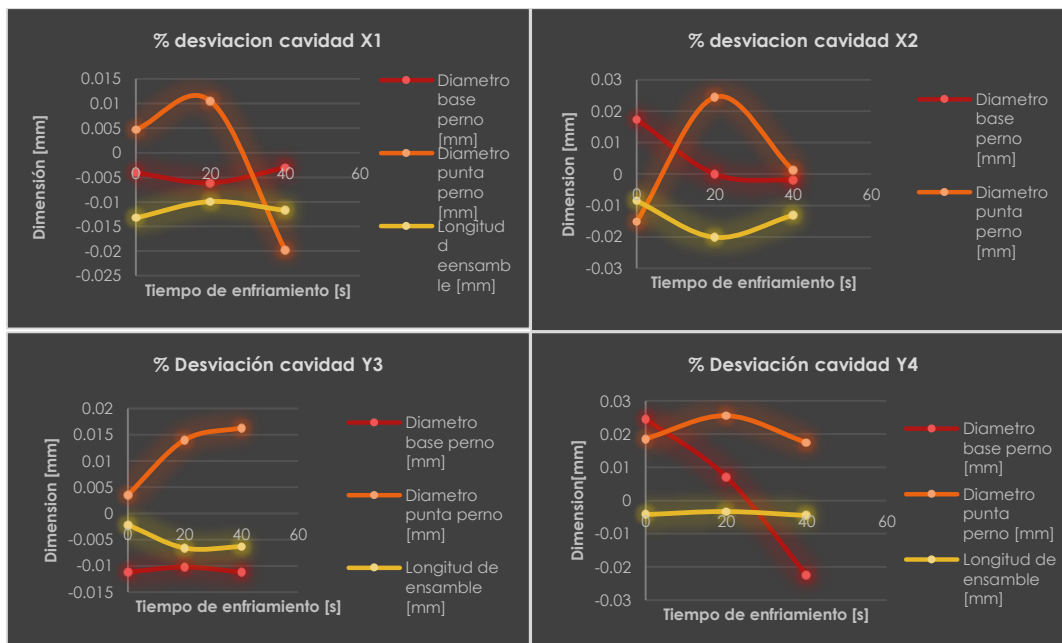


Figura de referencia 57. Desviación de las dimensiones de las paletas en función del tiempo de enfriamiento con respecto a las dimensiones de diseño.

Tabla de referencia 9. Parámetros obtenidos tras la aplicación del moldeo científico en el molde de bases

Parámetro	Valor
Tiempo de control de ciclo	31.9 s
Tiempo de inyección	0.17 s
Tiempo de dosificación	0.74 s
Presión de inyección	721 Bar
Contra presión	75 psi
Velocidad de inyección	70 mm/s
Tiempo de mantenimiento	6 s
Presión de mantenimiento	186 Bar
Temperatura de masa fundida	196 °C
Temperatura de boquilla	208 °C
Temperatura de zona de compresión 2	208°C
Temperatura de zona de compresión 1	202°C
Temperatura zona de alimentación	186°C
Temperatura de garganta	20°C
Temperatura bebedero	206°C
Temperatura distribuidor	206°C
Temperatura inyector 1 (zona 3)	240°C
Temperatura inyector 2 (zona 4)	240°C
Tiempo de enfriamiento	3 s
Retardo de dosificación	8 s
Velocidad angular de husillo	150 RPM
Retroceso	15.9 mm
Parada de dosificación	13.0 mm
Cojín de masa	6.8 mm
Punto de conmutación	10 mm
Retardo de adelanto de expulsor	0 s
Presión de adelanto de expulsor	50 Bar
Velocidad 1 de adelanto de expulsor	10% inicio de la velocidad 2, 10 mm
Velocidad 2 de adelanto de expulsor	60% parada a 90 mm
Presión de retroceso de expulsor	50 Bar
Velocidad de retroceso de expulsor	80% parada a 1mm
Vibración de expulsor	- Parada a 1mm
Expulsor hidráulico activado	Si
Cantidad de vibraciones	1

Tabla de referencia 10. Parámetros obtenidos tras la aplicación del moldeo científico en el molde de actuadores

Parámetro	Valor
Tiempo de control de ciclo	299 s
Tiempo de inyección	0.16 s
Tiempo de dosificación	1.36 s
Presión de inyección	587 Bar
Contra presión	75 psi
Velocidad de inyección	119 mm/s
Tiempo de mantenimiento	6 s

Presión de mantenimiento	521 Bar
Temperatura de masa fundida	200 °C
Temperatura de boquilla	198 °C
Temperatura de zona de compresión 2	198°C
Temperatura de zona de compresión 1	192°C
Temperatura zona de alimentación	176°C
Temperatura de garganta	26°C
Temperatura bebedero	206°C
Temperatura distribuidor	206°C
Temperatura inyector 1 (zona 3)	240°C
Temperatura inyector 2 (zona 4)	240°C
Tiempo de enfriamiento	5 s
Retardo de dosificación	8 s
Velocidad angular de husillo	150 RPM
Retroceso	25 mm
Parada de dosificación	22 mm
Cojín de masa	8.4 mm
Punto de conmutación	20 mm
Retardo de adelanto de expulsor	0 s
Presión de adelanto de expulsor	50 Bar
Velocidad 1 de adelanto de expulsor	5% inicio de la velocidad 2, 15 mm
Velocidad 2 de adelanto de expulsor	10% parada a 111 mm
Presión de retroceso de expulsor	70 Bar
Velocidad de retroceso de expulsor	2% parada a 102mm
Vibración de expulsor	- Parada a 102mm
Expulsor hidráulico activado	Si
Cantidad de vibraciones	1

Tabla de referencia 11 Datos con los cuales se generó la curva de viscosidad aparente en el molde de paletas

Velocidad de inyección[mm/s]	Tiempo de inyección promedio [s]	Presión de inyección promedio [Bar]	Viscosidad aparente [Bar s]
119	0.1	425.8	335.5304
110	0.098	352.4	272.137376
100	0.072	357.4	202.774464
90	0.074	367.6	214.354912
80	0.074	316.2	184.382544
70	0.074	283	165.02296
60	0.078	270.8	166.444512
50	0.082	254	164.12464
40	0.078	172.4	105.963936
30	0.082	208.6	134.788976
20	0.11	143.4	124.29912
10	0.152	113.4	135.825984
1	0.24	60.8	114.98496

Tabla de referencia 12. Parámetros obtenidos tras la aplicación del moldeo científico en el molde de paletas

Parámetro	Valor
Tiempo de control de ciclo	58.3 s
Tiempo de inyección	0.07 s
Tiempo de dosificación	5.45 s
Presión de inyección	202 Bar
Contra presión	75 psi
Velocidad de inyección	600 mm/s
Tiempo de mantenimiento	2 s
Presión de mantenimiento	91 Bar
Temperatura de masa fundida	196 °C
Temperatura de boquilla	195 °C
Temperatura de zona de compresión 2	195°C
Temperatura de zona de compresión 1	186°C
Temperatura zona de alimentación	170°C
Temperatura de garganta	20°C
Temperatura bebedero	N/D
Temperatura distribuidor	N/D
Temperatura inyector 1 (zona 3)	N/D
Temperatura inyector 2 (zona 4)	N/D
Tiempo de enfriamiento	40 s
Retardo de dosificación	8 s
Velocidad angular de husillo	150 RPM
Retroceso	22 mm
Parada de dosificación	22 mm
Cojín de masa	8.6 mm
Punto de conmutación	20 mm
Retardo de adelanto de expulsor	0 s
Presión de adelanto de expulsor	10 Bar
Velocidad 1 de adelanto de expulsor	50% inicio de la velocidad 2, 15 mm
Velocidad 2 de adelanto de expulsor	50% parada a 119 mm
Presión de retroceso de expulsor	50 Bar
Velocidad de retroceso de expulsor	2% parada a 102mm
Vibración de expulsor	- Parada a 102mm
Expulsor hidráulico activado	Si
Cantidad de vibraciones	1

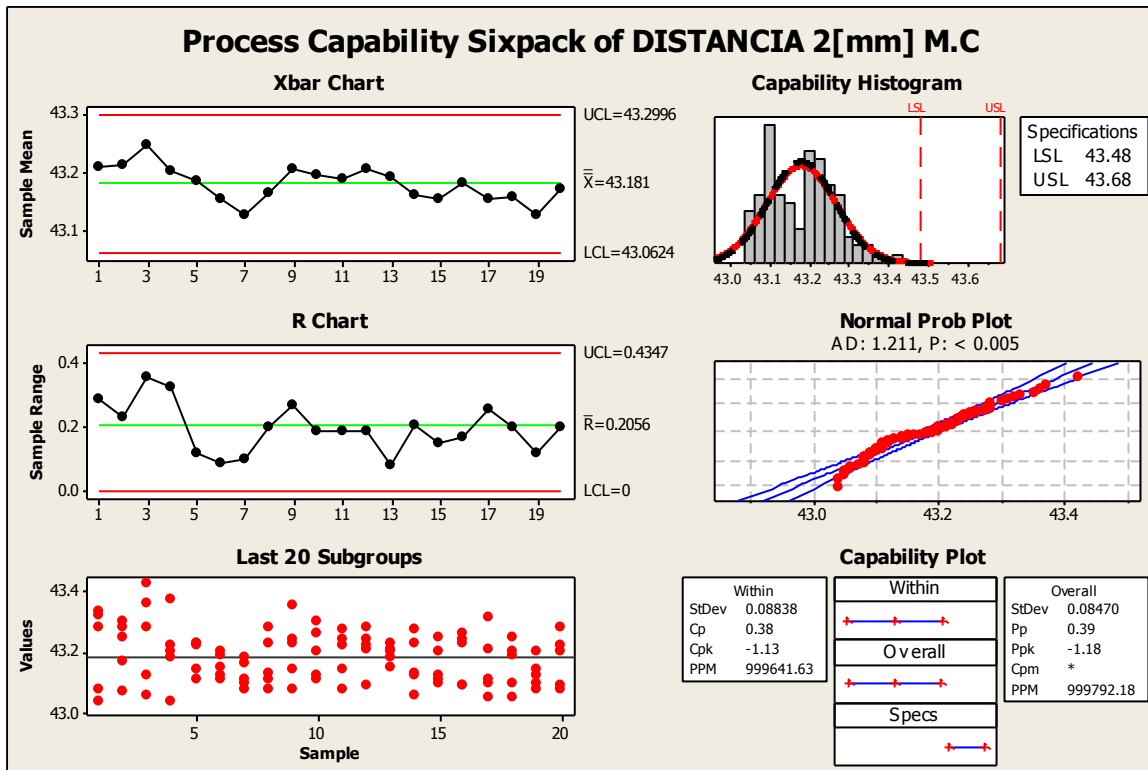


Figura de referencia 58 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la distancia 2 obtenida por moldeo científico.

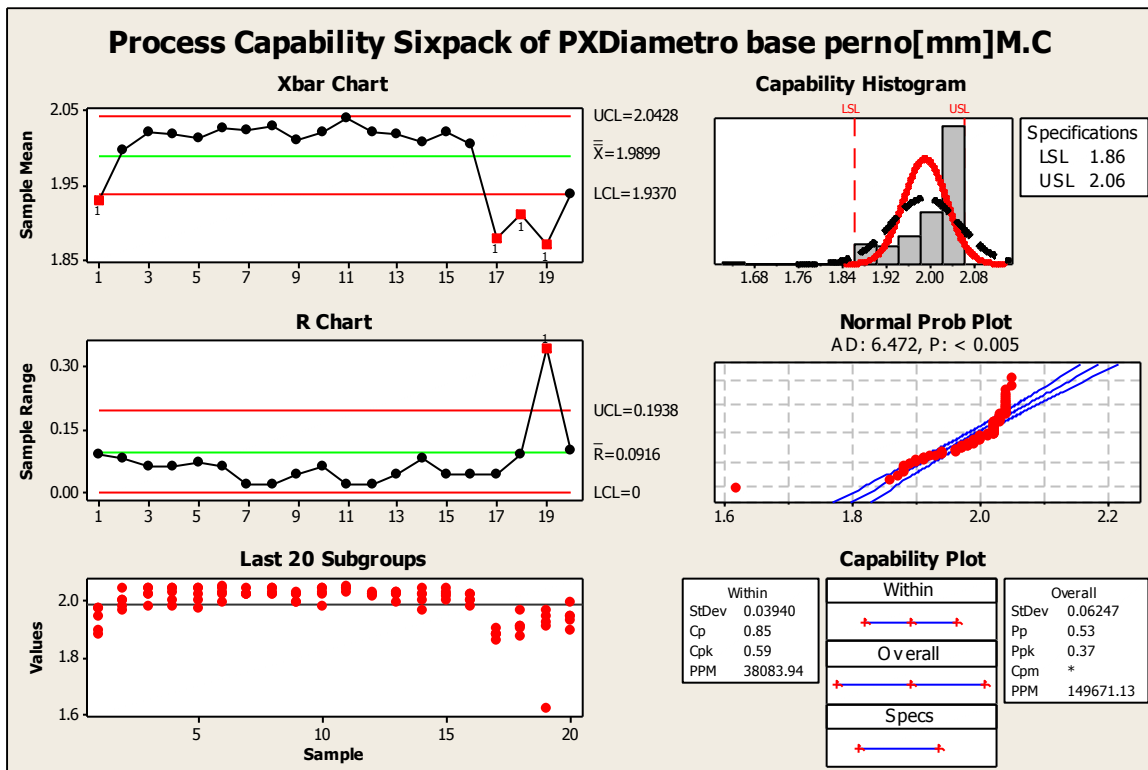


Figura de referencia 59 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la PX Diámetro de base de perno obtenida por moldeo científico.

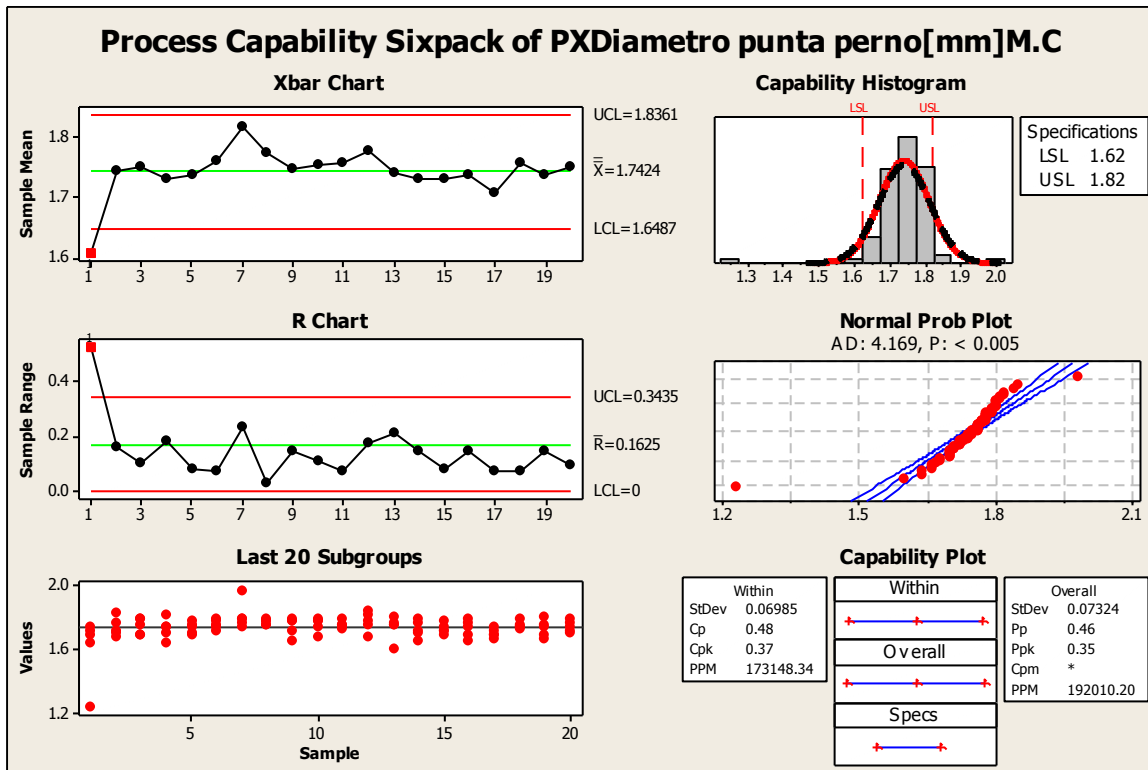


Figura de referencia 60 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la PX Diámetro de punta de perno obtenida por moldeo científico.

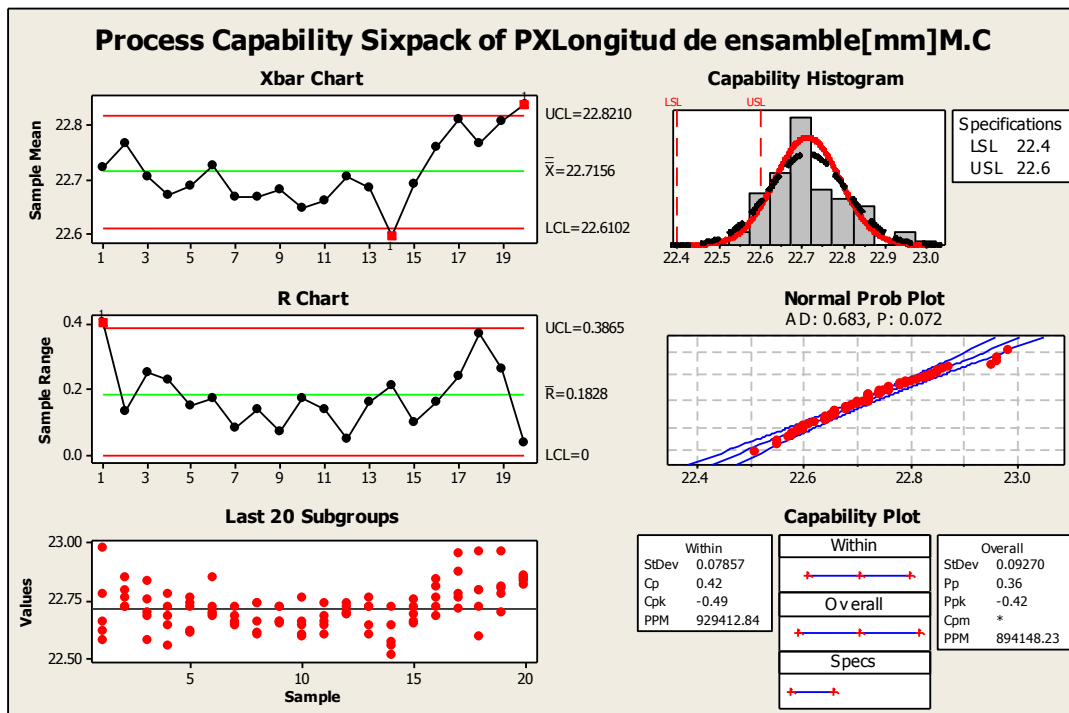


Figura de referencia 61 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la PX Longitud de ensamble obtenida por moldeo científico.

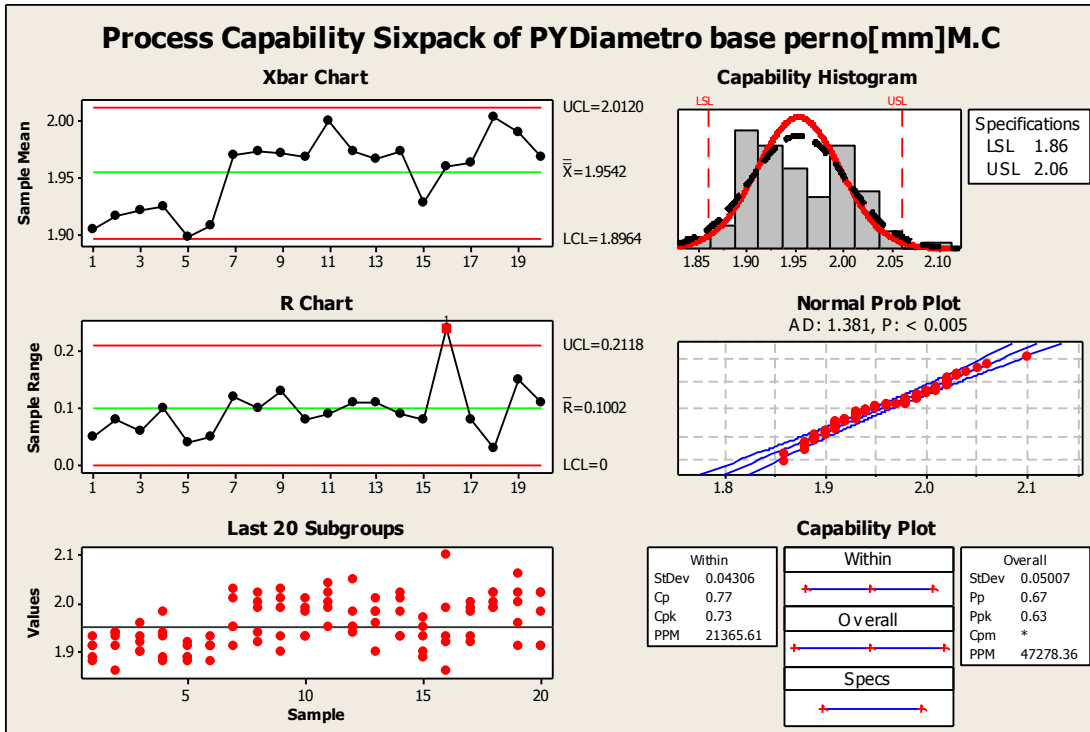


Figura de referencia 62 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la PY Diámetro de base de perno obtenida por moldeo científico.

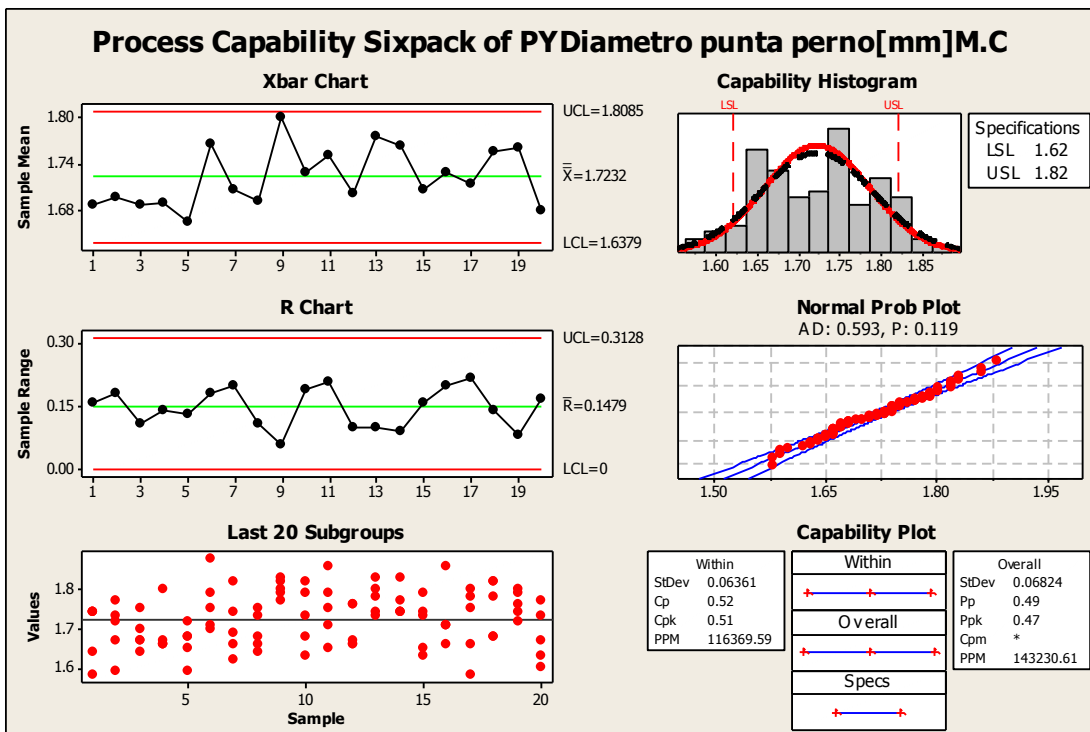


Figura de referencia 63 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la PY Diámetro de punta de perno obtenida por moldeo científico.

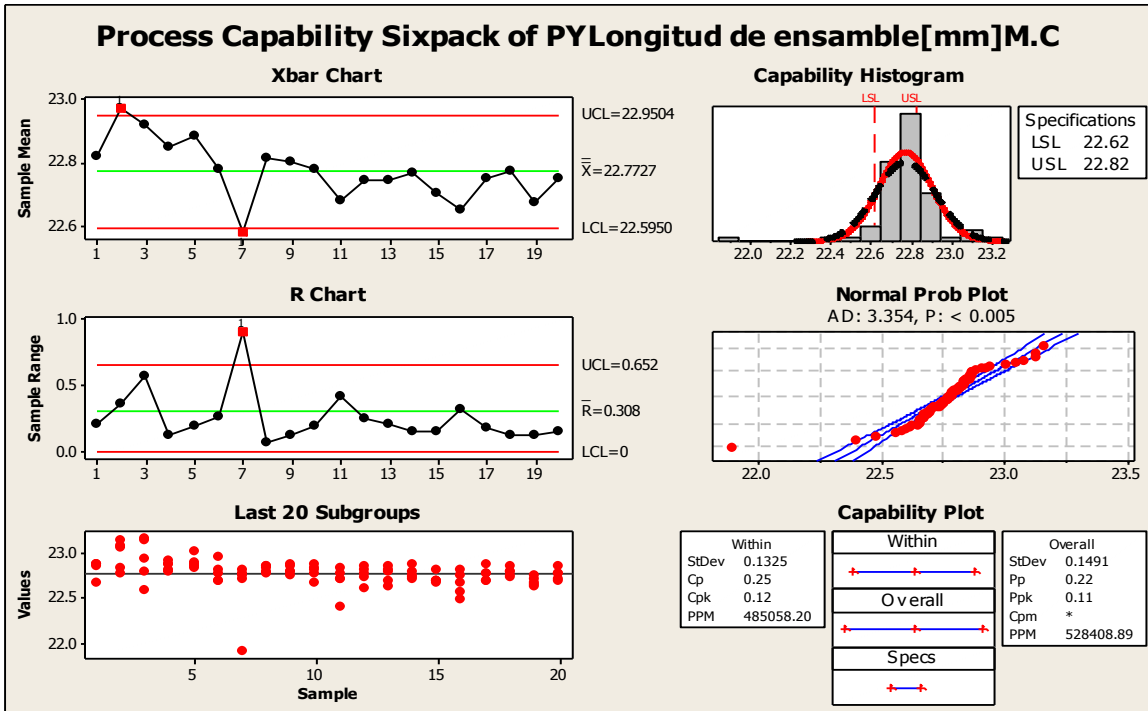


Figura de referencia 64 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la PY Longitud de ensemble obtenida por moldeo científico.

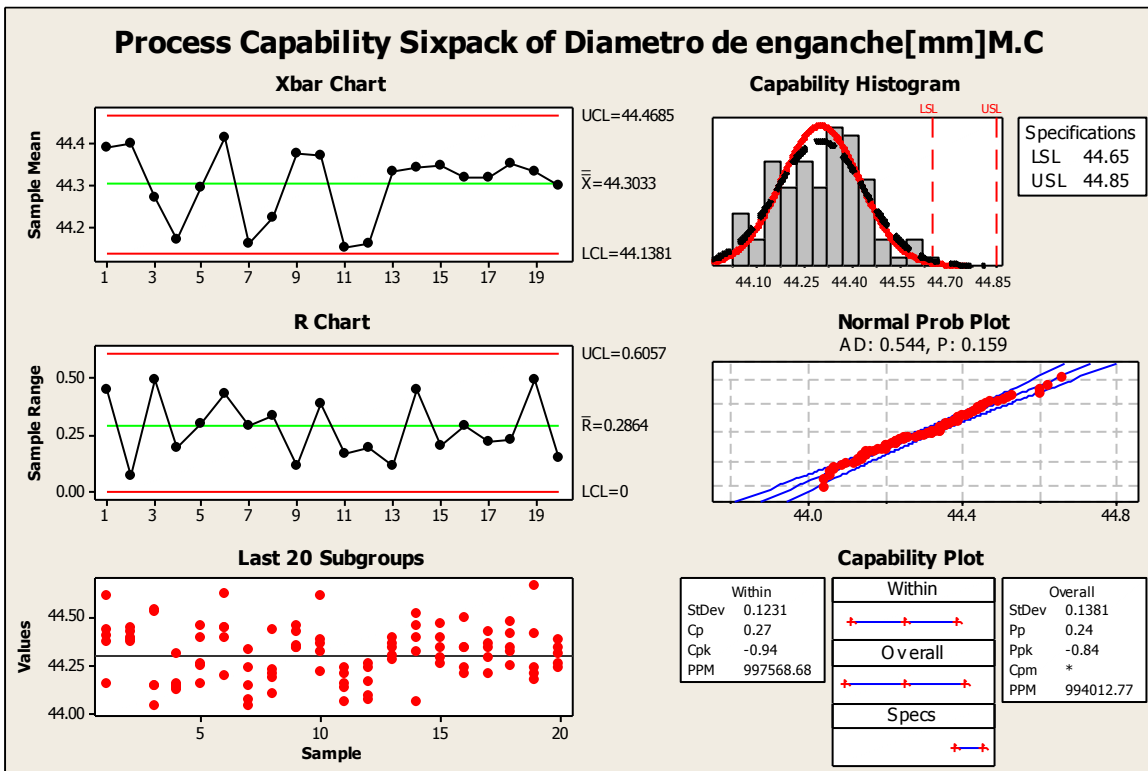


Figura de referencia 65 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de de enganche obtenida por moldeo científico.

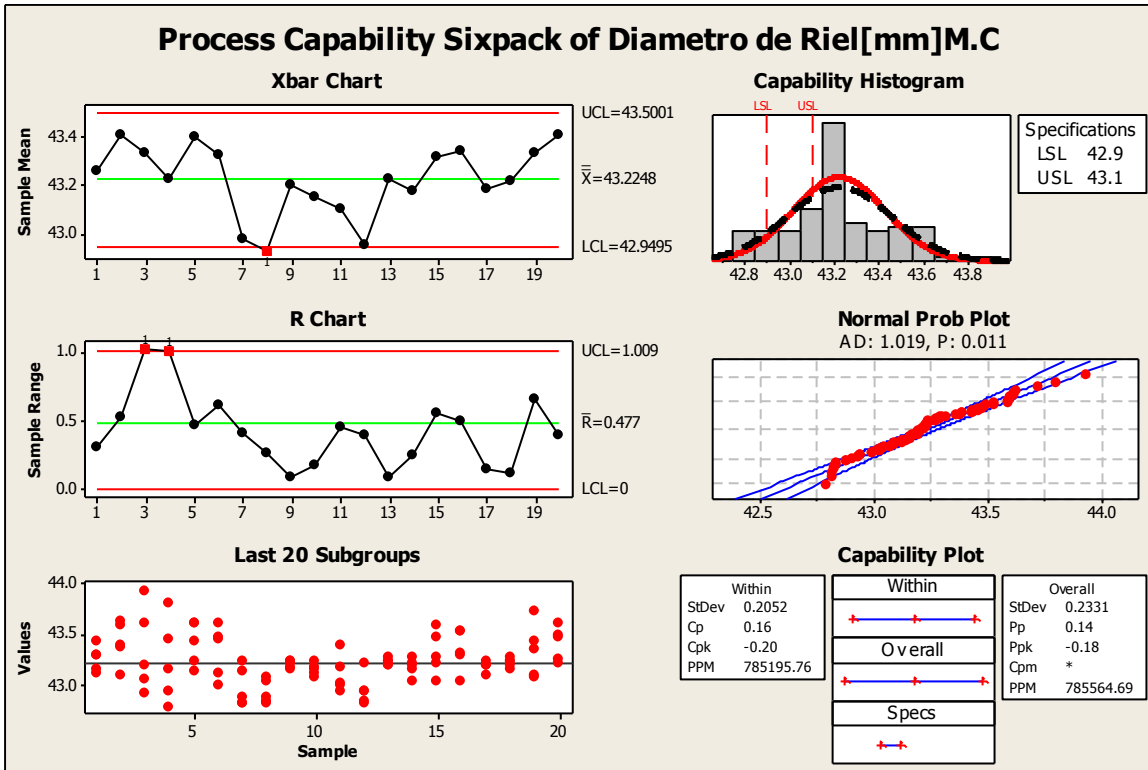


Figura de referencia 66 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de riel obtenida por moldeo científico.

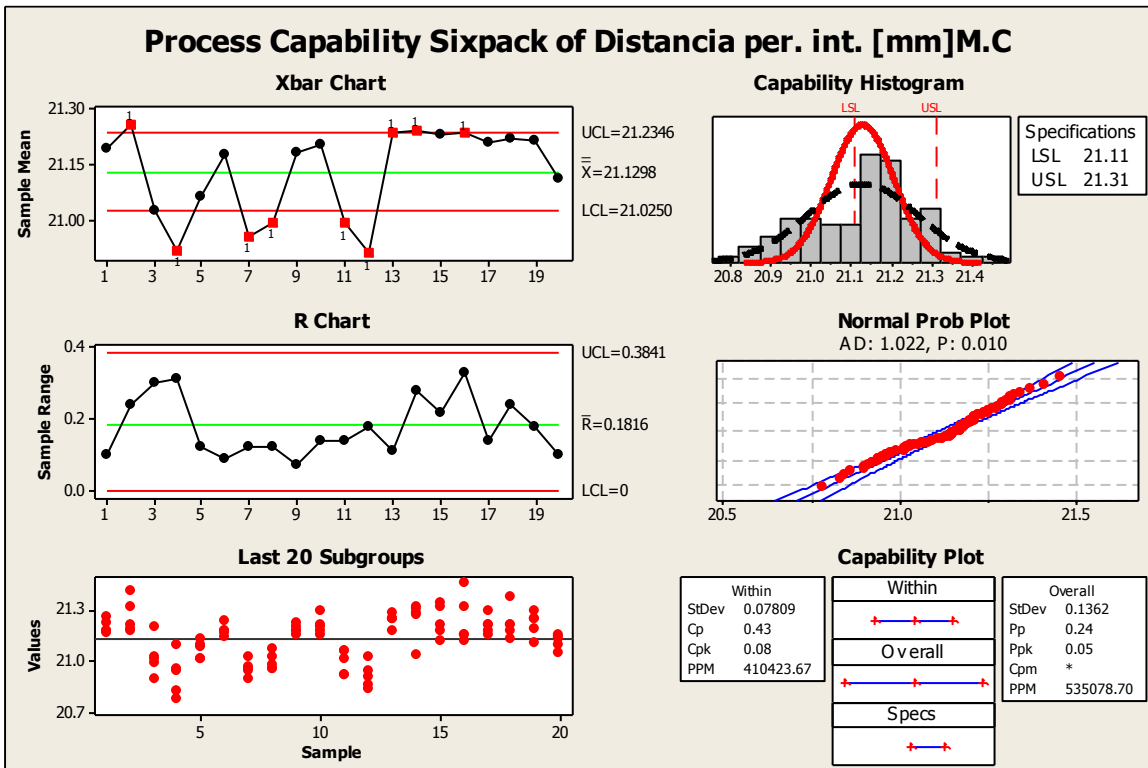


Figura de referencia 67 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la distancia entre perímetros internos obtenida por moldeo científico.

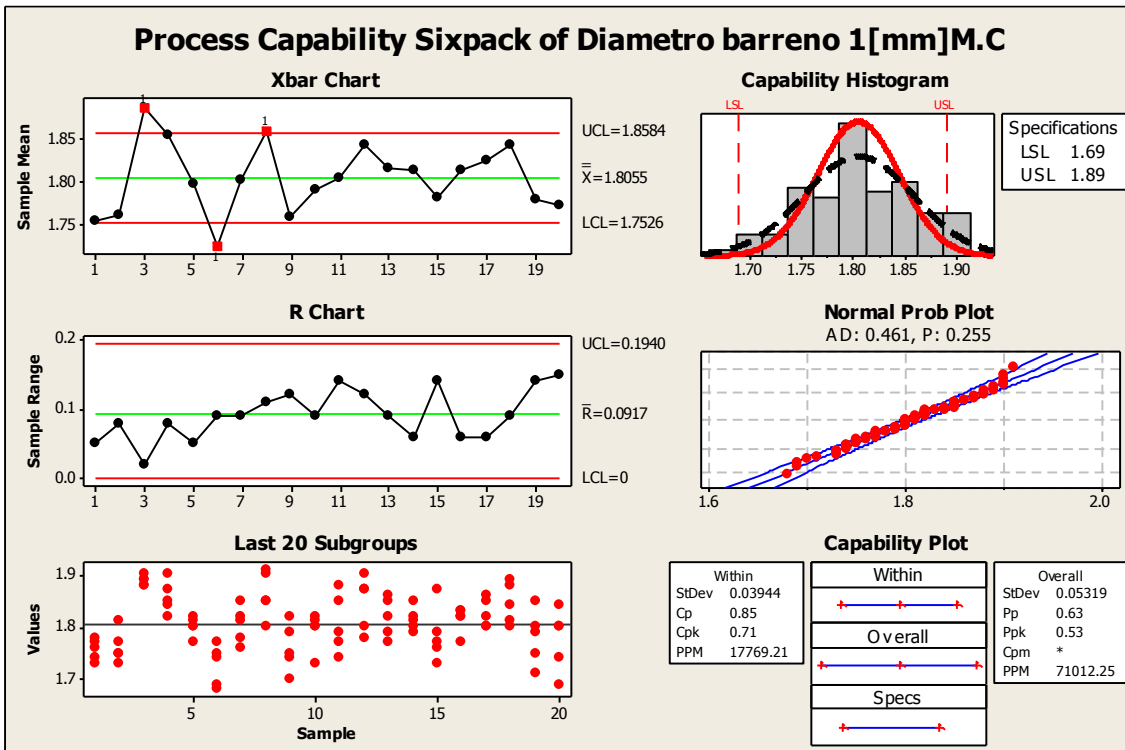


Figura de referencia 68 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de barreno 1 obtenida por moldeo científico.

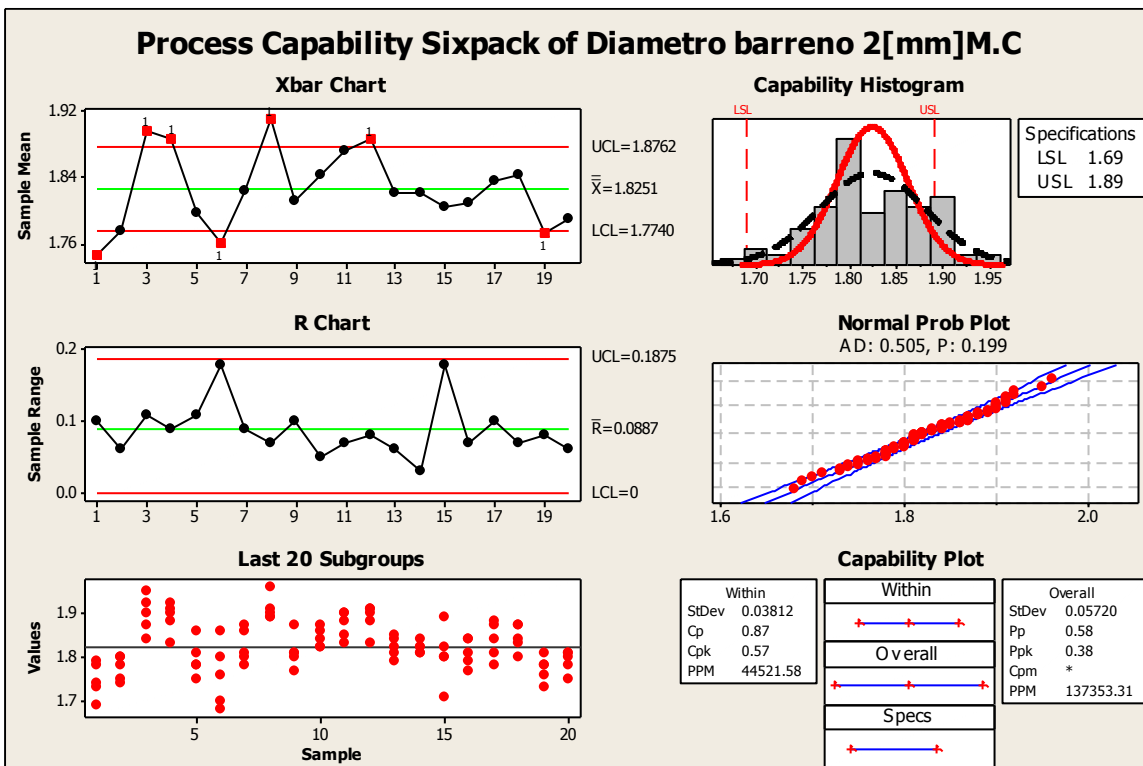


Figura de referencia 69 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de barreno 2 obtenida por moldeo científico.

ANEXO 4 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

TABLA DE DISEÑO ALEATORIZADA PARA EL MOLDE DE BASES

Run	A	B	C	D
1	-	-	-	+
2	-	+	-	+
3	+	+	+	+
4	-	+	+	-
5	+	+	+	-
6	+	-	+	+
7	-	+	+	+
8	-	-	+	+
9	+	-	-	-
10	+	-	+	-
11	-	-	-	-
12	-	-	+	-
13	+	+	-	+
14	+	+	-	-
15	+	-	-	+
16	-	+	-	-

Tabla de referencia 13. Diseño de experimento en orden aleatorio

DOE BASES							
Orden estándar	Orden de experimento	Punto central	Bloques	Presión de mantenimiento [Bar]	Tiempo de mantenimiento [s]	Velocidad de inyección [mm/s]	Tiempo de enfriamiento [s]
9	1	1	1	139	3	70	6
11	2	1	1	139	6	70	6
16	3	1	1	232	6	80	6
7	4	1	1	139	6	80	1
8	5	1	1	232	6	80	1
14	6	1	1	232	3	80	6
15	7	1	1	139	6	80	6
13	8	1	1	139	3	80	6
2	9	1	1	232	3	70	1
6	10	1	1	232	3	80	1
1	11	1	1	139	3	70	1
5	12	1	1	139	3	80	1
12	13	1	1	232	6	70	6
4	14	1	1	232	6	70	1
10	15	1	1	232	3	70	6
3	16	1	1	139	6	70	1

TABLA DE DISEÑO ALEATORIZADA PARA EL MOLDE DE ACTUADORES

Run	A	B	C	D
1	-	-	+	-
2	-	+	+	+
3	-	+	-	-
4	+	-	-	-
5	+	-	+	-
6	-	-	+	+
7	+	+	+	+
8	-	-	-	+
9	+	+	+	-
10	+	-	-	+
11	+	+	-	-
12	-	+	+	-
13	-	+	-	+
14	+	-	+	+
15	-	-	-	-
16	+	+	-	+

Tabla de referencia 14. Diseño de experimento en orden aleatorio

DOE ACTUADORES							
Orden estándar	Orden de experimento	Punto central	Bloques	Presión de mantenimiento [Bar]	Tiempo de mantenimiento [s]	Velocidad de inyección [mm/s]	Tiempo de enfriamiento [s]
5	1	1	1	80	3	119	1
15	2	1	1	80	6	119	7
3	3	1	1	80	6	100	1
2	4	1	1	948	3	100	1
6	5	1	1	948	3	119	1
13	6	1	1	80	3	119	7
16	7	1	1	948	6	119	7
9	8	1	1	80	3	100	7
8	9	1	1	948	6	119	1
10	10	1	1	948	3	100	7
4	11	1	1	948	6	100	1
7	12	1	1	80	6	119	1
11	13	1	1	80	6	100	7
14	14	1	1	948	3	119	7
1	15	1	1	80	3	100	1
12	16	1	1	948	6	100	7

TABLA DE DISEÑO ALEATORIZADA PARA EL MOLDE DE PALETAS

Run	A	B	C	D
1	-	+	+	+
2	-	+	-	+
3	-	-	+	+
4	+	-	-	+
5	+	+	+	+
6	+	+	+	-
7	+	-	+	+
8	-	-	+	-
9	+	-	+	-
10	+	-	-	-
11	-	+	-	-
12	+	+	-	+
13	+	+	-	-
14	-	+	+	-
15	-	-	-	+
16	-	-	-	-

DOE PALETAS							
Orden estandar	Orden de experimento	Punto central	Bloques	Presión de mantenimiento [Bar]	Tiempo de mantenimiento [s]	Velocidad de inyección [mm/s]	Tiempo de enfriamiento
15	1	1	1	50	3	70	40
11	2	1	1	50	3	50	40
13	3	1	1	50	1	70	40
10	4	1	1	132	1	50	40
16	5	1	1	132	3	70	40
8	6	1	1	132	3	70	0
14	7	1	1	132	1	70	40
5	8	1	1	50	1	70	0
6	9	1	1	132	1	70	0
2	10	1	1	132	1	50	0
3	11	1	1	50	3	50	0
12	12	1	1	132	3	50	40
4	13	1	1	132	3	50	0
7	14	1	1	50	3	70	0
9	15	1	1	50	1	50	40
1	16	1	1	50	1	50	0

Optimal D	High Cur Low	Presión	Tiempo d	Velocida	Tiempo c
0.00000		132.0 [91.0] 50.0	3.0 [2.0] 1.0	70.0 [60.0] 50.0	40.0 [20.0] 0.0
Composite Desirability	0.00000				
X1Diamet	Targ: 1.960 y = 1.9606 d = 0.99375				
Diametro	Targ: 1.720 y = 1.7561 d = 0.63875				
Longitud	Targ: 22.50 y = 22.5564 d = 0.43625				
Diametro	Targ: 1.960 y = 1.9789 d = 0.81125				
Diametro	Targ: 1.720 y = 1.7577 d = 0.62250				
Longitud	Targ: 22.50 y = 22.8599 d = 0.00000				
Diametro	Targ: 1.960 y = 1.9994 d = 0.60625				
Diametro	Targ: 1.720 y = 1.7563 d = 0.63750				
Longitud	Targ: 22.720 y = 22.8286 d = 0.00000				
Diametro	Targ: 1.960 y = 2.0090 d = 0.51000				
Diametro	Targ: 1.720 y = 1.7283 d = 0.91750				
Longitud	Targ: 22.720 y = 22.7836 d = 0.36375				

Figura de referencia 70 Gráfico de optimización para las paletas

Optimal D 0.00000	High Cur Low	Presión 948.0 [948.0] 80.0	Tiempo d 6.0 [3.0] 3.0	Velocida 119.0 [119.0] 100.0	Tiempo d 7.0 [1.0] 1.0
Composite Desirability 0.00000					
C1.Dimen Targ: 43.560 y = 43.620 d = 0.40000					
C1.Dimen Targ: 43.580 y = 43.2433 d = 0.00000					
C2.Dimen Targ: 43.560 y = 43.630 d = 0.30000					
C2.Dimen Targ: 43.580 y = 43.490 d = 0.10000					

Figura de referencia 71 Gráfico de optimización para actuadores

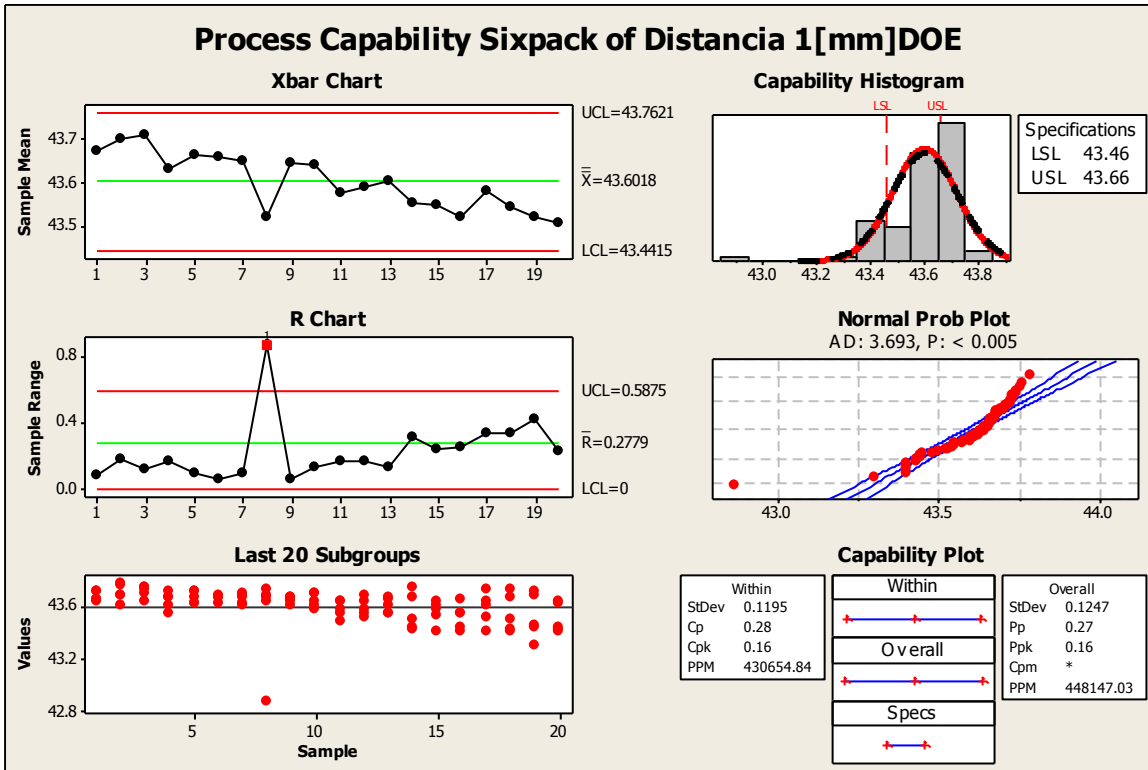


Figura de referencia 72 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la distancia 1 obtenida por DOE.

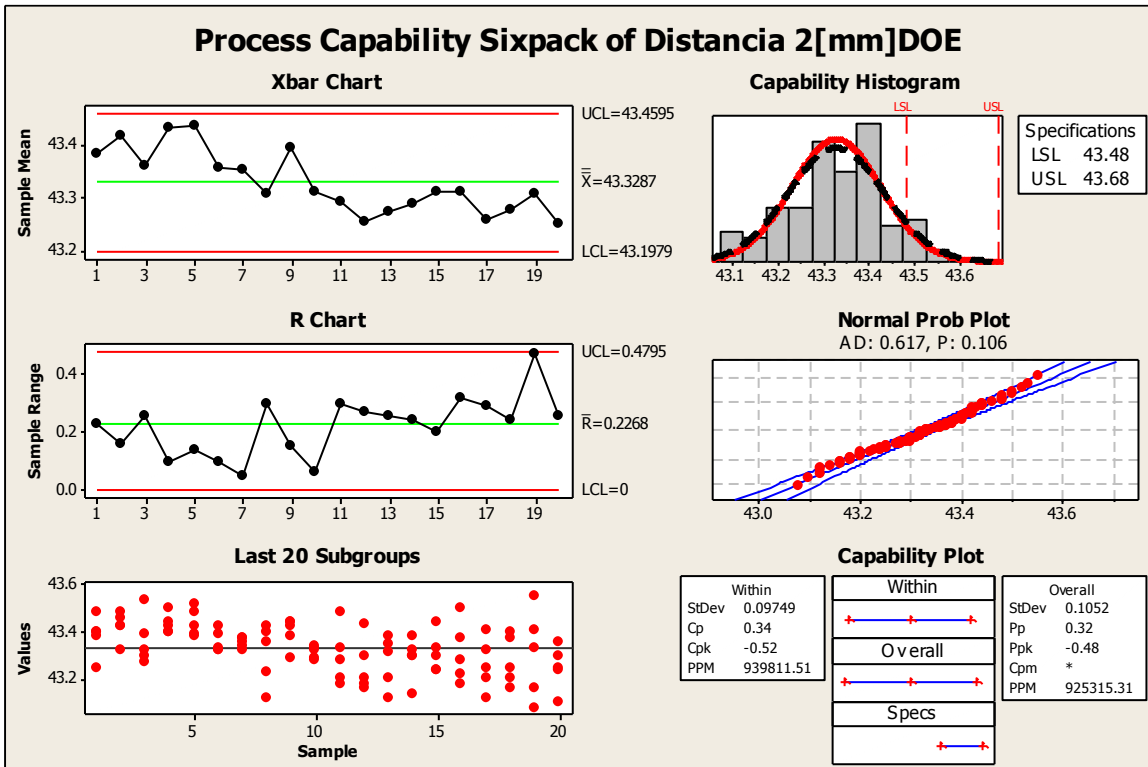


Figura de referencia 73 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la distancia 2 obtenida por DOE.

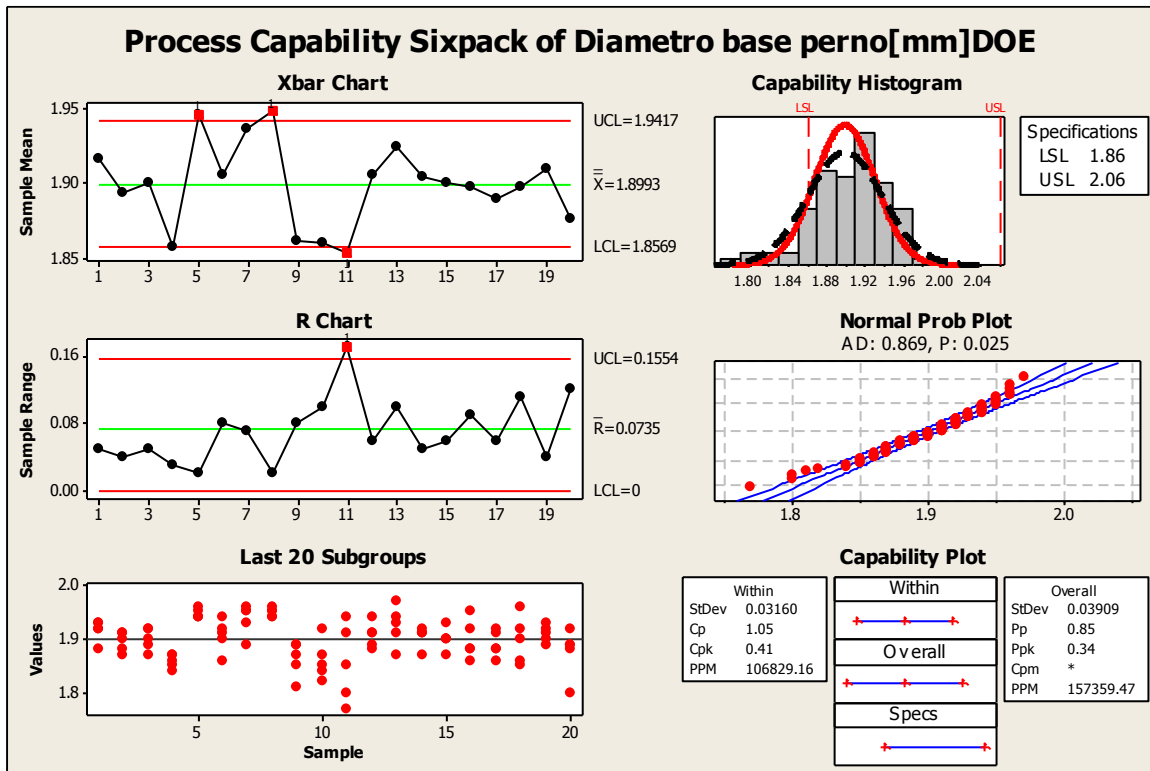


Figura de referencia 74 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de la base del perno de la paleta X obtenida por DOE.

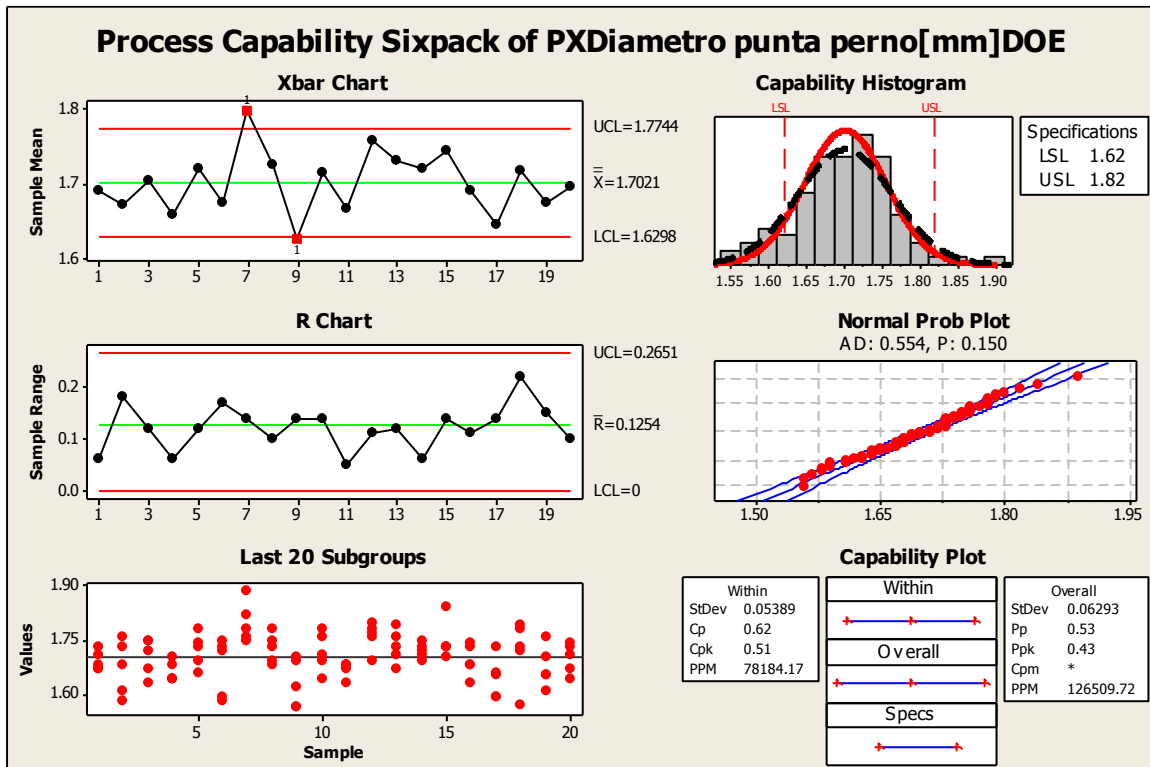


Figura de referencia 75 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de la punta del perno de la paleta X obtenida por DOE.

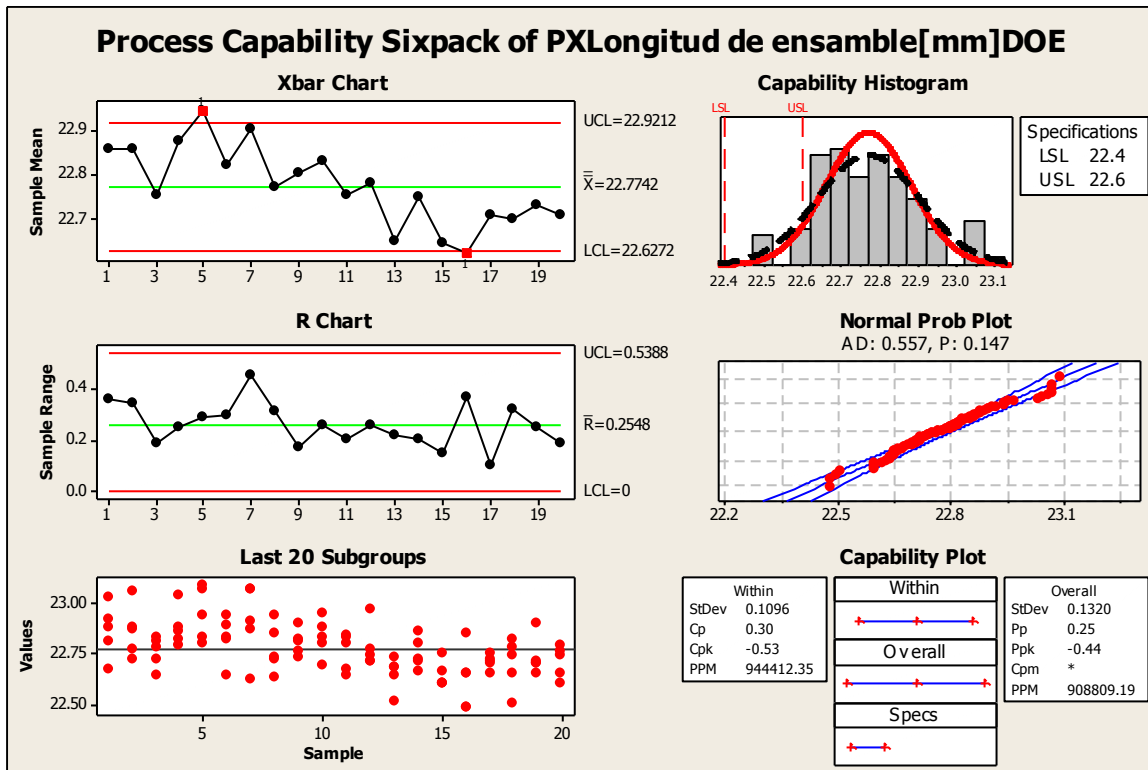


Figura de referencia 76 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la longitud de ensamble de la paleta X obtenida por DOE.

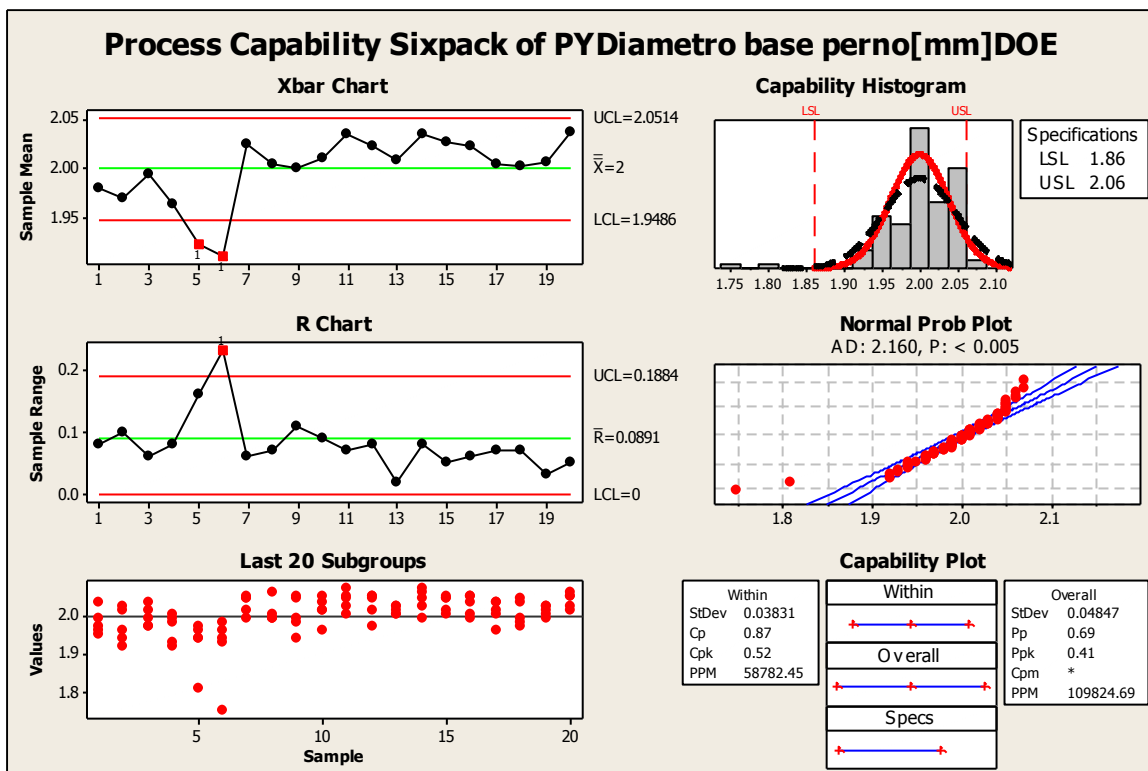


Figura de referencia 77 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de la base del perno de la paleta Y obtenida por DOE.

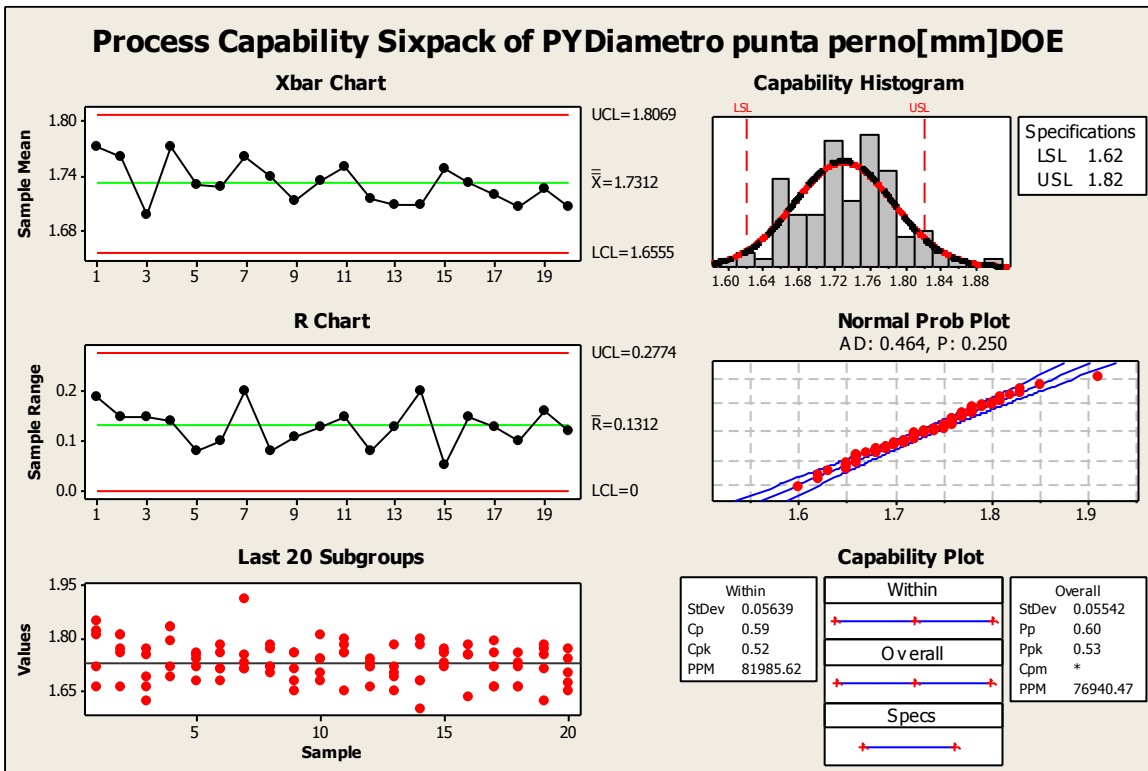


Figura de referencia 78 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de la punta del perno de la paleta Y obtenida por DOE.

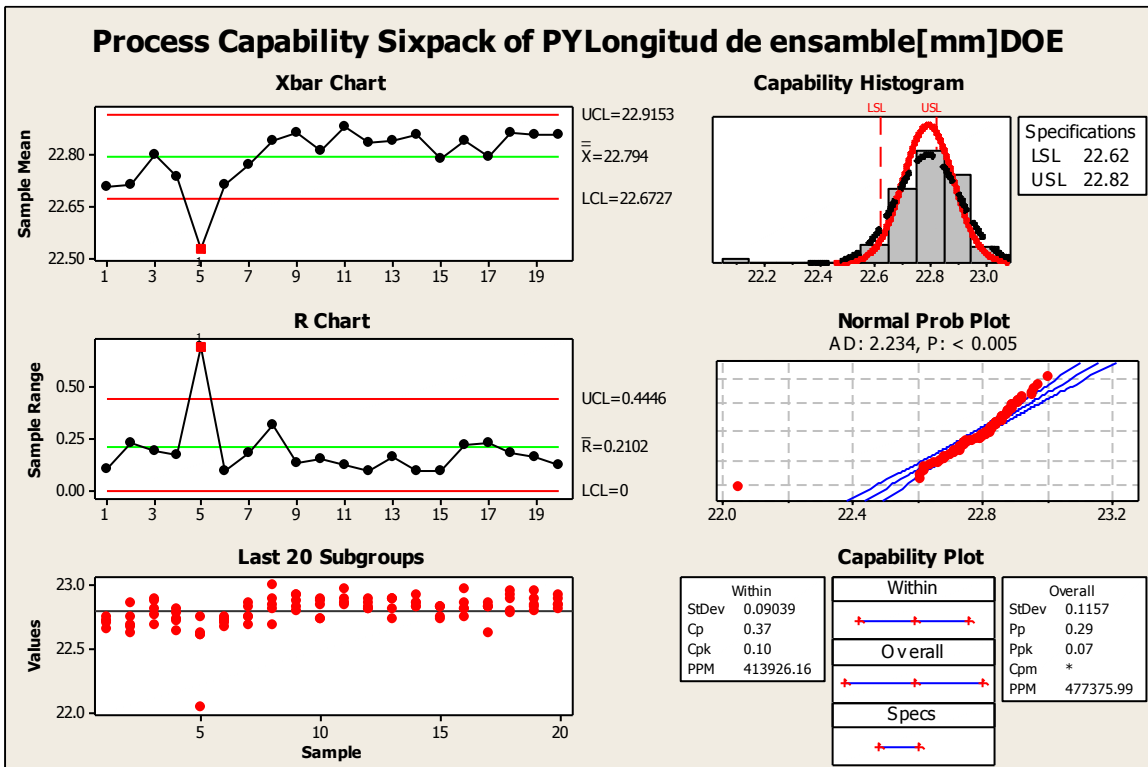


Figura de referencia 79 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la longitud de ensamble de la paleta Y obtenida por DOE.

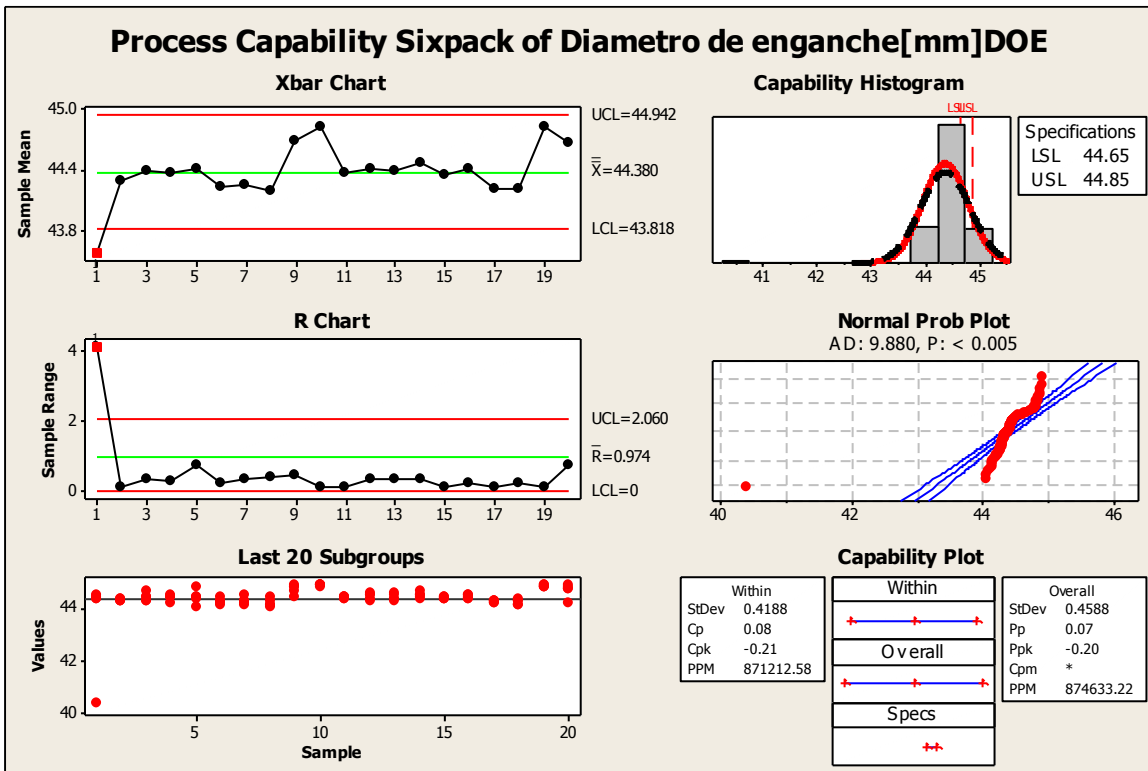


Figura de referencia 80 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de enganche obtenido por DOE.

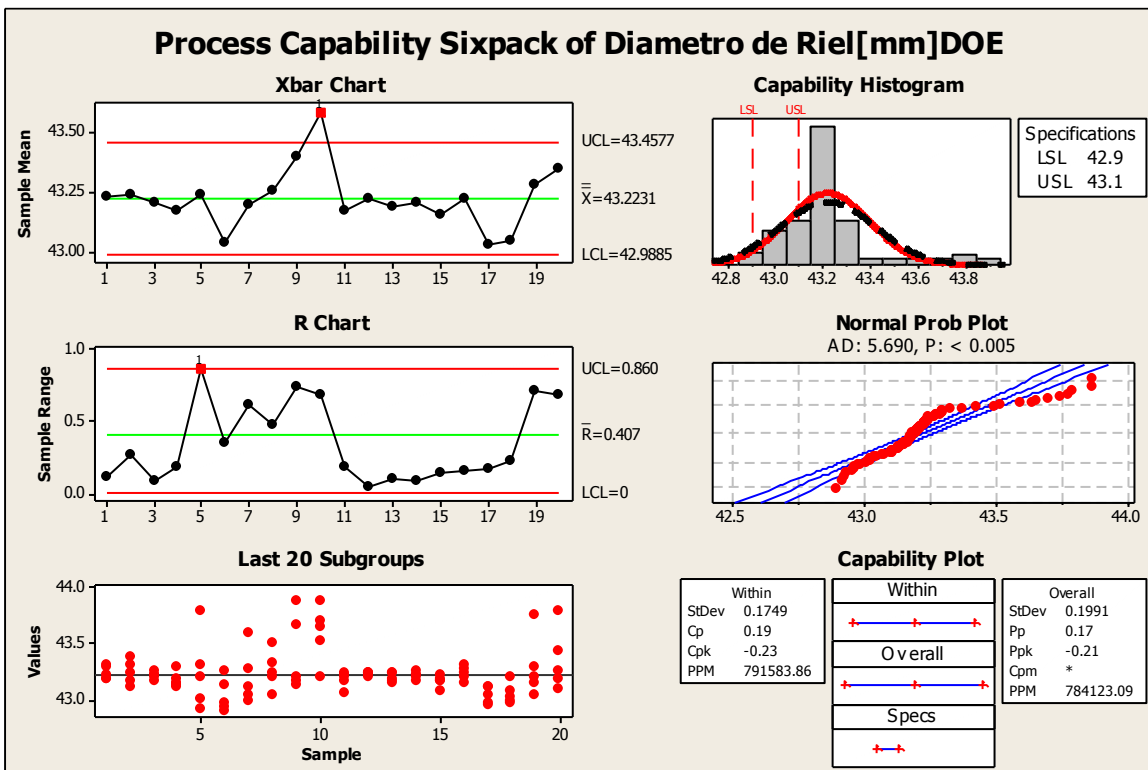


Figura de referencia 81 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la diámetro de riel obtenido por DOE.

Process Capability Sixpack of Distancia entre perimetros internos [mm]DOE

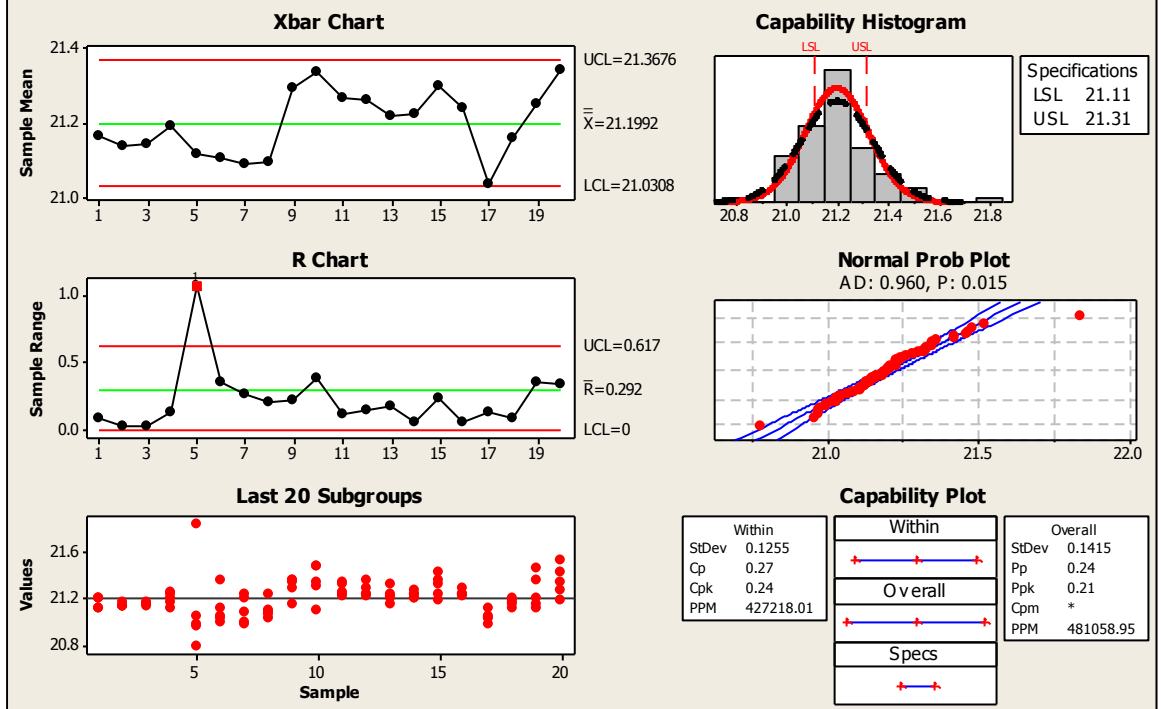


Figura de referencia 82 Gráfico de capacidad de proceso six pack de la distancia 1 obtenida por DOE.

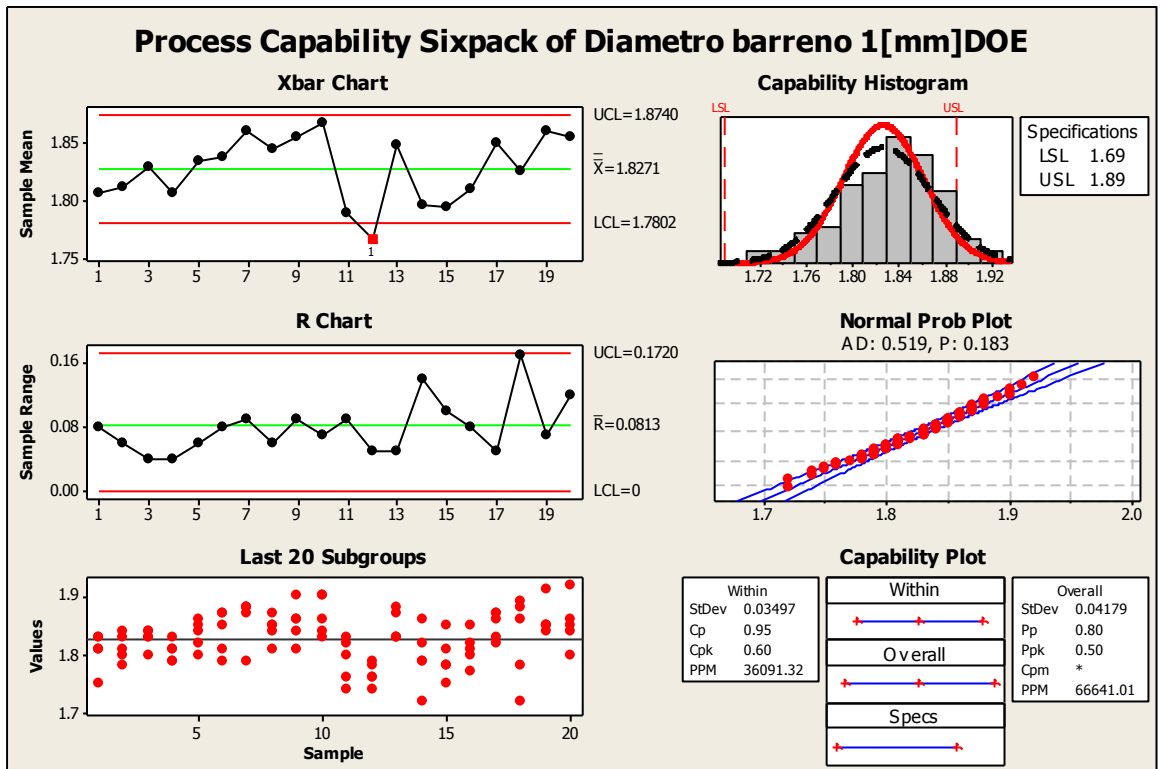


Figura de referencia 83 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de barreno1 obtenida por DOE.

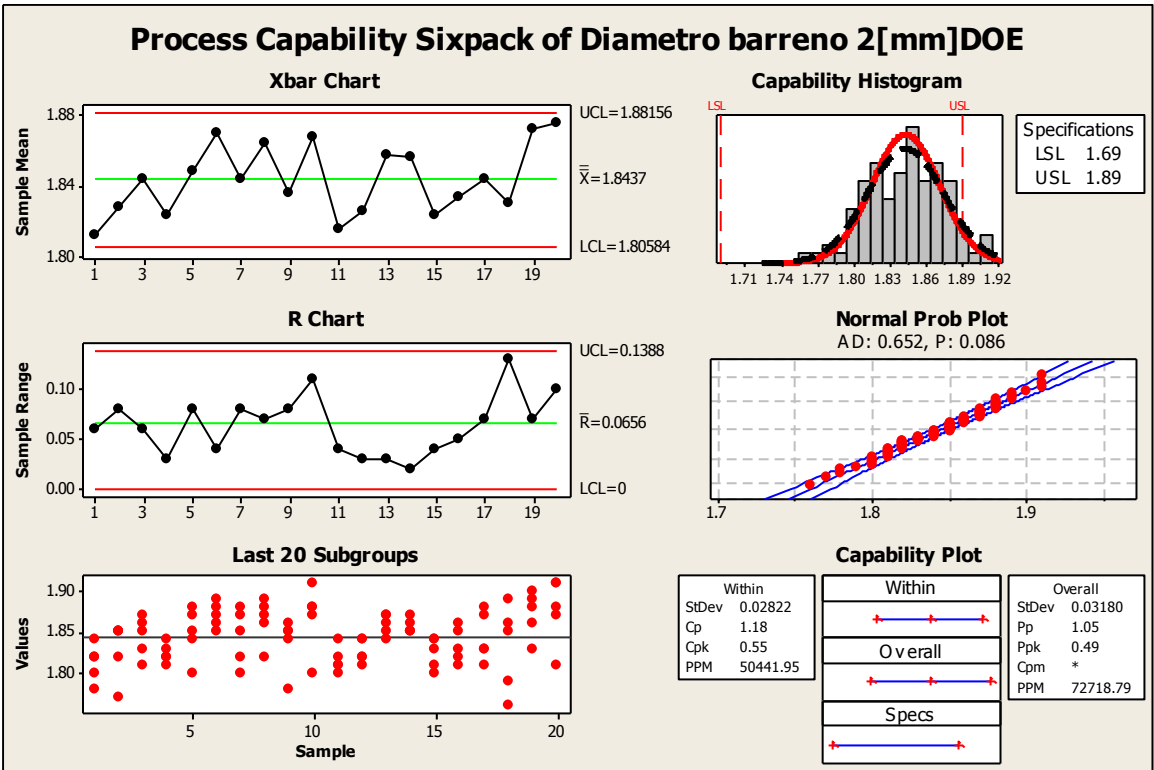


Figura de referencia 84 Gráfico de capacidad de proceso six pack del diámetro de barreno 2 obtenido por DOE.