

DISEÑO DE UN MOLDE DE INYECCION DE PLASTICOS, CON BASE EN
ANALISIS DE LLENADO, MEDIANTE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES
CAD/CAM/CAE

JORGE ALEXIS HERRERA DIAZ

CESAR JAHIR ZARATE USECHE

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C., 2018

DISEÑO DE UN MOLDE DE INYECCION DE PLASTICOS, CON BASE EN
ANALISIS DE LLENADO, MEDIANTE HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES
CAD/CAM/CAE

JORGE ALEXIS HERRERA DIAZ

CESAR JAHIR ZARATE USECHE

Proyecto de Trabajo de Grado en la modalidad de Solución a un problema de
Ingeniería para optar al título de Ingeniero Mecánico

DIRECTOR

ING. JORGE ANDRÉS GARCÍA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C., 2018

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	8
1. INTRODUCCION.....	9
2. OBJETIVOS.....	10
2.1 GENERAL.....	10
2.2 ESPECIFICOS.....	10
3. MARCO REFERENCIAL	11
3.1 MARCO CONCEPTUAL	11
3.1.1 <i>Entrada (gate)</i>	11
3.1.2 <i>Canal (runner)</i>	12
3.1.3 <i>Bebedero (sprue)</i>	12
3.1.4 <i>Cavidad</i>	12
3.1.5 <i>Viscosidad</i>	12
3.1.6 <i>Reologia</i>	12
3.1.7 <i>Mold wizard</i>	12
3.1.8 <i>Software CAM</i>	12
3.1.9 <i>Software CAE</i>	12
4. MARCO TEORICO	13
4.1 PROCESO DE INYECCIÓN DE PLÁSTICOS	13
4.1.1 <i>Poliuretano (TPU)</i>	13
4.1.2 <i>Ciclo de inyección</i>	13
4.1.3 <i>Comportamiento del material dentro del molde</i>	14
4.1.4 <i>Proceso de inyección a partir de curvas P-V-T</i>	15
4.1.5 <i>Determinación del número de cavidades:</i>	16
4.1.6 <i>Diseño y análisis de llenado de cavidades:</i>	16
4.1.7 <i>MFI (Melt Flow Indices)</i>	17
4.2 <i>ÁREA PROYECTADA</i>	18
4.3 <i>RADIO ENTRADA (GATE)</i>	19
4.4 <i>RADIO DEL CANAL (RUNNER)</i>	19
4.5 <i>CAÍDA DE PRESIÓN</i>	20
4.6 <i>BEBEDERO (SPRUE)</i>	20

4.7	FUERZA DE INYECCIÓN.....	20
4.8	DISTRIBUCIÓN DE CAVIDADES.....	21
5.	SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE LLENADO DE UN MOLDE DE INYECCIÓN DE PLÁSTICOS.....	23
5.1	CASO DE ESTUDIO.....	23
5.2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	25
5.3	CALCULO DE NÚMERO DE CAVIDADES	25
5.4	DIBUJO CAD DEL SISTEMA DE LLENADO DEL MOLDE SELECCIONADO	26
5.5	UTILIZACIÓN DE <i>SOFTWARE</i> CAE PARA EL ANÁLISIS DEL SISTEMA DE LLENADO	27
5.5.1	Simulación de llenado SOLIDWORKS	27
5.5.2	Simulación de llenado MOLD FLOW.....	37
5.6	Conclusiones	44
6.	DISEÑO DEL SISTEMA DE LLENADO DEL MOLDE	45
6.1	OBTENCIÓN DEL ÁREA PROYECTADA	45
6.2	FUERZAS DE INYECCIÓN	46
6.2.1	Obtención del centroide de cada cavidad	47
6.3	DISTRIBUCIÓN DE CAVIDADES.....	50
6.4	ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CANALES	51
6.5	ENTRADA (<i>GATE</i>).....	59
6.6	ANÁLISIS FINAL	60
6.7	CONCLUSIONES	63
7.	DISEÑO DE UN MOLDE DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO, UTILIZANDO EL ACELERADOR DE DISEÑO MOLD WIZARD DEL SOFTWARE NX 12	64
7.1	FLUJOGRAMA PARA DISEÑO DE MOLDE MEDIANTE ANÁLISIS DE LLENADO, CON HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES.....	78
7.2	CONCLUSIONES	78
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Convención de variables.....	17
Tabla 2. Parámetros del proceso de inyección.....	24
Tabla 3. Piezas vendidas por año (FRIPARTS).....	26
Tabla 4. Dimensiones propuestas de entradas.....	36
Tabla 5. Área proyectada.....	46
Tabla 6. Fuerzas de inyección.....	47
Tabla 7. Coordenadas de centroides caso real.....	47
Tabla 8. Volumen específico producto terminado.....	57
Tabla 9. Radios mínimos.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Partes internas del molde de inyección.....	11
Figura 2. Elastómeros.....	13
Figura 3. Tiempos en el ciclo de inyección.....	14
Figura 4. Etapas en el ciclo de moldeo.....	15
Figura 5. Curva P-V-T para un material semicristalino.....	15
Figura 6. Área proyectada del <i>mouse</i>	18
Figura 7. Entrada principal de cavidad.....	19
Figura 8. Tipos de distribución.....	21
Figura 9. Molde de inyección de cuatro cavidades.....	23
Figura 10. Pantalla de la maquina.....	24
Figura 11. Producto terminado.....	25
Figura 12. (a) Distribución de bujes con referencias. (b) Sólido. (c) Dimensión de entrada (<i>gate</i>). (d) Dimensión de canal (<i>runner</i>).....	27
Figura 13. Distribución de bujes para el análisis CAE.....	28
Figura 14. (a) Definición de tipo y geometría de canal. (b) Visualización del modelo con canales.....	29
Figura 15. (a) Dimensiones de las entradas. (b) Selección de líneas de las entradas. (c) Generación de entradas.....	30
Figura 16. (a) Dimensionamiento de bebedero. (b) Selección de línea para bebedero. (c) Generación de bebedero.....	31
Figura 17. Bujes enmallados.....	31
Figura 18. Selección de polímero.....	32
Figura 19. Selección de metal del molde.....	33
Figura 20. Parámetros del proceso.....	33
Figura 21. Ubicación del punto de inyección.....	34
Figura 22. Ejecución de análisis.....	34
Figura 23. Tiempo de llenado.....	35
Figura 24. Secuencia del llenado caso real.....	35
Figura 25. Secuencia de llenado uniforme.....	37
Figura 26. Modelo CAD cavidades del molde de inyección.....	37
Figura 27. Enmallado.....	38
Figura 28. Puntos de inyección.....	39
Figura 29. Creación de bebedero.....	39
Figura 30. Distribución de cavidades.....	40
Figura 31. Interfaz de selección de parámetros para el análisis.....	41
Figura 32. Tiempo de llenado.....	42
Figura 33. Secuencia de llenado.....	43
Figura 34. Secuencia de llenado con modificación de entrada.....	44
Figura 35. Dimensiones de los bujes.....	45
Figura 36. (a) Acción de momentos en la parte externa del molde. (b) Efectos de los momentos en las columnas del molde.....	48
Figura 37. Diagrama de fuerzas caso real.....	49

Figura 38. Distribución de cavidades seleccionada.....	50
Figura 39. (a) Alternativa 1 (b) Alternativa 2.....	51
Figura 40. Geometría de los canales.....	52
Figura 41. Alternativa 1 con dimensiones de canales y entradas.....	52
Figura 42. Alternativa 2 con dimensiones de canales y entradas.....	53
Figura 43. Grafica PVT Desmopan 385.....	56
Figura 44. Momentos alternativa 1.....	60
Figura 45. Momentos alternativa 2.....	61
Figura 46. Secuencia de llenado alternativa 1.....	61
Figura 47. Secuencia de llenado alternativa 2.....	62
Figura 48. Modelado CAD software NX 12.....	64
Figura 49. Asistente para el molde (<i>Mold Wizard</i>).....	65
Figura 50. Iniciar proyecto.....	65
Figura 51. Inspección del <i>software</i>	66
Figura 52. Selección del eje coordenado.....	67
Figura 53. Volumen de trabajo.....	67
Figura 54. Verificar regiones.....	68
Figura 55. Definir regiones.....	69
Figura 56. Superficie de separación para diseño.....	70
Figura 57. Placas de separación.....	71
Figura 58. Orden de las cavidades alternativa 2.....	72
Figura 59. Creación de entradas.....	73
Figura 60. Creación de distribución de canales.....	74
Figura 61. Selección del molde DME.....	75
Figura 62. Molde DME.....	76
Figura 63. Bebedero y anillo de posicionamiento.....	76
Figura 64. Visualización final del molde de inyección.....	77
Figura 65. Visualización final del molde de inyección sin la parte superior.....	77
Figura 66. Flujograma para diseño de moldes.....	78

RESUMEN

El proyecto consiste en el diseño de un molde de inyección de plástico con base en el análisis de llenado mediante herramientas computacionales CAD/CAM/CAE, teniendo en cuenta parámetros y dimensiones de un molde que se encuentra en funcionamiento en la empresa FRIPARTS. Con los datos obtenidos en la empresa se realizó una simulación CAE al sistema de llenado en dos diferentes programas, calibrando así la simulación con el caso real.

Se realizó el análisis de balanceo del molde mediante la determinación de fuerzas y momentos que se generan en el mismo, a partir de esto se plantearon dos alternativas de diseño del sistema de llenado contemplando variables como dimensiones y geometrías de: bebedero, canales y entradas; las anteriores halladas mediante cálculos. Luego se realizó el análisis de balanceo y simulación CAE en cada una de las alternativas, para así determinar la alternativa más viable. Por último, se implementó el acelerador de moldes (*Mold Wizard*) del programa NX12 construyendo el molde con base a la alternativa seleccionada.

1. INTRODUCCION

Los productos plásticos se obtienen principalmente por procesos de manufactura como inyectado soplado, extrusión soplado, moldeo por transferencia, inyección y extrusión. Particularmente los procesos de inyección e inyectado soplado emplean moldes para fabricar diferentes tipos de piezas, que se utilizan en todas las ramas del sector industrial, cada una demandando distintos estándares de calidad [1].

La calidad de los productos y la eficiencia del proceso se ven afectadas por defectos atribuidos en gran parte a la etapa del diseño de los moldes. El proceso de diseño de moldes es un proceso complejo que considera parámetros como la capacidad de inyección de la máquina, la distribución del número de cavidades, la presión de inyección, el volumen de material, la geometría de la pieza, el balanceo de canales de llenado, el análisis de temperaturas, entre otros [2].

En el caso de Colombia, el diseño de moldes de inyección es elaborado de manera empírica y, solo el 50% de las industrias dedicadas a la elaboración de moldes, poseen un departamento de diseño. El 60% de las empresas que tienen un área de diseño, utilizan herramientas computacionales CAE (Computer Aided Engineering) dichos porcentajes fueron obtenidos por medio de encuestas realizadas por la Corporación Centro de Productividad y Desarrollo Tecnológico del sector Metalmecánico y Siderúrgico (CDT Metalmecánico) de Colciencias. Las que no cuentan con un departamento de diseño delegan este trabajo a los operarios [3].

Dada la problemática en la falta de implementación, conocimiento y correcta manipulación de herramientas computacionales en la etapa de diseño de moldes de inyección, en las empresas colombianas que fabrican moldes se pretende realizar un aporte en la metodología de diseño, por medio del análisis computacional del sistema de llenado, y rediseño del molde para la fabricación de bujes de la empresa FRIPARTS. Se busca determinar el tipo de entrada (*gate*), distribución de cavidades y geometría de canales, utilizando herramientas computacionales CAD/CAM/CAE, y el acelerador de diseño de moldes de inyección MOLD WIZARD de NX.

El molde del buje muelles que actualmente se encuentra en funcionamiento en la empresa FRIPARTS, fue hecho por una empresa que cuenta con 35 años de experiencia en la elaboración de moldes, el cual fue diseñado empíricamente sin herramientas computacionales. Como ejercicio académico se pretende realizar una comparación del molde actual con el propuesto, por medio de herramientas computacionales CAD/CAM/CAE, con base en la teoría de diseño de moldes y análisis computacionales.

2. OBJETIVOS

2.1 GENERAL

Diseñar un molde de inyección de plásticos con base en los resultados de un análisis de llenado.

2.2 ESPECIFICOS

- Simular el sistema de llenado de un molde de inyección de plásticos, para el buje muelles de la empresa “FRIPARTS”, mediante un software CAE.
- Evaluar el número de cavidades y la distribución del molde para el buje muelles.
- Plantear alternativas del diseño del sistema de llenado, considerando la vela, los canales de inyección (*runners*), entradas a la cavidad (*gates*), para comparar la eficiencia con respecto al molde real.
- Diseñar un nuevo molde de inyección de plásticos para el buje muelles, considerando la mejor alternativa del diseño del sistema de llenado, utilizando un acelerador de diseño (*mold wizard*) de un software CAD comercial.

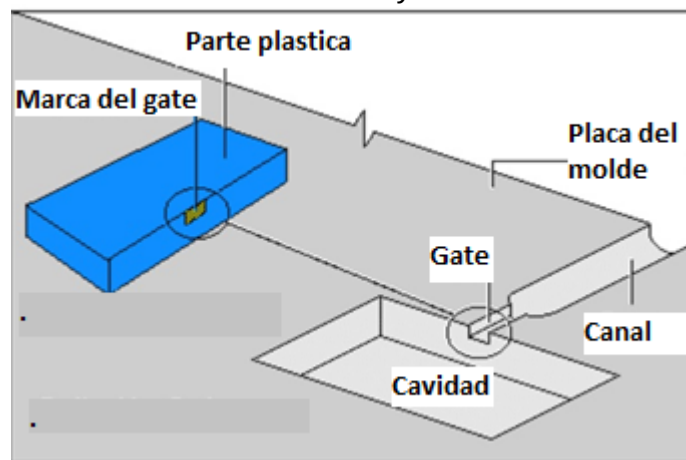
3. MARCO REFERENCIAL

Los moldes de inyección están compuestos por un gran número de partes tanto externas como internas, se hará enfoque en la parte interna que compone el molde dando a conocer su respectivo nombre y la función que cada uno de estos cumple.

3.1 MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se mostrará una imagen con las respectivas partes internas de un molde de inyección para comprender mejor a que corresponde cada una:

Figura 1. Partes internas del molde de inyección



Fuente: http://bluestarmould.blogspot.com/2015/08/very-basic-knowledge-of-injection_5.html

3.1.1 Entrada (gate)

Es por donde ingresa el material fundido a la cavidad para empezar a llenar la respectiva geometría. Los tipos de *gate* son:

- Directo (Bebedero).
- De tabulación.
- De borde (estándar).
- De supervisión.
- De ventilador.
- De disco.
- De entrada.
- Araña.
- De película (flash)

3.1.2 Canal (*runner*)

O en español canales de ingreso del material por los cuales fluye el polímero en estado líquido hacia las cavidades para ser llenadas[2][2].

3.1.3 Bebedero (*sprue*)

Es por donde inicia el ingreso de material fundido hacia los canales del molde de inyección[2].

3.1.4 Cavity

Es donde se le da la respectiva geometría a la pieza que se va a fabricar, dependiendo de su aplicación puede tener distintos tipos de acabado.

3.1.5 Viscosidad

Característica de un fluido en movimiento, que se opone hacia su flujo por medio de una fuerza. En pocas palabras es la resistencia de un fluido a fluir.

3.1.6 Reología

Estudia el flujo y deformación de la materia en este caso el comportamiento en un fluido dependiente de la temperatura y fluidez[2].

3.1.7 Mold wizard

Es una tecnología de proceso para optimizar el diseño del molde, el cual genera un alto nivel de productividad superando al software CAD[4].

3.1.8 Software CAM

Por sus siglas en inglés *Computer Aided Manufacturing*, que significa manufactura asistida por computador[5].

3.1.9 Software CAE

Por sus siglas en inglés *Computer Aided Engeneering*, que significa ingeniería asistida por computador[5].

4. MARCO TEORICO

El análisis de llenado en las cavidades de los moldes de inyección es importante en la etapa de diseño, ya que se debe desarrollar el diseño tanto de la pieza como del molde y las cavidades deben ser llenadas por masa fundida. Por lo general el flujo del polímero va desde el punto en el que este es inyectado con un flujo radial hacia los bordes, evitando des uniformidad y sobrellenado en el molde [2].

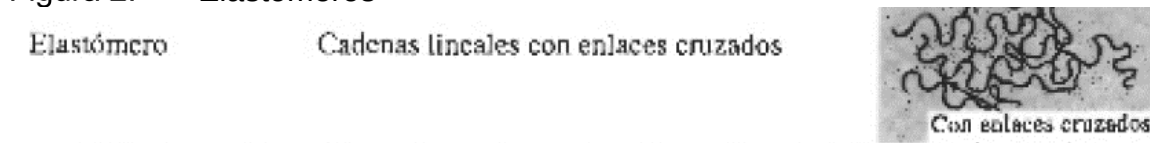
4.1 PROCESO DE INYECCIÓN DE PLÁSTICOS

4.1.1 Poliuretano (TPU)

El poliuretano es un elastómero con propiedades especiales tanto en rendimiento como en flexibilidad, es un copolímero en bloque que consta de secuencias alternas de segmentos duros y blandos.

Los elastómeros tienen una estructura intermedia, en la cual se permite que ocurra una ligera formación de enlaces cruzados entre las cadenas como se observa en la Figura 2.

Figura 2. Elastómeros



Fuente: Ciencia e ingeniería de los materiales (Askeland) página 450

4.1.2 Ciclo de inyección

El ciclo de inyección en una maquina convencional, se representa por medio de tiempos de operación:

- Tiempo de cierre de molde.
- Tiempo de avance de la unidad de inyección.
- Tiempo de llenado o de inyección.
- Tiempo de compactación.
- Tiempo de retroceso de la unidad de inyección.
- Tiempo de enfriamiento.
- Tiempo de apertura del molde.
- Tiempo de extracción de la pieza.
- Tiempo con el molde abierto.

En la Figura 3 se muestra la duración relativa de las diferentes etapas en el ciclo de inyección:

Figura 3. Tiempos en el ciclo de inyección



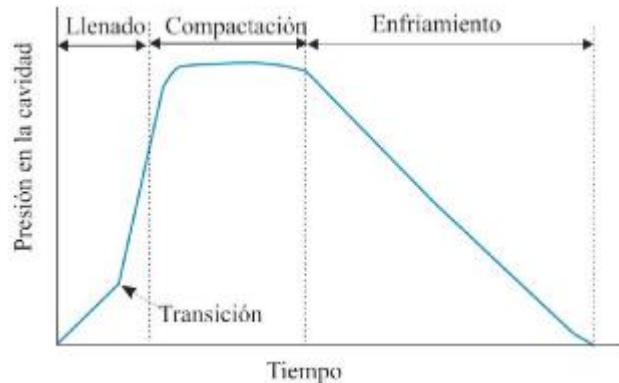
Fuente: <http://iq.ua.es/TPO/Tema5.pdf>

4.1.3 Comportamiento del material dentro del molde

El flujo de un polímero dentro del molde de inyección se comprende como un problema reológico bastante complejo, tratándose de un líquido no newtoniano, compresible a través de un sistema de distribución (bebedero, canales y entradas) con distintas geometrías.

El flujo de material fundido dentro del molde de inyección se representa por medio de diferentes etapas, teniendo en cuenta que el comportamiento del material se rige por tres variables fundamentales como lo son: temperatura, presión y tiempo.

Figura 4. Etapas en el ciclo de moldeo



Fuente: <http://iq.ua.es/TPO/Tema5.pdf>

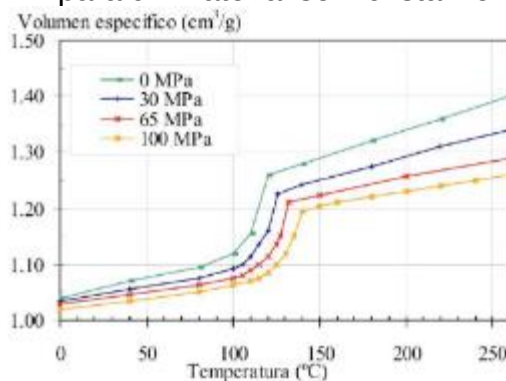
En la Figura 4 se observa el comportamiento de la presión durante las diferentes etapas de inyección. En la etapa de llenado la presión aumenta hasta su punto máximo en un lapso de tiempo corto para llenar las cavidades[6].

Durante la etapa de compactación se adiciona el material necesario, para terminar de llenar las cavidades en su totalidad, manteniendo así una presión constante compensando los efectos de la contracción térmica que sufre el material en su solidificación, evitando deformaciones, rechupes y presencia de aire atrapado en el producto. La etapa de enfriamiento se representa por medio de una caída de presión iniciando en el punto máximo hasta la presión atmosférica.

4.1.4 Proceso de inyección a partir de curvas P-V-T

Las curvas mostradas en la Figura 5 proporcionan información sobre el material fundido durante el proceso de inyección, teniendo en cuenta temperatura, volumen específico y presión.

Figura 5. Curva P-V-T para un material semicristalino



Fuente: <http://iq.ua.es/TPO/Tema5.pdf>

Se observa en la Figura 5 como varía el volumen específico de un polímero semicristalino en función de la temperatura para diferentes presiones (distintas de la presión atmosférica). Mientras el material permanece fundido el volumen específico disminuirá conforme este se enfría[6]. Cuando el material alcanza la temperatura de cristalización se produce una disminución del volumen específico (aumento de la densidad) como consecuencia de la cristalización del material. En este grafico (Figura 5) se puede representar el ciclo de inyección en el molde.

4.1.5 Determinación del número de cavidades:

Para establecer un número determinado de cavidades del molde se deben tener en cuenta criterios tales como: capacidad de inyección de la máquina, tiempo de ciclo, requerimientos de piezas anuales y establecer un plazo de tiempo de producción[7].

Considerando los parámetros anteriores se procede a calcular de la siguiente manera:

$$CU = \frac{Pza/Año}{200 * \frac{3600}{Ti * 2} * 1.75} \quad (1)$$

$$\frac{Pza}{Año} = \text{piezas requeridas anualmente}$$

$$Ti = \text{Tiempo de inyeccion(seg)}$$

$$CU = \text{Numero de cavidades}$$

4.1.6 Diseño y análisis de llenado de cavidades:

En la actualidad las maquinas inyectoras de polímeros más desarrolladas entregan presiones de inyección de 200 MPa (30 psi) aproximadamente[2], sin embargo, se debe asumir una menor presión de fusión para llenar la cavidad, y así permitir una caída de presión razonable en el sistema de alimentación[8].

Para el análisis del flujo de polímeros en el molde es necesario comprender y tener en cuenta los fenómenos de: esfuerzo cortante, velocidad de cizallamiento y viscosidad[9]. La tabla 1 muestra las variables a considerar.

Tabla 1. Convención variables

SIMBOLO	VARIABLE
τ	<i>Esfuerzo cortante</i>
η	<i>Viscosidad</i>
$\dot{\gamma}$	<i>Velocidad de cizallamiento</i>
v	<i>Velocidad del fluido</i>
h	<i>Altura de la placa</i>
W	<i>Espesor</i>
τ^*	<i>Esfuerzo critico</i>
V_{max}	<i>velocidad de la linea central</i>
η_0	<i>Viscosidad cero de cizalla</i>
T	<i>Temperatura</i>
P	<i>Presión</i>
$\dot{v}$	<i>Flujo volumetrico</i>

Fuente: Autor

4.1.7 MFI (Melt Flow Indices)

El comportamiento de la viscosidad de las masas fundidas de polímero puede ser extremadamente complejo, mucho más de lo que se aprecia a menudo cuando se contempla el índice de flujo de fusión por sus siglas en ingles MFI que significan *Melt Flow Indices*[2].

$$\eta(\dot{\gamma}, T, P) = \frac{\eta_0(T, P)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (2)$$

En los análisis de llenado de un molde por inyección se incluyen las reducciones de costos, optimización de procesos, y la calidad de mejora. Todo esto de acuerdo con las modificaciones y necesidades específicas que el molde requiera de acuerdo con la aplicación que se le dé a este[10].

En la etapa de diseño de moldes se debe verificar el sistema de llenado, teniendo en cuenta la geometría de la cavidad y las propiedades del material a inyectar; sin embargo, el análisis de llenado requiere condiciones del proceso tales como temperatura, velocidad lineal, flujo volumétrico. Esto depende de algunas características del material y debe ser consultado al proveedor para ajustar diferentes parámetros en el proceso de inyección reduciendo el tiempo del ciclo y/o problemas de moldeo[2].

$$\dot{v} = W \int_{-H/2}^{H/2} V_{max} \left(1 - \left(\frac{2z}{H} \right)^2 \right) dz = \left(\frac{2}{3} \right) V_{max} WH \quad (3)$$

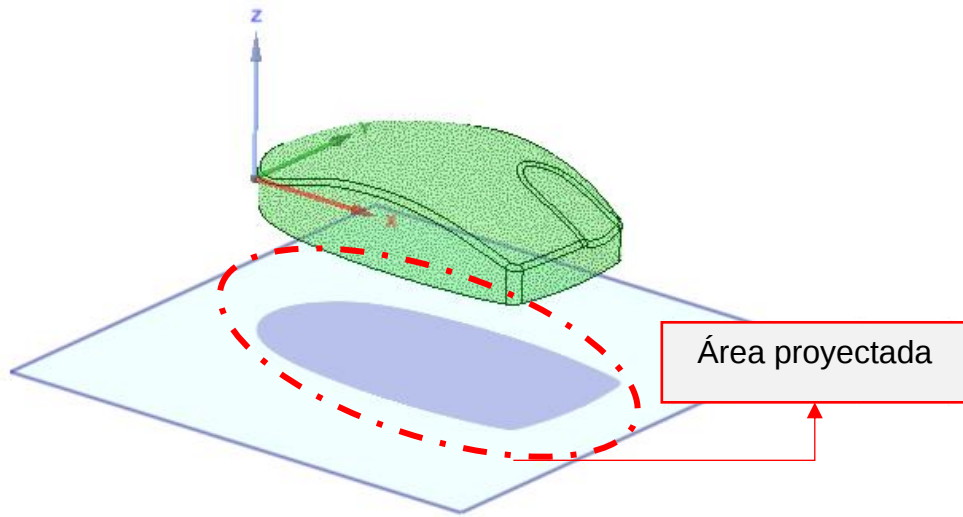
El caudal máximo generalmente está limitado por la velocidad máxima del cilindro de la máquina de moldeo o defectos de moldeo causados por caudales elevados, tales como marcas: de chispa, chorro o quemadura. El caudal mínimo está limitado por solidificación prematura de la masa fundida en la cavidad del molde[2].

Los índices de flujo de fusión se pueden estimar calculando el volumen de las cavidades de molde y los *runners*, dividiendo por tiempo estimado de llenado.

4.2 ÁREA PROYECTADA

El área proyectada es la cantidad de superficie de una figura tridimensional, la cual se observa desde la vista superior de la misma, se mide en unidades al cuadrado por ejemplo: m^2, in^2, cm^2 , etc.

Figura 6. Área proyectada del *mouse*



Fuente: https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/spaceclaim/Measure_Projected.htm?fbclid=IwAR0QixiiM-a_XH3AEkArvn3oLDYIKOW3mUFBvX9jtykLbkeX2N7MJ22UCJA

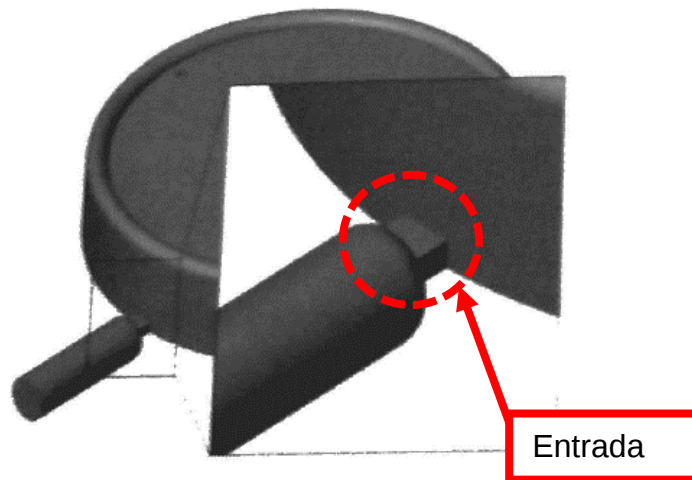
Como se observa en la Figura 6. El área proyectada del de una figura tridimensional, para este caso una carcasa de un *mouse* de computador que se observa en color verde, y su área proyectada de color azul sobre el plano XY.

4.3 RADIO ENTRADA (GATE)

La entrada es la que conecta el canal con la cavidad del molde como se muestra en la Figura 7 [11], con diferentes geometrías según su aplicación, por lo general en los moldes de inyección esta aumenta o disminuye los costos a la hora de su fabricación.[2]

$$R_{entrada} = \sqrt[3]{\frac{4 * \dot{V}}{\pi * \dot{\gamma}_{max}}} \quad (4)$$

Figura 7. Entrada principal de cavidad



Fuente: *Injection Mold Design Engineering* página 198

4.4 RADIO DEL CANAL (RUNNER)

Para el diseño del canal se debe tener en cuenta la longitud del mismo (L), ley de Potencia del material (K), caída de presión del sistema (ΔP), flujo volumétrico que llega a este ($\dot{V}$), índice de viscosidad (n). Las anteriores variables se utilizan para hallar el valor del radio mínimo de los canales [2].

$$R_{canal} = \left(\left(\frac{2KL}{\Delta P} \right)^{\frac{1}{n}} * \frac{\left(3 + \frac{1}{n} \right) \dot{V}}{\pi} \right)^{\frac{1}{3 + \frac{1}{n}}} \quad (5)$$

4.5 CAÍDA DE PRESIÓN

La caída de presión como su nombre lo indica es la pérdida de presión a medida que el material fundido se desplaza hasta las cavidades, se emplean las siguientes ecuaciones tanto para los canales, bebedero y entradas respectivamente[2].

$$\Delta P = \frac{2KL}{R} * \left(\frac{\left(3 + \frac{1}{n}\right) \dot{V}}{\pi R^3} \right)^n \quad (6)$$

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{bebedero} + \Delta P_{c1} + \Delta P_{c2} \quad (7)$$

4.6 BEBEDERO (SPRUE)

El bebedero es la parte principal por donde ingresa el material se debe diseñar de forma cónica con l menor distancia posible y una conicidad, se deben tener en cuenta las variables tanto del material como de la maquina [2].

$$R_{bebedero} = \left(\left(\frac{2 * K * L}{\Delta P_{bebedero}} \right)^{\frac{1}{n}} * \frac{\left(3 + \frac{1}{n}\right) * \dot{v}}{\pi} \right)^{\frac{1}{3 + \frac{1}{n}}} \quad (8)$$

Para calcular la caída de presión en el bebedero se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$\Delta P_{bebedero} = \Delta P_{total} * \frac{L_{bebedero}}{L_{total}} \quad (9)$$

4.7 FUERZA DE INYECCIÓN

Para poder hallar la fuerza de inyección en cada cavidad se necesita el área proyectada de las mismas. Después de obtener el área proyectada se calcula la fuerza de inyección con la ecuación [11].

$$F = A * P \quad (10)$$

F = Fuerza de inyección

A = Area proyectada

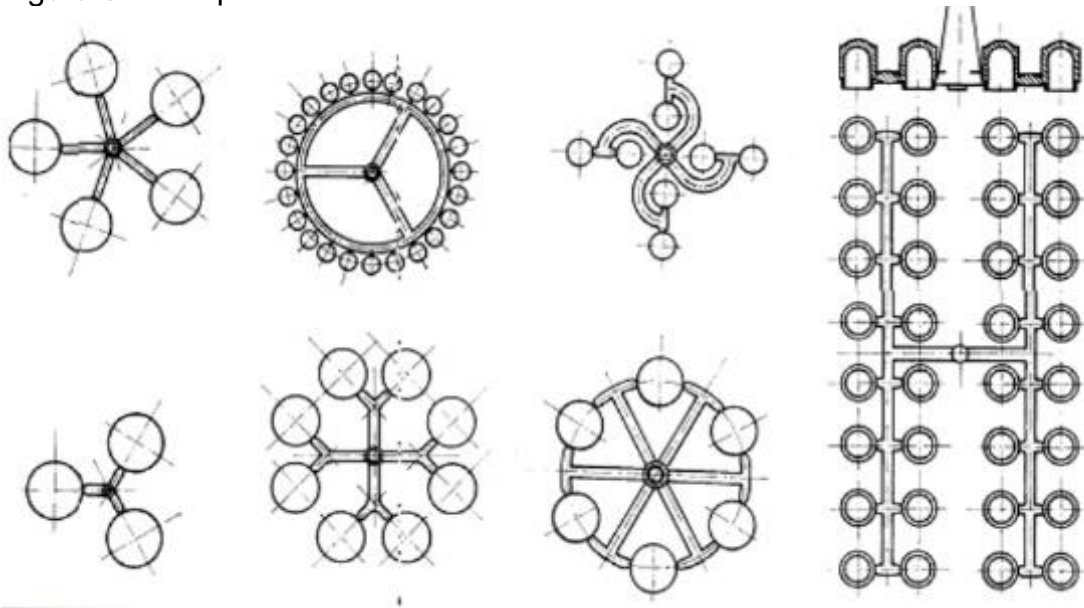
P = presión de inyección

4.8 DISTRIBUCIÓN DE CAVIDADES

Existen varios tipos de distribución de cavidades de acuerdo a las necesidades del molde, la motivación principal es proporcionar un flujo equilibrado y caídas de presión mínimas al consumir la menor cantidad de material. Como tal, muchos sistemas de alimentación utilizan un híbrido de diseños ramificados y radiales [2].

El diseño radial tiene un volumen de sistema de alimentación más bajo y proporciona un flujo más equilibrado. Sin embargo, se necesitan corredores primarios más largos y más desechos a medida que aumenta el tamaño de las cavidades [11].

Figura 8. Tipos de distribución



Fuente: <http://wikifab.dimf.etsii.upm.es/wikifab/images/f/f6/04Alimentacion08.pdf>

Sin embargo, algunas pautas generales son las siguientes:

- La longitud total del sistema de alimentación debe ser lo más corta posible para minimizar (a) el consumo de material y (b) la caída de presión a través del sistema de alimentación[11].

- Los sistemas de alimentación balanceados naturalmente proporcionan una mayor consistencia de cavidad a cavidad con respecto al flujo de fusión, la presión de fusión y la calidad de la pieza moldeada que los diseños equilibrados artificialmente[2].
- El número total de ramas en un sistema de alimentación debe ser minimizado para evitar el volumen excesivo del corredor y los posibles desequilibrios de la temperatura de fusión[11].
- Para minimizar la caída de presión para un volumen dado del sistema de alimentación, los diámetros del sistema de alimentación son generalmente más grandes con el bebedero y posteriormente se vuelven más pequeños con el primario, el secundario y otros canales con caudales decrecientes[2].
- El análisis económico es vital para determinar la cantidad correcta de cavidades del molde, el diseño de las cavidades del molde y el tipo de sistema de alimentación[2].
- Se deben considerar moldes de canal caliente y de tres placas cuando las cavidades en un molde de dos placas obstruyen la disposición deseada del sistema de alimentación[2].

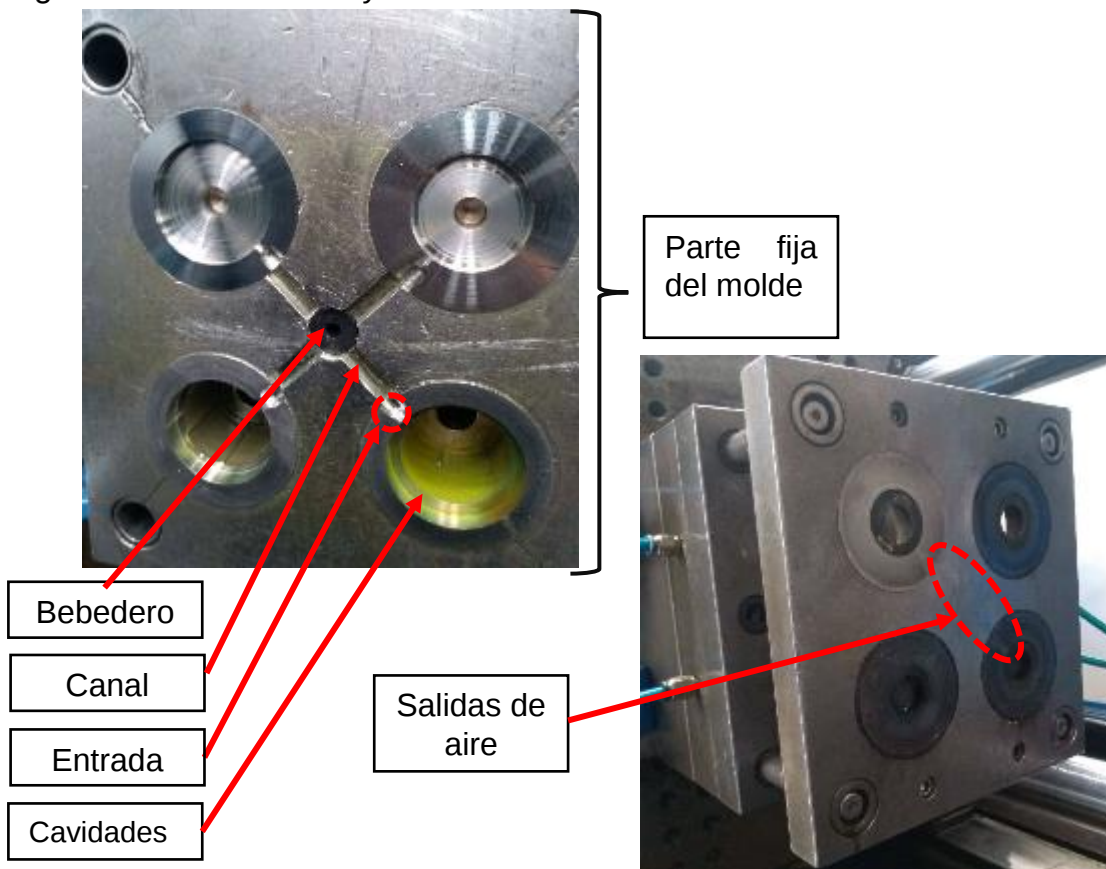
5. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE LLENADO DE UN MOLDE DE INYECCIÓN DE PLÁSTICOS.

En este capítulo se llevó a cabo la simulación del sistema de llenado por medio de dos *softwares*, teniendo en cuenta los parámetros y dimensiones del caso real. Todo esto se realizó con el fin de que los resultados obtenidos en la simulación sean confiables con base en el tiempo total de llenado del molde.

5.1 CASO DE ESTUDIO

Se seleccionó un molde de bujes de poliuretano (Desmopan 385), de la empresa FRIPARTS, como caso de estudio (Figura 9). Consta de cuatro cavidades con diferente geometría.

Figura 9. Molde de inyección de cuatro cavidades



Fuente: Autor

La Tabla 2 muestra los parámetros de funcionamiento de la máquina inyectora para el caso de estudio. En la visita a la empresa, los datos de temperatura de la masa fundida y los tiempos de ciclo fueron visualizados mediante la pantalla del control de la máquina; la presión se registró mediante los manómetros del sistema hidráulico; la temperatura del molde se registró por medio de un termómetro laser (MASTERGRIP) apuntando directamente el rayo a las cavidades en el instante que salían los bujes. El tiempo de llenado se obtuvo mediante la pantalla de la maquina (PLC), como se muestra en la Figura 10, el tiempo de inyección llega hasta los 9,9 segundos.

Figura 10. Pantalla de la maquina



Fuente: Autor

Tabla 2. Parámetros del proceso de inyección

Variable	Valor	Unidad
Presión de inyección	20-25	MPa
Temperatura del material	210	°C
Tiempo de llenado	10	s

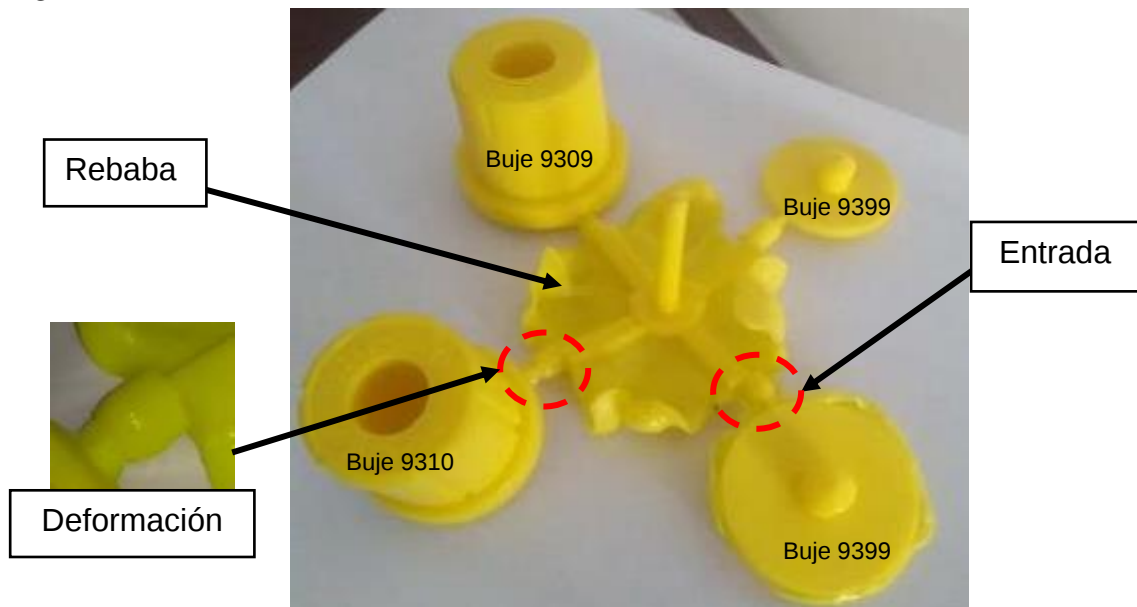
Variable	Valor	Unidad
Temperatura del molde	41	°C
Tiempo de apertura del molde	5	s
Material del molde	Acero AISI SAE 4340	_____
Material de inyección	Desmopan 385(TPU)	_____

Fuente: Autor

5.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Figura 11 muestra una rebaba en los 4 canales, además de esto se observa tanto en el canal como en la entrada de los bujes una deformación.

Figura 11. Producto terminado



Fuente: Autor

5.3 CALCULO DE NÚMERO DE CAVIDADES

El procedimiento del cálculo de número de cavidades se hizo realizando un sondeo de cuantas piezas de la referencia 9310, 9309, 9399, 9398 se venden anualmente,

tiempo de inyección, costo de producción de la referencia. El resultado del sondeo realizado se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Piezas vendidas por año (FRIPARTS)

Referencia	9310	9309	9399	9398
Piezas requeridas en el año	65976	68987	61225	59489
Tiempo de inyección (s)	10	10	10	10

Fuente: Autor

El cálculo del número de cavidades teniendo en cuenta los datos de la Tabla 3, se hizo empleando la ecuación número (1) para verificar el número de cavidades del molde

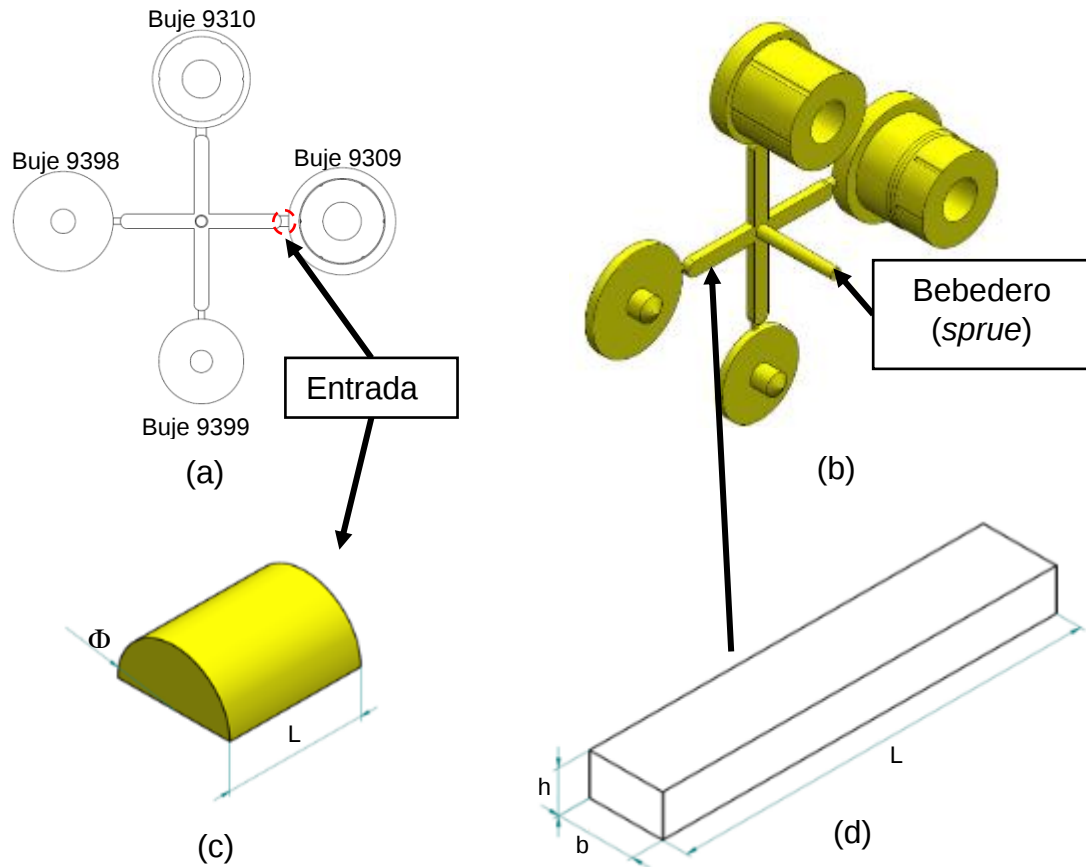
$$CU = \frac{255677 \frac{Pza}{Año}}{200 * \frac{3600 s}{10 s * 2} * 1.75} = 4,063$$

El resultado obtenido muestra que el número de cavidades es 4, lo que quiere decir que es el adecuado según el molde que posee la empresa.

5.4 DIBUJO CAD DEL SISTEMA DE LLENADO DEL MOLDE SELECCIONADO

Teniendo en cuenta que se va estudiar de una forma computacional el sistema de llenado, lo primero es digitalizar este sistema. Se realizó un dibujo tridimensional del sistema de llenado y de las cavidades del molde tomando las dimensiones del molde real, como se observa en la Figura 12.

Figura 12. (a) Distribución de bujes con referencias. (b) Sólido. (c) Dimensión de entrada (*gate*). (d) Dimensión de canal (*runner*).



Fuente: Autor

La distribución que tiene el molde de la empresa FRIPARTS con las respectivas referencias, se observa en la Figura 12. (a). La Figura 12. (b) muestra el sólido completo de los bujes tal como sale del proceso de inyección con su respectivo bebedero. En la Figura 12. (c) se observa la geometría de las 4 cavidades con sus dimensiones:

- Buje 9309: $\Phi = 5\text{mm}$; $L=3,5\text{ mm}$
- Buje 9310: $\Phi = 5\text{mm}$; $L=3,5\text{mm}$
- Buje 9398: $\Phi = 3\text{mm}$; $L=3,5\text{ mm}$
- Buje 9399: $\Phi = 3\text{mm}$; $L=4\text{ mm}$

La Figura 12. (d) muestra la geometría rectangular de los canales con las siguientes dimensiones: $b = 7 \text{ mm}$ y $h = 4 \text{ mm}$. La longitud del canal para cada cavidad se muestra a continuación:

- Buje 9309: $L = 37,5 \text{ mm}$
- Buje 9310: $L = 40,5 \text{ mm}$
- Buje 9398: $L = 38 \text{ mm}$
- Buje 9399: $L = 42 \text{ mm}$

5.5 UTILIZACIÓN DE SOFTWARE CAE PARA EL ANÁLISIS DEL SISTEMA DE LLENADO

En la implementación del *software* CAE para el análisis de llenado, se realizaron los mismos procedimientos con cada *software*, iniciando con Solidworks y posteriormente realizando lo mismo con Moldflow:

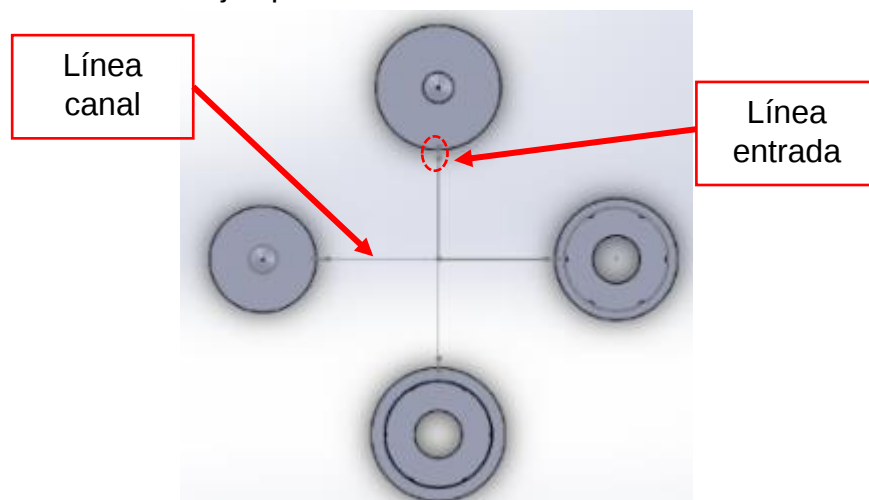
5.5.1 Simulación de llenado SOLIDWORKS

Para realizar el análisis se empleó el *software* SOLIDWORKS 2017 - 2018 (versión de prueba 60 días), modelando los bujes con sus correspondientes medidas, para luego emplear el complemento del *software* llamado “*PLASTICS*”.

• Definición de canales y entradas:

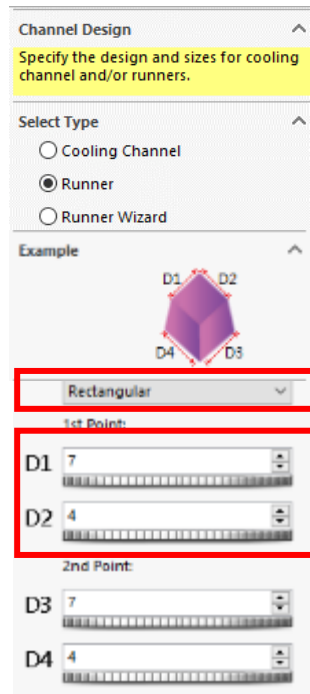
Se hizo la distribución de los bujes de acuerdo a las medidas tomadas del molde real (Figura 13). Los bujes se conectan por medio de líneas, que representan los canales de inyección, con las dimensiones mencionadas en la Figura 12. (c) y Figura 12 (d).

Figura 13. Distribución de bujes para el análisis CAE

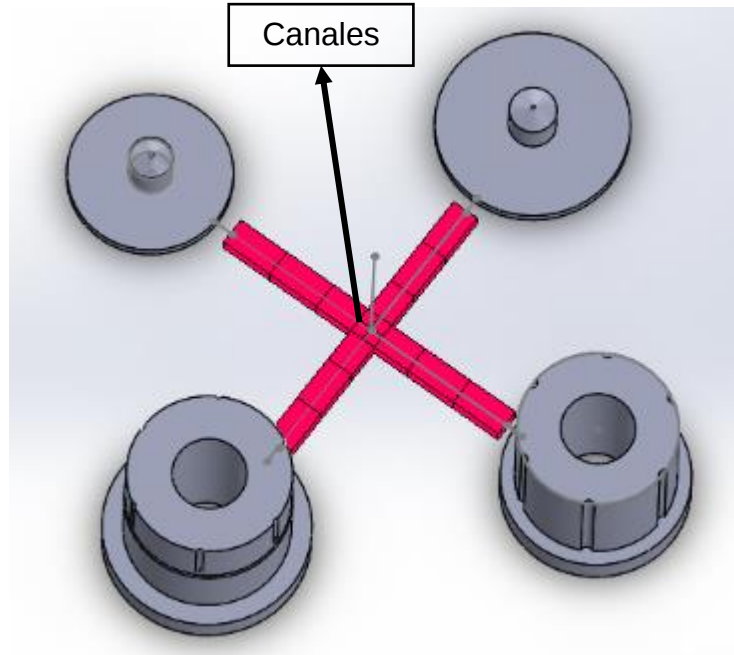


Fuente: Autor

Figura 14. (a) Definición de tipo y geometría de canal. (b) Visualización del modelo con canales



(a)



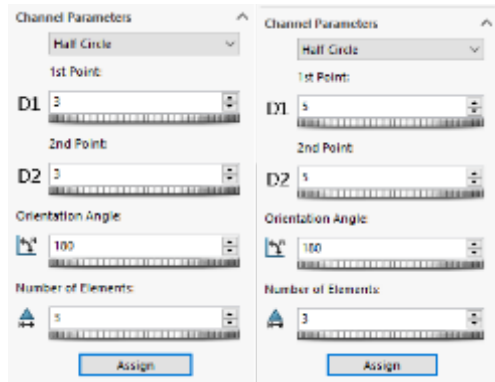
(b)

Fuente: Autor

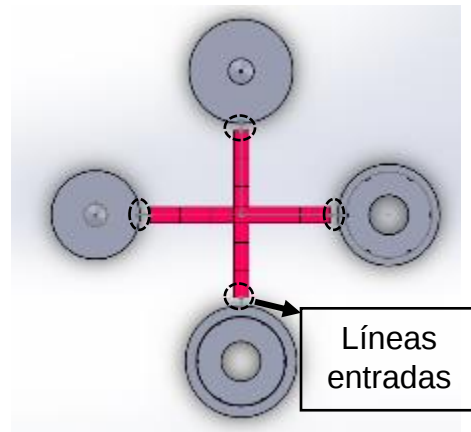
Se realiza la selección de cada línea y se le asigna la geometría, teniendo en cuenta el tipo de canal que para este caso es de colada por donde fluye el material, en la Figura 14. (a) se define el canal que se desea dimensionar, también se definen las dimensiones de los dos extremos que ambos son de 7x4 milímetros y se procede a asignar este canal seleccionando las líneas que llevan dicha geometría (Figura 14.(b)).

Para la realización de las entradas se hace el mismo procedimiento que los canales variando solo la dimensión de estos la cual es de 3 milímetros a continuación se mostraran las dimensiones a considerar:

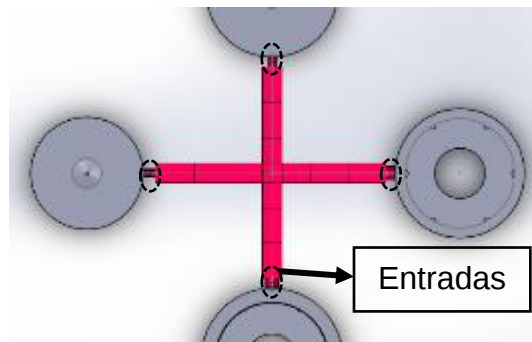
Figura 15. (a) Dimensiones de las entradas. (b) Selección de líneas de las entradas. (c) Generación de entradas



(a)



(b)



(c)

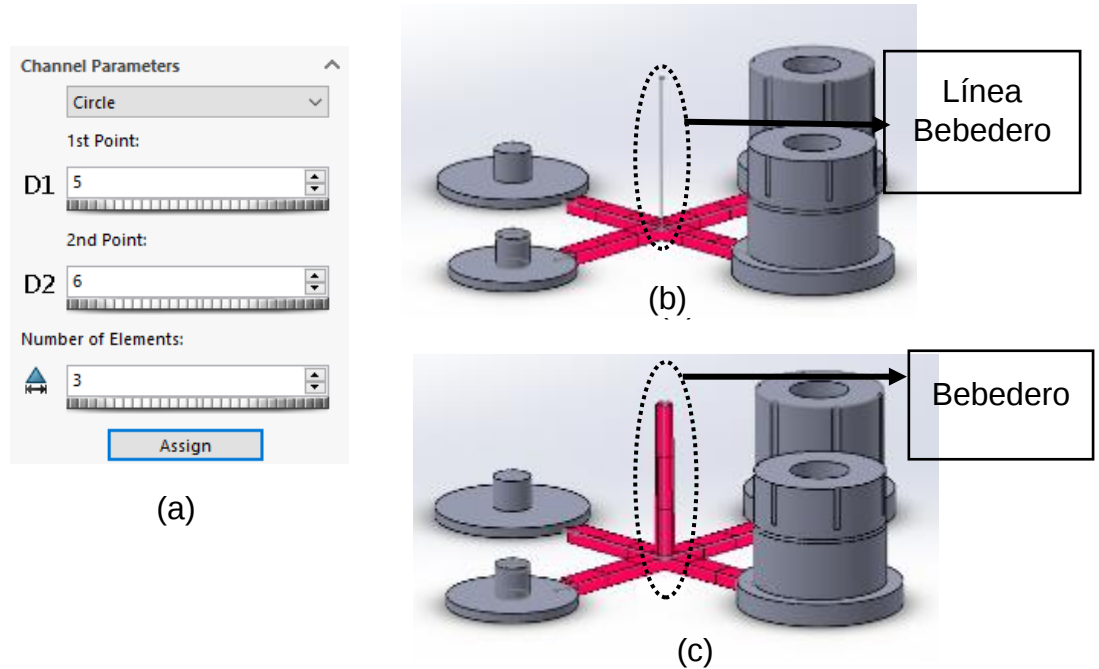
Fuente: Autor

Se fijaron dimensiones de 3 y 5 milímetros de diámetro para los extremos de las entradas con geometría semicircular (Figura 15. (a)) de acuerdo a las dimensiones mostradas en la Figura 12. (c). Se seleccionaron las líneas a las cuales fueron asignadas las dimensiones del diámetro mencionado (Figura 15. (b)) para luego generar las entradas como se evidencia en la Figura 15. (c).

- **Creacion de bebedero (*sprue*):**

De igual manera se define la geometría del canal principal de llenado por donde es inyectado el material:

Figura 16. (a) Dimensionamiento de bebedero. (b) Selección de línea para bebedero. (c) Generación de bebedero



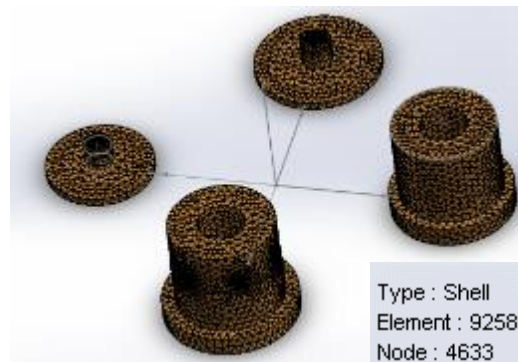
Fuente: Autor

Como se observa en la Figura 16. (a). se dimensionaron el D1 y el D2 con 5 milímetros y 6 milímetros de diametro respectivamente, se selecciona la línea respectiva como se muestra en la Figura 16. (b) y se genera el bebedero cuya geometria es cónica (Figura 16. (c)).

- **Enmallado:**

Se comienza definiendo el enmallado que se desea usar de acuerdo a la geometría empleada, para este caso se realizó un enmallado automático:

Figura 17. Bujes enmallados



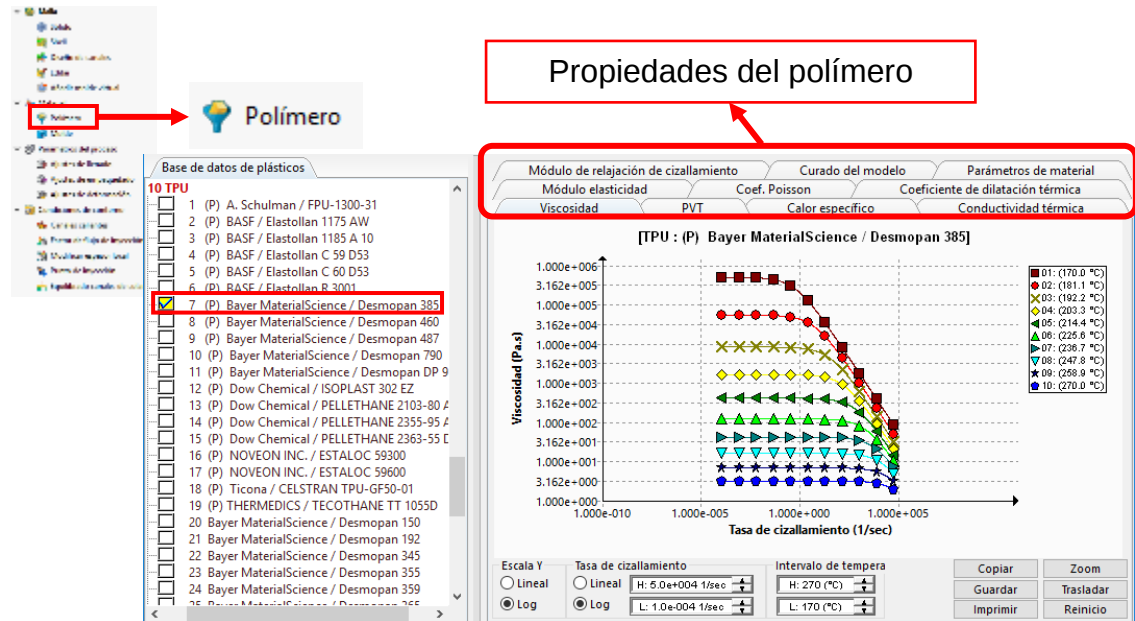
Fuente: Autor

Se observan los cuatro bujes con su respectivo enmallado que automáticamente es creado por el *software* (Figura 17), cuya geometría es triangular, este proceso se debe hacer previamente para poder realizar los análisis deseados.

- **Selección del material de inyección:**

Se selecciona un material para hacer el respectivo analisis, el cual es TPU del fabricante bayer (Covestro) cuya referencia es “Desmopan 385”. Al seleccionar dicho material el *software* arroja las propiedades del mismo por medio de graficas y tablas como se observa en la Figura 18.

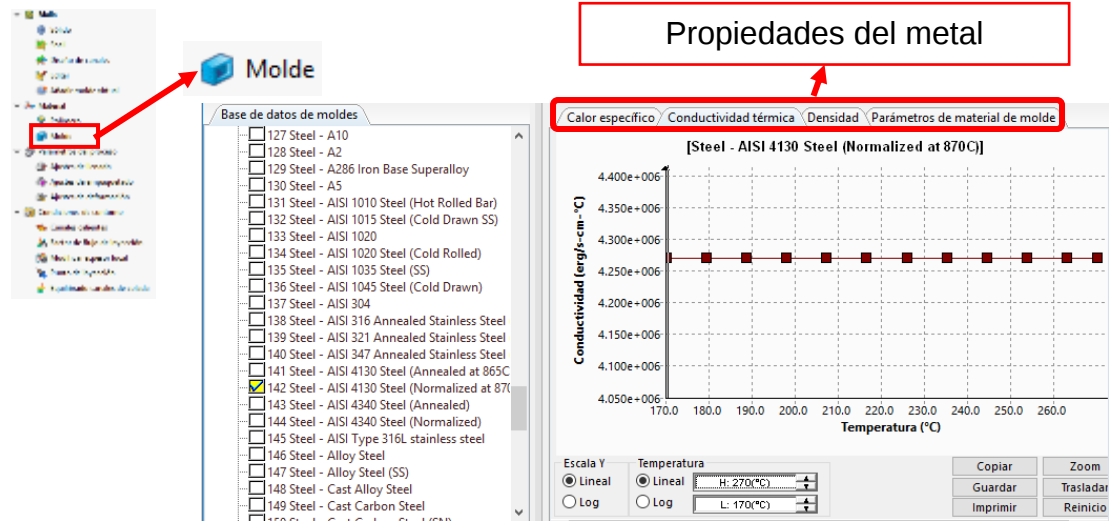
Figura 18. Selección del polímero



Fuente: Autor

De la misma manera se procede a seleccionar el material del molde el cual es fabricado de acero SAE 4130 (Figura 19). Se realiza el mismo procedimiento que en la selección del polímero.

Figura 19. Selección de metal del molde

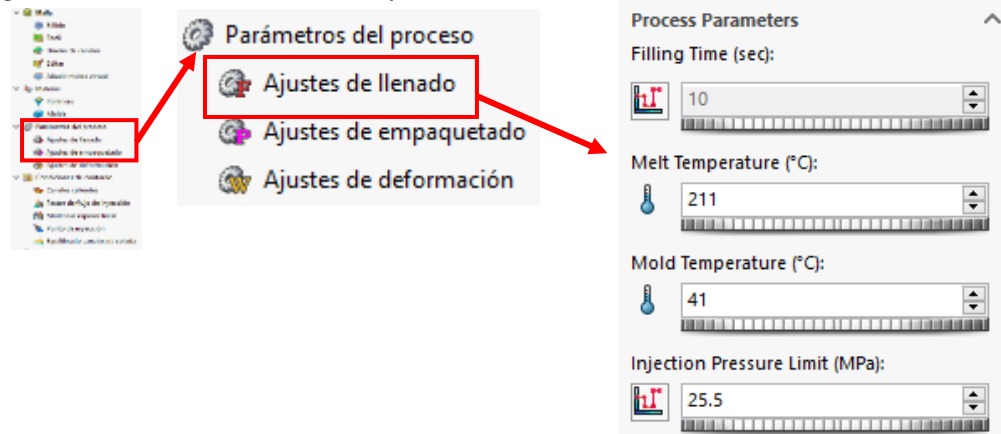


Fuente: Autor

- **Variables de proceso:**

Seguidamente se establecen los parametros del proceso:

Figura 20. Parametros del proceso

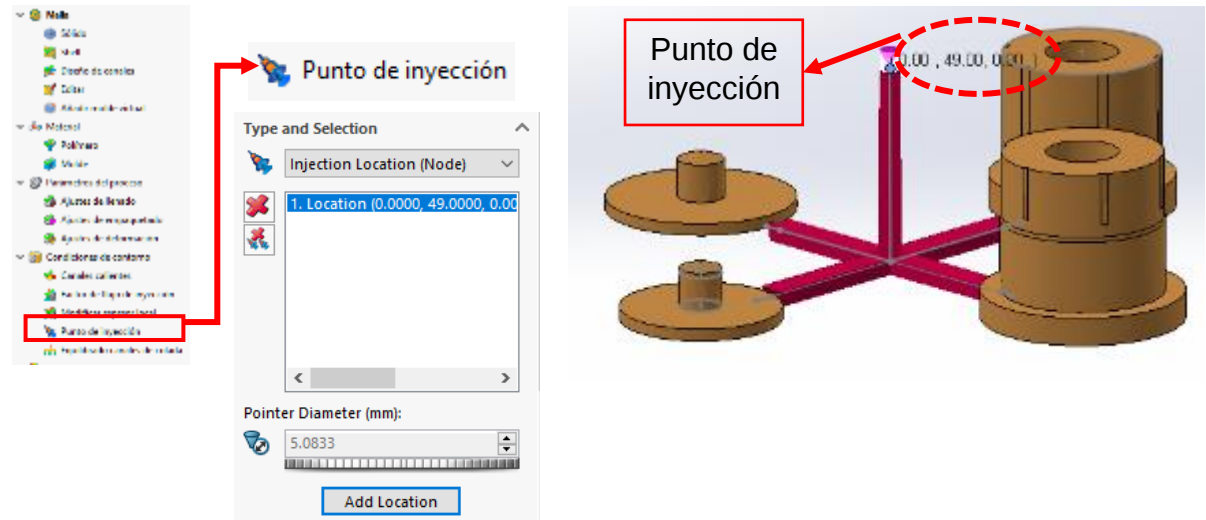


Fuente: Autor

En la Figura 20. Se muestran los parametros empelados en el analisis, los cuales son temperatura del material cuyo valor es de 211°C, el siguiente valor corresponde a la temperatura del molde (41°C), por ultimo se ingresa el valor de la presion maxima de inyeccion que corresponde a 25.5 MPa todos los anteriores datos tomados de la Tabla 2, para asi continuar con el siguiente paso.

- **Localizacion de puntos de inyeccion:**

Figura 21. Ubicación del punto de inyección



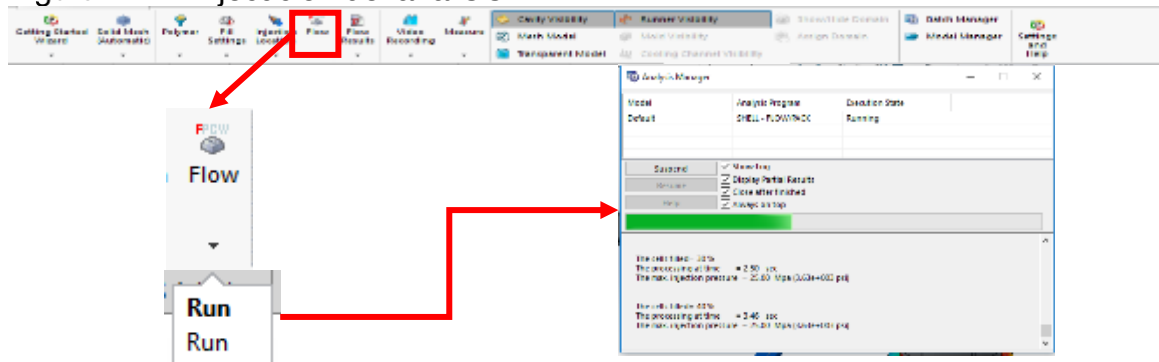
Fuente: Autor

Se realiza la selección del punto de inyeccion de acuerdo al sólido creado en el *software*, al ubicar el punto de inyeccion el *software* arroja las coordenadas de este para asi agregarlo como se muestra en la Figura 21. y continuar con la etapa final que es el analisis de flujo.

- **Ejecutar simulación:**

En esta etapa se ejecuta el análisis de flujo, dando *click* en “*RUN*”. Se debe esperar un tiempo hasta completar el análisis como se muestra en la Figura 22.

Figura 22. Ejecución del análisis

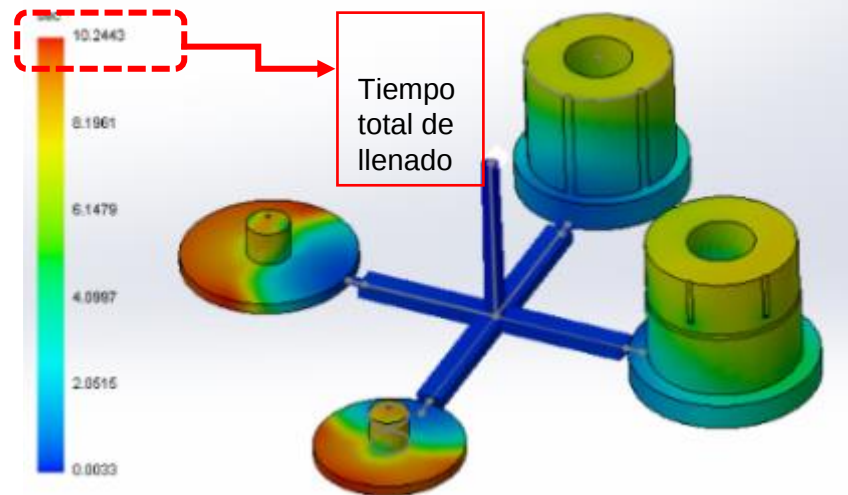


Fuente: Autor

- **Resultados:**

Al terminar la ejecución de la simulación se pueden observar los resultados de la siguiente manera:

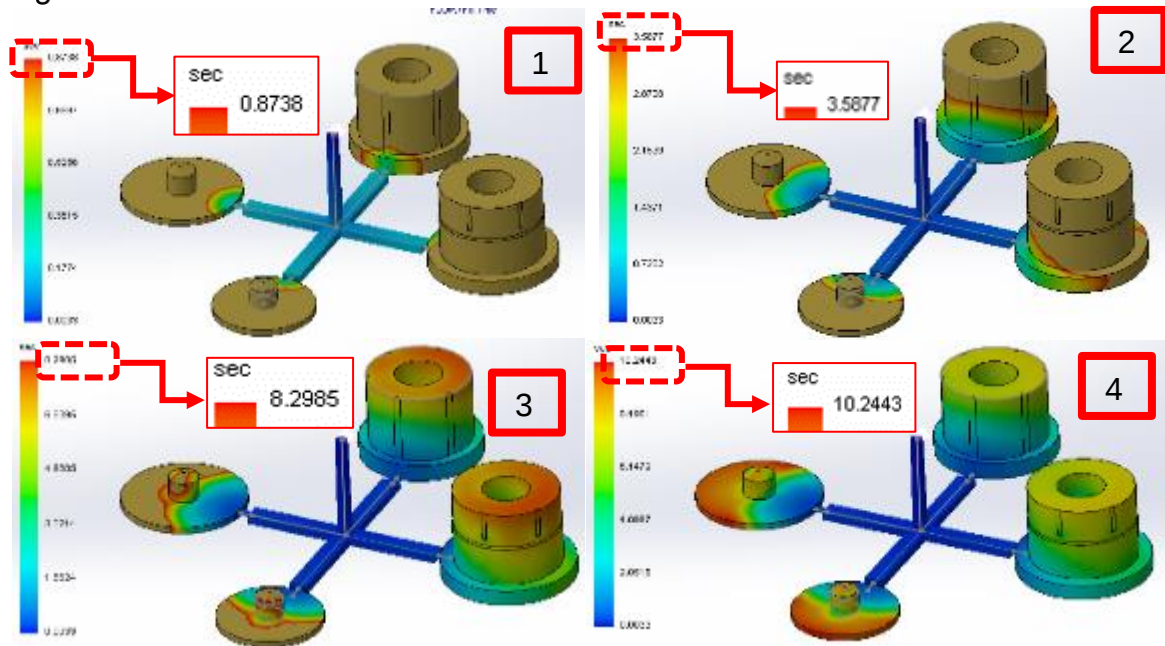
Figura 23. Tiempo de llenado



Fuente: Autor

Como se observe en la Figura 23. El tiempo de llenado del molde en su totalidad es de 10,8 segundos aproximadamente.

Figura 24. Secuencia de llenado caso real



Fuente: Autor

En la Figura 24. Se observan las etapas de llenado y es evidente que las cavidades de los bujes más grandes son llenadas en su totalidad, antes que se complete el llenado en las otras dos cavidades más pequeñas, esto se debe a que las entradas de las cavidades de los bujes 9309 y 9310 son de un diámetro mayor a los de los bujes 9398 y 9399.

- **Balanceo del molde:**

Para que el llenado del molde se hiciera de una manera uniforme se variaron en un principio las dimensiones de las entradas de los bujes 9398 y 9399, ya que estos son los últimos en llenar de acuerdo al caso de estudio, como se observa en la Figura 24. Se realizaron una serie de pruebas de ensayo y error, modificando las dimensiones desde diámetros de 1,5 mm en las entradas de los bujes anteriormente mencionados por lo que las cavidades no son llenadas en su totalidad.

Se aumentaron las dimensiones hasta que se observara un llenado uniforme en las 4 cavidades del molde. Al realizar esta modificación se observaba que el llenado se hacía a cabalidad en todas las cavidades, por lo que se fueron aumentando las dimensiones en las 4 entradas de las cavidades empezando desde los 1,75 mm de diámetro, que era el mínimo con que se llenaba el molde de forma completa, al ir aumentando estas dimensiones se observaba que los bujes 9398 y 9399 que en el caso real tardaban más tiempo en llenar, ahora llenaban de manera más rápida por lo que fue necesario ir aumentando las dimensiones en las entradas de los bujes 9310 y 9309, hasta llegar a un llenado uniforme. Las dimensiones con las cuales se hizo el llenado de la manera más igualitaria posible se muestran a continuación (Tabla 4):

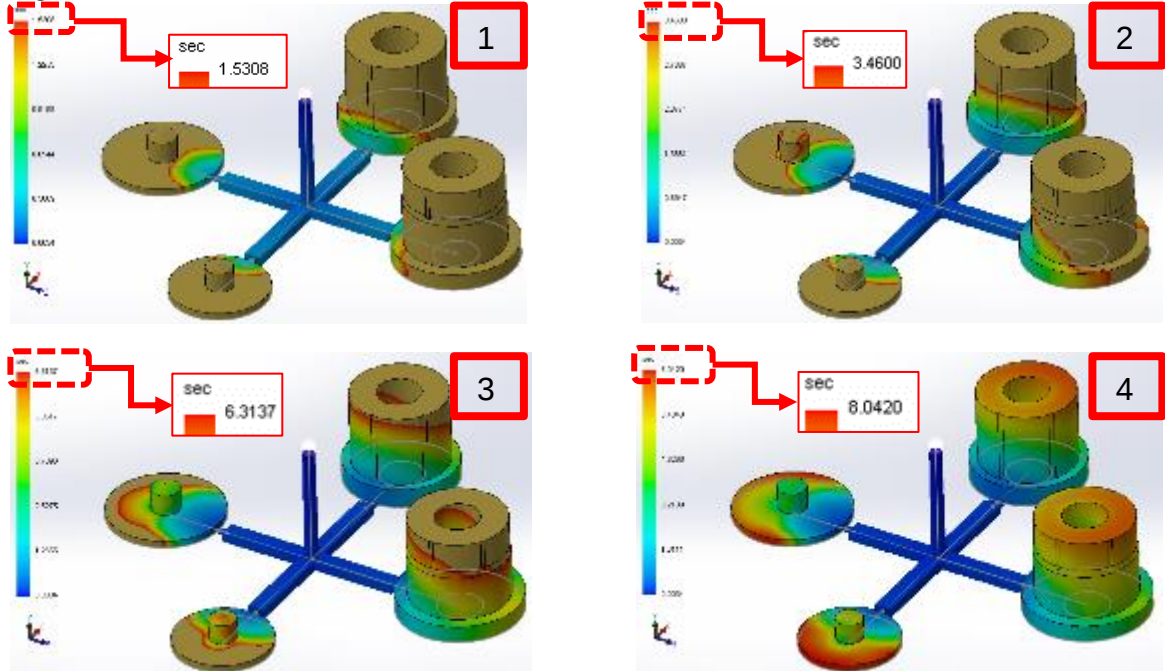
Tabla 4. Dimensiones propuestas de entradas

Referencia Buje	Geometría	Dimensión
9398		$\Phi = 2,5 \text{ mm}$
9399		$\Phi = 2,6 \text{ mm}$
9310		$R=3,25 \text{ mm}$
9309		$R= 3,25 \text{ mm}$

Fuente: Autor

Se realizó el respectivo análisis de llenado, modificando únicamente los datos mencionados en la Tabla 4 y se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 25. Secuencia de llenado uniforme



Fuente: Autor

El llenado de las 4 cavidades se hace de manera uniforme y con un tiempo de llenado de 8 segundos (Figura 25), es decir reduciendo aproximadamente 2 segundos el tiempo en comparación con el caso real (Figura 24).

5.5.2 Simulación de llenado MOLD FLOW

Ahora se expondrá el procedimiento para realizar el análisis llenado en el software MOLDFLOW versión estudiantil de la comunidad AUTODESK.

En primer lugar, se realizó el modelado CAD de cada cavidad en *Autodesk Inventor Professional 2017*, teniendo en cuenta las medidas obtenidas por el molde de la empresa FRIPARTS. Como lo muestra la Figura 26.

Figura 26. Modelado CAD cavidades del molde de inyección

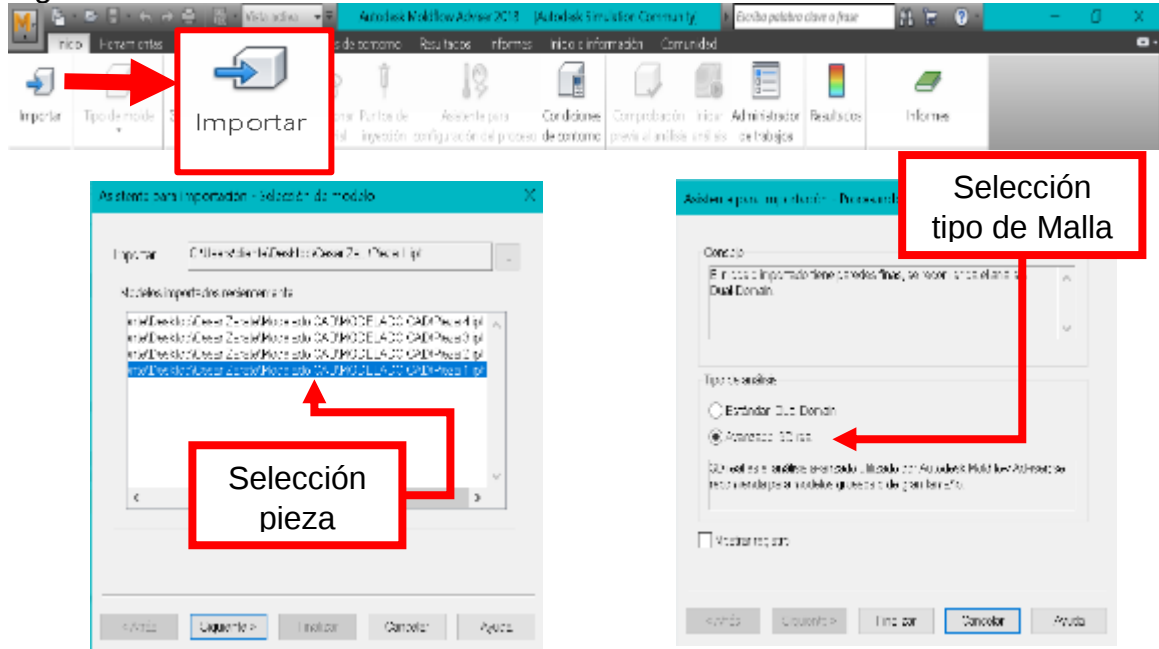


Fuente: Autor

- **Enmallado:**

Se da inicio al *software* AUTODESK MOLDFLOW, luego de tener abierto el programa se importará cada cavidad que está modelada previamente, cabe destacar que al importar el modelado CAD, el *software* da a elegir el tipo de malla.

Figura 27. Enmallado

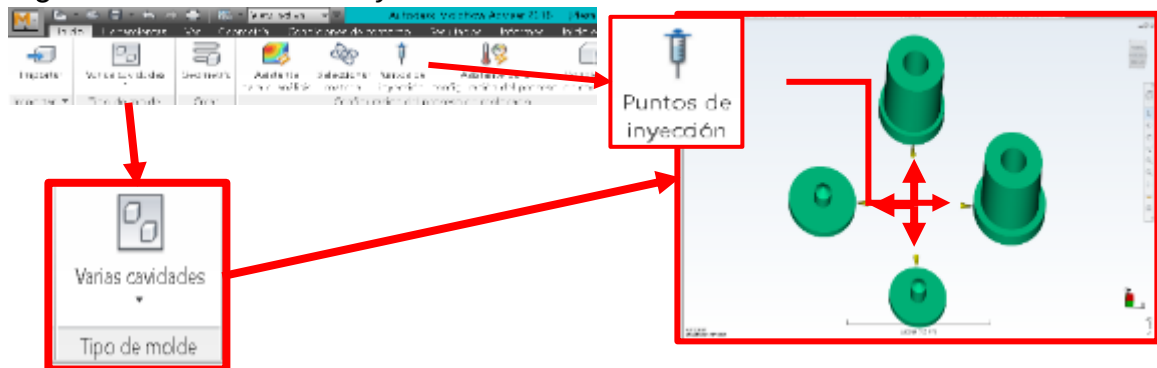


Fuente: Autor

Como se observa en la Figura 27, se seleccionó la malla 3D, ya que es la más adecuada para piezas gruesas y de gran tamaño. El otro tipo de malla, se llama malla *Dual Domain*, es utilizada para piezas finas y delicadas.

- **Localización de puntos de inyección:**

Figura 28. Puntos de inyección

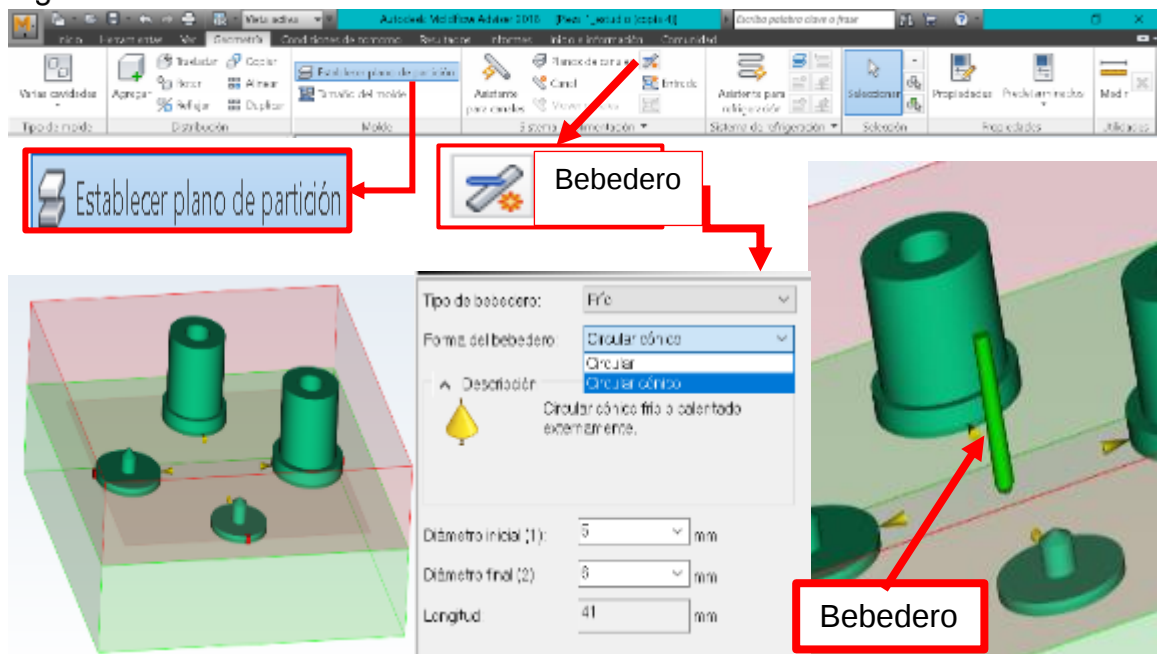


Fuente: Autor

Después de importar las 4 cavidades se asigna la coordenada de posición a cada una, cada coordenada se identifica en el plano del molde de inyección. Al tener cada cavidad en su posición se procede a establecer el punto de inyección de las cavidades, este punto de inyección se identifican con una flecha amarilla como se muestra en la Figura 28, el cual indica por donde va ingresar el material fundido a la cavidad.

- **Creación de canal principal (Bebedero)**

Figura 29. Creación de bebedero



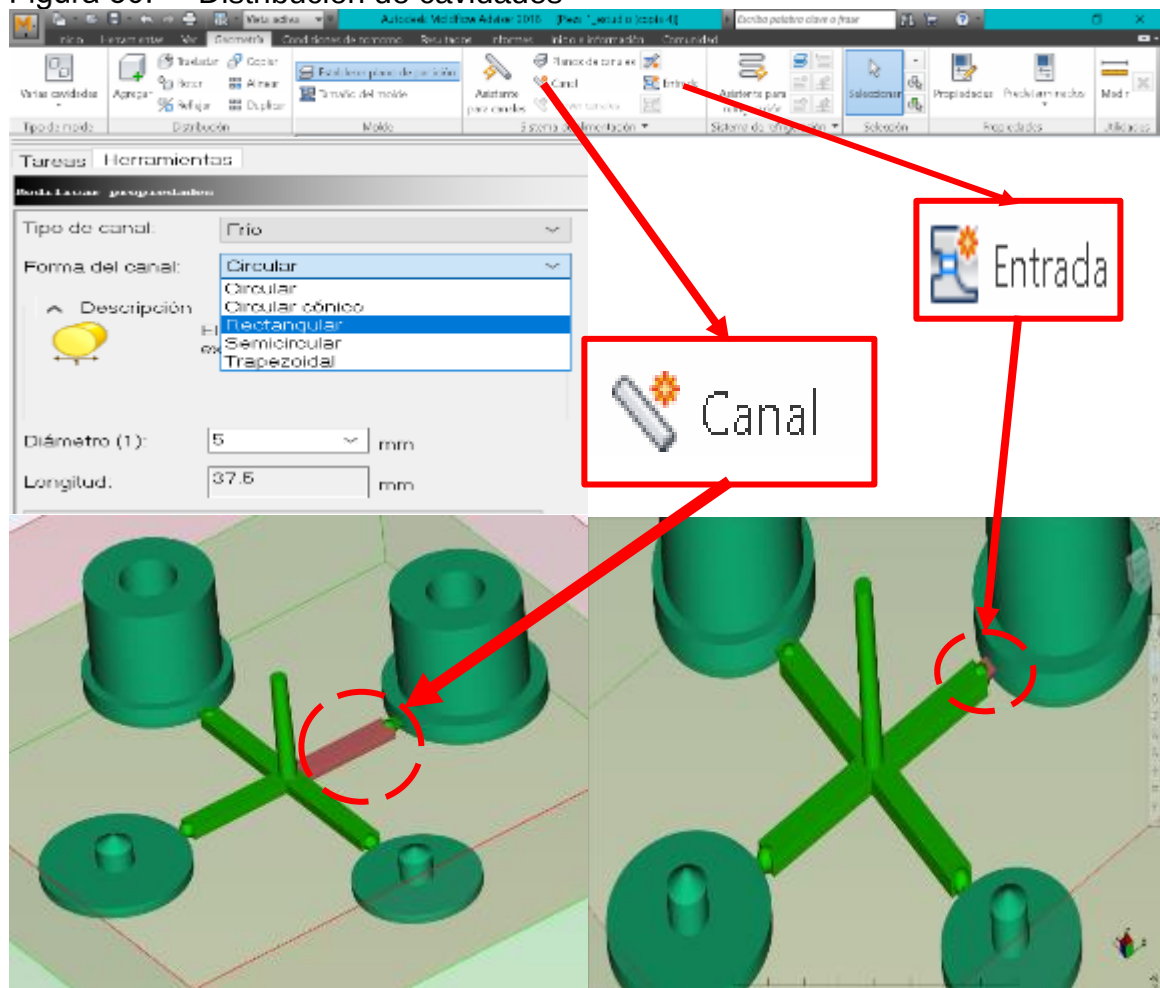
Fuente: Autor

Ya establecidos los puntos de inyección se efectúa el plano de repartición del molde de inyección, definiendo así la placa superior e inferior. Como se muestra en la Figura 29, la placa de color verde es la inferior, está fija y no puede contener ningún sistema de distribución de canales. La placa roja va a contener el sistema de distribución de canales.

Por otra parte, se agrega el canal de alimentación llamado bebedero, el cual se encarga de trasladar el polímero fundido desde la unidad de inyección hasta el interior del molde, el tipo de bebedero es circular cónico con diámetro inicial de 5 mm y diámetro final de 6mm.

- **Definición de canales y entradas:**

Figura 30. Distribución de cavidades



Fuente: Autor

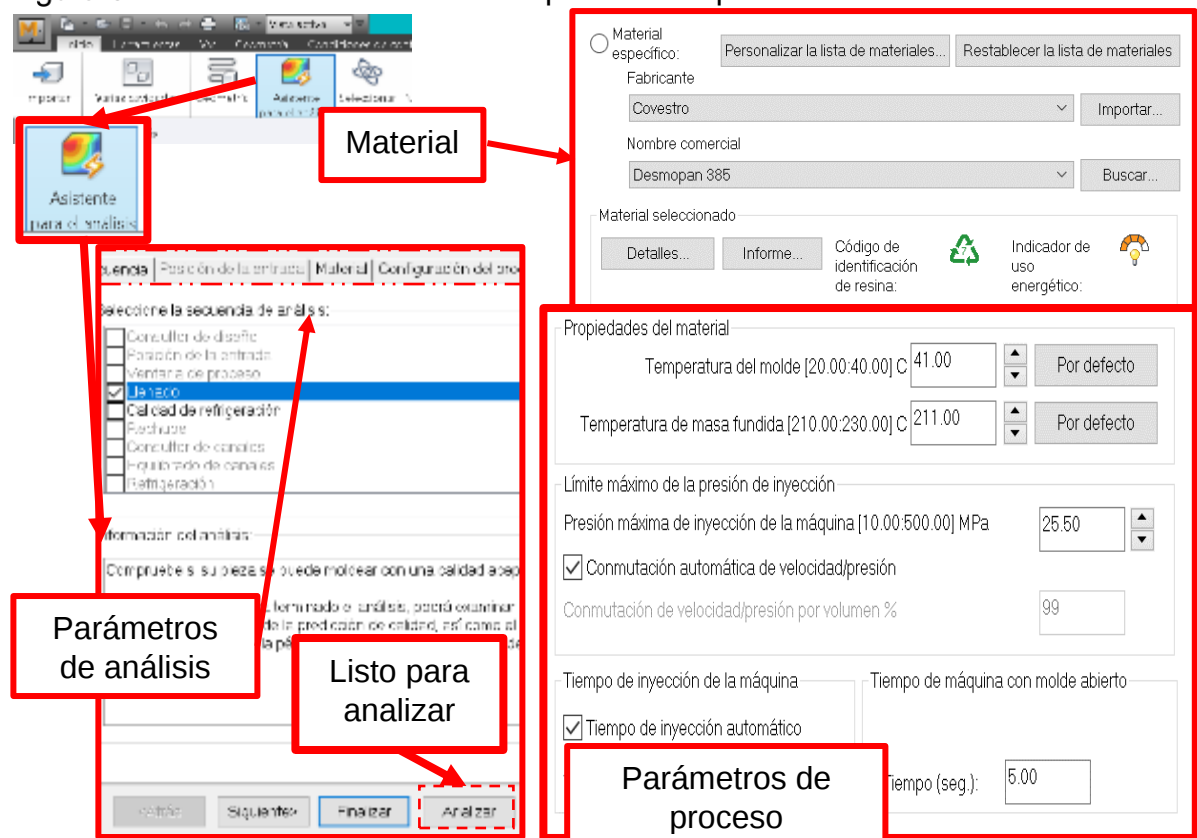
Se realizó la distribución de canales y las entradas en el *software* como se observa en la Figura 30, luego de generar el bebedero en el centro de la distribución de cavidades se selecciona la opción de crear canales, al dar *click* en la opción ya mencionada se le indica al programa el tipo de canal, lo anterior se realizó con las dimensiones de las Figura 12 (c) y Figura 12 (d).

- **Variables de proceso:**

El *software* contiene un asistente de análisis, se puede elegir el tipo de estudio, ya sea de llenado o de refrigeración entre otros. En este caso se seleccionó la opción de llenado, para el análisis se ingresan los parámetros de proceso.

El primer parámetro de proceso (Tabla 2) que requiere el *software* para su análisis, es el material (Desmopan 385), luego se configura la temperatura del molde (41°C), la temperatura de masa fundida (211°C), la presión de inyección de la máquina que es de 25.5 MPa y por último el tiempo del molde abierto que es de 5 segundos. En la Figura 31 se observa la interfaz de selección de parámetros para el análisis.

Figura 31. Interfaz de selección de parámetros para el análisis

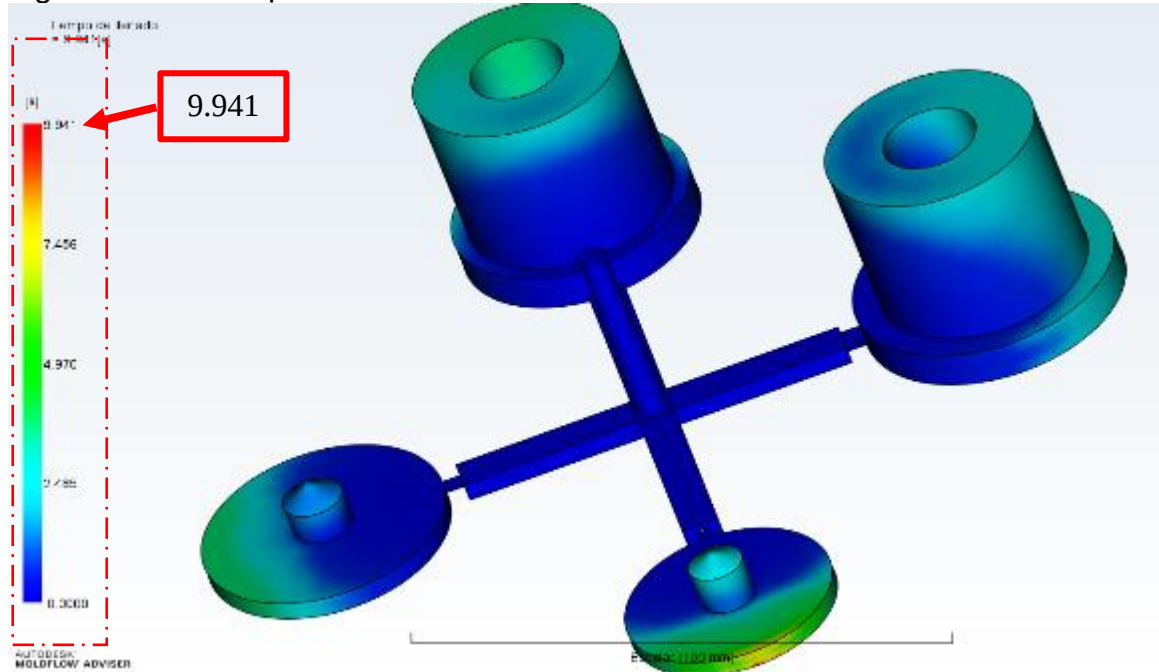


Fuente: Autor

- **Ejecutar simulación:**

Luego de tener todos los parámetros establecidos se da *click* a ANALIZAR y se esperan unos minutos a que el *software* haga su respectivo análisis. En la Figura 32 se observa el resultado del tiempo de llenado.

Figura 32. Tiempo de llenado



Fuente: Autor

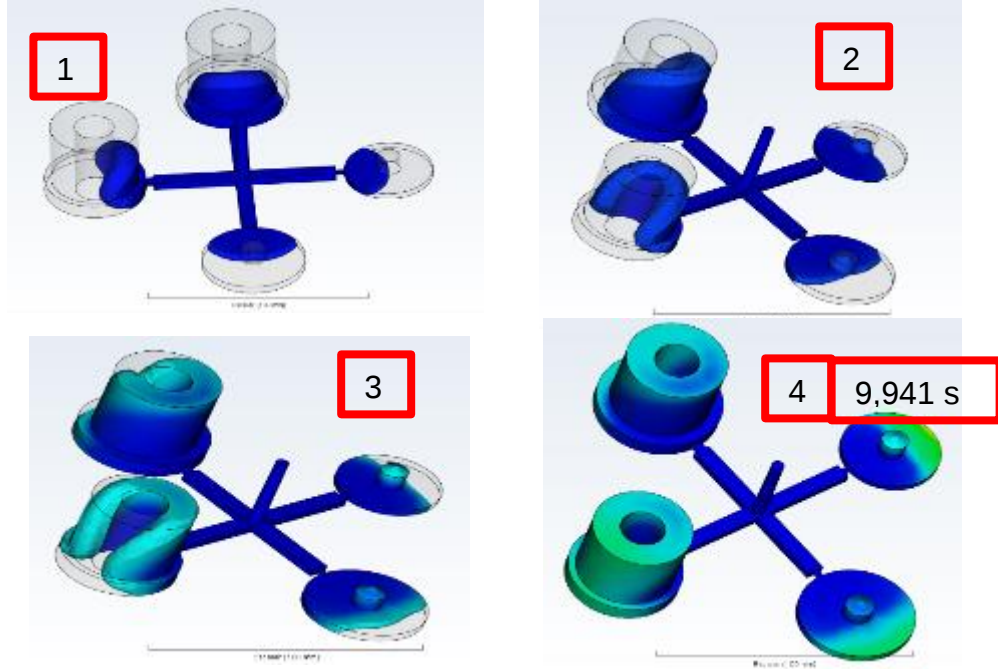
- **Resultados:**

Se muestra en la Figura 32, el tiempo total de llenado de las cavidades es 9.941 segundos teniendo en cuenta los parámetros obtenidos en el caso de estudio, se evidencia que este tiempo se asemeja al del caso real.

Otra característica de este análisis es que las 4 cavidades no son llenadas al tiempo, y esta representa un error en el diseño de la distribución de cavidades o el sistema de canales y entradas.

En la Figura 33 se observa la secuencia de llenado, en la que se evidencia el error de diseño.

Figura 33. Secuencia de llenado



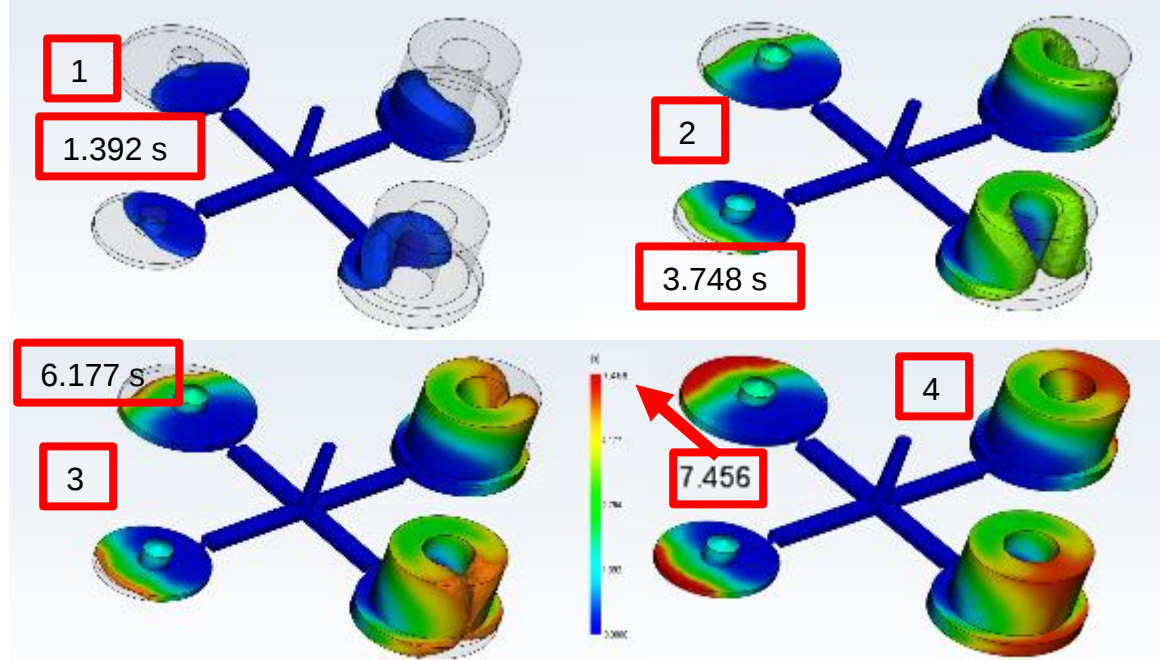
Fuente: Autor

- **Balanceo del molde**

Se trató de balancear el sistema de alimentación modificando las dimensiones de las entradas de cada cavidad. El criterio de balanceo fue modificar los diámetros con la metodología ensayo y error. Las dimensiones más adecuadas se muestran en la Tabla 4.

Se modificaron los diámetros en el modelo de simulación de Mold Flow, y los resultados fueron los siguientes

Figura 34. Secuencia de llenado con modificación de entrada



Fuente: Autor

Se observa en la Figura 34, que la secuencia en el llenado se ve una mejora, ya que las cavidades se llenan al tiempo. Por motivo a esta uniformidad de llenado el tiempo de inyección se redujo de 10 a 7 segundos aproximadamente.

5.6 Conclusiones

- Los resultados obtenidos al realizar las simulaciones en los dos *software* CAE (Solidworks, Mold flow) se compararon con el caso de estudio y se obtuvo un error del 0,6% en Mold Flow y un 0,1024% en Solidworks por lo que ambos son confiables para la simulación de llenado de moldes.
- Como se observa en la Figura 24. y Figura 33. Que corresponden a las secuencias de llenado del caso real, tanto de SOLIDWORKS como de MOLD FLOW respectivamente, se muestra que el llenado de las cuatro cavidades no se hace uniformemente.
- Se logró hacer un llenado de las cavidades más uniforme, modificando tanto geometría como dimensiones de las entradas, además de esto se reduce el tiempo de llenado de las 4 cavidades en aproximadamente un 20%.
- Se concluye que el número de cavidades que posee el molde de la empresa es el adecuado.

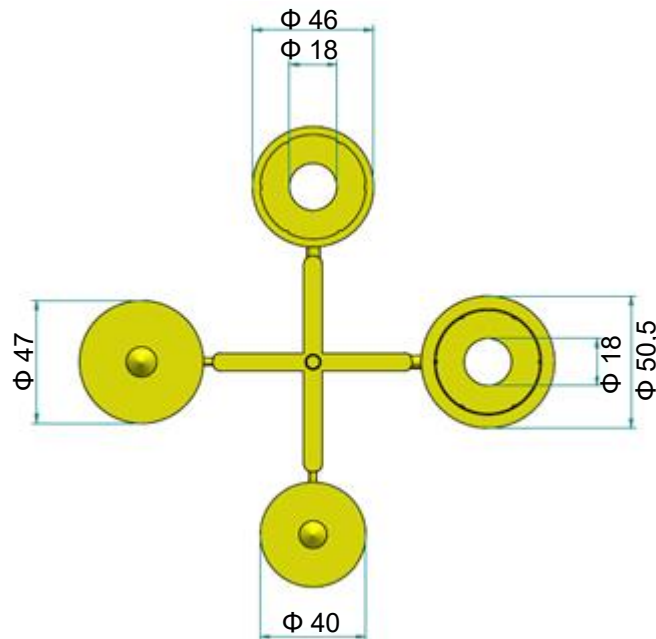
6. DISEÑO DEL SISTEMA DE LLENADO DEL MOLDE

Para el sistema de llenado de un molde se deben tener en cuenta variables importantes tales como: área proyectada, fuerzas de inyección, distribución de cavidades, diseño de entradas, canales y bebedero. Estas son importantes para que se lleve a cabo un buen diseño del sistema de llenado del molde.

6.1 OBTENCIÓN DEL ÁREA PROYECTADA

Para llevar a cabo los cálculos de áreas proyectadas de los bujes 9309, 9310, 9398 y 9399, se empleó el modelo completo, como se muestra en la Figura 12 (b), y teniendo en cuenta las medidas de la Figura 35.

Figura 35. Dimensiones de los bujes



Fuente: Autor

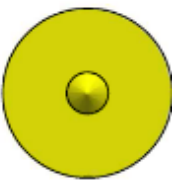
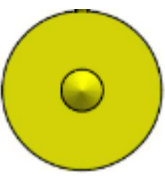
El cálculo se hace por medio de dos ecuaciones, la ecuación A que es la ecuación de un círculo y la ecuación B que es la ecuación de un disco. Estas ecuaciones se determinaron por lo que refleja la cavidad viéndolo desde una vista superior, las ecuaciones se muestran en el siguiente esquema.

$$\text{Ecuacion A} = \pi * r^2$$

$$\text{Ecuacion B} = \pi * r_1^2 - \pi * r_2^2$$

Con las ecuaciones mostradas anteriormente se calcula el área proyectada de cada de cada cavidad, en la Tabla 5 se muestra el resultado del área proyectada con su respectiva ecuación.

Tabla 5. Área proyectada

Referencia	Dibujo	Dimensiones	Ecuación	Área proyectada
Buje 9309		Radio 1= 25,25 mm Radio 2= 9 mm	B	$1784,5 \text{ mm}^2$
Buje 9310		Radio 1= 23 mm Radio 2= 9 mm	B	$1407,4 \text{ mm}^2$
Buje 9398		Radio = 23,5 mm	A	1735 mm^2
Buje 9399		Radio = 20 mm	A	$1256,6 \text{ mm}^2$

Fuente: Autor

6.2 FUERZAS DE INYECCIÓN

Para poder hallar la fuerza de inyección, se utiliza la ecuación (10) en cada cavidad, se necesita el área proyectada de las mismas. Teniendo en cuenta la presión de inyección del caso de estudio tomada de Tabla 2 (25 MPa), es igual en todos los puntos de inyección y el valor del área proyectada de cada cavidad se encuentra en la Tabla 5

Tabla 6. Fuerzas de inyección

Referencia	Fuerza inyección (N)
Buje 9309 (F4)	44612,5
Buje 9310(F1)	35185
Buje 9398(F3)	43375
Buje 9399(F2)	31415

Fuente: Autor

Los valores obtenidos en la Tabla 6 muestran las fuerzas que produce la inyección, se evidencia que las fuerzas no son iguales en todas las cavidades, ya que las áreas proyectadas son de valores distintos.

6.2.1 Obtención del centroide de cada cavidad

Para la obtención del centroide de cada cavidad se dividió el diámetro de cada una de las referencias de bujes en la mitad, ya que las cuatro cavidades son de geometría circular.

Con la fuerza de inyección de cada cavidad hallada, ahora se busca dónde ubicarla. En este caso la fuerza de inyección se coloca en el centroide de las referencias: 9309, 9310, 9398 y 9399 con sus respectivas coordenadas X, Y, partiendo de un punto específico que en este caso es el bebedero. El cual es hallado por medio de un *software* CAD (Solidedge), en la Tabla 7 se muestran las coordenadas obtenidas.

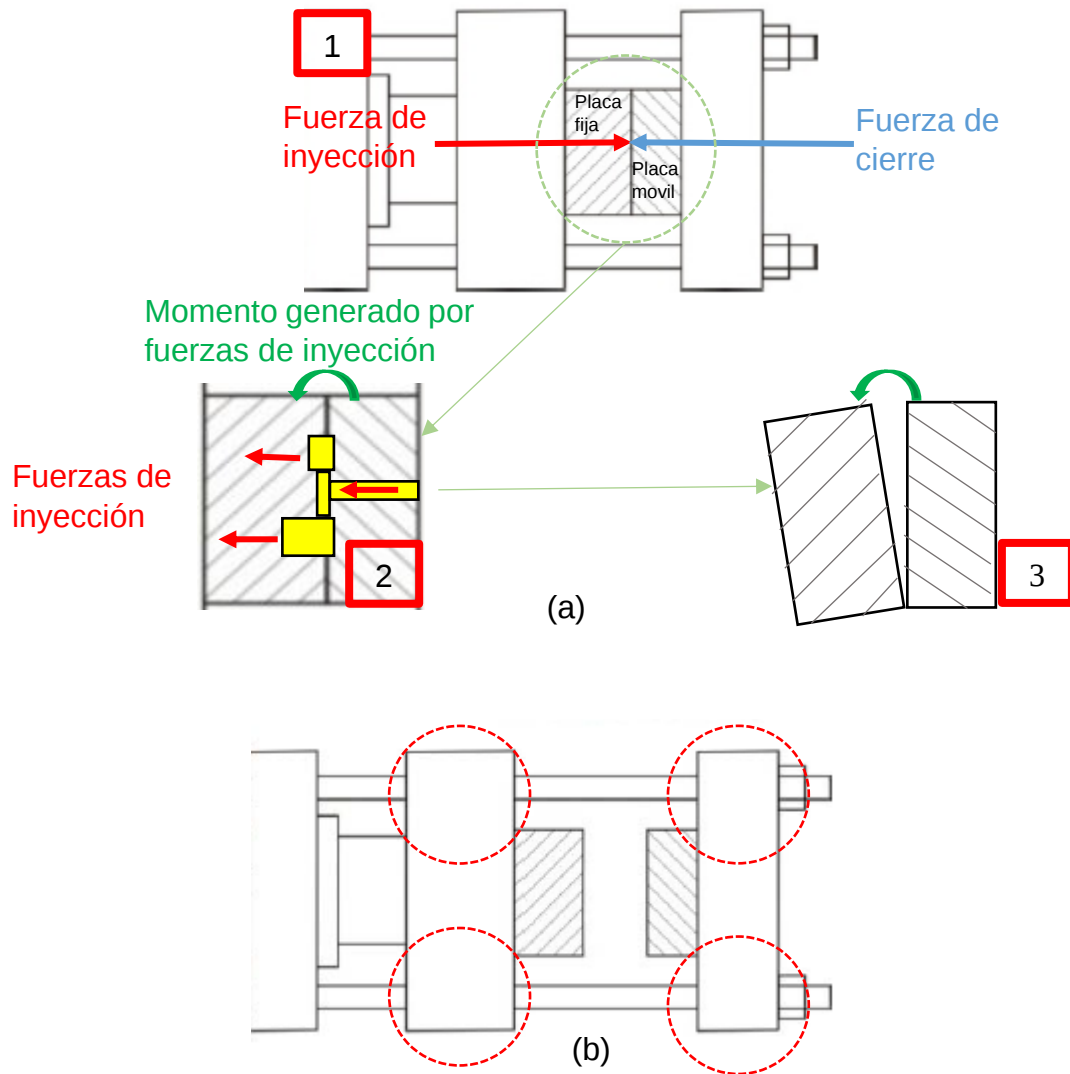
Tabla 7. Coordenadas de centroides caso real

Referencia	X (mm)	Y(mm)
Buje 9309	66,25	0
Buje 9310	0	67
Buje 9398	65	0
Buje 9399	0	66

Fuente: Autor

Al tener las coordenadas de ubicación de la fuerza de inyección de cada cavidad, se realiza un análisis de fuerzas teniendo en cuenta la distribución de las cavidades. Es decir que, al tener cada fuerza en un punto específico o centroide genera unos momentos flectores en el molde de inyección como se muestran a continuación:

Figura 36. (a) Acción de momentos en la parte externa del molde. (b) Efectos de los momentos en las columnas del molde.



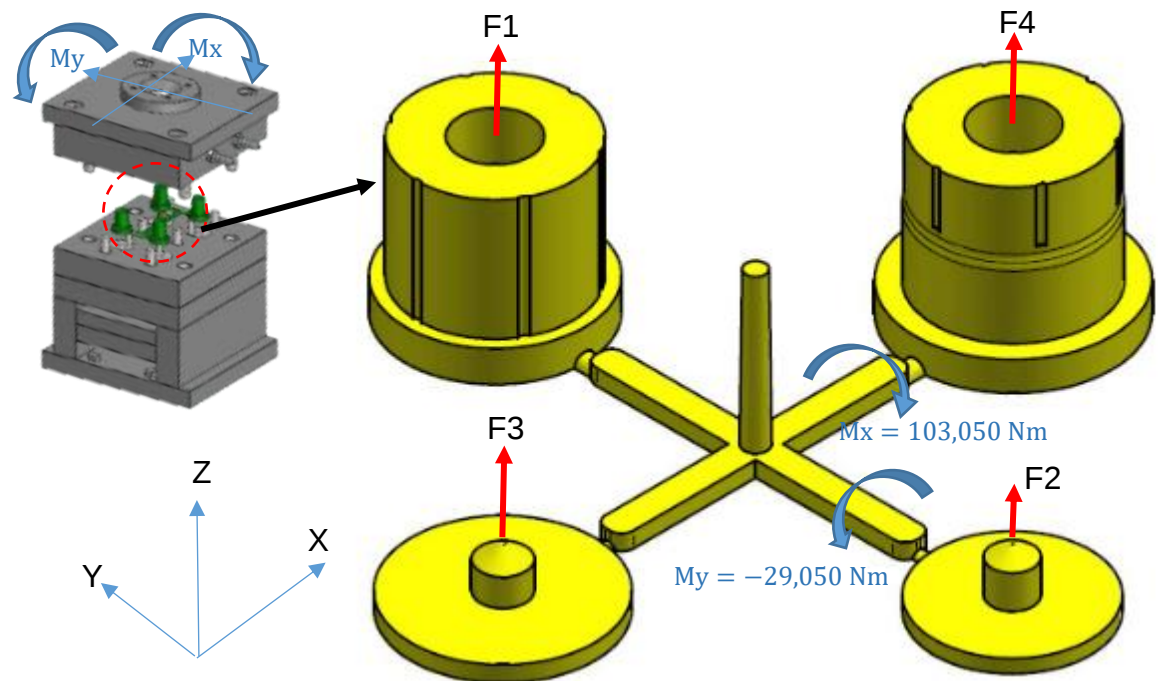
Fuente: Autor

Se observa en Figura 36 (a) que las fuerzas de inyección actúan sobre la placa móvil, para contrarrestar estas fuerzas existe una fuerza de cierre del molde la cual actúa sobre la placa fija, usualmente las magnitudes de estas dos fuerzas son iguales. Cada una de las cavidades genera una fuerza de inyección con diferente magnitud, esta magnitud varía de acuerdo al área proyectada que posee cada una de las cavidades, dichas fuerzas generan un momento sobre las placas del molde como se observa en la imagen 2 (Figura 36 (a)), estos momentos afectan el molde y esto se ve reflejado con el uso, llevando así a que estas placas pierdan su

paralelismo con el tiempo (imagen 3 Figura 36 (a)); los momentos generados también afectan las columnas del molde en su cierre (Figura 36 (b)).

Haciendo énfasis particularmente en lo que sucede al interior del molde, se observan los diagramas de cuerpo libre de las cavidades con su respectivo sistema de llenado (Figura 37), la distribución de cavidades con el diagrama de fuerzas y momentos a los que está sometido el molde de la empresa FRIPARTS, los momentos en cada uno de los ejes fueron sumados por esto se observa un valor en cada eje.

Figura 37. Diagrama de fuerzas caso real



Fuente: Autor

Teniendo en cuenta el diagrama de fuerzas de la Figura 37, se realizan sus respectivas ecuaciones de fuerza en el eje X , Y . posteriormente se halla la ecuación de momentos en cada eje, considerando las distancias que ahí entre el bebedero y la fuerza de inyección. A continuación, se muestran las ecuaciones de sumatoria de fuerzas y momentos.

$$\sum Fy = F1 + F2$$

$$\sum Fx = F3 + F4$$

$$\sum My = -F4(L4) + F3 * (L3) = (-44612,5 * 41) + (43375 * 41,5) = -29,050 \text{ Nm}$$

$$\sum Mx = -F2(L2) + F1 * (L1) = (-31415 * 46) + (35185 * 44) = 103,050 \text{ Nm}$$

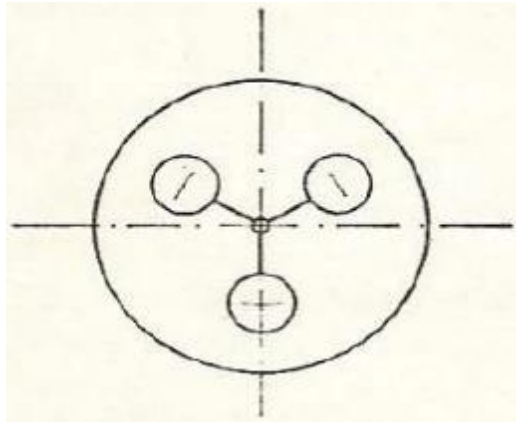
En definitiva, los resultados de las fuerzas y momentos muestran que la distribución de las cavidades es errónea, puesto que la sumatoria de momentos en el eje X, Y es diferente de cero, por esta razón se evidencian deformidades (rebaba) en los canales del producto terminado del molde de inyección, debido a la flexión que generan las fuerzas de inyección sobre el molde.

6.3 DISTRIBUCIÓN DE CAVIDADES

La selección de la mejor distribución de los canales de llenado se hace por medio de recomendaciones teóricas, basadas en un factor básico.

El principal factor de selección de la mejor distribución, corresponde a que las cavidades se llenen de una forma simultánea y uniforme. Para obtener líneas de flujo iguales, se tuvo en cuenta la teoría de distribución de canales y se seleccionó la distribución radial considerando el bebedero como punto central. En la Figura 38 se muestra la distribución de canales seleccionada.

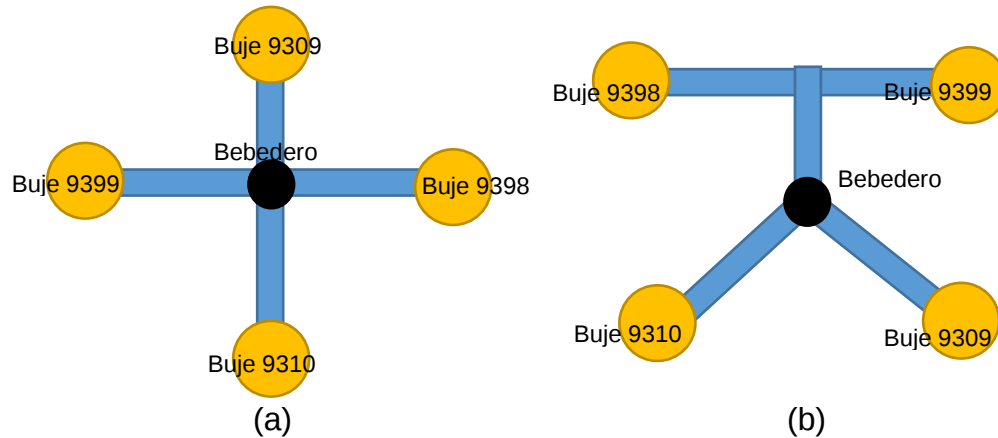
Figura 38. Distribución de cavidades seleccionada



Fuente: Moldes Para Inyección De Plástico (menges-mohren) página 66

Después de la selección de distribución de canales radial se establecieron dos alternativas de distribución de las cavidades, ya que las cavidades no son del mismo volumen. La primera alternativa se basa en confrontar las dos cavidades con más volumen y las otras dos cavidades con menos volumen, como se muestra en la Figura 39 (a).

Figura 39. (a) Alternativa 1 (b) Alternativa 2



Fuente: Autor

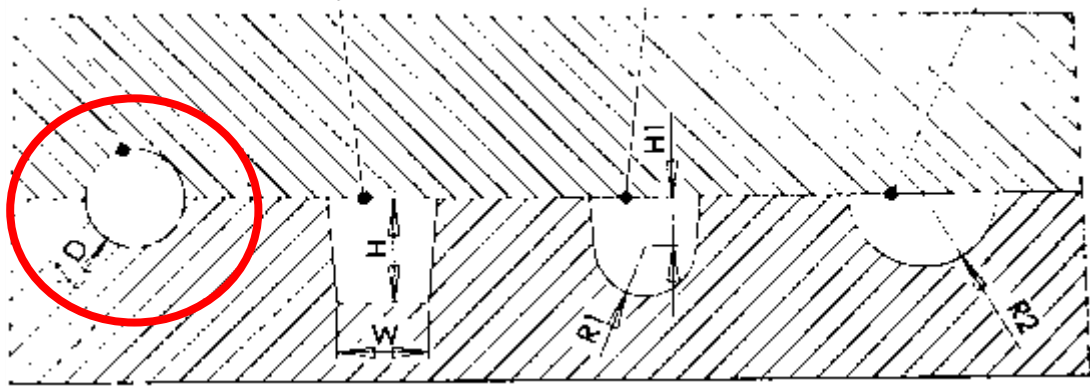
La segunda alternativa, corresponde a tres canales principales y dos secundarios, las dos cavidades de mayor volumen van conectadas a dos canales principales, en el tercer canal principal se unen los dos canales secundarios que contienen las dos cavidades de menor volumen como lo muestra la Figura 39 (b).

6.4 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE CANALES

La distribución no es la única causa de un llenado equilibrado o uniforme. También va de la mano con la distancia de los canales, el diámetro y geometría de los canales.

La geometría circular se seleccionó para los canales, debido a que tiene poca pérdida de calor, la relación de superficie/volumen es mínima y se puede desmoldar con facilidad. En la Figura 40 se muestra con un círculo rojo la geometría seleccionada.

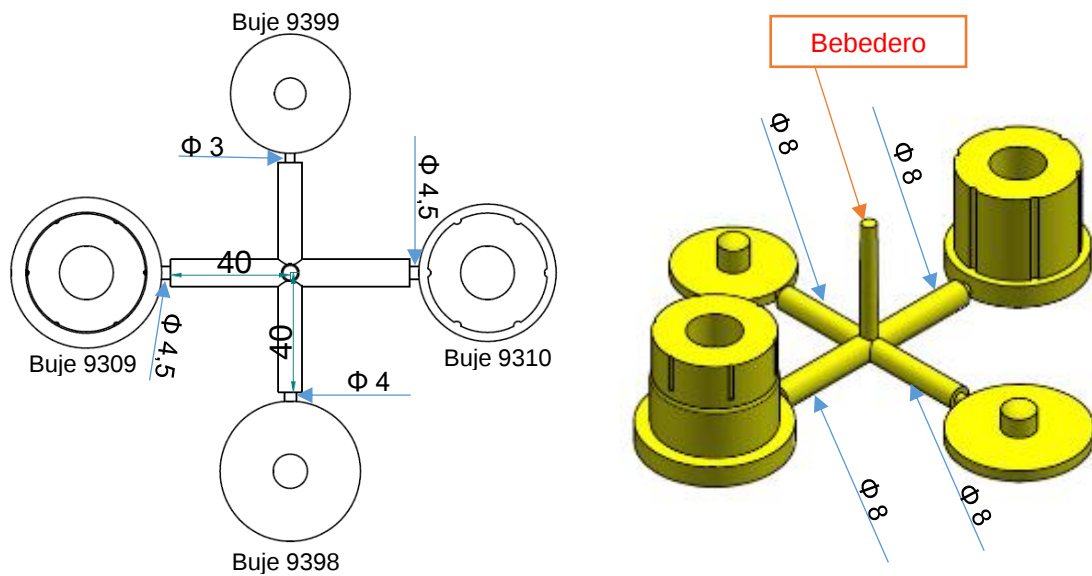
Figura 40. Geometría de los canales



Fuente: *Injection Mold Design Engineering* página 177

Luego de seleccionar la geometría de los canales se determina la caída de presión que tiene cada canal, ya sean canales primarios o secundarios. Lo fundamental para este análisis es establecer unas dimensiones de longitud y diámetros para los canales como se observa en la Figura 41.

Figura 41. Alternativa 1 con dimensiones de canales y entradas

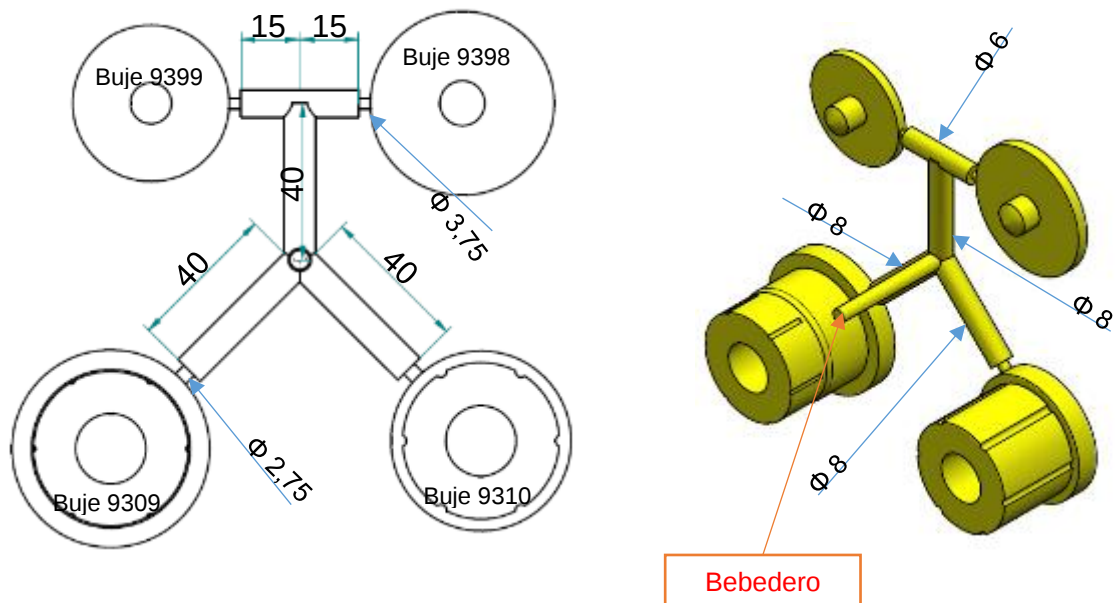


Fuente: Autor

La Figura 41 muestra que los diámetros de las entradas (*gate*) son diferentes para todas las cavidades, pero sus longitudes tienen el mismo valor y equivale a 4 milímetros. El bebedero con una geometría cónica cuyos diámetros son de 3 milímetros y 8 milímetros, con una longitud de 45 milímetros, las dimensiones del bebedero se realizaron teniendo en cuenta un ángulo de conicidad de aproximadamente 6° ya que esto es lo recomendado por la literatura[12].

La alternativa 2 consiste en tres canales principales que tienen una longitud de 40 mm por 8 milímetros de diámetro y los dos canales secundarios tienen una longitud de 15 mm por 6 mm de diámetro, Como se muestra en la Figura 42.

Figura 42. Alternativa 2 con dimensiones de canales y entradas



Fuente: Autor

Como se muestra en la Figura 42 las entradas de las 4 cavidades poseen una longitud de 3 milímetros y diámetros de 2,75 milímetros para las cavidades de los bujes 9310, 9309; Para las entradas de los bujes 9398 y 9399 se emplearon diámetros de 3,75 milímetros. El bebedero se dimensiono conservando el ángulo de conicidad de 6° (longitud = 45mm, diámetro mayor = 8 mm, diámetro menor = 3 mm).

La caída de presión del sistema de canales se calcula teniendo en cuenta la ecuación (6), teniendo en cuenta que los canales de las dos alternativas son de las mismas dimensiones, que se muestra en la Figura 42, utilizando el Desmopan 385 (TPU) como el material a fundir. Teniendo en cuenta el índice de viscosidad (n) de 0,29 y la ley de potencia (K) de 17,000 pa-s del Desmopan 385. El caudal volumétrico ($\dot{V}$) de la maquina es de 221 cm³/s[2], por lo que la caída de presión del bebedero es:

$$\Delta P = \frac{(2)(17,000 \text{ Pa s})(0,045m)}{0,0045m} * \left(\frac{\left(3 + \frac{1}{0,29}\right) * \left(221 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}\right)}{\pi(0,0045m)^3} \right)^{0,29}$$

$$= 4,01 \text{ Mpa}$$

Después del bebedero, el polímero fundido se ramifica en tres canales de flujo. Como cada canal tiene las mismas dimensiones, se supone que el caudal volumétrico ($\dot{v}$) a través de cada canal es del 33,3% del caudal de entrada, 72,93 cm³/s. Por lo que la caída de presión (ecuación (6)) a través de los canales principales es:

$$\Delta P = \frac{(2)(17,000 \text{ pa s})(0,04m)}{0,004m} * \left(\frac{\left(3 + \frac{1}{0,29}\right) * \left(72,93 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}\right)}{\pi(0,004m)^3} \right)^{0,29}$$

$$= 3,22 \text{ Mpa}$$

Uno de los canales principales tiene una ramificación a dos canales secundarios, entonces se supone que el caudal volumétrico ($\dot{v}$) a través de cada canal es la mitad del caudal volumétrico del canal principal, 36,465 cm³/s. Por lo que la caída de presión (ecuación 5) a través de los canales secundarios es

$$\Delta P = \frac{(2)(17,000 \text{ pa s})(0,015m)}{0,003m} * \left(\frac{\left(3 + \frac{1}{0,29}\right) * \left(36,456 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}\right)}{\pi(0,003m)^3} \right)^{0,29}$$

$$= 1,69 \text{ Mpa}$$

La caída de presión total (ecuación 6) a través del sistema de distribución de canales es la suma de las caídas de presión a través de cada parte del sistema de canales.

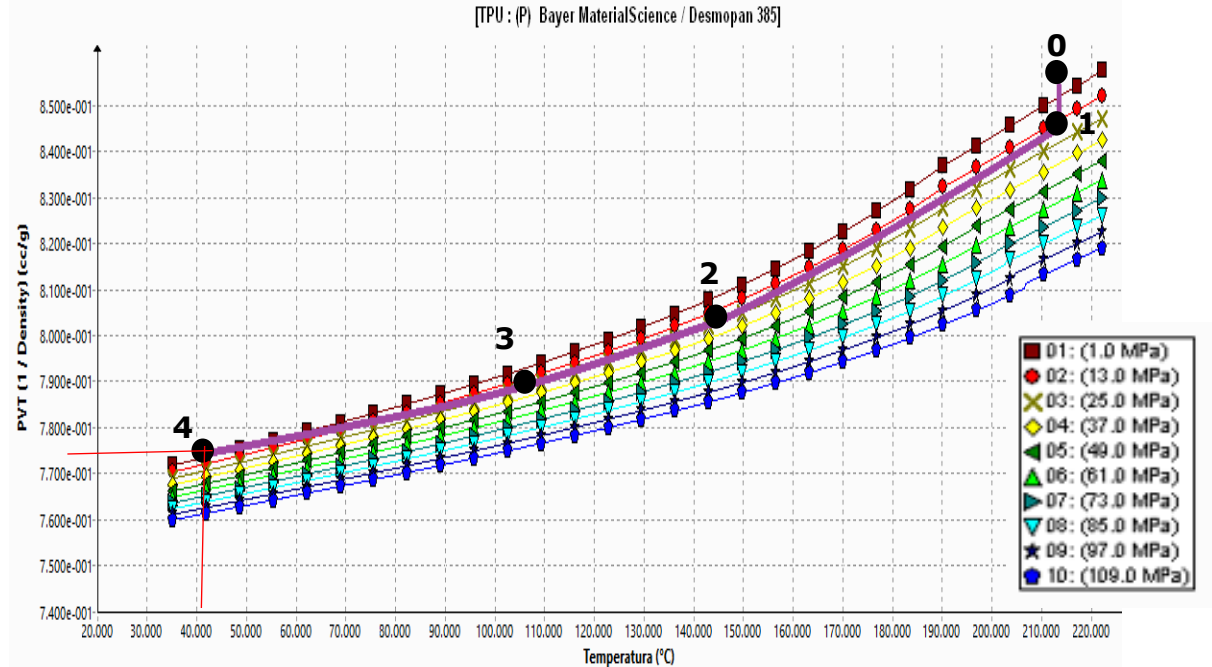
$$\Delta P_{total} = 4,01 \text{ MPa} + 3,22 \text{ MPa} + 1,69 \text{ MPa} = 8,92 \text{ MPa}$$

La presión de inyección es de 25 Mpa (Tabla 2) en esta presión se debe contemplar la caída de presión del sistema de distribución de canales (8,92Mpa).

$$\text{Presión de inyeccion dentro del molde} = 25 \text{ MPa} - 8,92 \text{ MPa} = 16,08 \text{ MPa}$$

Se muestra como resultado la presión de inyección dentro del molde que es de 16,08 MPa, debido a las pérdidas de presión que tiene el sistema. Teniendo en cuenta la presión de inyección dentro del molde se realizó un análisis del proceso de inyección con una gráfica PVT del Desmopan 385.

Figura 43. Grafica PVT Desmopan 385



Fuente: Autor

En la Figura 43 se puede ver el comportamiento de la presión y temperatura dentro del molde de inyección. Entre los puntos 0 y 1 se realiza el llenado de las cavidades que se produce a una temperatura de 211 °C. Durante el llenado, la presión de las cavidades aumenta de 0 MPa hasta 16 MPa mientras el material se enfría.

Durante el periodo de compactación (Puntos 1 a 2) la presión en el interior del molde se mantiene, ya que la máquina inyectora continua introduciendo material para compensar la contracción (Volumen específico cm^3/g) mientras el material se enfría. Entre los puntos 2 y 3 el material se cristaliza mientras que sigue en el periodo de compactación.

Del punto 3 al punto 4, la presión de inyección disminuye hasta llegar a la presión atmosférica y la temperatura hasta la del molde (41 °C), el material se encuentra suficientemente frio para poder desmoldar.

Para comprender los datos de volumen específico se realizaron mediciones tanto de volumen como de peso del producto terminado:

Tabla 8. Volumen específico producto terminado

REFERENCIA	PESO [g]	VOLUMEN [cm ³]	DENSIDAD [g/cm ³]	VOL. ESPECIF. [cm ³ /g]
9309	58,7	55,53	1,05709	0,94600
9310	54,8	42,19	1,29889	0,76989
9398	10,6	7,84	1,35204	0,73962
9399	6,75	5,25	1,28571	0,77778
Mazarota	14,8	2,71	5,46125	0,18311
TOTAL	145,65	113,52	1,28303	0,77940

Fuente: Autor

La Tabla 8 muestra el valor del volumen específico de todo el producto terminado que corresponde a $0,7794 \text{ cm}^3/\text{g}$, este valor se debe tener en cuenta en la gráfica PVT (Figura 43).

Se corrobora que la presión de 16 MPa (contemplando la caída de presión) y temperatura de 211°C están bien seleccionados, por medio de la comparación entre el valor de volumen específico obtenido en la Tabla 8 con el valor de la Figura 43 en el punto 4 ($0,776 \text{ cm}^3/\text{g}$), se observa que la diferencia entre estos datos es mínima. Cabe resaltar que las propiedades y calidad del producto dependen de la presión de inyección, densidad de las piezas inyectadas y temperatura de la masa fundida. Al seleccionar de manera correcta los anteriores parámetros se puede llegar a un llenado uniforme complementándose con el sistema de distribución [6].

- **Radio mínimo de los canales**

Una vez analizada la caída de presión en todo el sistema de canales, es posible ajustar el diseño del sistema de alimentación para que proporcione una disminución en la caída de presión. El método utilizado se basa en restricciones de los diámetros mínimos de los canales, especificando la caída de presión máxima.

Se calculan los diámetros mínimos del sistema de distribución de canales que se muestra en la Figura 42, para que la caída de presión en la distribución de canales no supere el ΔP_{total} que es igual a 8,92 MPa. El material utilizado es Desmopan 385, el cual se utilizaron las mismas propiedades mencionadas con anterioridad.

En primer lugar, se halla la longitud total de todo el sistema de canales, a partir de la entrada del material fundido hasta las cavidades. La longitud total es

$$L_{total} = (45mm) + (40mm) + (15mm) = 100mm$$

La caída de presión máxima ΔP_{total} se relaciona con el bebedero multiplicándola con la relación que hay entre la longitud del bebedero entre la longitud total del sistema (ecuación (9)).

$$\Delta P_{Bebedero} = 8,92 \text{ Mpa} * \frac{45mm}{100mm} = 4,014 \text{ Mpa}$$

Debido a que la caída de presión del bebedero es 4,014 MPa, el diámetro mínimo del bebedero se puede calcular a partir de la ecuación (8):

$$R_{Bebedero} = \left(\left(\frac{2 * 17,000 \text{ pas} * L_{Bebedero}(m)}{4,014 * 10^6 \text{ Pa}} \right)^{\frac{1}{0,29}} \right. \\ \left. * \frac{\left(3 + \frac{1}{0,29} \right) * \left(221 * 10^{-6} \frac{m^3}{s} \right)}{\pi} \right)^{\frac{1}{3 + \frac{1}{0,29}}} = 0,002837 \text{ m} = 2,83mm$$

El diámetro mínimo del bebedero es de 2,83 mm, con este diámetro se evita que la caída de presión sea mayor a 4,01 Mpa. El cálculo del diámetro mínimo del canal principal y secundario se hace de la misma forma como se hizo con el bebedero, teniendo en cuenta las dimensiones de los canales principales y secundarios. En la Tabla 9 se muestra el cálculo de los diámetros mínimos del sistema de distribución de canales.

Tabla 9. Radios mínimos

Canal	Radio mínimo (mm)
Bebedero	2,83
Canal principal	3,789
Canal secundario	2,43

Fuente: Autor

6.5 ENTRADA (GATE)

Como en este caso ya se conocen las localizaciones donde irán las entradas se procede a definir la geometría de la entrada.

La geometría a emplear en el nuevo diseño del molde con las 4 cavidades es cilíndrica ya que es la que mejor rendimiento da para el transporte del material fundido respecto a sus características, reduciendo las pérdidas de presión con dimensiones más pequeñas. Se calcula el radio mínimo de las entradas (ecuación (4), a partir de los datos de flujo volumétrico ($\dot{V}$) y tasa de cizallamiento máxima ($\dot{\gamma}_{max} = 50000 \text{ s}^{-1}$)[2], se obtiene el radio mínimo de la entrada:

$$R_{entrada} = \sqrt[3]{\frac{4 * 36,456 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}}{\pi * 50.000 \text{ s}^{-1}}} = 0,00097552 \text{ m} = 0,97552 \text{ mm}$$

Por último, se procede a calcular la pérdida de presión en la entrada con la ecuación (6):

$$\Delta P = \frac{(2)(17,000 \text{ p s})(Lm)}{Rm} * \left(\frac{\left(3 + \frac{1}{0,29}\right) * \left(36,456 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}\right)}{\pi(Rm)^3} \right)^{0,29}$$

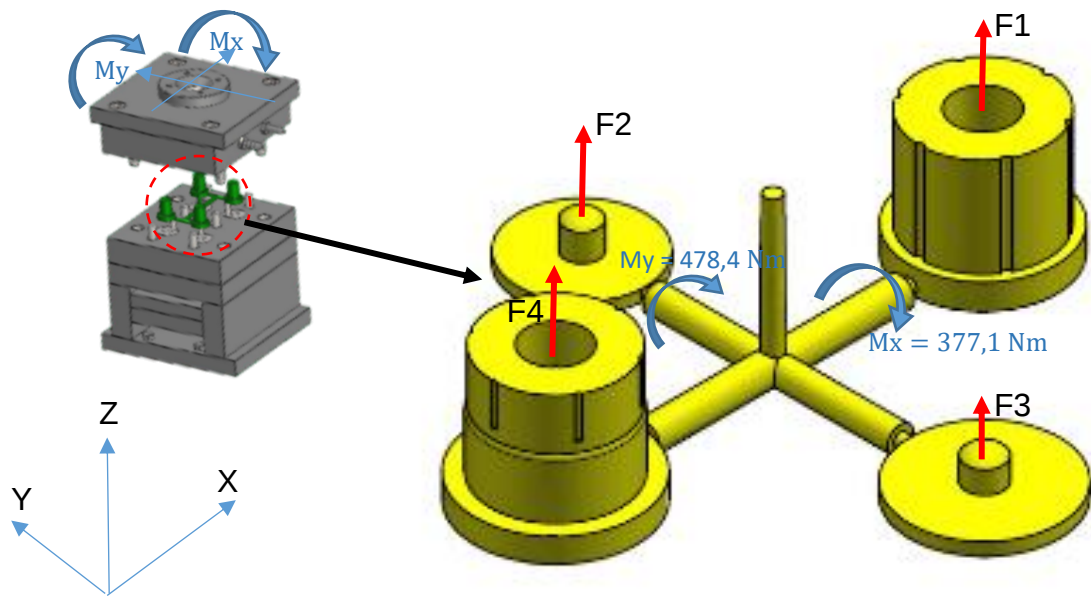
$$= 2,768 \text{ Mpa}$$

6.6 ANÁLISIS FINAL

Para elegir la mejor distribución se realizó un análisis de momentos a cada alternativa, En la Figura 44 se observa los momentos generados por las fuerzas que produce cada cavidad.

Los momentos en la alternativa 1, en el eje X es de 377,1 Nm y en el eje Y es de -478,4 Nm. Estos valores indican que la distribución es inadecuada, porque la sumatoria de momentos deben ser aproximadamente cero, de lo contrario se presentan fenómenos tales como; rebabas o pandeos en las placas del molde de inyección.

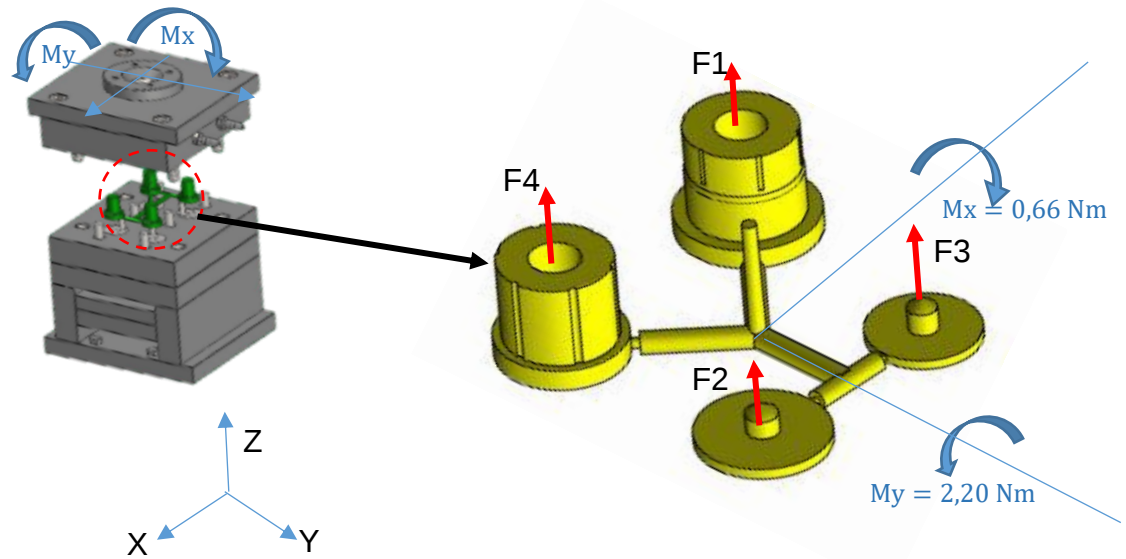
Figura 44. Momentos Alternativa 1



Fuente: Autor

Luego se analizó la alternativa 2 como se muestra en la Figura 45, los momentos generados por las fuerzas para esta alternativa en los ejes X,Y son cercanos a cero, la sumatoria momentos en el eje x es de 0,6687 Nm y en el eje Y es de 2,2035 Nm.

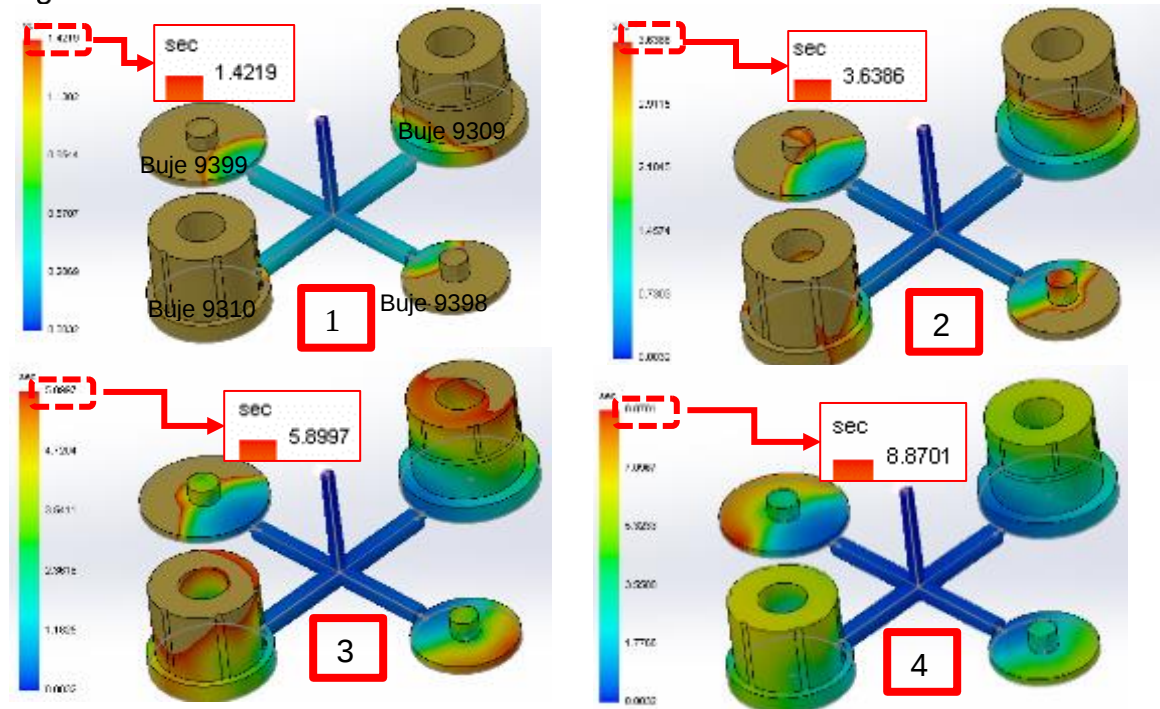
Figura 45. Momentos alternativa 2



Fuente: Autor

Los análisis de llenado de las dos alternativas se llevaron a cabo en el software Solidworks, las cuales se observan a continuación:

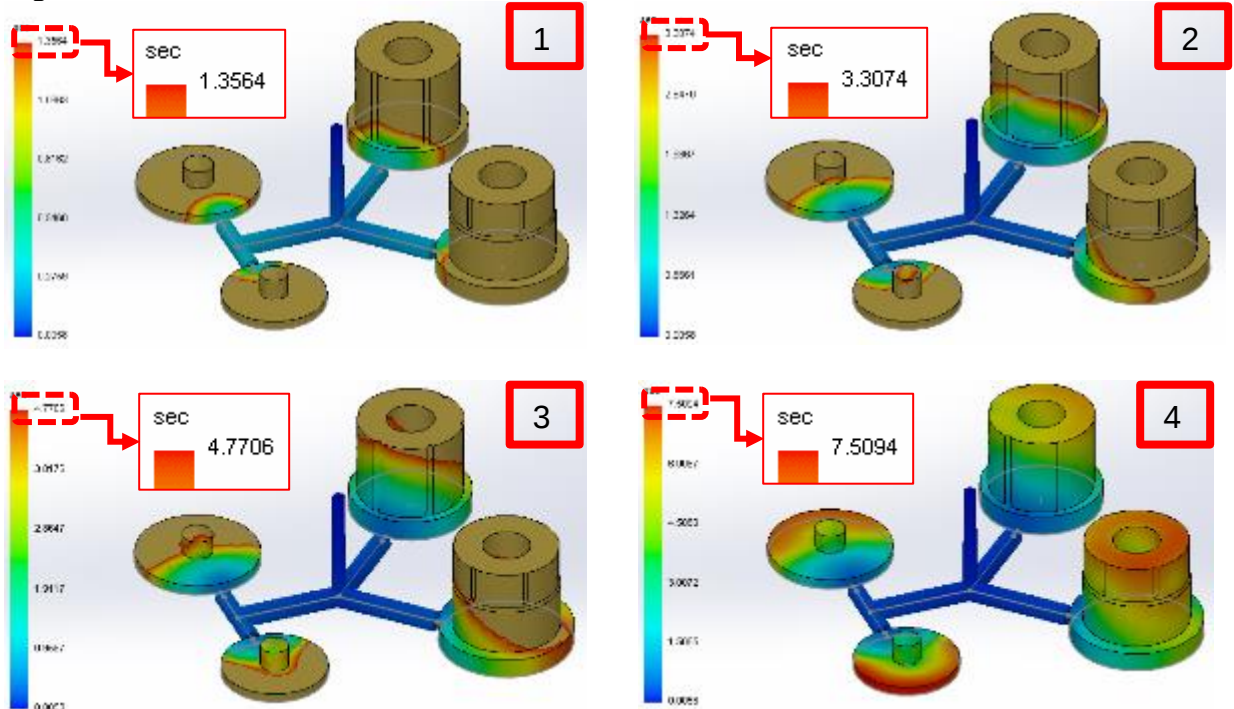
Figura 46. Secuencia de llenado Alternativa 1



Fuente: Autor

Como se muestra en la Figura 46 el llenado no se hace de manera uniforme ya que la cavidad del buje 9399 es la última en llenarse, el cual confirma que la alternativa 1 se encuentra desbalanceada respecto al análisis de momentos realizados en Figura 44. Para que el material complete el llenado en su totalidad las 4 cavidades se demoran aproximadamente 9 segundos, es decir 1 segundo menos que el caso de estudio.

Figura 47. Secuencia de llenado Alternativa 2



Fuente: Autor

En la Figura 47 se observa que el llenado de las cavidades se hace de una manera uniforme, el resultado de esta secuencia corrobora que la distribución está balanceada y los momentos que generan son aproximados a cero como se muestra en la Figura 45. Por lo que se selecciona esta alternativa como la mejor, ya que el tiempo en el que se completa este proceso es de 7,5 segundos, disminuyendo 2,5 segundos respecto al caso de estudio.

6.7 CONCLUSIONES

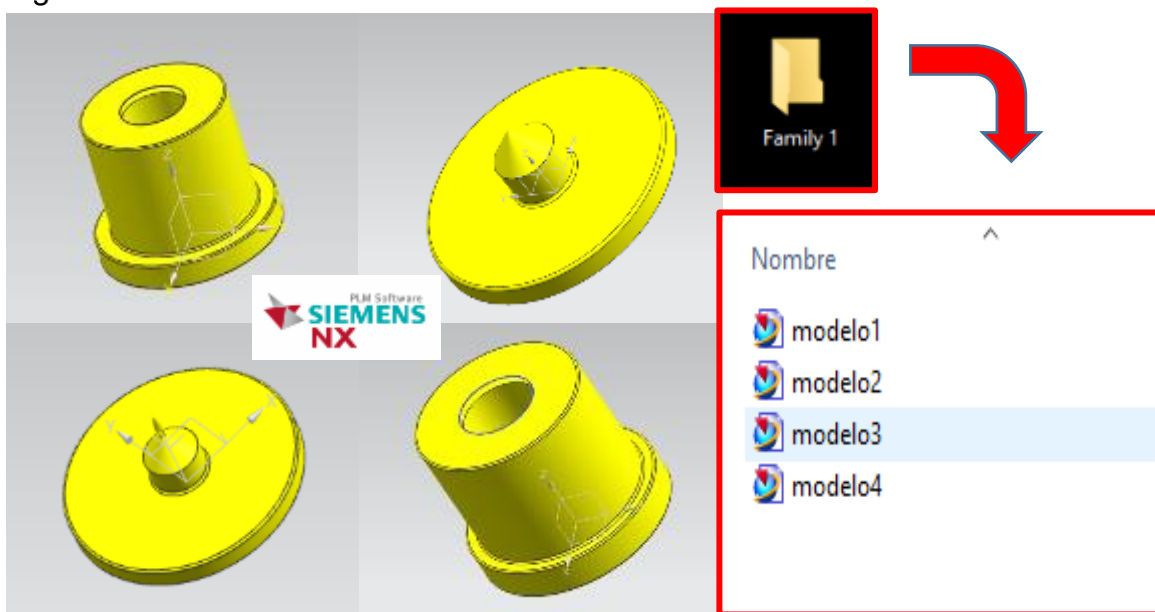
- Se concluye que tanto la distribución como los diseños de canales y entradas del caso de estudio no son los adecuados.
- Al realizar dos alternativas de diseño, se seleccionó la alternativa 2 debido a que la selección de parámetros del proceso y distribución se hicieron de manera adecuada, esto indica que el molde esta balanceado, evitando desperdicios de material que se produce por medio de rebaba.
- Se comprobó mediante el análisis de llenado (Figura 47), que el tiempo de llenado del molde se reduce en aproximadamente un 25% respecto al caso real.

7. DISEÑO DE UN MOLDE DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO, UTILIZANDO EL ACELERADOR DE DISEÑO MOLD WIZARD DEL SOFTWARE NX 12

A continuación, se va empezar a usar el *software* NX 12 de Siemens, creando un molde de inyección con la herramienta molde (Mold Wizard). Considerando la distribución del sistema de canales, forma de las entradas y diámetros seleccionados con el capítulo anterior[13].

En primer lugar, se pone en funcionamiento el programa NX 12 de Siemens. Una vez abierto el programa, se procede a realizar el modelado CAD de cada cavidad, teniendo en cuenta que se deben guardar en la misma carpeta (*Family 1*). Como se muestra en la Figura 48.

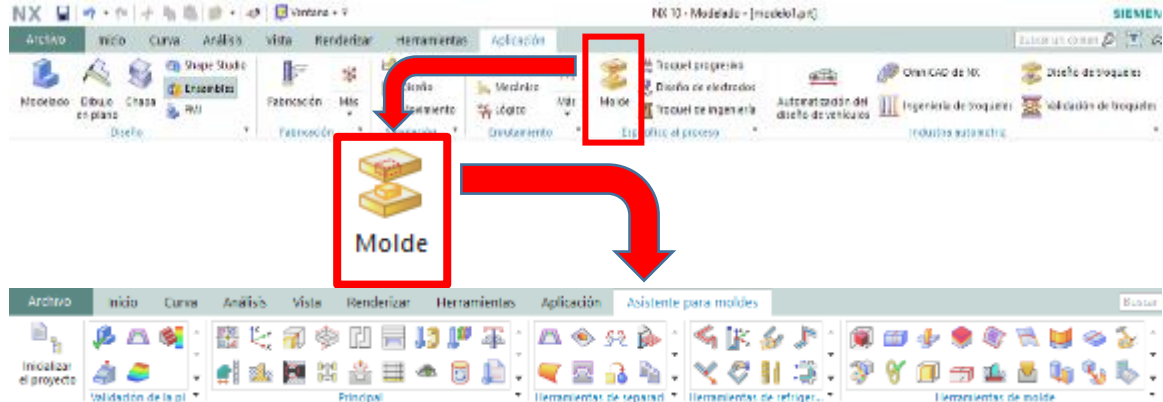
Figura 48. Modelado CAD software NX 12



Fuente: Autor

Luego de tener todas las cavidades modeladas y guardadas, se selecciona la pestaña de aplicación, se abrirá un desplegable, en el que figuran distintas herramientas de análisis. El cual se eligió la herramienta Molde (*Mold Wizard*), extendiendo un asistente para moldes con diferentes opciones, como se muestra en la Figura 49.

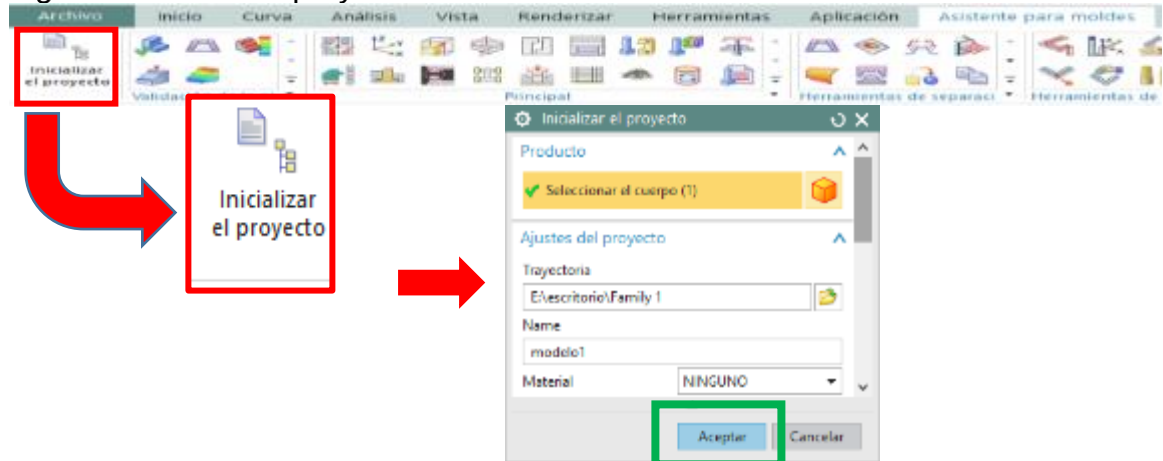
Figura 49. Asistente para molde (*Mold Wizard*)



Fuente: Autor

Para comenzar a utilizar el asistente de moldes se da inicio a un proyecto, seleccionando la opción (inicializar el proyecto). Aparecerá una ventana con diferentes opciones como nombre del proyecto y en que carpeta se va guardar, preferiblemente guardar el proyecto en la misma carpeta que se guardaron los modelados CAD (*Family 1*). Como se muestra en la Figura 50.

Figura 50. Iniciar proyecto

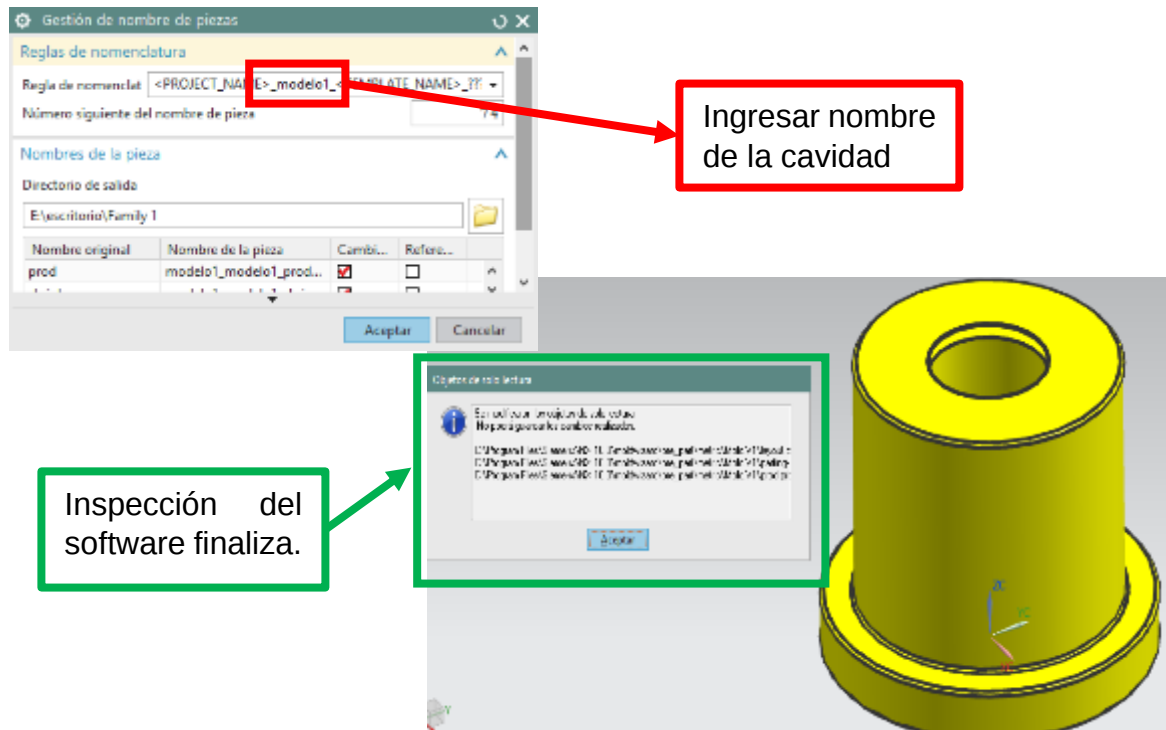


Fuente: Autor

Luego de haber asignado nombre y lugar donde se va a guardar el proyecto se da *click en* aceptar, (recuadro verde) Figura 50. Después se mostrará un cuadro declarando la nomenclatura de la pieza, en el cual se debe agregar el nombre de la

pieza donde lo indica el recuadro rojo, asignando una nomenclatura a cada proceso. Posteriormente de dar *click* en aceptar, el *software* inspecciona toda la cavidad y corrobora que todo esté bien, como se muestra en el recuadro verde (Figura 51).

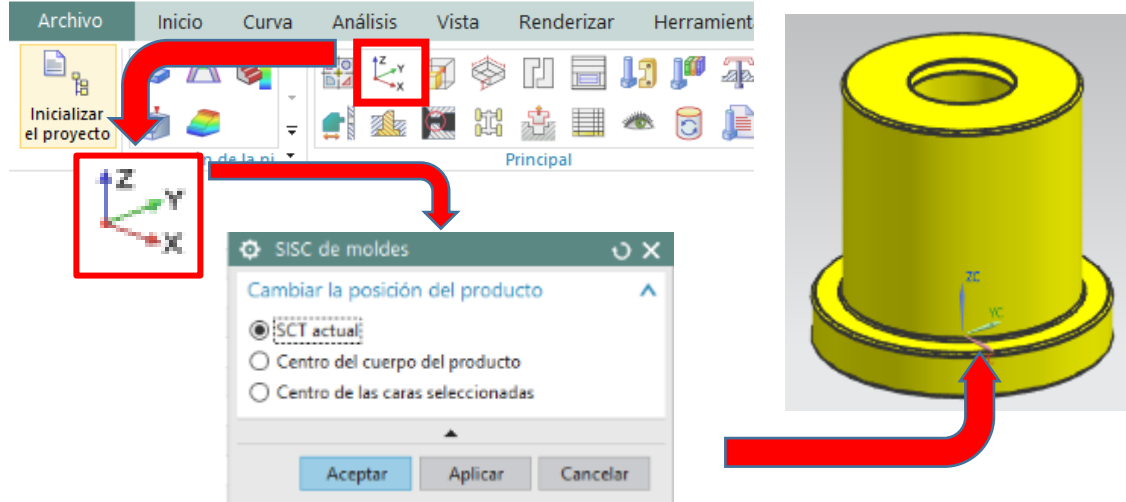
Figura 51. Inspección del *software*.



Fuente: Autor

Inmediatamente que el *software* dé el visto bueno, se establece el punto cero de la cavidad. Dando en la opción de posicionamiento, genera 3 opciones, la primera opción es que tenga las mismas coordenadas con las que se creó el primer boceto del modelado CAD, la segunda opción es entre dos caras y la última opción es el centro de una cara. Como se ve en la Figura 52 se seleccionó la primera opción, ya que el eje coordenado actualmente se encuentra en el centro de la pieza.

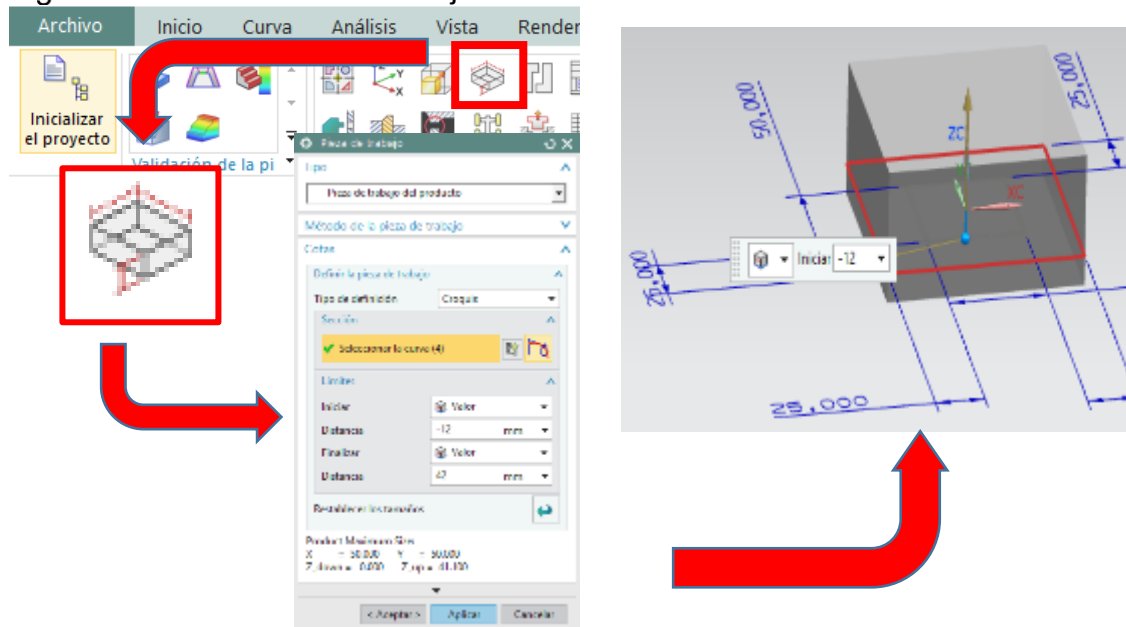
Figura 52. Selección del eje coordenado



Fuente: Autor

Al establecer el eje coordenado de la pieza. Se forma el volumen de trabajo de la cavidad, al ejecutar esta opción sale un recuadro dando unas dimensiones de trabajo que se ajustan a la cavidad. Dando una altura de 42 mm, un material base con altura de 12 mm. El programa automáticamente calcula un ancho y un alto dependiendo de la altura de la cavidad y la altura de la base. Como se muestra en la Figura 53

Figura 53. Volumen de trabajo

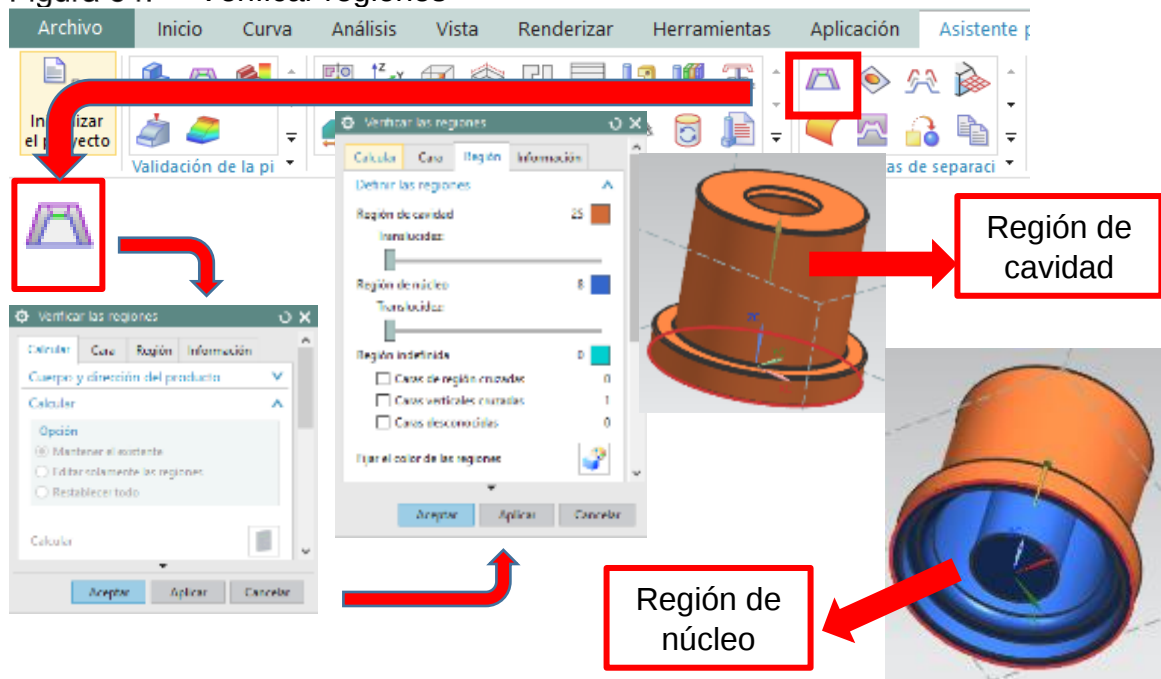


Fuente: Autor

Luego de establecer el volumen de trabajo se verifican las regiones, el *software* identifica 2 regiones. La primera se llama región de cavidad, la cual se identifica de un color naranja y siempre es el exterior de la pieza. La segunda se llama región de núcleo, es el interior de la cavidad o su contenido que se identifica de color azul.

Como se muestra en la Figura 54, se da *click* en verificar regiones que se encuentra en la parte superior, emerge una ventana para que el programa automáticamente calcule las dos regiones. Al calcular las dos regiones se identifican mediante la opción de región que se encuentra en la misma ventana.

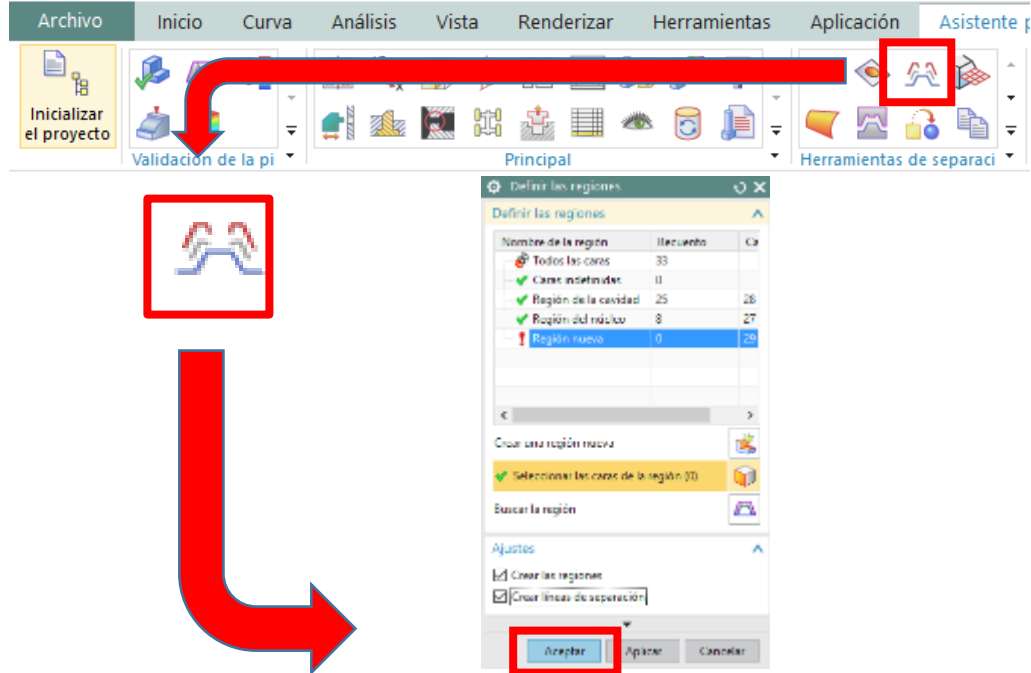
Figura 54. Verificar regiones



Fuente: Autor

Al aceptar, se debe confirmar cada una, mediante la opción de definir las regiones. Se despliega una ventana mostrando una lista de todas las regiones que se verificaron, es muy importante seleccionar las dos casillas que dicen: “crear las regiones”, “crear líneas de separación”, para poder dar aceptar. Como se muestra en la Figura 55.

Figura 55. Definir regiones

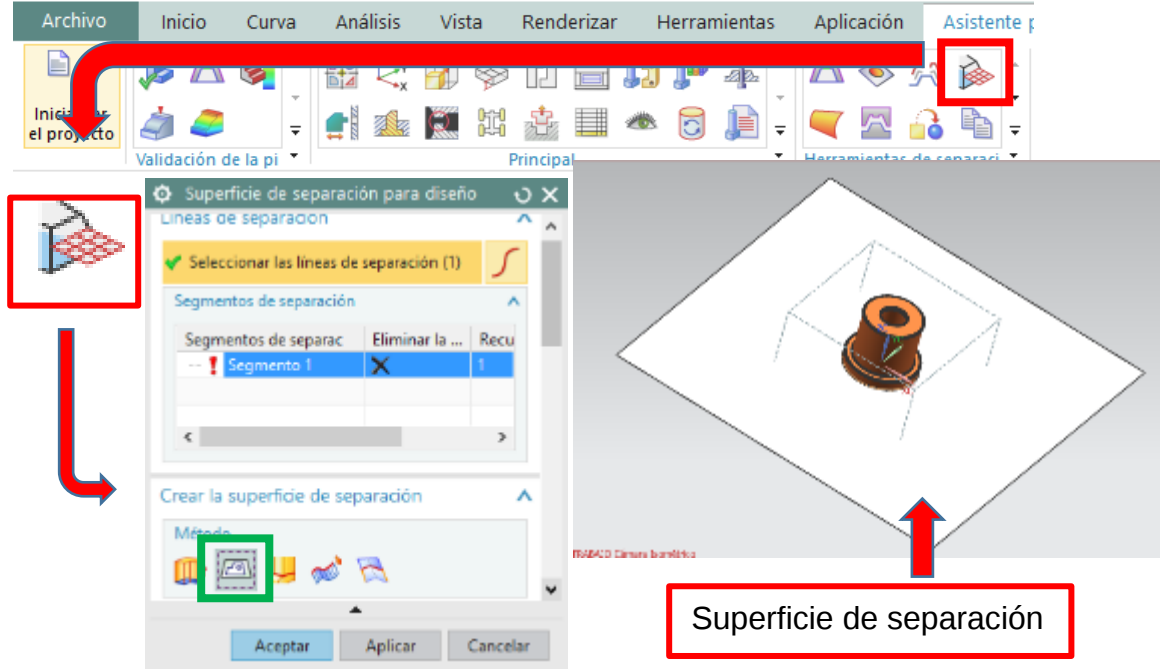


Fuente: Autor

Al definir con éxito las regiones, se crea la superficie de separación. Mediante la opción de superficie de separación para diseño, que se encuentra en la parte superior en el asistente de moldes. Con esta opción se define la superficie de separación correspondiente a la cavidad teniendo en cuenta su región de cavidad (región naranja) y núcleo (región azul).

Para crear esta superficie sin ningún problema, se debe seleccionar la opción “plano limitado”, como se muestra en la Figura 56 con un recuadro verde, que se encuentra dentro de la ventana de superficie de separación para diseño. Al dar aceptar, inmediatamente se genera una superficie de color blanco mostrando que la superficie fue creada con éxito.

Figura 56. superficie de separación para diseño

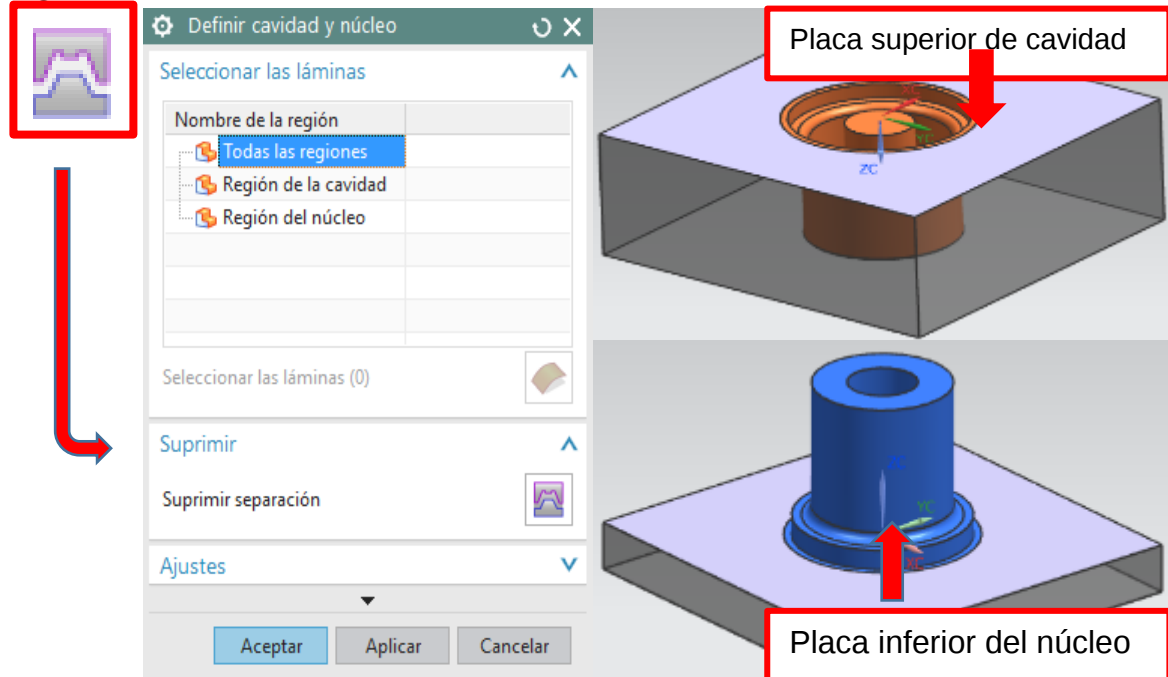


Fuente: Autor

Ahora se utilizará la opción definir cavidad y núcleo, esta herramienta sirve para definir las dos placas de separación entre la cavidad y el núcleo[13]. Como se observa en la Figura 57, se generan dos placas que al unirlas forman la cavidad o pieza que se necesita para el molde de inyección.

Para generar las placas se debe seleccionar la herramienta ya mencionada y oprimir la opción todas las regiones, luego de oprimir se generará las dos placas.

Figura 57. Placas de separación

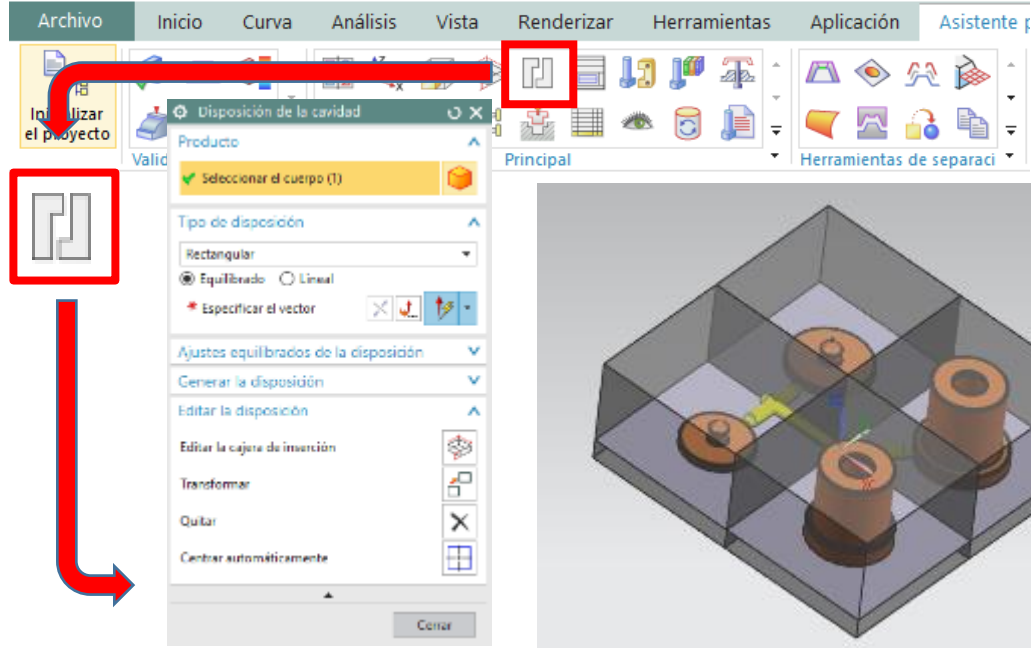


Fuente: Autor

El paso anterior de definir las dos placas, es la última etapa que se hace para que el programa acepte o identifique la pieza como cavidad con sus respectivas regiones y placas. Ahora bien, se deben agregar los demás modelados para ser identificados por NX 12, la manera que se agregan las demás piezas se hace de la misma forma que se muestra de la Figura 50 hasta la Figura 57.

Luego de agregar todas las 4 cavidades se debe dar una ubicación a cada una, mediante la herramienta de "Disposición de la cavidad". Esta herramienta permite trasladar, centrar y quitar volúmenes de trabajo dependiendo la distribución de las cavidades. Se seleccionó las distribuciones mostradas en la Figura 42, mediante las herramientas "Disposición de la cavidad" se ubicaron las cavidades en su respectivo orden. Como se muestra en la Figura 58.

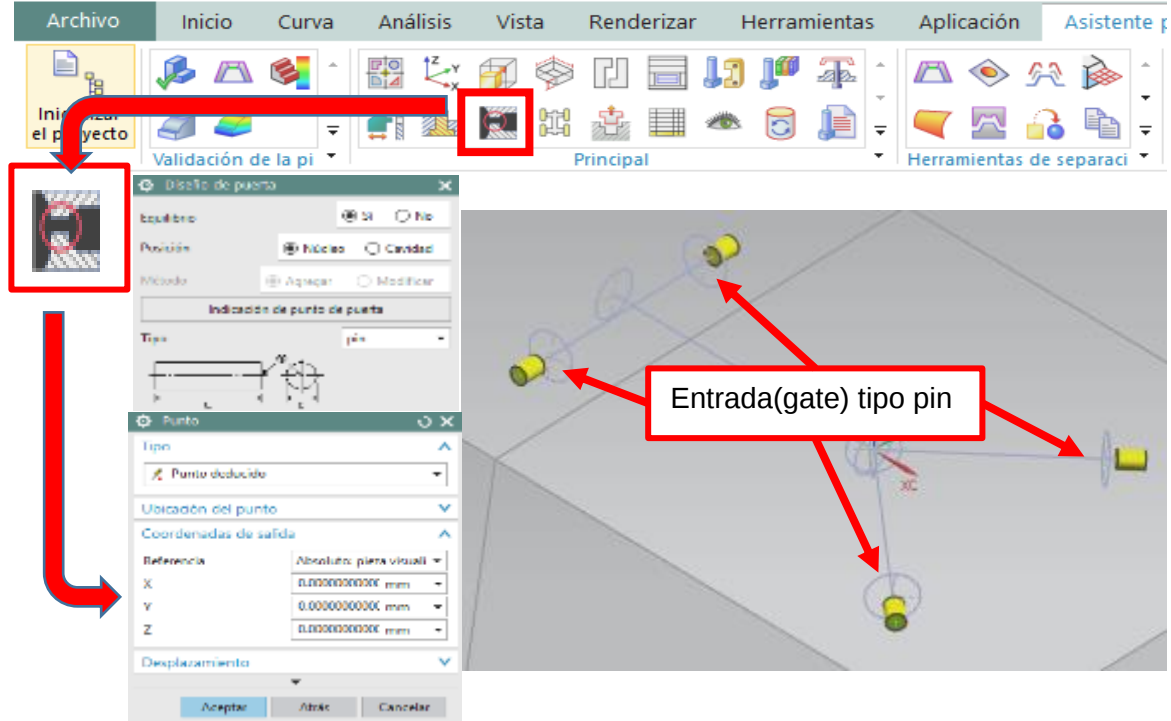
Figura 58. Orden de las Cavidades Alternativa 2



Fuente: Autor

Luego de ubicar cada cavidad en su posición, se crea la entrada (*gate*) a cada cavidad. Con la herramienta “Biblioteca del módulo de entrada”, al elegir esta herramienta se despliega una ventana con diferentes opciones de entrada (*gate*), se selecciona el tipo de entrada, que en este caso es pin con su respectiva coordenada. Como se muestra en la Figura 59.

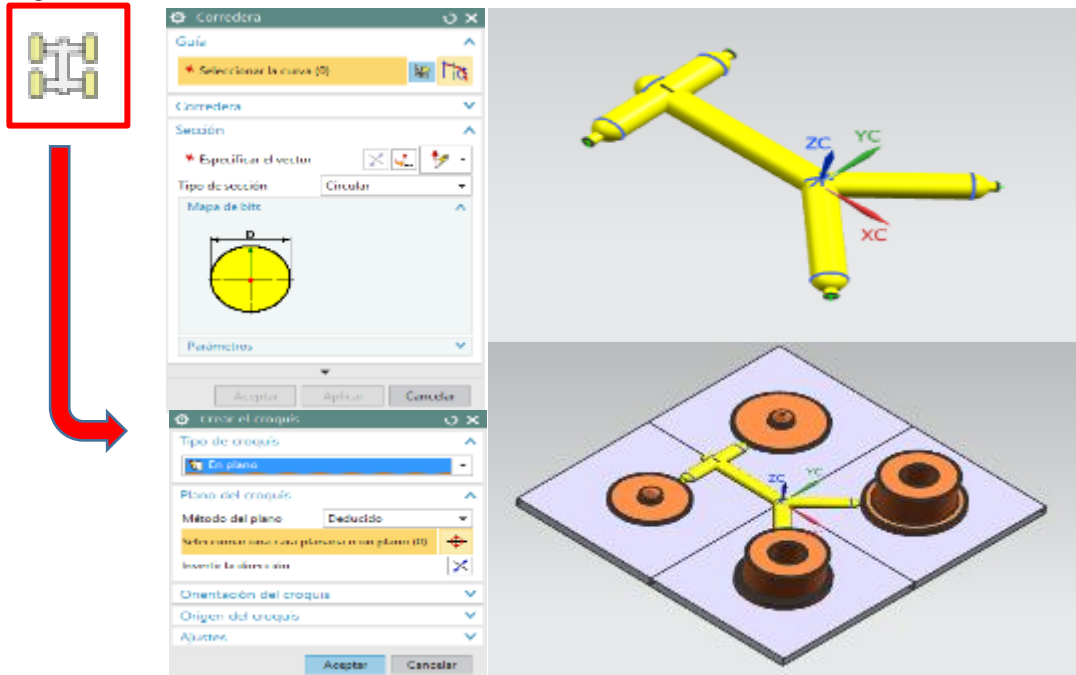
Figura 59. Creación de entradas (gate)



Fuente: Autor

Después de crear las entradas (gate) de las cavidades, se utiliza la herramienta de “corredera”, sirve para crear la trayectoria que trasladan el fluido fundido para llenar las cavidades. Se hace mediante un boceto, el cual se dibuja una línea que indica la trayectoria o distribución de canales seleccionada, luego se escoge la forma de la sección transversal que en este caso es circular. Como se observa en la Figura 60.

Figura 60. Creación de distribución de canales

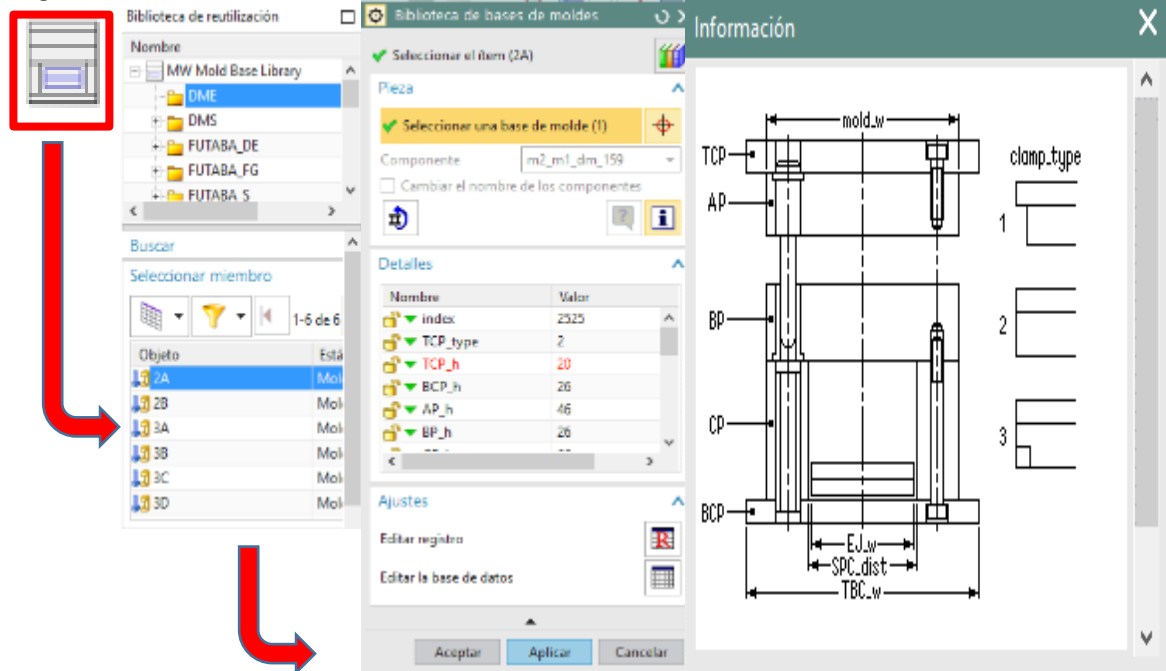


Fuente: Autor

Por último, se usa la herramienta “Biblioteca de bases de moldes”, en pocas palabras es la ayuda para crear moldes en el programa NX 12, el cual muestra una variedad de tipos de moldes. Se seleccionó el molde DME, que consiste en un molde de 3 placas y es empleado en la empresa FRIPARTS.

Al elegir el molde DME, el programa automáticamente se acopla a la distribución de cavidades y canales ya creadas con anterioridad. Arrojando las dimensiones propias del molde, como se muestra en la Figura 61.

Figura 61. Selección del molde DME

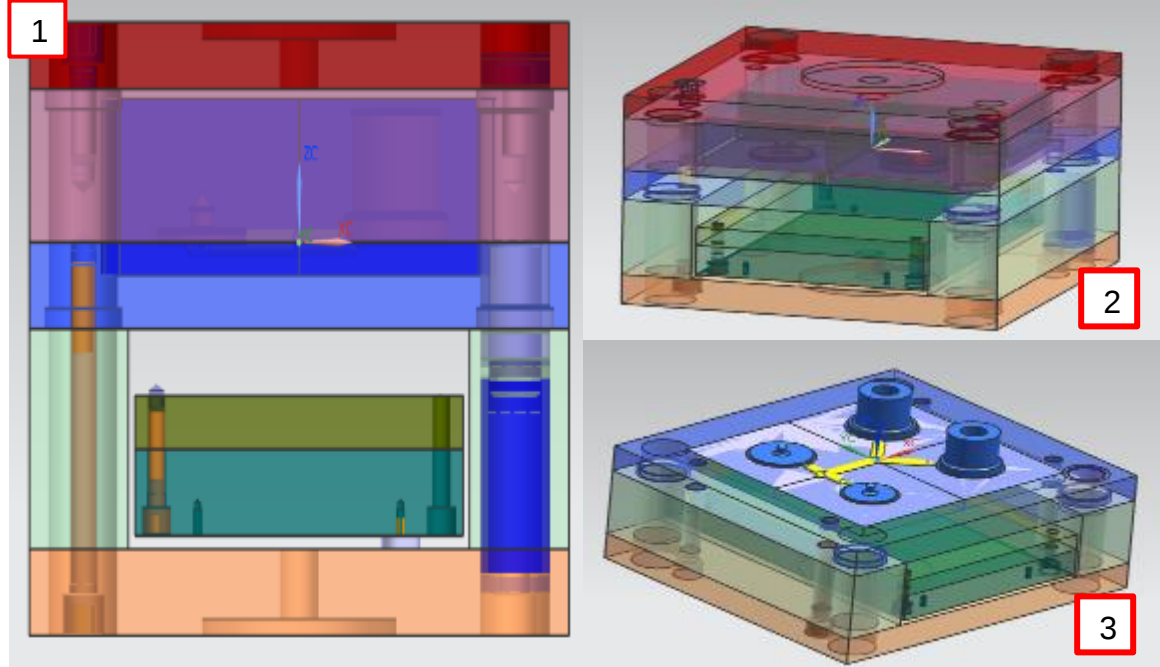


Fuente: Autor

En la imagen 1 de la Figura 62, la placa azul es la que contiene la placa inferior del núcleo, la placa rosa es la que esta tallada la placa de la cavidad y la placa roja es la que contiene el anillo de posicionamiento y el bebedero. La imagen 3 de la Figura 62, se muestra el molde de inyección sin las placas superiores, exponiendo la placa del núcleo.

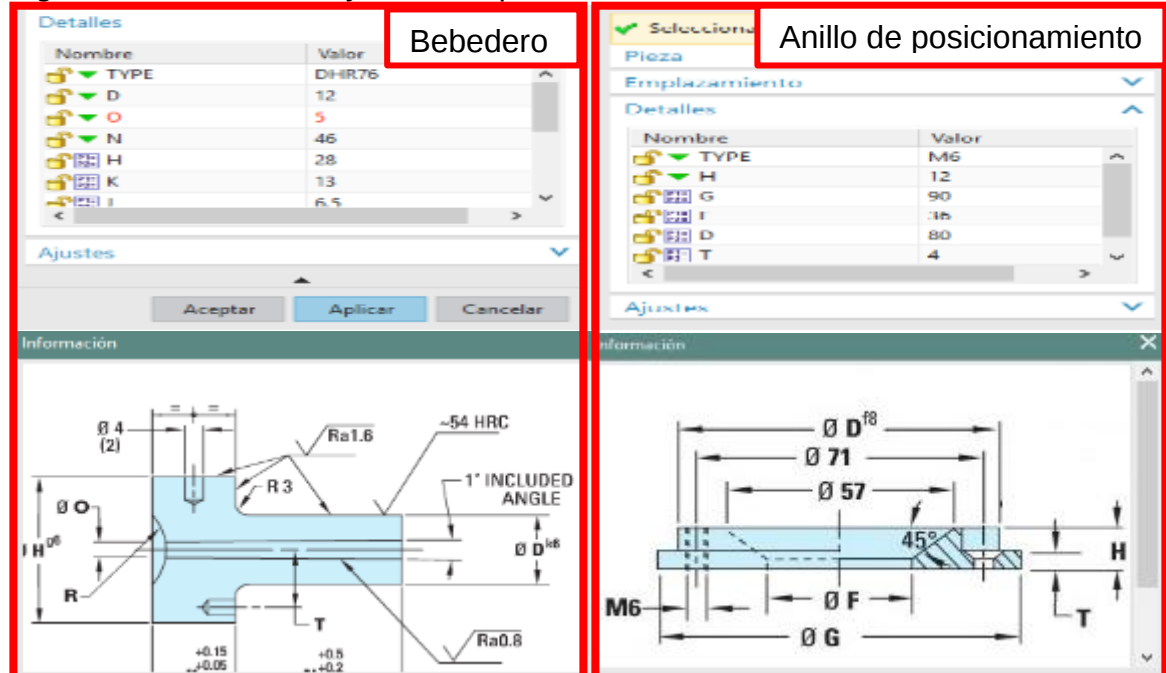
Para finalizar esta etapa se seleccionó el bebedero y el anillo de posicionamiento. Como se observa en la Figura 63, las dimensiones del bebedero son de 5 mm en el inicio y el final de 8 mm de diámetro, una longitud de 45 (mm). El diámetro del anillo de posicionamiento es de 90 (mm).

Figura 62. Molde DME



Fuente: Autor

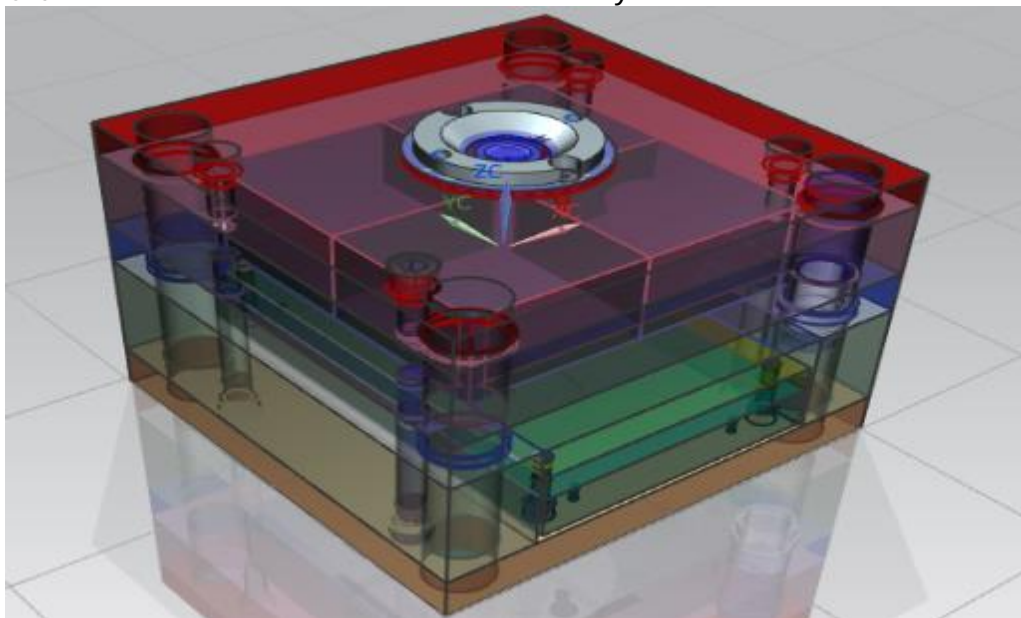
Figura 63. Bebedero y anillo de posicionamiento



Fuente: Autor

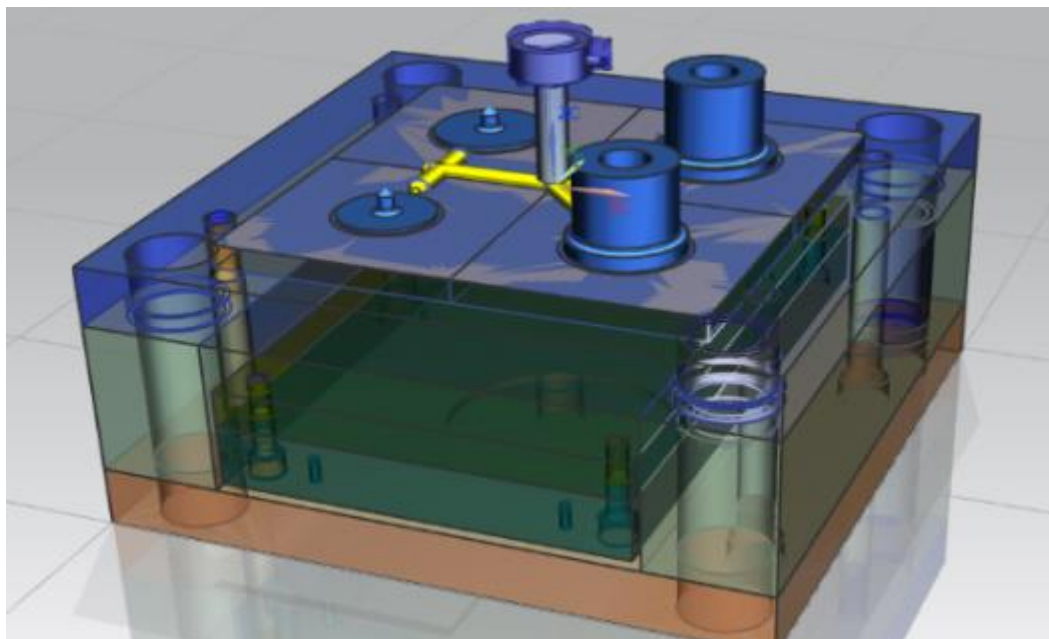
En la Figura 64 y la Figura 65, se mostró un renderizado del molde de inyección ya terminado utilizando el acelerador de moldes de NX 12.

Figura 64. Visualización final del molde de inyección



Fuente: Autor

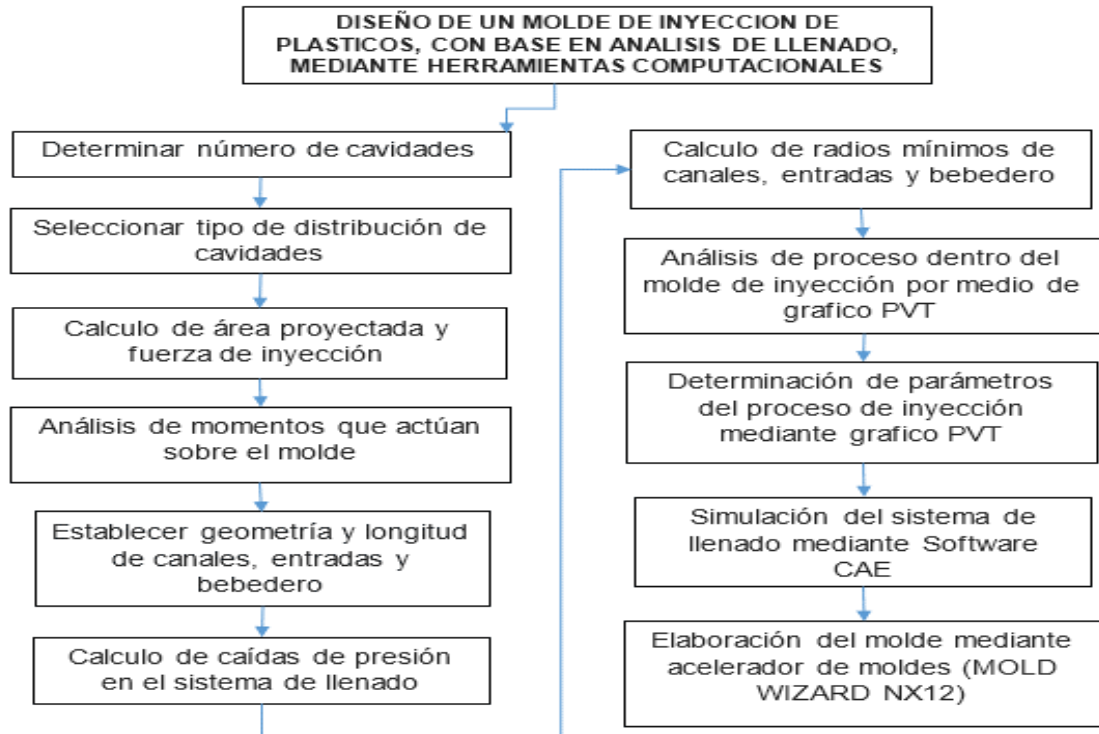
Figura 65. Visualización final del molde de inyección sin la parte superior



Fuente: Autor

7.1 FLUJOGRAMA PARA DISEÑO DE MOLDE MEDIANTE ANÁLISIS DE LLENADO, CON HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES.

Figura 66. Flujoograma para diseño de moldes.



Fuente: Autor

7.2 CONCLUSIONES

- Se logró implementar el acelerador de moldes del software NX12 para así reducir tiempo en el diseño de moldes de inyección.
- La implementación del complemento Mold Wizard de NX12 es una herramienta que contribuye en el diseño de moldes de inyección, reduciendo errores de manufactura y sobre costos debido al mal diseño.
- Con la utilización software CAD/CAM/CAE como lo es NX, en el diseño de moldes se evidencia que es algo necesario en las industrias colombianas que fabrican
- El diseño de moldes mediante Mold Wizard puede ser implementado en cualquier tipo de empresa debido a su potencial y precisión.
- El uso de un acelerador de diseño no sustituye los conocimientos que se deben tener en cuenta en el diseño de moldes.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Laboratorio de producción Facultad de ingeniería Industrial, “Plásticos-protocolo - Curso de procesos de manufactura,” *Esc. Colomb. Ing.*, p. 29, 2007.
- [2] D. O. Kazmer, *Injection Mold Design Engineering*, Second. Munich: Hanser Publisher, 2016.
- [3] A. Guarín and G. J. Páramo, “Estudio del estado del moldes de inyección en Colombia,” *Rev. Univ. EAFIT*, no. 128, pp. 53–66, 2002.
- [4] J. Davis, “Creativity with NX Mold Wizard,” 2008.
- [5] M. V. Candal, “Integración CAD/CAE/CAM-PR en la optimización del diseño de productos plásticos,” *Red Univ. Los Andes*, p. 12, 2005.
- [6] M. Beltrán and A. Marcilla, “Tema 5. Inyección,” *Tecnol. polímeros*, no. Ciencias, p. 276, 2011.
- [7] P. H. Kauffer, *Injection Molding: Process, Design, and Applications*. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011.
- [8] D. Kumar, P. N. Rao, and G. S. Dangayach, “An Investigation on Optimization of Parameters for Injection Molded Polypropylene – Marble Composites with Multi Objective Genetic Algorithm,” *Mech. Eng. Dep. Malaviya Natl. Inst. Technol. Jaipur, India*, pp. 1–6, 2016.
- [9] T. Wu, K. Liu, and A. Tovar, “Multiphase topology optimization of lattice injection molds,” *Comput. Struct.*, vol. 192, pp. 71–82, 2017.
- [10] B. Chouychai, R. Manthung, S. Sricharoen, T. Morawong, and A. I. M. Process, “Heuristic Optimization for Gate Location in Injection Molding Using Gaussian Curvature of NURBS,” *King Mongkut’s Univ. Technol. North Bangkok Rayong Campus, Rayong, Thail.*, 2016.
- [11] Menges-Mohre, “Moldes para inyeccion de plasticos.” Mexico, p. 215, 1983.
- [12] European Business Management, “Elastómeros de poliuretano termoplástico,” *BASF Polyurethanes GmbH*, 2010.
- [13] S. A. R. Ariza, “ELABORACION DE MATERIAL GUIA PARA EL DISEÑO DE MOLDES DE INYECCION MEDIANTE EL MODULO ‘MOLD WIZARD’ DE UNIGRAPHICS N7,” Universidad Santo Tomas, 2010.