



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

**CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS**

TESIS

**DISEÑO DE MOLDE PARA INYECCIÓN DE
PROBETAS DE PC+ABS CUMPLIENDO
LA NORMA ASTM D3641**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

ING. JORGE ELIECER BENITEZ PRADA

DIRECTORES:
**DR. EDUARDO AGUILERA GÓMEZ
DR. JUAN FRANCISCO REVELES ARREDONDO**

SALAMANCA, GUANAJUATO

JULIO, 2018

Contenido

Agradecimientos	IV
Lista de figuras	VIII
Lista de tablas	IX
Resumen	X
Abstract	XI
1. MOLDEO POR INYECCIÓN DE PLÁSTICOS	1
1.1. Introducción	1
1.2. Evolución del proceso de inyección de plásticos	2
1.3. Proceso de inyección de plástico	4
1.3.1. Máquina inyectora	4
1.3.2. Tipos de máquinas inyectoras	6
1.3.2.1. Máquina de émbolo (o pistón)	6
1.3.2.2. Máquina preplastificadora de tornillo o máquina de dos etapas	7
1.3.2.3. Máquina de tornillo reciprocante	8
1.4. Defectos en el proceso de moldeo por inyección	9
1.5. Ventajas del proceso de moldeo por inyección	10
1.6. Molde de inyección	11
1.6.1. Sistema de distribución	12
1.6.2. Sistema de enfriamiento	15
1.6.3. Sistema de eyección	18
1.6.4. Sistema de ventilación	18
1.6.5. Diseño de moldes de inyección	20
2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	21
2.1. Antecedentes	21
2.2. Justificación	22
2.3. Objetivo	23
2.3.1. Objetivos específicos	23
2.4. Definición del problema	24
2.4.1. Estrategia de solución	24
2.5. Resultados esperados	26
3. ANÁLISIS POR INTERACCIÓN FLUIDO ESTRUCTURAL DEL PROCESO DE MOLDEO POR INYECCIÓN	27
3.1. Introducción	27
3.2. Simulación de la fase de inyección	28
3.3. Simulación de la fase de solidificación	45
3.4. Simulación por interacción fluido estructural FSI	54

4. DISEÑO DEL MOLDE CON CAVIDADES DE PROBETAS PARA ENSAYOS DE TENSIÓN	59
4.1. Dimensionamiento de las probetas para pruebas de tensión según la norma ASTM D638	60
4.2. Dimensionamiento del molde según la norma ASTM D3641	63
4.2.1. Disposición de la cavidad	63
4.2.2. Corredores	64
4.2.3. Compuertas	65
4.2.4. Cavidades	66
4.2.5. Pasadores eyectores	67
4.2.6. Canales de enfriamiento	67
5. CONCLUSIONES	69
Referencias	73

Agradecimientos

En primer lugar, a Dios, Por darme la oportunidad de vivir y acompañarme en cada paso que doy, por guiarme a lo largo de mi carrera, por fortalecerme en los momentos de debilidad e iluminar mi mente, por darme salud para lograr mis objetivos, por haberme permitido llegar hasta este punto y sobre todo por permitirme gozar de tranquilidad y felicidad en mi vida.

A mi madre María Prada, por darme la vida, por su incondicional apoyo en todo momento, por ser pilar fundamental en todo lo que soy, por los valores inculcados, por la motivación constante, por creer en mí, por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación para mí futuro, pero más que nada, por su amor.

A mi novia Julet Méndez, por estar a mi lado brindándome la mejor de las compañías, por apoyarme en las buenas y en las malas, por vivir junto a mi cada decisión que tomo, por su paciencia y dedicación, por su amor incondicional y porque gracias a todo esto hoy puedo con alegría presentar y disfrutar a su lado esta tesis.

A mi tío Carlos Benítez, su esposa e hijos, quienes son mi gran ejemplo de un hermoso hogar, por preocuparse por mí de manera desinteresada, por siempre creer en mis capacidades y permitirme de igual manera creer que todo es posible con suficiente esfuerzo y dedicación.

A mis familiares, que sin importar el poco tiempo que he compartido con todos y sin importar las distancias, siempre me tienen presente y han intentado aportar directamente o indirectamente, siempre en pro de mi bienestar.

A la División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca DICIS, por su acogida, por el esfuerzo de formar seres humanos comprometidos con la transformación tecnológica, económica y social, por impulsar y promover el desarrollo científico y tecnológico al más alto nivel y por todo el apoyo recibido durante los dos años de mi maestría en ingeniería mecánica.

Al Dr. José Manuel Riesco Ávila, coordinador del posgrado, por la confianza depositada al postularme para recibir la beca CONACYT, con la cual fue posible culminar esta meta, y quien aparte de cumplir con sus funciones de manera excepcional, me brindo a mí y mis compañeros su amistad, atención e incansable apoyo.

Al Dr. Eduardo Aguilera Gómez y al Dr. Juan Francisco Reveles Arredondo, por permitirme trabajar a su lado durante este proyecto, por brindarme sus conocimientos, por enriquecer mi trabajo con sus aportes, por facilitar todas las condiciones para lograr culminar en tiempo y forma, gracias por sus consejos, su tiempo, su comprensión y por permitirme aprender en lo personal y lo profesional siendo su asesorado.

Al grupo de investigación en plásticos, por la colaboración de todos sus integrantes, por su constante seguimiento, por sus opiniones, por sus conocimientos, en especial agradezco al Dr.

Héctor Plascencia Mora y al futuro Dr. Jorge Jurado, por su tiempo y valiosos aportes.

Finalmente, gracias a México, a mis amigos y a mis mascotas que hicieron parte importante de mi día a día durante esta etapa que hoy culmino con éxito.

JORGE ELIECER BENITEZ PRADA

Lista de figuras

1.1.	Ciclo común de moldeo	1
1.2.	Variedad de productos plásticos	3
1.3.	Unidades de una máquina inyectora	4
1.4.	Diagrama básico de una máquina inyectora del tipo tornillo recíprocante	5
1.5.	Ejemplo de sujeción de palanca	5
1.6.	Sujeción hidráulica.	6
1.7.	Máquina de inyección de tipo émbolo	6
1.8.	Máquina preplastificadora de tornillo o máquina de dos etapas	7
1.9.	Vista de corte de una máquina de tornillo recíprocante	8
1.10.	Válvula de retención	8
1.11.	Moldeo con defecto de disparo corto	9
1.12.	Moldeo con defecto de rebaba	9
1.13.	Moldeo con defecto de línea de soldadura	9
1.14.	Moldeo con defecto de hundimiento	10
1.15.	Componentes de un molde de inyección	11
1.16.	Detalles de un molde de dos placas para moldeo por inyección	11
1.17.	Sistema de distribución	12
1.18.	Corredores a) balanceados b) no balanceados	13
1.19.	Tipos de sección transversal de corredores	13
1.20.	Comparación de la presión ejercida sobre las moléculas por una sección transversal circular y una sección no circular	14
1.21.	Representación de los canales de enfriamiento	15
1.22.	Diagrama del ciclo de moldeo por inyección	16
1.23.	Dimensionamiento de los canales de enfriamiento	17
1.24.	Tipos de arreglos de los canales de enfriamiento	17
1.25.	Sistema de eyección para molde de inyección	18
1.26.	Sistema de ventilación para molde de inyección	19
2.1.	Proceso convencional de producción por inyección	22
2.2.	Proceso mejorado de producción por inyección	23
3.1.	Modelo FSI para el proceso de inyección de plásticos dentro de Ansys workbench®	28
3.2.	Geometría de las cavidades de las probetas generadas mediante Solidworks®	28
3.3.	Parámetros de procesabilidad del material proporcionados por el fabricante	29
3.4.	Geometría de las cavidades de las probetas digitalizada	30
3.5.	Tipos de elementos para mallado en el módulo de Fluent®	30
3.6.	Malla generada en Fluent® de las cavidades de las probetas digitalizadas	31
3.7.	Calidad ortogonal de los elementos de la malla en Fluent® de la geometría digitalizada	31
3.8.	Malla generada en Fluent® de las cavidades de las probetas generada en Solidworks	32

3.9. Calidad ortogonal de los elementos de la malla en Fluent® de las cavidades de las probetas propuestas	32
3.10. Condiciones de frontera para las geometrías de estudio	33
3.11. Comportamiento No-Newtoniano	34
3.12. Comportamiento de la viscosidad con respecto a la velocidad de corte, para varias temperaturas	35
3.13. Fase del polímero al inicio y final de la simulación de la geometría digitalizada en Fluent®	35
3.14. Fase del polímero al inicio y final de la simulación de la geometría propuesta en Fluent®	36
3.15. Seguimiento del frente de flujo a través del tiempo para Moldflow Adviser 2017 R2® y Fluent® de la geometría digitalizada	38
3.16. Seguimiento del frente de flujo a través del tiempo para Moldflow Adviser 2017 R2® y Fluent® de la geometría propuesta	40
3.17. Resultados para la presión de inyección en la geometría digitalizada	42
3.18. Resultados para la presión de inyección en la geometría propuesta	43
3.19. Resultado de las velocidades en el llenado de las cavidades de la geometría propuesta en Fluent®	44
3.20. Resultado de las temperaturas en el llenado de las cavidades de la geometría propuesta en Fluent®	44
3.21. Variación del calor específico en función de la temperatura para el PC+ABS Moldflow Adviser 2017 R2®	45
3.22. Variación del volumen específico en función de la temperatura para el PC+ABS Moldflow Adviser 2017 R2®	46
3.23. Variación de la entalpía específica en función de la temperatura para el PC+ABS	47
3.24. Modelo CAD del molde de inyección de probetas para pruebas de tensión	47
3.25. Condiciones de frontera térmicas en el molde de inyección	48
3.26. Resultados de la simulación de la fase de solidificación a través del tiempo	51
3.27. Resultados de la solidificación para los puntos de prueba dentro de la geometría de las probetas	52
3.28. Ubicación puntos de prueba en la geometría de las probetas	52
3.29. Secciones transversales de la ubicación de los puntos de prueba	54
3.30. Análisis fluido estructural FSI para el proceso de inyección de plásticos dentro de Ansys Workbench®	54
3.31. Restricciones de movimiento para el análisis fluido estructural FSI	55
3.32. Resultados importados por el análisis fluido estructural FSI	56
3.33. Resultado de la fuerza de reacción necesaria para mantener el molde cerrado	56
3.34. Esfuerzos de Von Mises para la boquilla del molde de inyección	57
3.35. Esfuerzos de Von Mises para la placa fija del molde de inyección	57
3.36. Esfuerzos de Von Mises para el positivo del molde de inyección	58
3.37. Esfuerzos de Von Mises para el negativo del molde de inyección	58
4.1. Configuración geométrica para probetas de tensión según la norma ASTM D638	60
4.2. Sección transversal típica de una probeta tipo I moldeada por inyección	61
4.3. Perfil creado por medio de Solidworks® para una probeta tipo I según la norma ASTM D638 (cotas en pulgadas)	61
4.4. Sección transversal típica cumpliendo la norma ASTM D638 de la probeta generada mediante Solidworks® (cotas en pulgadas)	62
4.5. Vista isométrica probeta tipo I generada mediante Solidworks®	62
4.6. Disposición probable de las cavidades según la norma ASTM D3641	63

4.7. Disposición de la cavidad generada por medio de Solidworks®	64
4.8. Sección transversal tipo Trapezoidal modificado generada para las probetas por medio de Solidworks®(cotas en pulgadas)	64
4.9. Ángulo de inclinación seleccionado para corredor tipo trapezoidal (cotas en pulgadas)	65
4.10. Diámetro del bebedero, lado boquilla (cotas en pulgadas)	65
4.11. Dimensiones de la compuerta generada por medio de Solidworks®(cotas en pulgadas)	66
4.12. Ángulo de desmoldeo generado por medio de Solidworks®	66
4.13. Ubicación seleccionada para los pasadores de eyección	67
4.14. Dimensiones de los canales de enfriamiento generados en Solidworks®	67
4.15. Tipo de arreglo paralelo para los canales de enfriamiento generados en Solidworks®	68
4.16. Molde de inyección de probetas para pruebas de tensión	68

Lista de tablas

1.1. Evolución del moldeo por inyección	3
1.2. Funciones de los componentes de un molde de inyección	12
1.3. Tipos de compuertas	15
1.4. Dimensionamiento de los canales de enfriamiento	16
1.5. Dimensionamiento recomendado para el sistema de ventilación según el material inyectado	19
3.1. Parámetros de procesabilidad del material encontrados en Moldflow adviser 2017 R2 y Moldex3d	29
3.2. Composición de la malla en la geometría digitalizada	31
3.3. Composición de la malla en la geometría generada en Solidworks®	32
3.4. Esfuerzo máximo y factor de seguridad para cada componente del molde de inyección	58

Resumen

Se muestra un camino alternativo para el diseño de moldes de inyección de plásticos, auxiliándose de un análisis por interacción fluido-estructura (FSI por sus siglas en inglés). Se utilizó como ejemplo el caso básico del diseño de un molde para inyección de probetas para pruebas de tensión que sigue la Norma ASTM D638. Para el diseño del molde se siguió la Norma ASTM D3641 y el material a inyectar fue una mezcla de PC+ABS (70-30 %).

Se utilizaron los módulos de Fluent® , “transient thermal” y “static structural” del paquete de cómputo Ansys Workbench®, para simular las fases de inyección, solidificación y desarrollar un análisis estructural del molde. Se lograron obtener resultados del frente de flujo, presión de inyección, perfiles de velocidades durante la inyección; distribución de temperaturas en el molde y la pieza en la solidificación, tiempo necesario para la expulsión y esfuerzos que debe soportar el molde teniendo en cuenta todos los efectos de cada una de las fases del proceso. Los resultados permiten prever la calidad del diseño antes de realizar la construcción del molde y la producción de las probetas, de esta manera se evitan reprocesos de manufactura en el molde y defectos no deseados del producto.

Comparado con el proceso de producción actual en el cual la mayor cantidad de decisiones son tomadas posterior a la construcción del molde, desarrollándolo a prueba y error donde el diseño final no cuenta con ninguna garantía de que dicho molde ya construido se pueda ajustar y utilizar o sea necesario desecharlo por completo. Este trabajo propone una metodología un poco más compleja pero eficaz a la hora de diseñar un molde de inyección que cumpla las condiciones de trabajo esperadas y una pieza final con la reducción de la mayor cantidad de defectos posibles.

Abstract

An alternative path to design plastic injection molds is shown, assisted by a fluid structure interaction analyses (FSI). A basic case of a mold design for injection of test pieces for stress testing following the standard ASTM D638 was used as an example. The standard ASTM D3641 was used to design the mold and the material used was a mixture of PC+ABS (70 %-30 %).

Fluent TM, Transient thermal and Static structural modules from the computing package Ansys Workbench TM were used, to simulate injection, solidification and mold development phases. Results about fluid front, injection pressure and speed profiles during injection were obtained; temperature distribution on the mold, the solidification piece, required time to extraction and stresses supported by the mold considering all the effects of each one of the process phases. Results allow to preview design quality before mold construction and test pieces production, with this manufacturing reworking and not desired defects are avoided.

Compared with the current production process in which most decisions are taken after the mold construction, that is developed by trial and error process, and where the final design does not count with any warranty that this mold can be adjusted and used, or it is needed to completely throw it away. This work suggests a more complex but effective methodology to design a mold with all the expected work conditions and a final piece without the higher amount of possible defects.

Capítulo 1

MOLDEO POR INYECCIÓN DE PLÁSTICOS

1.1. Introducción

El moldeo por inyección es un proceso de manufactura semicontinuo por medio del cual se calienta un polímero por encima de su temperatura de transición, hasta alcanzar un estado de fluidez, para luego forzarlo a alta presión dentro de la cavidad o cavidades de un molde cerrado, en donde el polímero sufre un proceso de enfriamiento alcanzando la solidificación, finalmente se abre el molde y se extrae la pieza. En la Figura 1.1, se muestra un ciclo común de moldeo por inyección.

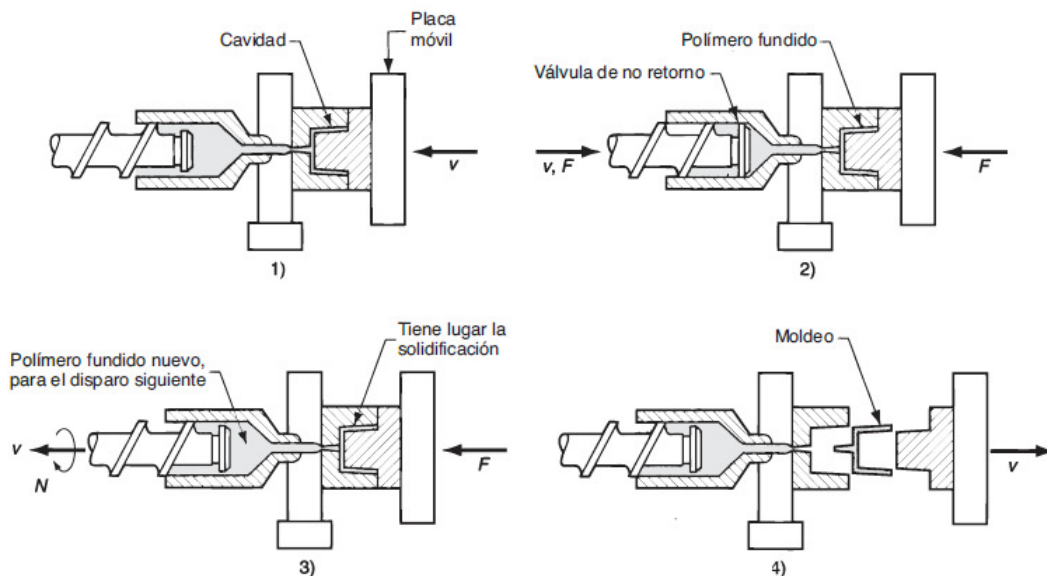


Figura 1.1: Ciclo común de moldeo: 1) Molde cerrado, 2) Se inyecta fluido a la cavidad, 3) Se retrae el tornillo y 4) Se abre el molde y la pieza se expulsa [1].

Un ciclo común de producción de moldeo por inyección dura de 10 a 30 segundos, aunque también existen ciclos que alcanzan un minuto o más. La masa de la pieza varía desde 50g hasta 25Kg; el límite superior se debe a componentes tales como puertas de refrigerador y defensas de autos [1].

1.2. Evolución del proceso de inyección de plásticos

En 1868, John Wesley Hyatt desarrolló un material plástico que llamó celuloide, el celuloide fue inventado en 1851 por Alexander Parkers, pero Hyatt lo mejoró para que dicho material pudiera ser procesado en la forma neta deseada, ganando un concurso creado por un fabricante de bolas de billar que buscaba un sustituto del marfil, el cual se estaba volviendo costoso y difícil de conseguir. Lamentablemente, después de que el premio fue ganado algunas bolas de billar explotaron debido a la inestabilidad y alta inflamabilidad del celuloide, haciendo que fuera necesario un mayor perfeccionamiento antes de que pudiera ser utilizado en empresas comerciales.

Hyatt y su hermano Isaiah dieron nacimiento a la industria del plástico al patentar la primera máquina de moldeo por inyección en 1872, con la cual los hermanos pudieron moldear plástico de celuloide. La máquina era simple, ya que actuaba como una aguja hipodérmica grande y contenía un émbolo básico para inyectar el plástico a través de un cilindro calentado en un molde, abriendo paso a múltiples investigaciones sobre este nuevo proceso de fabricación. Para 1920 la industria del moldeo por inyección había establecido sus bases y había estado creciendo desde entonces.

Durante la década de 1940, la industria del moldeo por inyección obtuvo un gran crecimiento como resultado de la demanda de productos de bajo costo y producción en masa generada por la Segunda Guerra Mundial, lo que llevo al descubrimiento de nuevos materiales para el proceso y avances técnicos que resultaron en aplicaciones cada vez más exitosas.

En 1946, James Hendry comenzó a comercializar su máquina de inyección de tornillo igualmente patentada. Este diseño reemplazó al dispositivo de Hyatt de émbolo convencional y revolucionó el procesamiento de plásticos. Las máquinas de tornillo representan aproximadamente el 95 % de todas las máquinas de inyección en la actualidad. El diseño del tornillo sinfín crea una acción de mezcla en el material creando una mezcla homogeneizada. Después de mezclar el tornillo deja de girar y todo el tornillo empuja hacia delante actuando como un émbolo para inyectar el material en el molde. Otra ventaja del tornillo es la reducción de los requerimientos de energía, al igual que una máquina de émbolo, el cilindro que contiene el plástico para inyección tiene una serie de bandas de calentador eléctrico alrededor del exterior. La función de dichas bandas es calentar y suavizar el plástico, sin embargo, el tornillo crea fricción cuando gira dentro del cilindro y genera calor adicional, por lo que el material también se calienta desde el interior y se requiere menos calor de las bandas para ablandar el plástico.

Aunque es evidente que la máquina de tornillo es la más popular, todavía hay un lugar para la máquina de tipo émbolo. El émbolo no gira, simplemente empuja el material hacia adelante, luego se retrae para el próximo ciclo. También reside dentro de un cilindro calentado por medio de bandas, como no hay rotación, no hay acción de cizalla o mezcla, por lo tanto, el calor es proporcionado únicamente por la bandas de calentador eléctrico, aspectos que pueden ser favorables al momento de generar determinadas características deseadas para ciertos productos; por ejemplo, si se colocan dos materiales de colores, blanco y negro, en el cilindro calentador, la máquina de émbolo dará como resultado una parte moldeada con aspecto marmoleado con remolinos blancos y negros, acabado deseado para productos tales como bases de lámparas o muebles; por otro parte la máquina de tornillo daría como resultado un producto de un solo color gris, debido a su acción mezcladora antes de la inyección.

Desde su nacimiento hasta la actualidad, la industria de moldeo por inyección ha crecido a un ritmo rápido y constante. Ha evolucionado desde la producción de peines y botones hasta el moldeo de productos para diversas industrias tales como: automotriz, médica, aeroespacial, de consumo, juguetes, plomería, empaques y construcción [2]. En la Figura 1.2, se muestran algunos ejemplos de la gran variedad de productos que se obtienen mediante moldeo por inyección.



Figura 1.2: Variedad de productos obtenidos mediante el proceso de moldeo por inyección.

La tabla 1.1 muestra algunas de las fechas más representativas en la evolución de la industria del moldeo por inyección.

Tabla 1.1: Evolución del moldeo por inyección (Modificada de [2]).

1868	Jonh Wesley Hyatt inyecta moldes de bolas de billar de celuloide.
1872	John e Isaiah Hyatt patentan la máquina de moldeo por inyección.
1937	Se fundó la sociedad de la industria del plástico.
1938	Dow inventa poliestireno (sigue siendo uno de los materiales más populares).
1940	La Segunda Guerra Mundial crea una gran demanda de productos de plástico.
1941	Se fundó la sociedad de ingenieros de plásticos.
1942	DME presenta componentes de molde.
1946	James Hendry construye la primera máquina de moldeo por inyección de tornillo.
1955	General Electric comienza a comercializar policarbonato.
1959	DuPont presenta homopolímero de acetal.
1969	Plásticos aterrizan en la luna.
1972	El primer robot de remoción de piezas se instala en una máquina de moldeo.
1979	La producción de plástico supera la producción de acero.
1980	Apple usa acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) en el Apple IIE computadora.
1982	El corazón de plástico JARVIK-7 mantiene vivo a Barney Clark.
1985	Firma japonesa presenta una máquina de moldeo totalmente eléctrica.
1988	Comienza la época del reciclaje de plástico.
1990	Molde de aluminio presentado para el moldeo de producción.
1994	Cincinnati-Milacron vende la primera máquina de moldeo completamente eléctrica en los Estados Unidos.

1.3. Proceso de inyección de plástico

1.3.1. Máquina inyectora

El proceso de inyección de plástico se lleva a cabo en una máquina inyectora o máquina de moldeo por inyección la cual consta de dos unidades principales:

1. Unidad de inyección del plástico
2. Unidad de sujeción

En la actualidad y debido a la evolución de la tecnología, las máquinas inyectoras constan adicionalmente de una unidad de control, e incluso algunos autores también reconocen al molde como una unidad más de dicha máquina, reconociendo su importancia y complejidad a la hora de su diseño y no viéndolo simplemente como una herramienta, ya que es esencial y fundamental en el proceso de moldeo por inyección. En la Figura 1.3, se muestran las unidades que componen una máquina de moldeo por inyección.

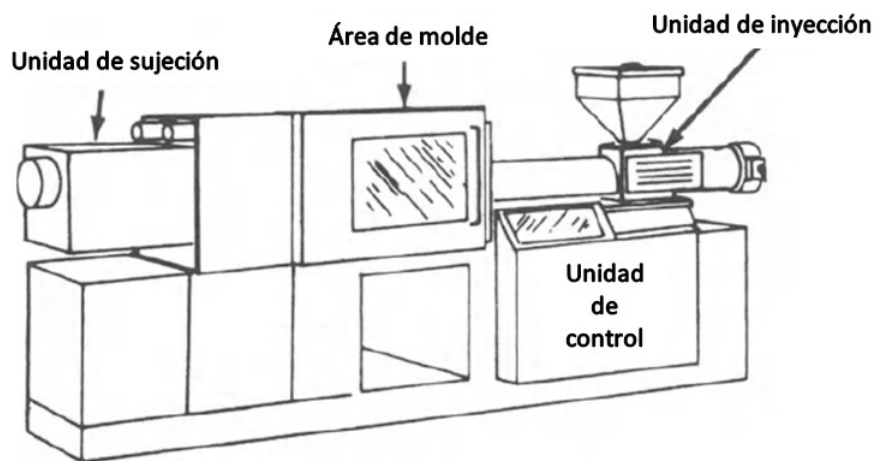


Figura 1.3: Unidades de una máquina inyectora (Modificada de [3]).

La unidad de inyección consiste de un barril con un suministro específico de “pellets” desde la tolva de alimentación. Dentro del barril, dependiendo el tipo de máquina inyectora, existe un émbolo o tornillo recíprocante, su función principal es empujar hacia la boquilla de inyección el plástico mientras se funde por la acción de una serie de calentadores montados alrededor del barril. El tornillo recíprocante además cumple la función de girar para mezclar y generar fricción por la rotación del tornillo con las paredes del barril. Una válvula de retención montada cerca de la punta del tornillo, impide que el polímero fundido fluya hacia atrás. En resumen, las funciones de la unidad de inyección son fundir y homogeneizar el polímero para inyectarlo en la cavidad del molde.

La unidad de sujeción debe realizar diferentes funciones relacionadas estrechamente con el molde para lograr un proceso de inyección satisfactorio:

1. Mantener la dos mitades del molde alineadas correctamente una con otra.
2. Conservar cerrado el molde durante la inyección, por medio de una fuerza de sujeción lo suficientemente grande como para contrarrestar la fuerza de inyección.
3. Abrir y cerrar el molde en los momentos apropiados del ciclo de inyección.

La unidad de sujeción consiste de dos placas, una fija y otra móvil, y un mecanismo para mover ésta. El mecanismo básicamente es una prensa accionada por un pistón hidráulico o dispositivos de palanca mecánica de varios tipos. Las máquinas grandes disponen de fuerzas de cierre de miles de toneladas. En la Figura 1.4 se muestra un diagrama básico de una máquina inyectora del tipo tornillo recíprocante.

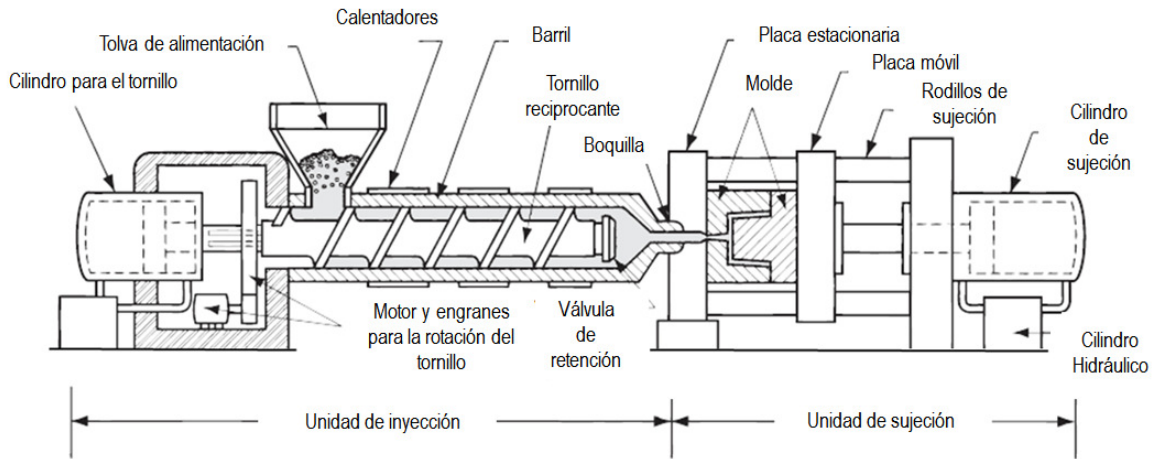


Figura 1.4: Diagrama básico de una máquina inyectora del tipo tornillo recíprocante. (Modificada de [1]).

Los sistemas de sujeción son de tres tipos: de palanca, hidráulico e hidromecánico. La sujeción de palanca incluye varios diseños, uno de los cuales se ilustra en la Figura 1.5, un actuador mueve la cruceta hacia adelante extendiendo los eslabones de palanca para empujar las placas móviles en dirección de la posición cerrada. Al comenzar el movimiento, la ventaja mecánica es poca y la velocidad alta; pero cerca del extremo de la carrera sucede lo contrario. Las sujeciones de palanca proporcionan tanto gran velocidad como fuerza en diferentes puntos del ciclo. Lo anterior es proporcionado por cilindros hidráulicos o tornillos impulsados por motores eléctricos. Las unidades de sujeción de palanca parecen más apropiadas para máquinas de tonelaje relativamente bajo.

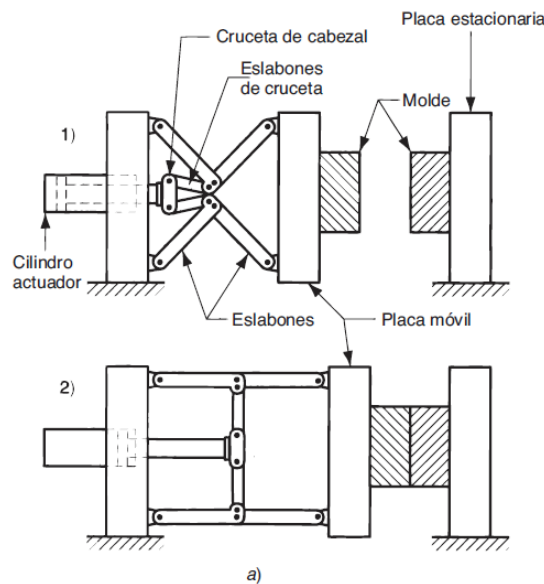


Figura 1.5: Ejemplo de sujeción de palanca: 1) abierta y 2) cerrada. No se muestran los rodillos de sujeción que guían la placa móvil. [1].

La sujeción del tipo hidráulico como la mostrada en la Figura 1.6, se emplea en máquinas de inyección de tonelaje elevado, por lo común en el rango de 1300 a 8900 kN (150 a 1 000 ton). Este tipo de sujeción es más flexible que la sujeción de palanca, en términos de fijar el tonelaje en posiciones dadas durante la carrera. Las sujeciones hidromecánicas están diseñadas para tonelajes grandes, generalmente por arriba de 8900 kN (1000 ton); operan con cilindros hidráulicos para mover con rapidez el molde hacia la posición de cerrado, el cierre de la posición por medios mecánicos y el empleo de cilindros hidráulicos de presión alta para finalmente cerrar el molde.

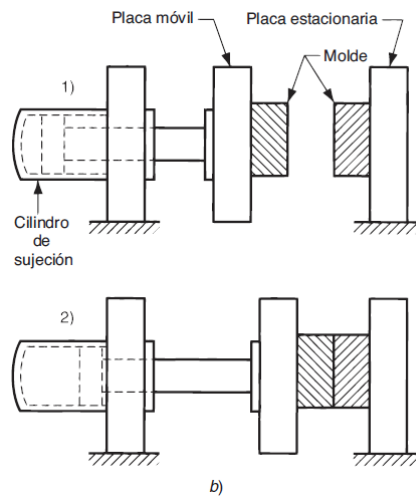


Figura 1.6: Sujeción hidráulica: 1)abierta y 2)cerrada. No se muestran los rodillos de sujeción que guían la placa móvil [1].

1.3.2. Tipos de máquinas inyectoras

Existen dos tipos de máquina de moldeo por inyección: la máquina de émbolo (o pistón) y la máquina de tornillo recíproco. El nombre de la maquina inyectora por lo general se basa en el tipo de unidad de inyección que emplea.

1.3.2.1. Máquina de émbolo (o pistón)

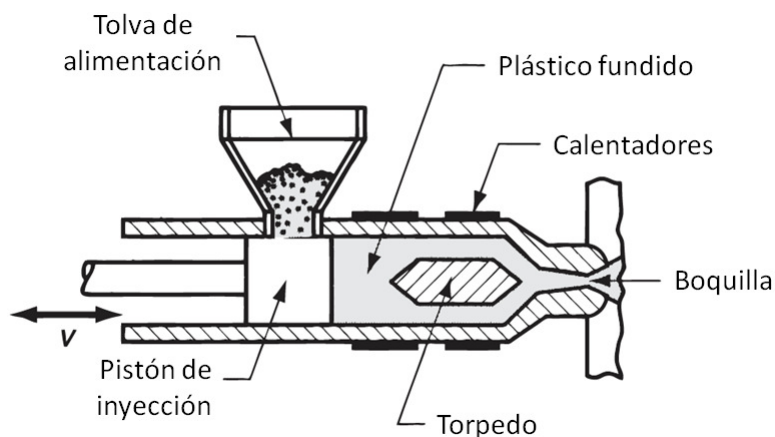


Figura 1.7: Máquina de inyección de tipo émbolo (Modificada de [1]).

La máquina de émbolo utiliza un pistón para forzar el paso del polímero fundido al interior del molde. La máquina de émbolo fue la primera en ser desarrollada, aunque a través de los años a sido sustituida por la máquina de tornillo recíprocante, todavía existen algunas en la actualidad.

El funcionamiento de la máquina de émbolo, permite que una cantidad del material caiga de la tolva de alimentación, a continuación, el émbolo transporta el material a lo largo del barril donde es calentado por conducción por medio de los calentadores eléctricos ubicados alrededor. El material fundido es forzado bajo presión hacia la cavidad del molde. Para dividir la masa de material dentro del barril y mejorar la transferencia de calor, se ubica un torpedo en su centro que obliga a pasar el material plástico por un par de rendijas de menor tamaño mejorando la plastificación de cada una de las partes de la masa total. Como se muestra en la Figura 1.7.

Desventajas de la máquina inyectora tipo émbolo:

1. Hay una deficiente mezcla y homogeneización del polímero fundido.
2. El proceso tiene mayor gasto energético ya que el polímero se funde únicamente por la acción de los calentadores eléctricos.
3. Es difícil medir con exactitud la cantidad de material en cada ciclo de moldeo, ya que la dosificación se realiza en volumen, cualquier variación de la densidad del material alterará el peso cada vez que se desplaza el émbolo.
4. Puesto que el émbolo comprime al material y éste se presenta de varias formas, cambiando desde gránulos sólidos a un fundido viscoso, la presión en la boquilla puede variar de forma considerable de un ciclo a otro.
5. La presencia de un torpedo causa una caída significativa de presión.
6. Las propiedades de flujo del polímero fundido dependen de la presión y como esta es errática, se incrementa la variabilidad de llenado del molde [4].

1.3.2.2. Máquina preplastificadora de tornillo o máquina de dos etapas

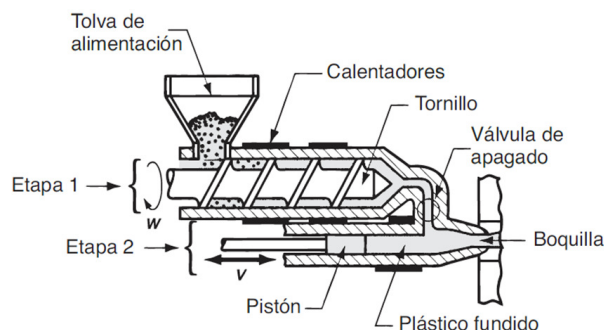


Figura 1.8: Máquina preplastificadora de tornillo o máquina de dos etapas (Modificada de [1]).

En busca de eliminar algunas de las desventajas de la máquina inyectora de émbolo, se creó una etapa previa de plastificación del material. Este tipo de máquina posee dos barriles, como se puede observar en la Figura 1.8. El material se alimenta en la primera etapa donde un extrusor con tornillo plastifica el material y luego lo alimenta al segundo barril a través de una válvula de no retorno. A continuación en el segundo barril, el émbolo fuerza el material hacia

la cavidad del molde de manera similar a una máquina de tipo pistón de una sola etapa, ya sin la necesidad del torpedo. En este sistema se resuelve el problema de homogeneizar el material y es posible controlar la cantidad de material con más exactitud.

Esta máquina se utiliza raramente debido a que es considerablemente más complicada y cara de lo necesario, sin embargo, esta máquina es utilizada para procesos donde es requerida una gran cantidad de volumen de material plastificado para la obtención de piezas grandes (moldes grandes).

1.3.2.3. Máquina de tornillo recíprocante

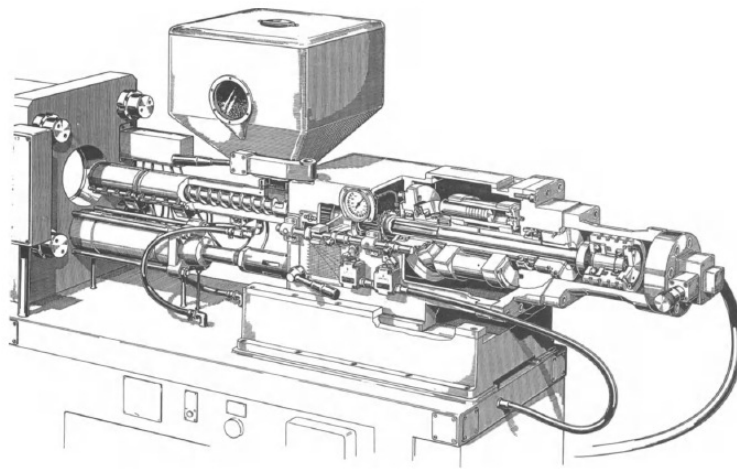


Figura 1.9: Vista de corte de una máquina de tornillo recíprocante [3].

En este tipo de máquina (Figura 1.9) se utiliza un tornillo de extrusión que transporta y mezcla el polímero fundido para ser inyectado en el interior del molde. El extremo de salida del tornillo se encuentra sellado por una válvula de retención, acumulando una carga de material plástico adelante al moverse hacia atrás en contra del frente de presión. Cuando se completa esta etapa, abre la válvula de retención, el tornillo detiene su giro y se le aplica presión convirtiéndolo en un émbolo mecánico o pistón que impulsa el material fundido acumulado a través de la boquilla que conecta con el molde. De esta manera se completa la etapa de inyección del proceso. En la Figura 1.10 se observa como opera la válvula de retención.

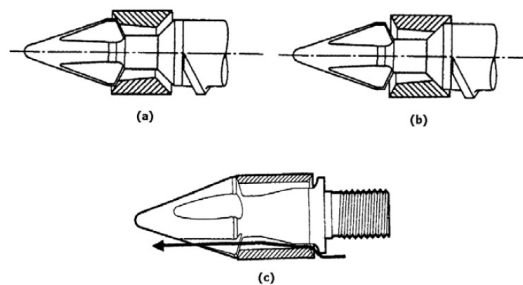


Figura 1.10: Válvula de retención (a) Posición de la válvula para permitir el paso de plástico, (b) Posición de la válvula para que el plástico no regrese, y (c) Flujo del plástico a través de la válvula [5].

1.4. Defectos en el proceso de moldeo por inyección

El moldeo por inyección es un proceso complicado, y son muchas las cosas que pueden salir mal. A continuación se mencionan defectos comunes de las piezas moldeadas por inyección [1]:

1. Disparos cortos: Igual que en el proceso de fundición, un disparo corto es un moldeo que se solidifica antes de que la cavidad se llene por completo. El defecto se corrige si se incrementa la temperatura y/o la presión. El defecto también surge por el uso de una máquina con capacidad de disparo insuficiente, caso en el que es necesario un aparato más grande. En la Figura 1.11 se observar este tipo de defecto.



Figura 1.11: Moldeo con defecto de disparo corto.

2. Rebabas: Las salpicaduras ocurren cuando el polímero fundido se escurre por la superficie de separación, entre las placas del molde; también sucede alrededor de los pasadores de inyección. Generalmente, este defecto es ocasionado por: 1) conductos y claros demasiado grandes en el molde, 2) presión de inyección demasiado alta en comparación con la fuerza de sujeción, 3) temperatura de fusión demasiado elevada o 4) tamaño excesivo del disparo. En la Figura 1.12 se observar este tipo de defecto.



Figura 1.12: Moldeo con defecto de rebaba.

3. Líneas de soldadura: Las líneas de soldadura ocurren cuando el polímero fundido fluye dentro de las cavidades, y se encuentra desde direcciones opuestas; la frontera así formada se denomina línea de soldadura, y tiene propiedades mecánicas inferiores a las del resto de la pieza. Las formas de eliminar este defecto son: temperaturas de fundición más altas, presiones de inyección mayores, ubicaciones alternativas de la puerta de la pieza y mejores conductos. En la Figura 1.13 se observar este tipo de defecto.

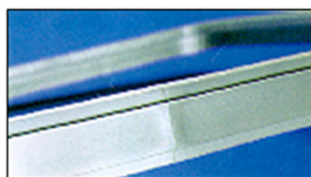


Figura 1.13: Moldeo con defecto de línea de soldadura.

4. Marcas de hundimiento o rechupes: Éstos son defectos que por lo general se relacionan con secciones moldeadas gruesas. Una marca de hundimiento ocurre cuando la superficie exterior del molde se solidifica, pero la contracción del material del interior hace que la capa se reduzca por debajo del perfil que se planeaba. Un vacío es ocasionado por el mismo fenómeno básico; sin embargo, el material de la superficie conserva su forma y la contracción se manifiesta como un vacío interno debido a fuerzas de tensión grandes sobre el polímero que aún está fundido. Estos defectos se eliminan con el incremento de la presión de compactación posterior a la inyección. Una mejor solución consiste en diseñar la pieza para tener espesor uniforme de la sección, y utilizar secciones más delgadas. En la Figura 1.14 se observar este tipo de defecto.



Figura 1.14: Moldeo con defecto de hundimiento.

1.5. Ventajas del proceso de moldeo por inyección

1. Permite una variedad casi ilimitada de formas geométricas de las piezas a formar.
2. Generalmente las piezas fabricadas no requieren un conformado posterior o acabado adicional al proceso de inyección. El proceso genera piezas de forma neta.
3. A pesar de requerir calentamiento para conformar los polímeros, se necesita menos energía que para trabajar metales, debido a que las temperaturas de procesamiento son mucho menores.
4. Generalmente no se requiere pintar o aplicar recubrimientos a los plásticos posteriormente al proceso de inyección.
5. Existe un alto grado de automatización en el proceso.
6. Las piezas fabricadas, dependiendo del polímero empleado, pueden ser transparentes u opacas, lo que hace atractivo los productos como alternativa para suplir el uso del vidrio.
7. Cuando el proceso se lleva a cabo con altos niveles de producción, se logran bajos costos de fabricación.
8. La rapidez de fabricación del proceso. Un tiempo de ciclo excesivo, pocas veces supera un minuto de fabricación.
9. El proceso es ambientalmente amigable, debido a no generar ningún tipo de contaminación ambiental de forma directa y reciclar gran parte del material utilizado en la fabricación de productos. Por otra parte no todos los plásticos pueden ser reciclados y al ser depositados en el medio ambiente causan diferentes daños ecológicos.

Debido a las ventajas mencionadas anteriormente los polímeros han logrado sustituir otros materiales tales como: madera, metales, fibras naturales y cerámicas, incursionando y posicionándose en variedad de industrias y productos [5].

1.6. Molde de inyección

El molde es una herramienta esencial en el proceso de moldeo por inyección, consta como mínimo de dos mitades, que pueden contener una cavidad o varias, a fin de producir más de una pieza en un solo ciclo. Cada molde se diseña sobre medida y para la pieza específica que se va a producir. Debido a que su diseño depende de diferentes requisitos del producto, los moldes pueden ser piezas muy sofisticadas y costosas. El molde cumple dos funciones principales: proporcionar la forma deseada al material mientras es inyectado bajo presión en las cavidades y solidificar el plástico fundido para su posterior expulsión. La pieza expulsada corresponde a la forma neta del producto. En la figura 1.15 se pueden observar los componentes básicos de un molde de inyección.

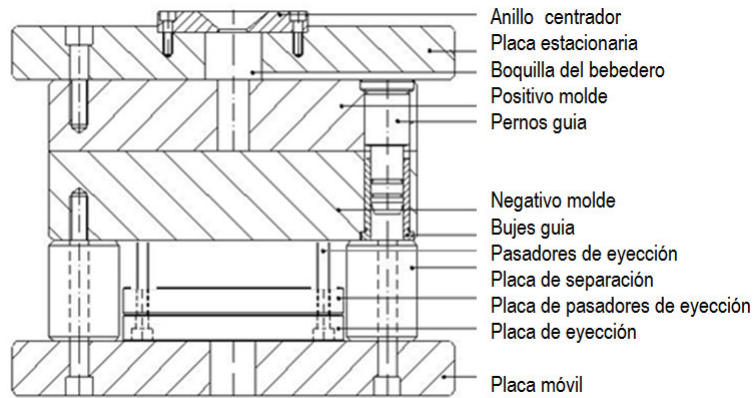


Figura 1.15: Componentes de un molde de inyección (Modificada de [6]).

Para obtener la pieza deseada cumpliendo con los requisitos del producto, sin experimentar y minimizando defectos del proceso como los mencionados en la sección 1.4. En la Figura 1.16 podemos observar algunos de los componentes que conforman un molde. El molde de inyección esta conformado por varios sistemas: 1) Sistema de distribución, 2) Sistema de enfriamiento, 3) Sistema de eyección, 4) Sistema de ventilación. Estos sistemas se describen más a detalle en las secciones 1.6.1 a la 1.6.4.

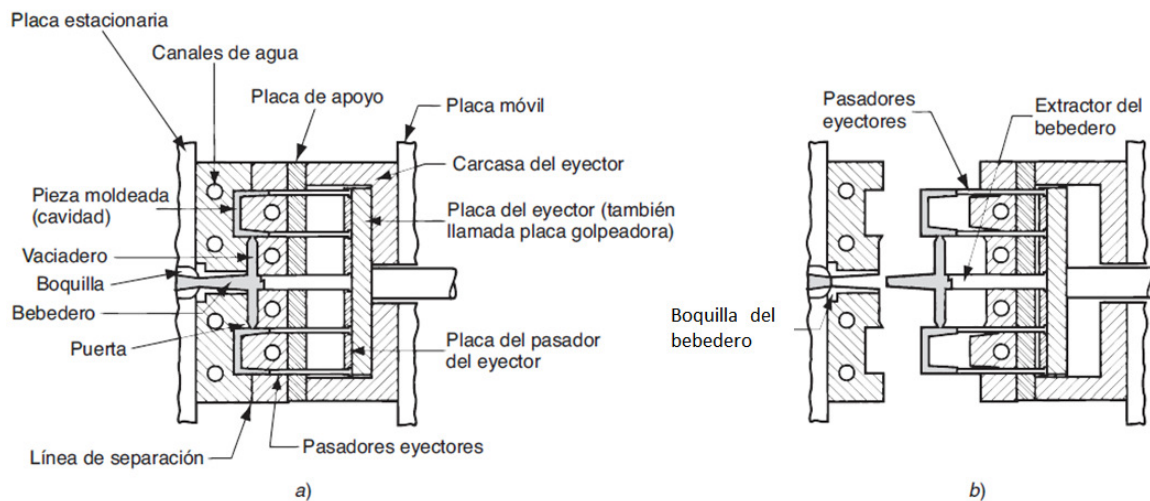


Figura 1.16: Detalles de un molde de dos placas para moldeo por inyección de termoplásticos: a) cerrado y b) abierto. El molde tiene dos cavidades para producir dos piezas en forma de copa (se muestra la sección transversal) [1].

Los componentes mostrados en las figuras 1.15 y 1.16, conforman un molde de inyección y cumplen con una función específica para la obtención del producto final, en la tabla 1.2 se observan dichas funciones.

Tabla 1.2: Funciones de los componentes de un molde de inyección (modificada de [3]).

Componente del molde	Función realizada
Anillo centrador y placa estacionaria	Mantener la cavidad o las cavidades en una posición fija y correcta con respecto a la boquilla de la máquina.
Pernos y bujes guía	Mantener la alineación correcta del molde.
Boquilla del bebedero	Proporcionar medios de entrada al molde.
Vaciaderos o corredores	Conducir el plástico fundido desde el bebedero a las cavidades.
Compuertas	Controlar el flujo hacia las cavidades.
Cavidades	Controlar la forma y la textura de la superficie del producto moldeado.
Canales de agua	Controlar la temperatura de las superficies del molde para enfriar el plástico al estado sólido.
Canales de venteo	Permitir el escape de aire y gas atrapado.
Pasadores o pines de eyección	Expulsar el artículo moldeado sólido de la cavidad.
Placa móvil	Ensamblar con la parte móvil de la máquina inyectora para separar las dos mitades del molde al finalizar el ciclo de enfriamiento.

1.6.1. Sistema de distribución

El sistema de distribución está conformado de canales por donde el polímero fundido fluye, de la boquilla del barril de inyección a la cavidad o cavidades del molde. En la figura 1.17 se pueden observar los componentes que constituyen el sistema de distribución de un molde de inyección.

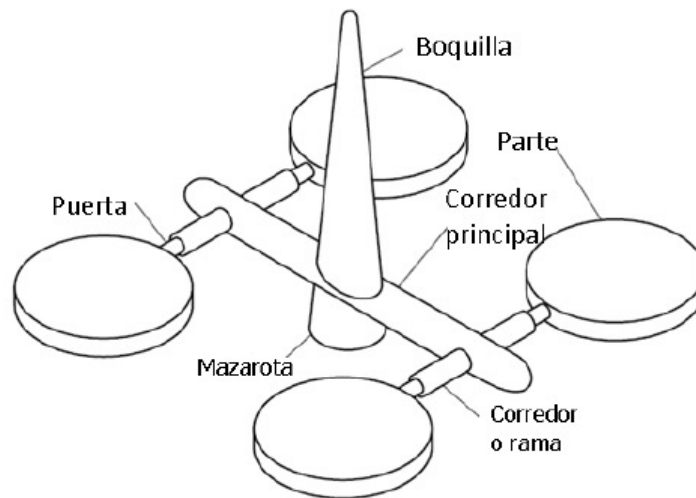


Figura 1.17: Componentes del sistema de distribución [5].

El **bebedero o boquilla** permite el ingreso del polímero fundido al molde desde el barril de inyección hasta la mazarota desde donde se distribuye a los corredores. El plástico que solidifica dentro de esta cavidad debe salir durante el desmolde, por lo que debe contar con un ángulo de desmoldeo. Debido al desgaste al que está sometido este canal, normalmente se hacen reemplazables y de fácil colocación.

La **mazarota** permite la distribución del polímero fundido que llega del bebedero, debe contener un depósito que almacene posibles partículas de polímero sólido remanente de ciclos anteriores y que pudieran obstruir los corredores.

Los **corredores** son los ductos que llevan el polímero fundido desde la mazarota, uniéndose a través de las **compuertas** que controlan la entrada del flujo hacia la cavidad o cavidades del molde. Los corredores deben ser tan cortos como sean posibles con el fin de reducir pérdidas de presión y temperatura innecesarias, además, es necesario que cuenten con un balanceo apropiado, haciendo que la caída de presión en cada corredor sea igual para llenar las diferentes cavidades al mismo tiempo, esto reduce el tiempo del ciclo, evita represión en zonas críticas, reduce la presión necesaria para llevar a cabo el proceso y evita fuerzas desequilibrantes en el molde [5]. En la figura 1.18 se observan corredores balanceados y no balanceados.

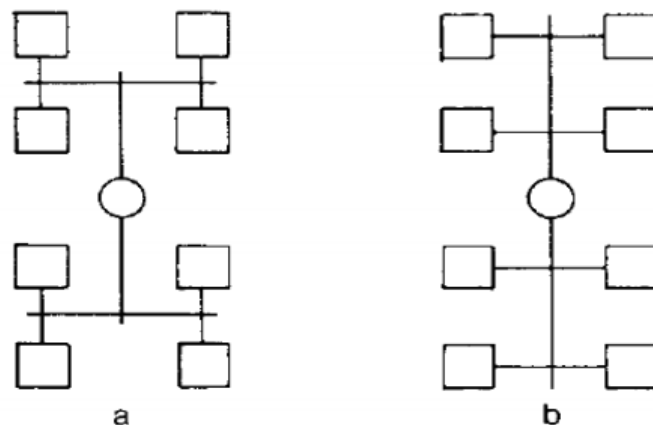


Figura 1.18: Corredores a)balanceados b)no balanceados [4].

Existen diferentes tipos de corredores o canales de distribución, dependiendo la forma geométrica de su sección transversal. En la figura 1.19 se muestran los diferentes tipos de corredores, lo recomendable de cada uno de ellos y su construcción con respecto a la línea de separación del molde.



Figura 1.19: Tipos de sección transversal de corredores (modificada de [32]).

El corredor circular completo es el más eficiente, ya que genera la misma presión en todas las direcciones en las moléculas de plástico, mientras que una sección no circular causa una presión desigual, esto se muestra en la figura 1.20. Un inconveniente con el corredor circular completo es que son los más costosos ya que se maquinan en ambas mitades del molde. Los semi-circulares producen las más altas caídas de presión por lo que son los menos recomendados. Los trapezoidales tienen la ventaja de ser maquinados en solo una de las mitades de molde como los semi-circulares, pero las caídas de presión son menores en comparación con estos.

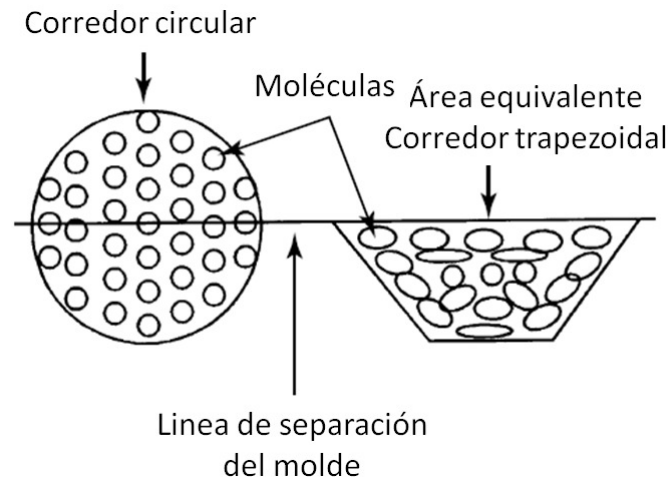


Figura 1.20: Comparación de la presión ejercida sobre las moléculas por una sección transversal circular y una sección no circular (modificada de [2]).

Como puede observarse en la figura 1.20 usar el diseño del corredor de la izquierda minimizará la cantidad de distorsión molecular creada mientras el plástico fundido fluye a través del corredor hacia la cavidad. La distorsión molecular produce esfuerzos en el material; las moléculas y los esfuerzos producidos son llevados a la cavidad donde se solidifican aun con dichos esfuerzos como residuo de la inyección.

El espesor de pared de la pieza a inyectar es un parámetro que ayuda a dimensionar los corredores del molde. En la mayoría de los casos un diámetro igual al espesor de la pared es un buen criterio de diseño para el corredor principal (ecuación (1.1)). Para los corredores secundarios o ramificaciones se calcula utilizando la ecuación (1.2):

$$D_{principal} = E_{pared} \quad (1.1)$$

$$D_{rama} = N_{rama}^{\frac{1}{3}} * D_{principal} \quad (1.2)$$

Donde:

$D_{principal}$, es el diámetro del corredor principal

E_{pared} , es el espesor de la pieza a moldear




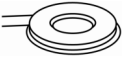

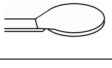


D_{rama} , es el diámetro del corredor secundario o ramificación

N_{rama} , es el numero de corredores secundarios o ramificaciones

Las compuertas que unen los corredores con las cavidades del molde presentan un estrechamiento que permite controlar el flujo, aumentando su velocidad de corte conforme fluye el polímero fundido y, en consecuencia, disminuye la viscosidad para llenar mejor y más rápido moldes con formas complejas. Existen diferentes tipos de compuertas dependiendo la forma geometría de las cavidades a llenar y el tipo de llenado que se desea realizar.

En la tabla 1.3 se muestran los distintos tipos de compuerta que existen.

Tabla 1.3: Tipos de compuertas.

Tipo de puerta	Esquema	Característica
Entrada cónica		Alimentan el polímero permitiendo una ligera relajación de esfuerzos.
Entrada puntiforme		Se llenan desde los bebederos; comúnmente usadas en moldes de tres placas, permiten altas velocidades y se llenan con facilidad; pueden eliminarse sin dificultad de la pieza moldeada.
Entrada lateral		Alimentan desde un lado del molde; comúnmente utilizadas para inyección múltiple.
Entrada anular		Se usan para moldear partes huecas ya que su flujo es previamente modificado a la forma final.
Entrada de diafragma		Similares a las puertas anulares, pero distribuyen el material fundido desde el canal de alimentación.
Entrada de abanico		Sirven para cubrir áreas grandes o largas de manera homogénea y distribuido correctamente.
Entrada de lengüeta		Estas puertas minimizan el efecto de jet y ayudan a lograr un flujo de régimen laminar cuyo número de Reynolds es adecuado para la inyección.
Entrada de cinta o laminar		Sirven para moldear homogéneamente áreas planas y delgadas, sobre todo en productos translúcidos y transparentes como objetivos de policarbonato, láminas de PMMA y dispositivos ópticos de medición, ya que minimiza las aberraciones cromáticas y ópticas debidas a ondas formadas por flujo en régimen turbulento.

1.6.2. Sistema de enfriamiento

El sistema de enfriamiento consiste de una bomba externa conectada a canales construidos en el molde, la figura 1.21 muestra la representación de los canales con respecto a la pieza moldeada. La bomba impulsa algún líquido frío, generalmente agua bajo flujo turbulento para remover el calor del polímero inyectado y con ello alcanzar la estabilidad térmica que permite su desmolde en estado sólido.

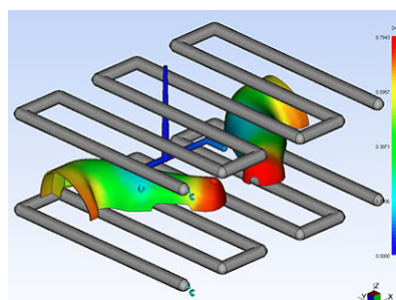


Figura 1.21: Representación de los canales de enfriamiento [8].

La cantidad de calor que debe removerse depende de:

- Temperatura de la masa fundida
- Calor específico del material
- Temperatura óptima de desmolde
- Espesor de la pieza

En los moldes de inyección, el sistema de enfriamiento requiere un alto grado de atención en su diseño. El tiempo de solidificación o enfriamiento constituye aproximadamente el 80 % del tiempo total del ciclo de inyección como se observa en la figura 1.22.

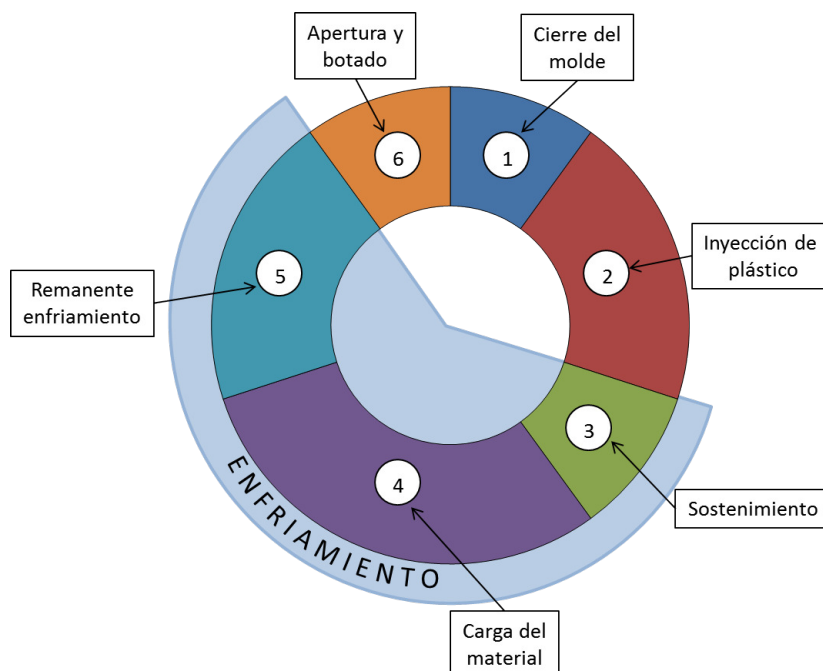


Figura 1.22: Diagrama del ciclo de moldeo por inyección (modificada de [9]).

Al optimizar el tiempo de solidificación se logra reducir problemas de calidad en la pieza final, tales como esfuerzos residuales, defectos geométricos, marcas de eyectores y burbujas causadas por enfriamiento desigual. Adicionalmente al disminuir el tiempo total del ciclo se reducen los costos de obtención de la pieza final.

Es posible encontrar en la literatura recomendaciones acerca del dimensionamiento óptimo de los canales de enfriamiento con respecto a la pieza moldeada, tal como se muestra en la tabla 1.4, esto con el fin de lograr un enfriamiento uniforme en el menor tiempo posible. En la figura 1.23 se puede ver la distribución de los canales con respecto a la cavidad del molde.

Tabla 1.4: Dimensionamiento de los canales de enfriamiento (Modificada de [10]).

Espesor de pared de la pieza mm(in) ^w	Diámetro de los canales de enfriamiento mm(in) ^d	Distancia del centro de los canales a la cavidad "a"	Distancia entre centros de canales "b"
2 (0.08)	8-10 (0.31-0.40)		
2-4 (0.08-0.16)	10-12 (0.40-0.47)	1.5-2d	2-3d
4-6 (0.16-0.24)	12-14 (0.47-0.55)		

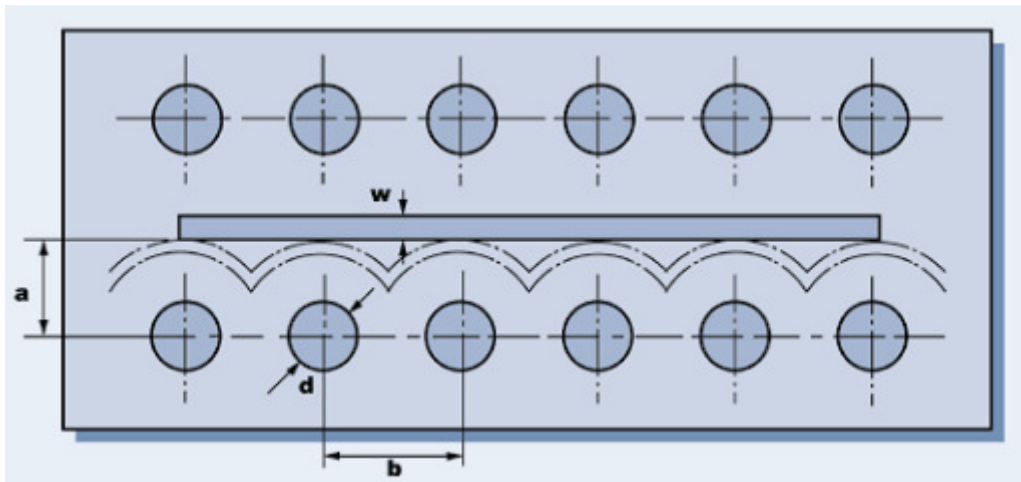


Figura 1.23: Dimensionamiento de los canales de enfriamiento [10].

Adicionalmente al dimensionamiento y ubicación de los canales de enfriamiento es importante considerar el tipo de arreglo a construir en el molde. Los tipos de arreglos posibles son:

- Arreglo en serie
- Arreglo en paralelo
- Arreglo serie-paralelo

Un **arreglo en serie** es de fácil construcción y bajo costo, pero el calor retirado es poco y presenta desventajas en circuitos largos con varios cambios de dirección.

Un **arreglo en paralelo** es altamente eficiente y ampliamente utilizado para producción de piezas de pared delgada con volúmenes de productividad altos.

Existe la posibilidad de utilizar **arreglos serie-paralelo**, el costo es mayor pero es mejor alternativa que los arreglos en serie y son usualmente usados en los moldes multicavidad. En la figura 1.24 se pueden observar los tipos de arreglos en paralelo y en serie, los arreglos tipo serie-paralelo sencillamente son una combinación de los anteriores.

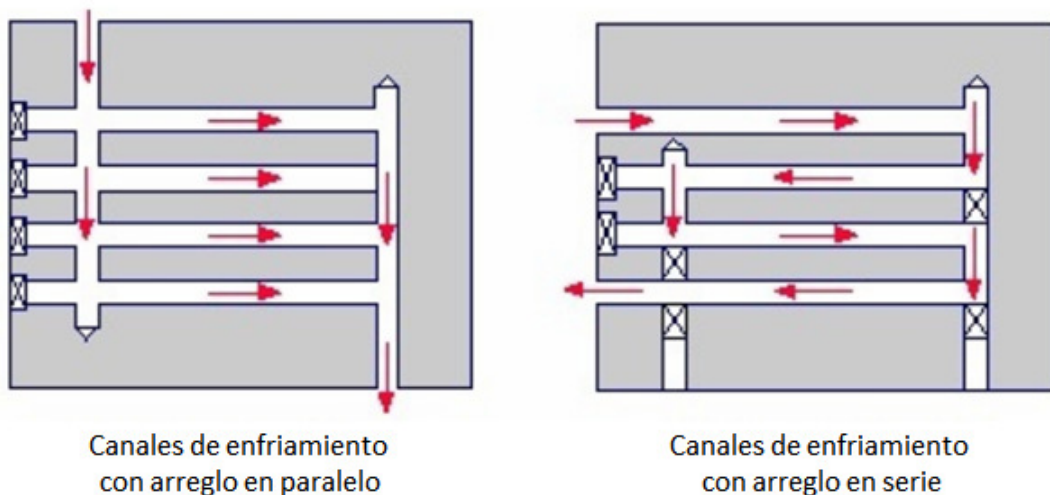


Figura 1.24: Tipos de arreglos de los canales de enfriamiento[10].

1.6.3. Sistema de eyección

Se requiere este sistema para lograr la expulsión de la pieza moldeada de la cavidad al final del ciclo de inyección. Este sistema siempre opera del lado móvil del molde, ubicando de manera uniforme pasadores eyectores detrás de la pieza accionandolos de manera mecánica, hidráulica o neumática. La figura 1.25 muestra un sistema de eyección típico accionado de manera mecánica.

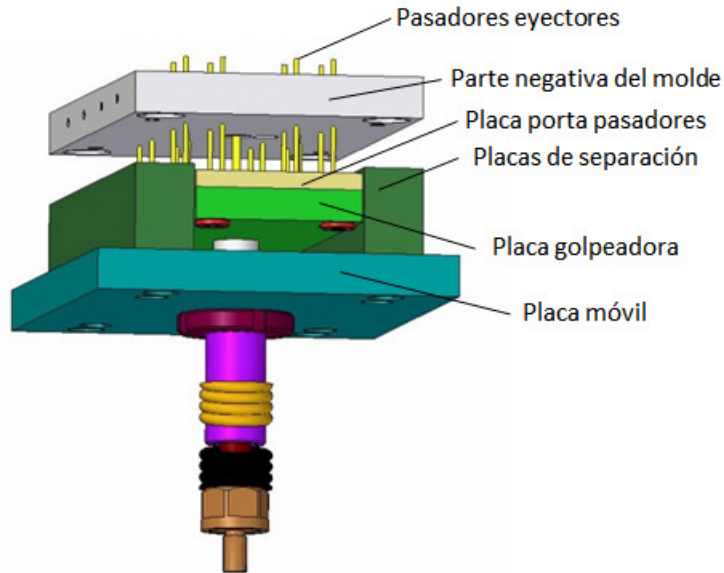


Figura 1.25: Sistema de eyección para molde de inyección (Modificada de [33]).

Es importante dar suficiente tiempo de solidificación a la pieza moldeada para obtener la consistencia deseada y así evitar problemas causados por el sistema de eyección, tales como: perforaciones, deformaciones o marcas que afecten la estética del producto.

Adicionalmente, un buen diseño del producto, análisis de contracción de la pieza, selección de ángulos de desmolde y áreas de contacto, permiten una expulsión con mayor facilidad.

Para productos de gran tamaño, es común notar la ausencia de dicho sistema integrado en el molde, ya que las piezas al final del enfriamiento son extraídas manualmente o por medio de robots.

1.6.4. Sistema de ventilación

Existe una gran cantidad de aire que queda atrapado al interior del molde cuando éste se cierra, además de lo anterior, se generan gases durante el proceso de fundición como preparación de la fase de inyección. El aire y estos gases deben ser desplazados y removidos para que el material plástico entrante pueda llenar de manera adecuada cada espacio de la cavidad del molde. De no ser removidos, el aire y los gases generados se comprimen por la presión del material entrante, causando defectos e incluso incendiando el material plástico si dicha compresión es elevada.

El método más eficiente para permitir que el aire y los gases atrapados escapen, es construir ranuras de venteo en la línea de separación del molde. Las dimensiones de las ranuras de venteo

no se pueden exagerar; el venteo debe tener las dimensiones necesarias para dejar pasar el aire pero evitando el paso del material; es por esta razón que existen dimensiones características de las ranuras de venteo dependiendo el material plástico inyectado (Tabla 1.5).

Tabla 1.5: Dimensionamiento recomendado para el sistema de ventilación según el material inyectado[5].

Material	Profundidad (pulgs)	Largo (pulgs)
ABS	0.002-0.003	0.030-0.050
SAN	0.002-0.003	0.030-0.050
POM	0.0005-0.0015	0.040-0.050
PMMA	0.0015-0.003	0.040-0.050
PA	0.0005-0.001	0.020-0.040
PC	0.001-0.003	0.030-0.050
PET	0.0005-0.0015	0.030-0.050
PBT	0.0005-0.0015	0.030-0.050
PE	0.001-0.002	0.020-0.040
PP	0.001-0.002	0.020-0.040
PS	0.001-0.003	0.030-0.050
PVC-R	0.001-0.003	0.040-0.050
PVC-F	0.0005-0.002	0.030-0.050

Al conjunto de ranuras de venteo se les denominan como sistema de ventilación del molde y son construidas comúnmente a lo largo del sistema de distribución, en las últimas zonas de llenado, donde se unen flujos de piezas alimentadas por varios puntos y en ocasiones en los dispositivos de expulsión de la pieza. En la figura 1.26 se puede observar la implementación del sistema de venteo en un molde de inyección.

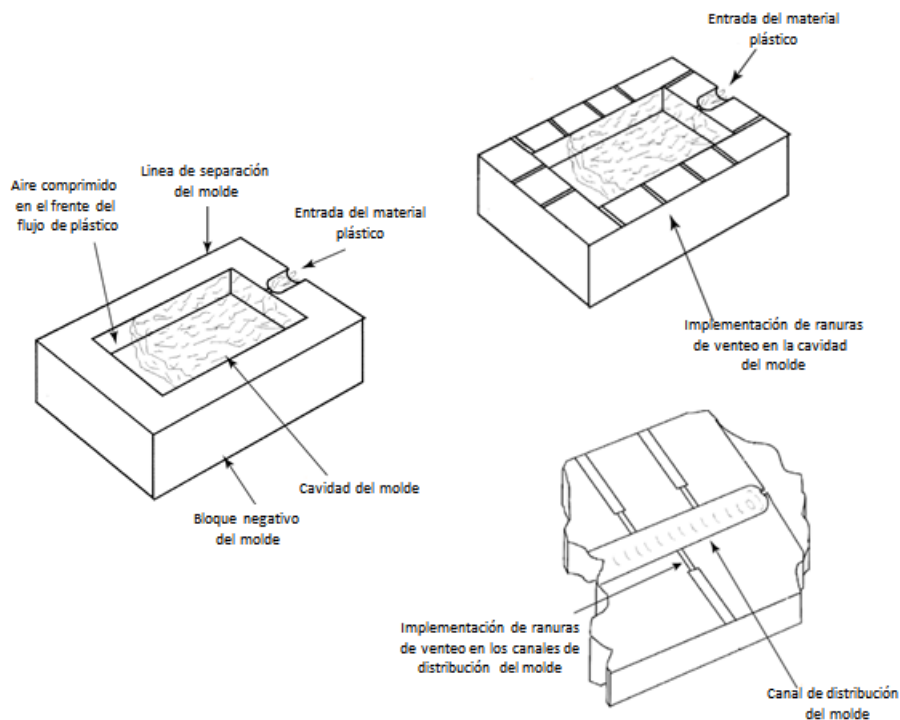


Figura 1.26: Sistema de ventilación para molde de inyección.

1.6.5. Diseño de moldes de inyección

Los parámetros principales para el diseño del molde son [5]:

- Número de cavidades.
- Tipo de corredor.
- Tipo de compuerta.
- Venteo.
- Línea de partición.
- Sistema de eyección.
- Geometría del sistema de enfriamiento.
- Acabado superficial.
- Tolerancias.
- Selección del material para el molde.
- Selección del plástico.
- Contracción del material plástico.

Cada uno de los parámetros mencionados anteriormente depende de la pieza o piezas a ser moldeadas, la cantidad de producción requerida, las limitaciones de operación propias de la máquina inyectora y las propiedades específicas del material plástico a inyectar. Es por esto que en una fase preliminar de diseño se requieren datos tales como [5]:

- Dimensiones máximas que puede tener el molde.
- Carrera máxima que puede tener la placa de eyección.
- Capacidad inyectora de la máquina.
- Propiedades reológicas y térmicas del plástico a inyectar.
- Tamaño, distribución y número de cavidades.
- Posición, tipo y tamaño del sistema de enfriamiento.
- Selección del tipo de corredor y compuerta.
- Posición de los eyectores.
- Línea de partición.
- Posición de las barras guía.

Teniendo claras las consideraciones preliminares de diseño, inicia un amplio recorrido en el cual el ingeniero necesita realizar varios análisis y cálculos para obtener el molde de inyección que genere la pieza final deseada, en los capítulos siguientes será posible identificar con mayor detalle los pasos y consideraciones para el diseño de un molde de inyección.

Capítulo 2

JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

2.1. Antecedentes

La necesidad de entender y controlar el proceso de moldeo por inyección, ha dado lugar a estudios y trabajos experimentales desde hace varios años, como una resolución aproximada para casos con geometrías simples, Kamal y Kenig [11] propusieron un modelo matemático para el tratamiento cuantitativo del proceso, Wu et al. [12] simularon el proceso obteniendo resultados para una cavidad en forma de disco.

Posteriormente se buscó analizar la influencia de determinados parámetros del proceso sobre las propiedades y defectos de las piezas moldeadas, así como mejorar el control del proceso, Williams y Lord [13] estudiaron el llenado del molde de inyección para materiales termoplásticos, Cox y Mentzer [14] analizaron la influencia del tiempo de llenado con respecto a aspectos relacionados con la pieza final, Bushko y Stokes [15] plantearon un modelo al encontrar resultados sobre los efectos de parámetros de proceso sobre la mecánica de la contracción y la acumulación de las tensiones residuales, Kalay y Bevis [16] exploraron la relación entre las condiciones de procesamiento y las propiedades físicas de las piezas obtenidas, Bigerelle et al. [17] caracterizaron la influencia de cuatro parámetros de proceso sobre la rugosidad de las piezas obtenidas, Kurt et al. [18] realizaron un estudio experimental para garantizar una mejor calidad de los productos moldeados.

Finalmente con la introducción de modelos de simulación numéricos se ha desarrollado paquete de cómputo que permite evaluar el proceso con el mayor control posible, obteniendo resultados muy confiables, Hieber et al. [19, 20] presentaron una formulación detallada para la simulación del llenado de cavidades delgadas de geometría plana arbitraria y una investigación teórica-experimental en cavidades delgadas de grosor variable, Chiang et al. [21, 22] simularon las etapas de llenado, post-llenado y realizaron la verificación experimental de dicha simulación obteniendo resultados favorables, Himasekhar et al. [23] simularon la transferencia de calor de un molde en la etapa de enfriamiento debido a su importancia tanto en la productividad como en la calidad de la pieza, Chiang et al. [24] emplearon un análisis del flujo de fluido y transferencia de calor durante las etapas de llenado y post-llenado para la predicción de contracciones y deformaciones, Titomanlio et al. [25] simularon el proceso con el objetivo de identificar las propiedades de los materiales que desempeñan un papel relevante en el modelado. Zhou y Dequn [26] simularon por ordenador el llenado de molde para cavidades generadas directamente con herramientas CAD, Guerrier et al. [27] simularon y compararon directamente molduras experimentales diseñadas con una ventana de cristal que permite visualizar en tiempo

real la inyección, Arredondo [5] realizó un modelo fluido-estructural del proceso para el diseño óptimo de moldes.

En la actualidad se cuenta con herramientas suficientes para el análisis del proceso de moldeo por inyección que permiten determinar condiciones idóneas en cuanto a los parámetros de proceso, diseño de moldes y resultado final de la pieza.

2.2. Justificación

El rápido desarrollo de los polímeros, entre los cuales se encuentran los termoplásticos, termofijos y elastómeros han superado el uso mundial de acero, aluminio, cobre y zinc, generando un gran interés acerca de las diversas técnicas de fabricación y la calidad del producto, los de mayor importancia comercial son los termoplásticos, ya que constituyen el 70 % del peso total de todos los polímeros sintéticos que se producen, y han logrado incursionar en diversos sectores del mercado [1, 28].

Entre las diversas técnicas de fabricación de productos plásticos se encuentra el moldeo por inyección, abarcando un 32 % de consumo de plástico mundial [3], principalmente por la variedad de piezas que pueden fabricarse, las buenas tolerancias dimensionales, la rapidez de fabricación y sus altos niveles de producción a bajo costo [5].

El reto en el moldeo por inyección es fabricar moldes cuya cavidad tenga la geometría que permita obtener la pieza deseada considerando la contracción y deformaciones posteriores a la solidificación, y que también permita la eyección de ésta. El molde es la herramienta esencial en el moldeo por inyección y debido a su versatilidad en cuanto al diseño, la técnica ha sido primordial durante décadas en la producción masiva de diversos productos [1, 29, 30].

En el proceso de inyección de plásticos la calidad del producto moldeado es difícil de predecir y/o controlar, en la figura 2.1 se puede observar un proceso convencional de producción, donde el proceso iterativo de prueba y error son la principal herramienta para el diseño del producto y del molde.



Figura 2.1: Proceso convencional de producción por inyección.

En la actualidad, con los avances tecnológicos se puede lograr estar un paso adelante en el proceso de inyección de plásticos, desarrollando simulaciones que permitan reducir o eliminar en su totalidad la necesidad de cambiar los diseños del producto y molde posterior a su construcción, en la figura 2.2 se representa un proceso mejorado de producción que cuenta con el aporte de herramientas CAE para el mejoramiento del proceso y por medio del cual se realiza el diseño del molde de la actual tesis, evitando así el proceso iterativo de prueba y error.

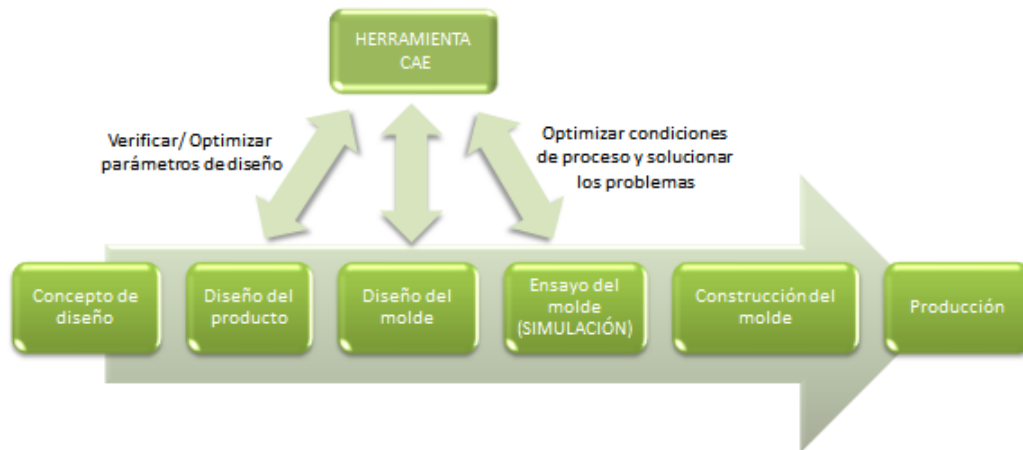


Figura 2.2: Proceso mejorado de producción por inyección.

El campo de investigación del proceso de inyección de plástico es muy amplio, y requiere de trabajos iniciales que aporten bases sólidas para la solución de problemas de alto nivel e interés en la academia y la industria, de allí la gran importancia de empezar con problemas sencillos que permitan conocer todos los detalles que implica el proceso de inyección y la fabricación de un molde.

Esta tesis continúa la investigación del tema dentro de la Universidad de Guanajuato y abre las puertas a futuros trabajos, permitiendo mostrar el interés de la Universidad de Guanajuato en adquirir equipos relacionados con el proceso de inyección de plásticos y generar con estos conocimiento basados en la experimentación; para que entidades interesadas en apoyar este tipo de investigación se vinculen y se lleve acabo una fructífera transferencia de conocimiento a los sectores interesados.

2.3. Objetivo

Utilizar simulación por interacción fluido-estructural (FSI por sus siglas en ingles), para diseñar un molde de inyección de plástico cumpliendo la norma ASTM D3641, con el fin de inyectar probetas para pruebas a tensión que sigan la norma ASTM D638, estas probetas serán de PC+ABS (70 %-30 %).

2.3.1. Objetivos específicos

- Modelar en un paquete de cómputo CAD la geometría del molde y las probetas, tomando en cuenta las normas ASTM D3641 y D638.
- Utilizar el programa Ansys Fluent® para modelar la fase de llenado en el molde.
- Realizar mediante el módulo Ansys Transient Thermal® la simulación de la fase de solidificación del PC+ABS.

- Analizar los esfuerzos que se presentan dentro del molde durante el proceso por medio del módulo Ansys Static Structural®[®], y de aquí, seleccionar los materiales para fabricar el molde.
- Diseñar los diferentes sistemas que conforman un molde de inyección de plástico (sistema de distribución, sistema de enfriamiento, sistema de ventilación y sistema de eyección) cumpliendo con las recomendaciones establecidas por la norma ASTM D3641.

2.4. Definición del problema

Se diseñará un molde para inyección de probetas para pruebas de tensión, mediante el apoyo de simulación por interacción fluido-estructura (FSI).

Con la simulación FSI se buscan determinar las condiciones del proceso tales como: presión, temperatura y tiempo de inyección, tiempo de solidificación necesario para una correcta expulsión de las probetas y fuerza de cierre necesaria para llevar a cabo el ciclo completo.

Adicionalmente se revisará con la simulación el correcto dimensionamiento del molde para un completo llenado de las cavidades, considerando el análisis del comportamiento del fluido y los materiales a utilizar en la fabricación del molde, considerando también las condiciones de esfuerzos y deformaciones termo-estructurales presentes en el molde durante el proceso de inyección.

Con todos los resultados mencionados anteriormente se espera tener herramientas suficientes para evitar la pérdida de tiempo y dinero que ocasionan los cambios en los diseños basados en prueba y error (figura 2.1), y evitar también los problemas típicos del proceso mencionados en la sección 1.4.

De esta manera se estará tomando un mejor proceso de diseño para el molde, basados en un proceso altamente apoyado por herramientas CAE (figura 2.2). Se espera obtener el dimensionamiento requerido de la probeta según la norma ASTM D638 y tener como referencia adicional las recomendaciones de diseño para el molde de probetas de la norma ASTM D3641.

2.4.1. Estrategia de solución

1. Revisión bibliográfica:

- Se realiza una extensa consulta de bibliografía que involucre información acerca de polímeros termoplásticos, fluidos no-newtonianos, reología, proceso de moldeo por inyección, simulación computacional de fluidos no newtonianos, simulación fluido-estructural, paquete de cómputo Ansys Fluent®[®], modelos de comportamiento para fluidos no newtonianos, entre otros temas de interés; de tal manera que antes de iniciar la solución del problema se cuente con el conocimiento básico que permita estar inmerso en el contexto adecuado de la presente investigación.
-

2. Revisión de propiedades típicas y parámetros de procesabilidad para el PC+ABS:

- Se buscan hojas y bases de datos existentes para el PC+ABS (70 %-30 %), las cuales incluyen normalmente propiedades mecánicas, térmicas, físicas y de procesabilidad típicas.

3. Selección de las propiedades del material y el modelo a utilizar para simular el proceso de inyección:

- Teniendo en cuenta la revisión realizada con anterioridad, se hace la selección de los datos necesarios que alimentaran la simulación del proceso de inyección.

4. Generación de las cavidades del molde en un paquete de CAD:

- Para simular la fase de llenado se requiere generar la geometría CAD de la cavidad del molde de inyección junto con las compuertas, los canales de distribución, mazarota y boquilla, partiendo de las recomendaciones de la norma ASTM D3641. Para la geometría de las probetas se sigue la norma ASTM D638.
- Para esta etapa se cuenta con la digitalización de un molde con el que se ha tenido poco éxito en la obtención de probetas para pruebas de tensión. Esta geometría se utilizará como punto de comparación al simular también su fase de llenado.

5. Simular fase de llenado del PC+ABS en las geometrías de las cavidades de probetas:

- Se realizan las simulaciones de llenado en las cavidades propuestas y en las cavidades digitalizadas mediante el paquete de cómputo Ansys Fluent®.

6. Agregar los demás componentes del molde en el modelo CAD para desarrollar los análisis termo-estructurales:

- Se genera la geometría CAD del molde cumpliendo las recomendaciones establecidas por la norma ASTM D3641 con respecto a los diferentes sistemas que lo componen (sistema de distribución, sistema de enfriamiento, sistema de ventilación y sistema de eyección).

7. Análisis térmico del molde y probetas durante la etapa de solidificación:

- Se busca analizar la fase de solidificación en el proceso de inyección, obteniendo el tiempo necesario para la expulsión de las probetas.

8. Desarrollo del modelo FSI para el molde de inyección:

- A partir de los resultados de simulación de la fase de llenado y el análisis térmico, se exportarán las cargas de temperatura y presión para realizar análisis fluido-estructural del molde durante el proceso inyección.

9. Diseño del molde de inyección:

- Con los resultados obtenidos de las etapas preliminares, se cuenta con herramientas suficientes para realizar un diseño del molde de inyección y generar los planos de fabricación correspondientes.
-

A grandes rasgos se describe como se abordó el problema, buscando simular el proceso de inyección en sus diferentes etapas, para obtener un molde con un buen diseño sin la necesidad de realizar prueba y error posterior a su construcción.

2.5. Resultados esperados

1. Simular por interacción fluido-estructural(FSI) el proceso de inyección de probetas de PC+ABS mediante el paquete de cómputo Ansys Workbench®.
2. Generar planos de fabricación del molde de inyección con todos los sistemas que lo componen (sistema de distribución, sistema de enfriamiento, sistema de ventilación y sistema de eyección). Tomando en cuenta los resultados de simulación.

Capítulo 3

ANÁLISIS POR INTERACCIÓN FLUIDO ESTRUCTURAL DEL PROCESO DE MOLDEO POR INYECCIÓN

3.1. Introducción

Mediante el paquete de cómputo Ansys workbench® es posible realizar análisis por interacción fluido-estructural (FSI), este tipo de simulación permite analizar las interacciones que se presentan entre los fluidos y las estructuras que los rodean, permitiendo obtener las deformaciones que puede causar el flujo de un fluido a una estructura física y que a su vez alteran el flujo, logrando la interacción entre los diferentes dominios físicos y obteniendo un análisis más completo y acertado de cualquier fenómeno de este tipo.

Teniendo en cuenta que el proceso de inyección de plásticos involucra el flujo de un polímero a alta temperatura y presión, con el fin de llenar por completo una o varias cavidades contenidas dentro del molde y así obtener una replica de dichas cavidades después de llevar el polímero hasta la solidificación. Se puede observar que es posible analizar el proceso completo por medio de una simulación FSI.

Dentro de Workbench se desarrolló el modelo FSI del proceso de inyección de plásticos, inicialmente se utilizó el módulo de Fluent® para analizar la fase de inyección del polímero, de este primer análisis es posible obtener como resultado: la presión de inyección necesaria para llenar adecuadamente las cavidades del molde, la distribución de temperaturas al final de la inyección y el tiempo necesario para completar esta fase del proceso. Finalizada la fase de inyección, comienza una segunda fase denominada solidificación, en la cual el plástico pierde temperatura hasta alcanzar su estado sólido y la consistencia suficiente para retirar el producto final del molde, esta etapa fue desarrollada por medio de un módulo de análisis térmico transitorio capaz de simular el cambio de fase del polímero y obtener el tiempo necesario para dicho proceso. Finalmente, con los resultados obtenidos durante las fases preliminares es posible importar los resultados a un análisis estructural que involucra la presión debida al flujo del fluido, las cargas térmicas entendidas como cargas que generan esfuerzos y deformaciones en la estructura del molde, junto con las demás cargas y restricciones propias de la sujeción del molde, logrando así el análisis completo de la combinación de efectos que son soportados por el molde durante el proceso. Todo lo anterior es de vital interés al momento de pensar en realizar un buen diseño. El esquema del modelo FSI del proceso de inyección de plástico por medio de Ansys workbench® se ilustra en la figura 3.1.

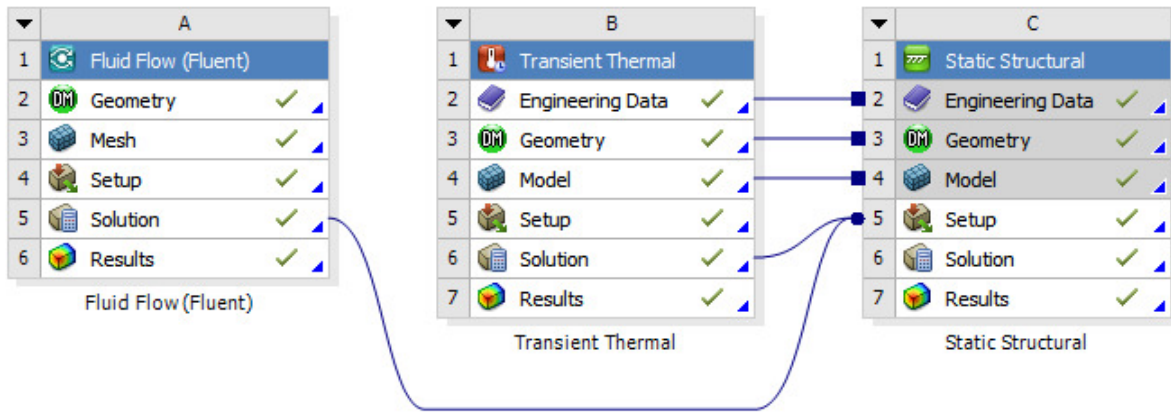


Figura 3.1: Modelo FSI para el proceso de inyección de plásticos dentro de Ansys workbench®.

3.2. Simulación de la fase de inyección

Para simular la fase de inyección del plástico es necesario desarrollar primero un modelo de la geometría de las cavidades que tendrá el molde de inyección, para lo cual se utilizó el paquete de cómputo Solidworks®, obteniendo la geometría que se muestra en la figura 3.2, las dimensiones y consideraciones utilizadas para desarrollar la geometría de las cavidades se mencionarán a detalle en el Capítulo 4.

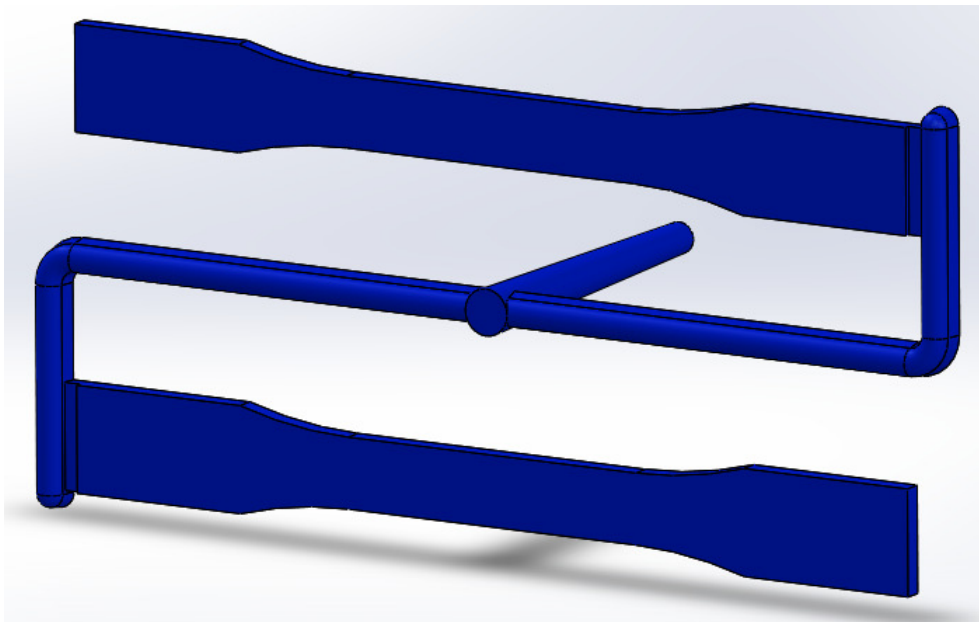


Figura 3.2: Geometría de las cavidades de las probetas generadas mediante Solidworks®.

El material plástico que se desea analizar para el proceso de inyección de probetas es el CYCOLOY XCY620S, una mezcla de policarbonato (PC) y acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), el cual suma la alta procesabilidad del ABS con las excelentes propiedades térmicas, mecánicas y de resistencia a los impactos del PC, con una considerable atención en aplicaciones de ingeniería, principalmente en la industria automovilística. En la figura 3.3 se pueden observar los parámetros típicos de procesabilidad proporcionados por un fabricante.

**CYCOLOY* Resin XCY620S****Americas: COMMERCIAL**

PROCESSING PARAMETERS	TYPICAL VALUE	UNIT
Injection Molding		
Drying Temperature	95 - 105	°C
Drying Time	2 - 4	hrs
Drying Time (Cumulative)	6 - 8	hrs
Maximum Moisture Content	0.02	%
Melt Temperature	260 - 290	°C
Nozzle Temperature	240 - 280	°C
Front - Zone 3 Temperature	250 - 290	°C
Middle - Zone 2 Temperature	250 - 290	°C
Rear - Zone 1 Temperature	230 - 260	°C
Hopper Temperature	60 - 80	°C
Mold Temperature	60 - 90	°C
Back Pressure	0.3 - 0.7	MPa
Shot to Cylinder Size	30 - 80	%

Figura 3.3: Parámetros de procesabilidad del material proporcionados por el fabricante [35].

Para tener certeza de los parámetros de procesabilidad proporcionados por el fabricante, se realizó una búsqueda dentro de los principales paquetes de simulación que actualmente son altamente reconocidos en el estudio del proceso de inyección de plásticos, Moldflow adviser 2017 R2 y Moldex3d. Mediante la comparación de los valores obtenidos de la biblioteca de los paquetes y los valores proporcionados por el fabricante, se tuvo suficiente información inicial que permitió alimentar adecuadamente las condiciones de inyección del material a estudiar, para la presente fase del proceso son suficientes la temperatura de fusión, la temperatura del molde y la densidad de la masa fundida. En la tabla 3.1 se observan los valores obtenidos de Moldflow y moldex3d.

Tabla 3.1: Parámetros de procesabilidad del material encontrados en Moldflow adviser 2017 R2 y Moldex3d.

	Moldflow adviser 2017 R2	Moldex3d
Temperatura del molde	60 – 90°C	60 – 90°C
	75°C (Recomendada)	75°C (Recomendada)
Temperatura de fusión	260 – 290°C	260 – 290°C
	275°C (Recomendada)	275°C (Recomendada)
Densidad de la masa fundida	1.0239 $\frac{g}{cm^3}$	1.02 $\frac{g}{cm^3}$

En esta fase se cuenta además con una geometría digitalizada, Figura (3.4), dicha geometría se obtuvo de un molde construido empíricamente por una empresa de la región, este molde presenta poco éxito en la obtención de probetas para pruebas de tensión. El análisis de esta geometría digitalizada se utilizará únicamente como punto de comparación con respecto a las cavidades propuestas, simulando la fase de inyección para ambas geometrías y revisando si la geometría propuesta muestra mejores resultados.

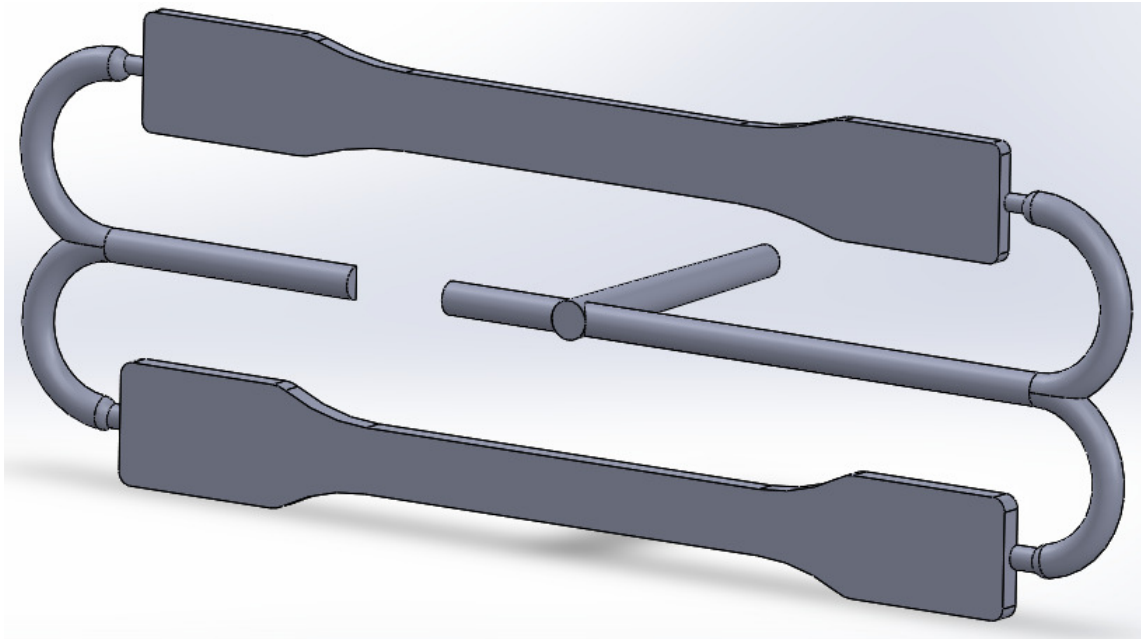


Figura 3.4: Geometría de las cavidades de las probetas digitalizada.

Teniendo tanto las geometrías como los parámetros necesarios del material, procedió a simular la fase de inyección dentro del módulo de Fluent® incluido en Ansys workbench®.

Se realizó un mallado con controles locales sobre ambas geometrías para lograr que la mayor cantidad de elementos tuvieran una calidad ortogonal por encima de 0.6, valor recomendado para análisis en el módulo de Fluent®.

En el caso del módulo de Fluent® se manejan elementos de malla de diferentes tipos para análisis 3D, en la figura 3.5 se observan los tipos de celdas utilizadas para realizar mallado en el módulo de Fluent®.

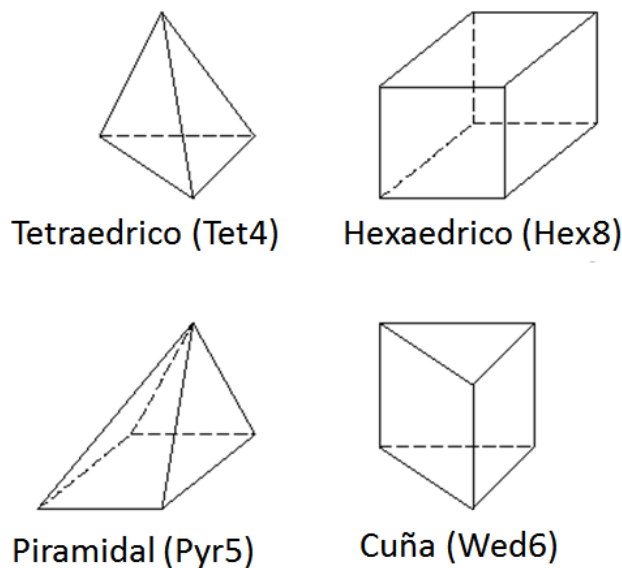


Figura 3.5: Tipos de elementos para mallado en el módulo de Fluent® (Modificada de [34]).

Para la geometría digitalizada se logró obtener una malla compuesta de la manera que se muestra en la tabla 3.2:

Tabla 3.2: Composición de la malla en la geometría digitalizada.

Tipo de Elemento	Cantidad de elementos
Tet4	48956
Hex8	6260
Wed6	18521
Pyr5	188
Total	73925

En la figura 3.6 se observa la malla de la geometría digitalizada, como se mencionó anteriormente se realizó una malla en la cual la mayor cantidad de elementos tuviera una calidad ortogonal por encima de 0.6, como se muestra en la figura 3.7.

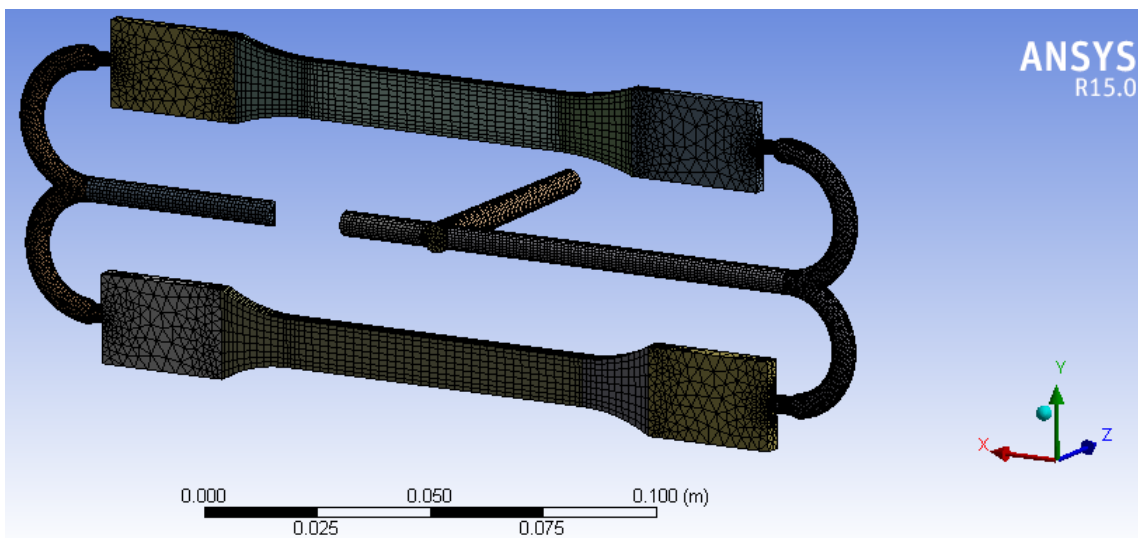


Figura 3.6: Malla generada en Fluent® de las cavidades de las probetas digitalizadas.

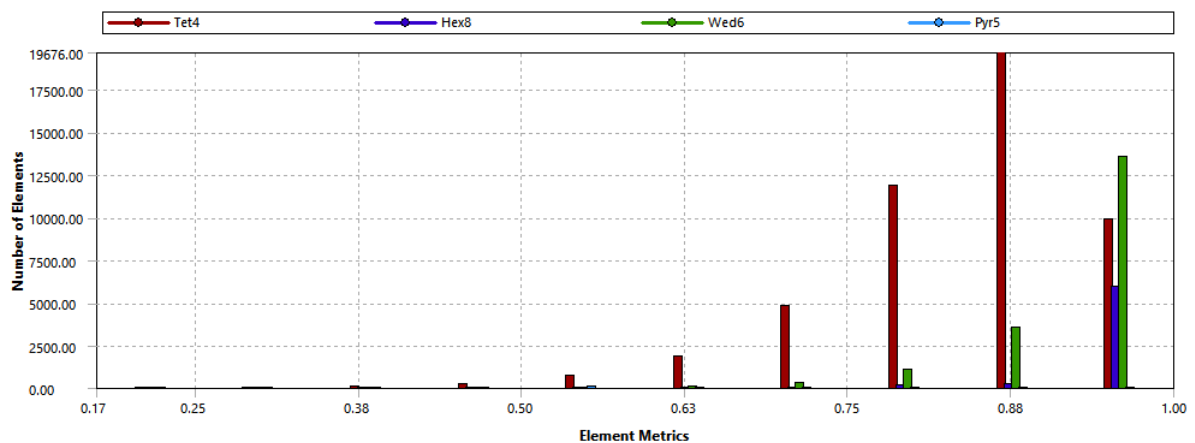


Figura 3.7: Calidad ortogonal de los elementos de la malla en Fluent® de la geometría digitalizada.

Para la geometría propuesta mediante Solidworks® se logró obtener una malla compuesta de la manera que se muestra en la tabla 3.3:

Tabla 3.3: Composición de la malla en la geometría generada en Solidworks®.

Tipo de Elemento	Cantidad de elementos
Tet4	7348
Hex8	30453
Pyr5	228
Total	38029

En la figura 3.8 se observa la malla de la geometría propuesta, como se mencionó anteriormente se realizó una malla en la cual la mayor cantidad de elementos tuviera una calidad ortogonal por encima de 0.6, como se muestra en la figura 3.9.

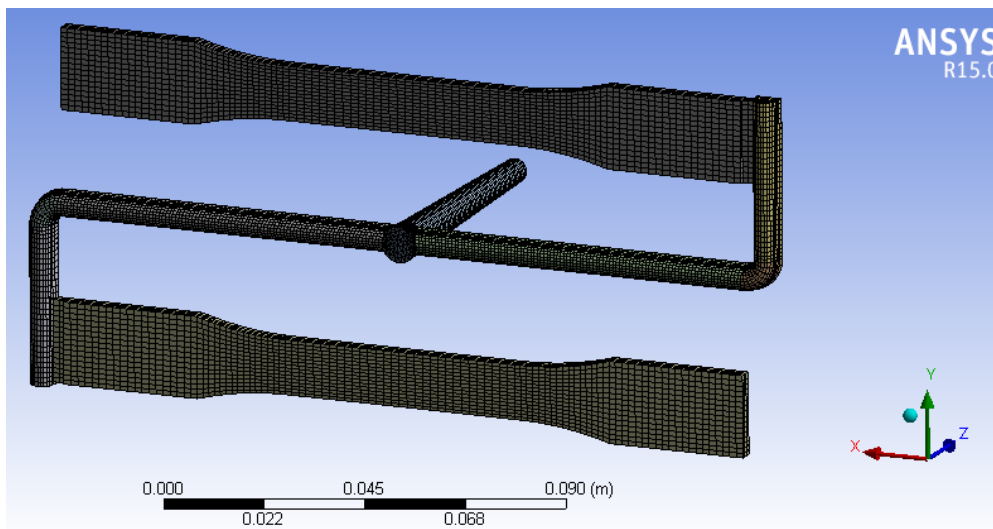


Figura 3.8: Malla generada en Fluent® de las cavidades de las probetas generada en Solidworks®.

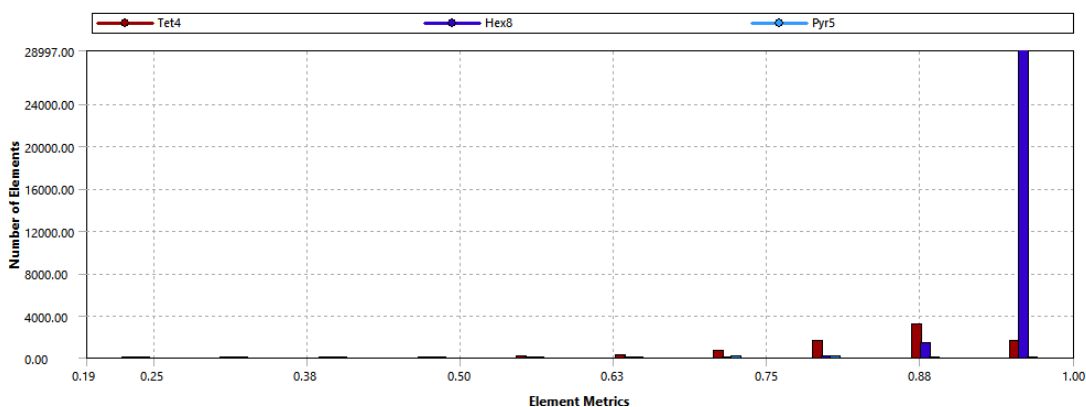


Figura 3.9: Calidad ortogonal de los elementos de la malla en Fluent® de las cavidades de las probetas propuestas.

Como condiciones de frontera para simular la fase de inyección con análisis multifásico, se requiere declarar como pared todas las áreas que componen la geometría, excepto aquellas que servirán de punto de inyección, donde se requiere la velocidad de entrada del polímero,

Lo anterior se muestra para los dos casos de estudio en la figura 3.10.

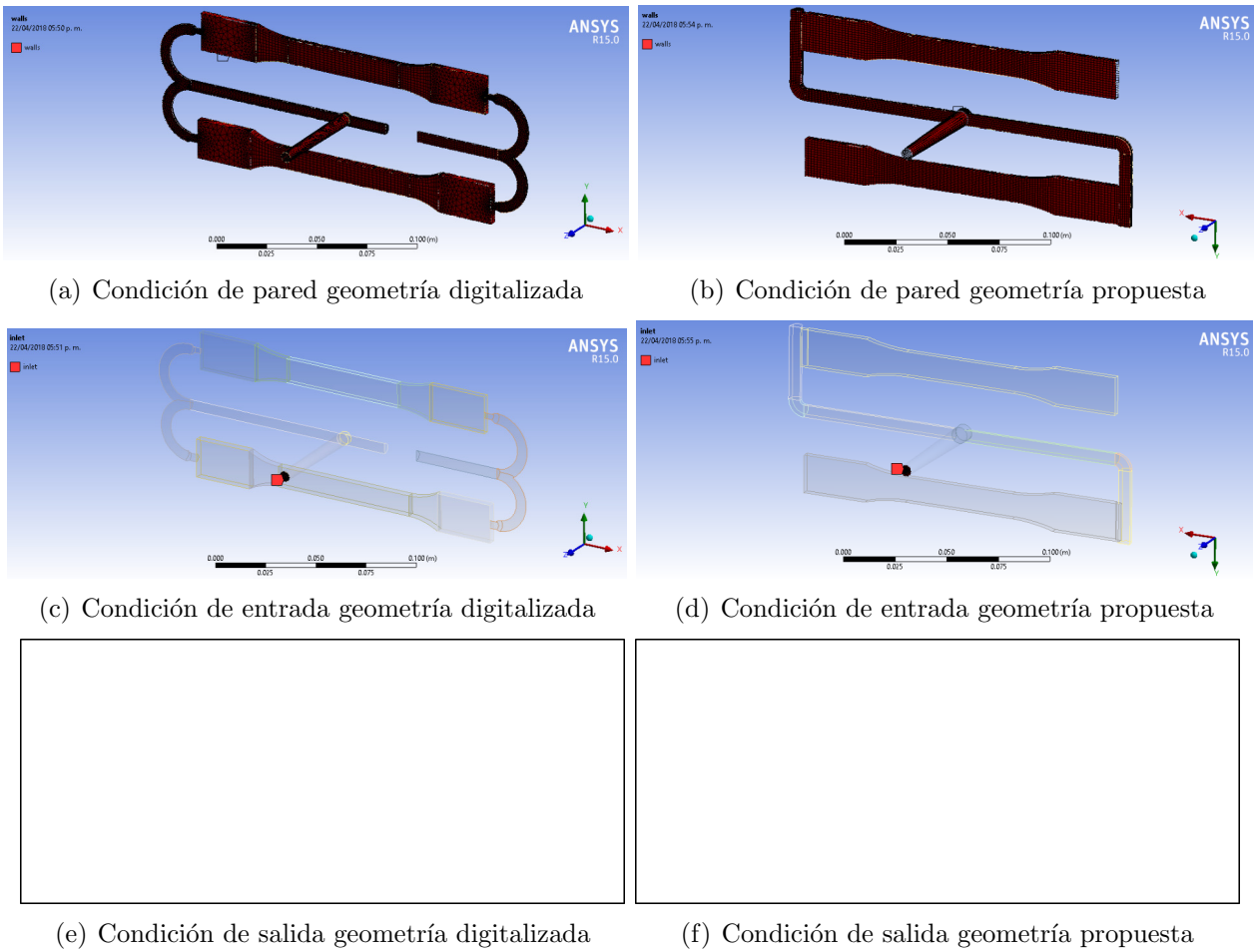


Figura 3.10: Condiciones de frontera para las geometrías de estudio ((e) y (f) se omiten por confidencialidad, los datos completos están en poder de la empresa, así como de los asesores y sinodales).

En la condición de pared se eligió una superficie lisa sin deslizamiento para analizar el efecto de la viscosidad. Para la condición de entrada, se prefirió una velocidad de entrada del flujo de polímero.

Para determinar el valor de la velocidad de entrada fue necesario suponer un tiempo de inyección de 0.3[seg] debido a la ausencia de datos experimentales del proceso y requerir un tiempo de inyección corto que facilitara la obtención de resultados para la capacidad de cómputo disponible, y a partir del volumen de cada una de las geometrías de estudio obtenido por medio del Solidworks®, se determinó un caudal de entrada por medio de la ecuación (3.1). Con el caudal de entrada definido fue posible determinar una velocidad de entrada 3.51[m/s] para la geometría digitalizada y de 3.65[m/s] para la geometría propuesta, a través de la ecuación (3.2).

$$Q_{entrada} = \frac{Vol_{geometria}}{t_{inyeccion}} \quad (3.1)$$

$$Vel_{entrada} = \frac{Q_{entrada}}{A_{entrada}} \quad (3.2)$$

Donde:

$Q_{entrada}$, es el caudal de entrada del polímero.

$Vol_{geometria}$, es el volumen de la geometría.

$t_{inyeccion}$, es el tiempo de inyección asumido.

$Vel_{entrada}$, es la velocidad de entrada del polímero.

$A_{entrada}$, es el área del punto de inyección.

El plástico inyectado se consideró como fluido No-Newtoniano, para lo cual se utilizó el modelo que mejor representa el comportamiento de los plásticos en estado líquido, basados en la literatura y los paquetes de cómputo especializados en el tema, el modelo de Cross (ecuación(3.3)) es el más adecuado, ya que contempla las dos mesetas Newtonianas y la zona de adelgazamiento (figura 3.11).

$$\eta(\gamma) = \frac{\eta_o}{1 + (\lambda\gamma)^{1-n}} \quad (3.3)$$

Donde:

$\eta(\gamma)$, es la viscosidad [Pa-s].

η_o , es la deformación viscosa o el "límite newtoniano", donde la viscosidad se aproxima a una constante a velocidades de cizalla muy bajas [Pa-s].

γ , es la velocidad de cizalla [1/s].

λ , es la constante de tiempo [s].

n , es el índice potencial en el régimen de velocidad de cizalla alta, que se determina mediante el ajuste de curva.

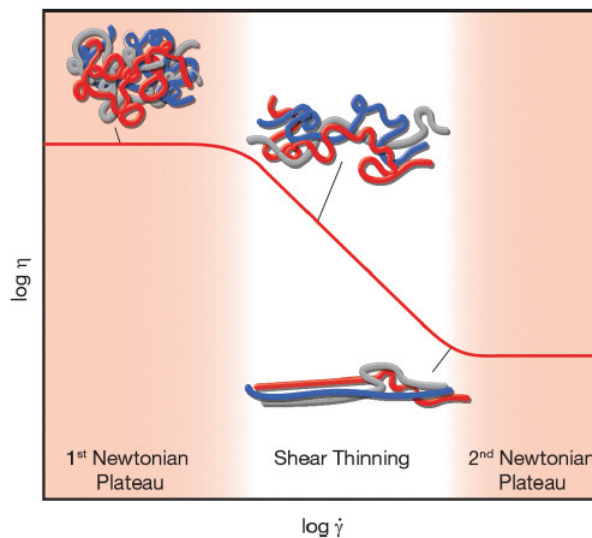


Figura 3.11: Comportamiento No-Newtoniano.

Los valores para el material plástico que se desea analizar se obtuvieron mediante la biblioteca de materiales del paquete de cómputo Moldflow Adviser 2017 R2 y Moldex3d. Para el caso del CYCOLOY XCY620S del fabricante SABIC Innovative Plastics US, LLC. se tiene que:

$$\eta_o = 355,598 [Pa/s] \quad (3.4)$$

$$\lambda = 0,002 [s] \quad (3.5)$$

$$n = 0,2735 \quad (3.6)$$

Con los datos obtenidos para el modelo de cross del material de estudio es posible graficar en escala logarítmica el comportamiento de la viscosidad con respecto a la velocidad de corte para diferentes temperaturas, como se muestra en la figura 3.12.

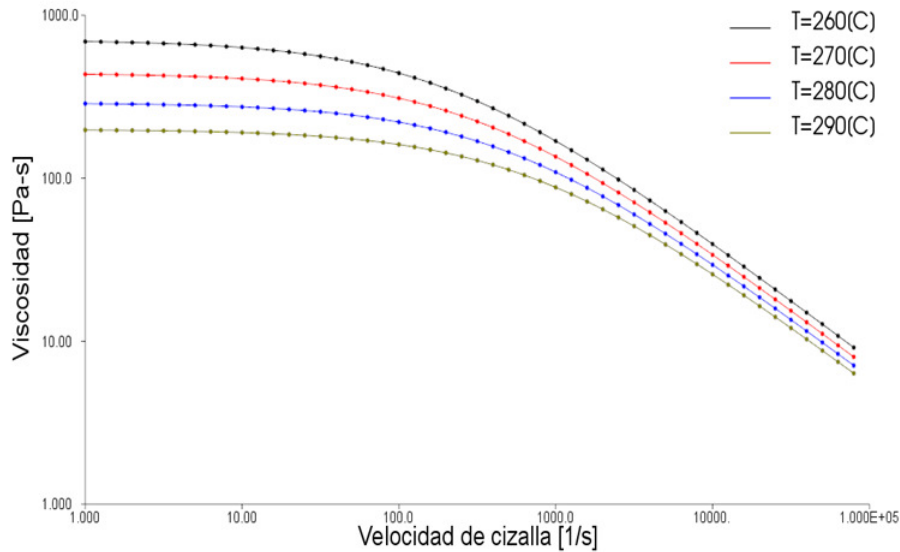
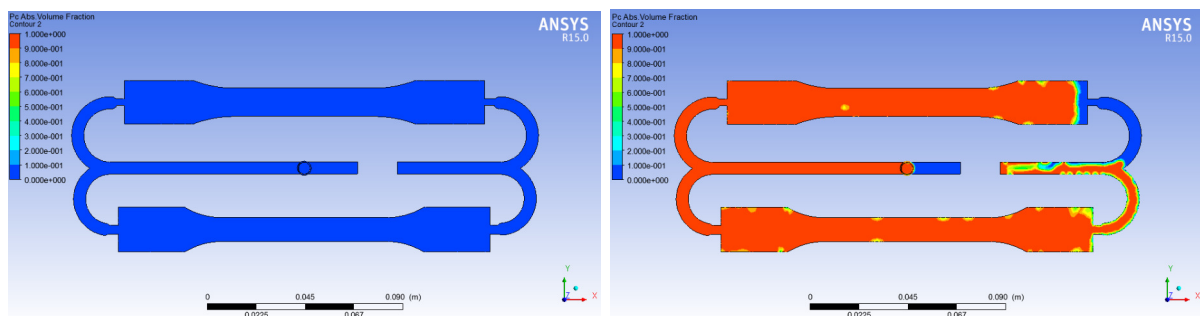


Figura 3.12: Comportamiento de la viscosidad con respecto a la velocidad de corte, para varias temperaturas (Moldflow Adviser 2017 R2®).

Las propiedades del aire se tomaron por defecto de la biblioteca de Ansys Fluent®, para utilizar este elemento como segunda fase del análisis, por último se debe considerar para iniciar la simulación un tamaño de paso de tiempo bajo, para lograr una mejor convergencia en cada paso de tiempo, para los casos de estudio con estos parámetros se requirió algo más de una semana de tiempo de solución o tiempo de cómputo, cabe resaltar que esto también dependerá de las capacidades de cómputo utilizadas.

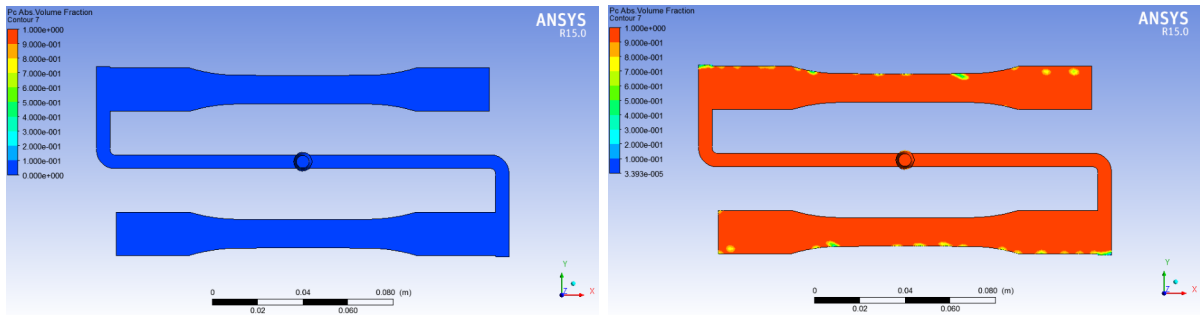
Teniendo todo lo anterior definido se procede a correr la simulación, se tuvo el cuidado de guardar los datos y casos cada 100 pasos de tiempo, con lo cual es posible revisar el seguimiento del frente de flujo a medida que avanza el llenado de las cavidades del molde de las probetas hasta el punto en que todo el aire (representado en color azul) contenido inicialmente fue desplazado y se tiene solo la fase del polímero (representado en color rojo) en el interior de la geometría, tal como se muestra en las figuras 3.13 y 3.14.



(a) Inicio de simulación geometría digitalizada

(b) Final de simulación geometría digitalizada

Figura 3.13: Fase del polímero al inicio y final de la simulación de la geometría digitalizada en Fluent®.



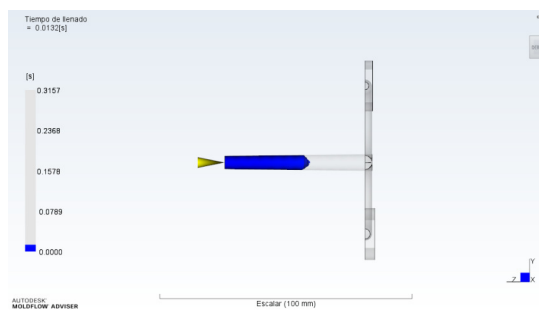
(a) Inicio de simulación geometría propuesta

(b) Final de simulación geometría propuesta

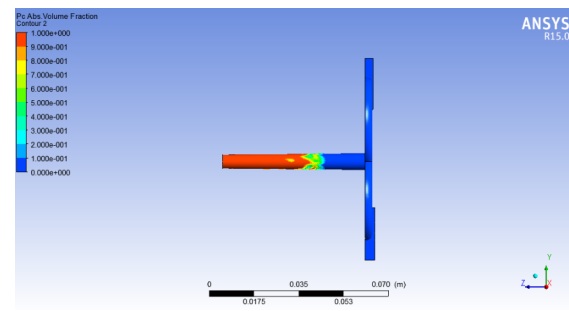
Figura 3.14: Fase del polímero al inicio y final de la simulación de la geometría propuesta en Fluent®.

Al no contar con datos experimentales no es posible validar que el seguimiento de flujo corresponda al llenado real de las cavidades, la opción que se utilizó en los casos de estudio fue realizar la simulación de las geometrías en el paquete de cómputo especializado Moldflow Adviser 2017 R2, bajo las mismas condiciones utilizadas en Fluent®, ya que dicho paquete de cómputo cuenta con casos de éxito comprobados en la simulación del proceso de inyección de plástico, y comparar los resultados obtenidos en ambos paquetes de cómputo, cabe resaltar que para validar definitivamente las simulaciones basta con realizar experimentalmente la inyección de las probetas por el método de disparos cortos y revisar de esta manera el frente de flujo, trabajo pendiente para el futuro de la actual investigación.

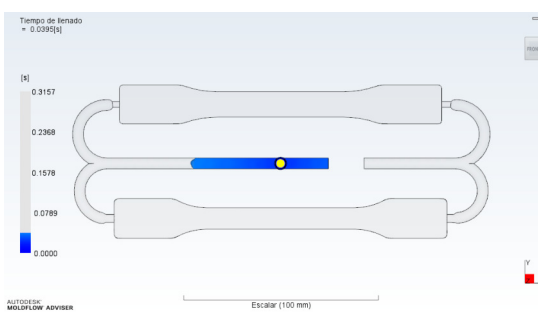
Los resultados y la respectiva comparación entre el seguimiento del frente de flujo entre las simulaciones realizadas en Fluent® y las simulaciones realizadas en Moldflow Adviser 2017 R2 se observan en la figura 3.15 para la geometría digitalizada y en la figura 3.16 para la geometría propuesta.



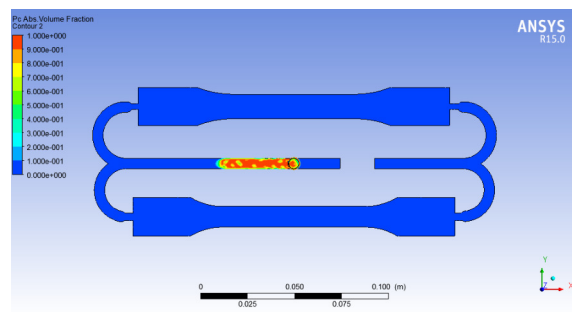
(a) Tiempo de llenado = 0.0132s Moldflow®



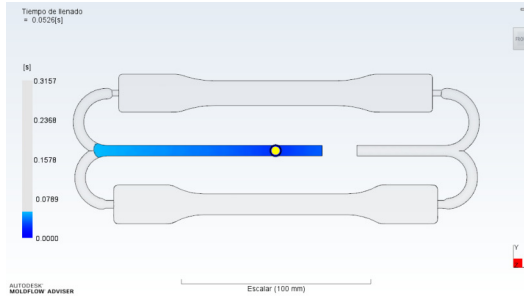
(b) Tiempo de llenado = 0.0132s Fluent®



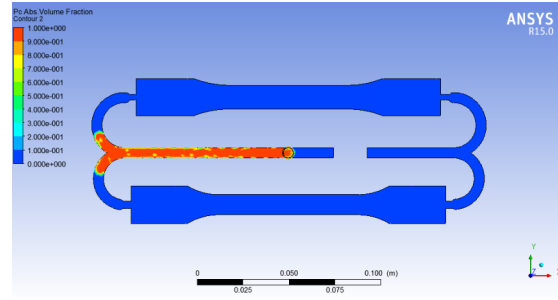
(c) Tiempo de llenado = 0.0395s Moldflow®



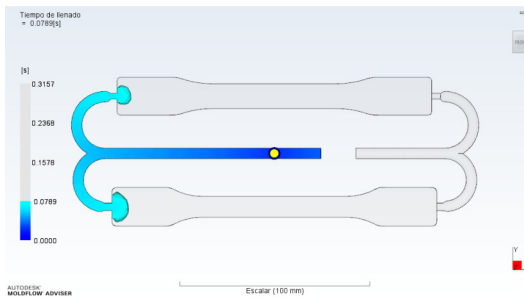
(d) Tiempo de llenado = 0.0395s Fluent®



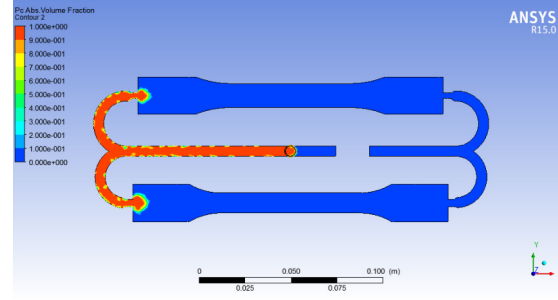
(e) Tiempo de llenado = 0.0526s Moldflow®



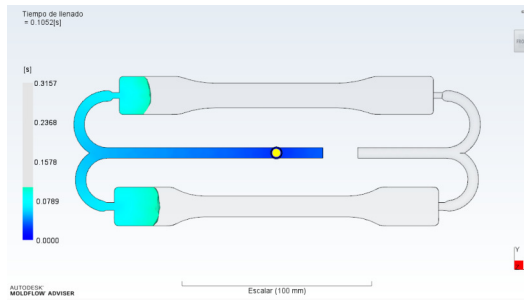
(f) Tiempo de llenado = 0.0526s Fluent®



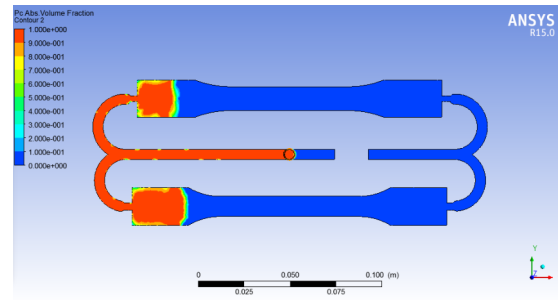
(g) Tiempo de llenado = 0.0789s Moldflow®



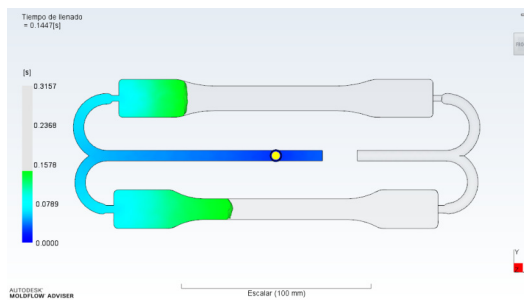
(h) Tiempo de llenado = 0.0789s Fluent®



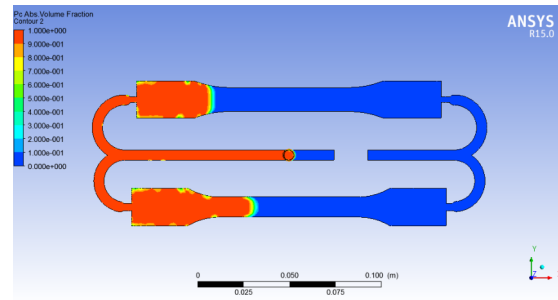
(i) Tiempo de llenado = 0.1052s Moldflow®



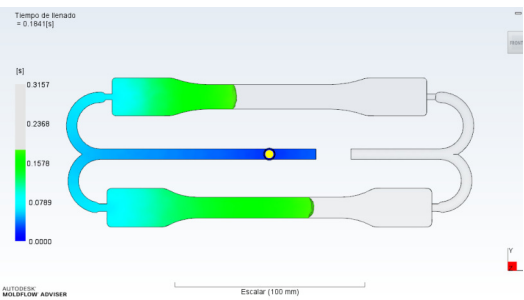
(j) Tiempo de llenado = 0.1052s Fluent®



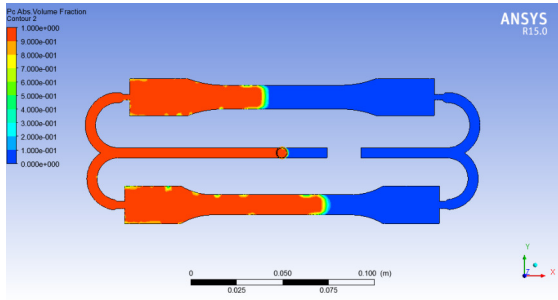
(k) Tiempo de llenado = 0.1447s Moldflow®



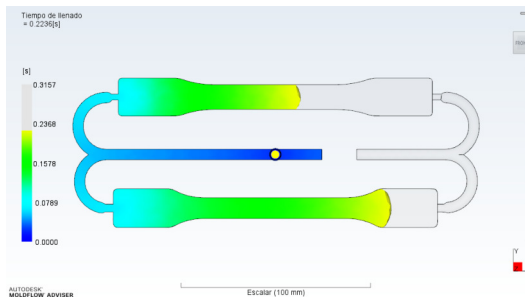
(l) Tiempo de llenado = 0.1447s Fluent®



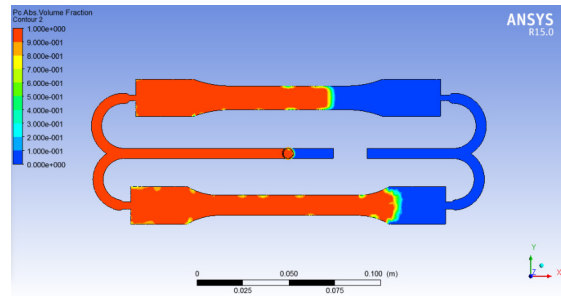
(m) Tiempo de llenado = 0.1841s Moldflow®



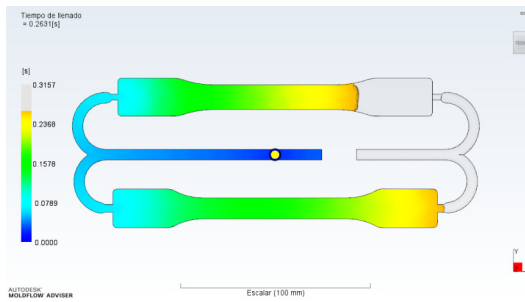
(n) Tiempo de llenado = 0.1841s Fluent®



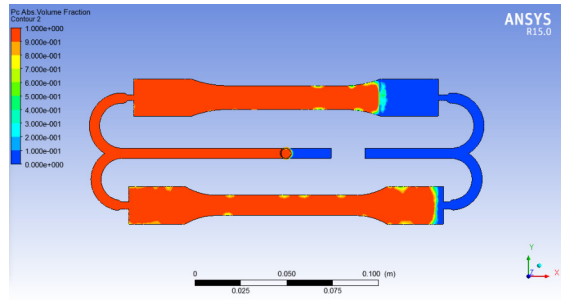
(ñ) Tiempo de llenado = 0.2236s Moldflow®



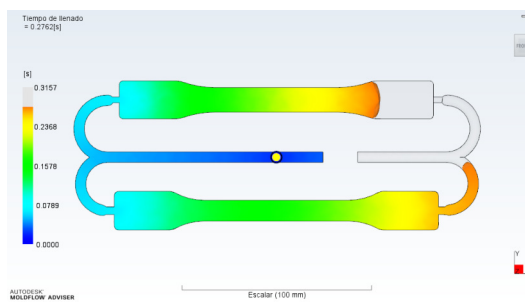
(o) Tiempo de llenado = 0.2236s Fluent®



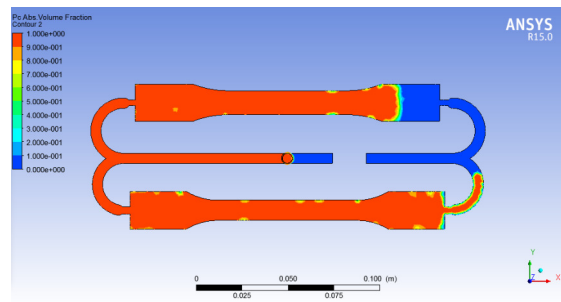
(p) Tiempo de llenado = 0.2631s Moldflow®



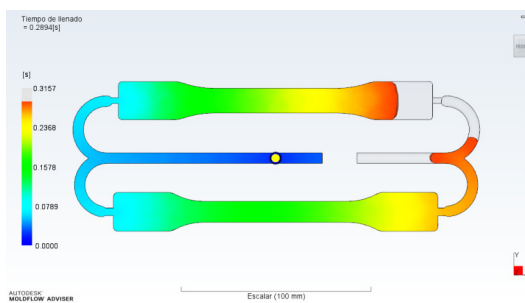
(q) Tiempo de llenado = 0.2631s Fluent®



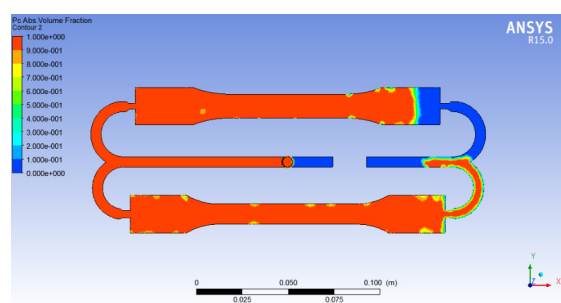
(r) Tiempo de llenado = 0.2762s Moldflow®



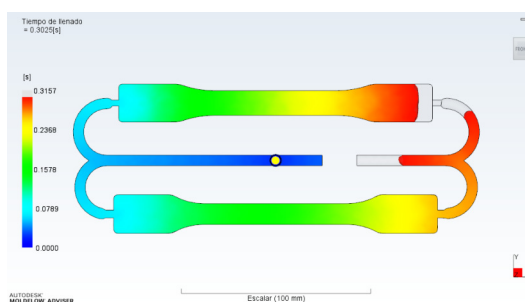
(s) Tiempo de llenado = 0.2762s Fluent®



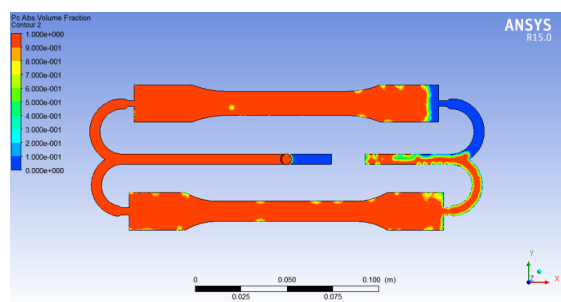
(t) Tiempo de llenado = 0.2894s Moldflow®



(u) Tiempo de llenado = 0.2894s Fluent®

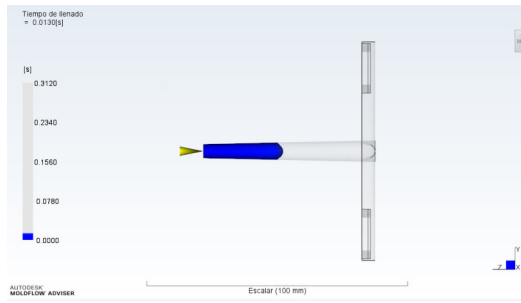


(v) Tiempo de llenado = 0.3025s Moldflow®

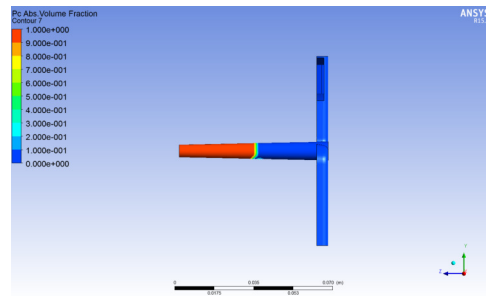


(w) Tiempo de llenado = 0.3025s Fluent®

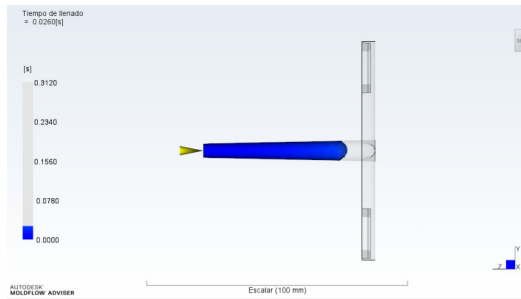
Figura 3.15: Seguimiento del frente de flujo a través del tiempo para Moldflow Adviser 2017 R2® y Fluent® de la geometría digitalizada.



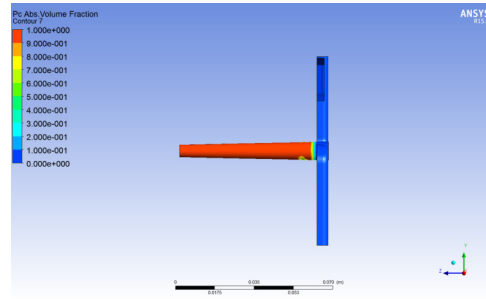
(a) Tiempo de llenado = 0.0130s Moldflow®



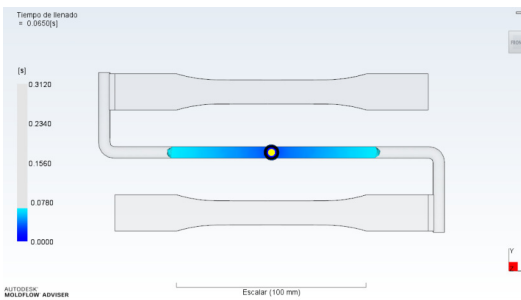
(b) Tiempo de llenado = 0.0130s Fluent®



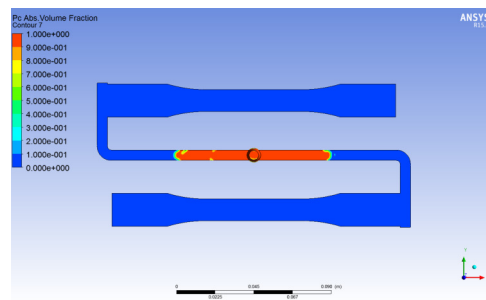
(c) Tiempo de llenado = 0.0260s Moldflow®



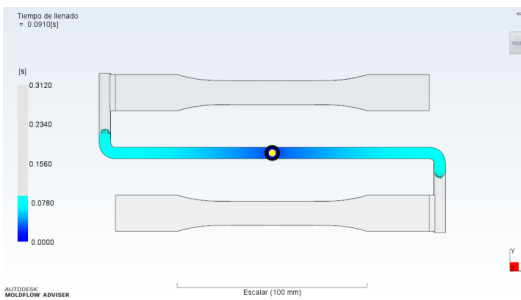
(d) Tiempo de llenado = 0.0260s Fluent®



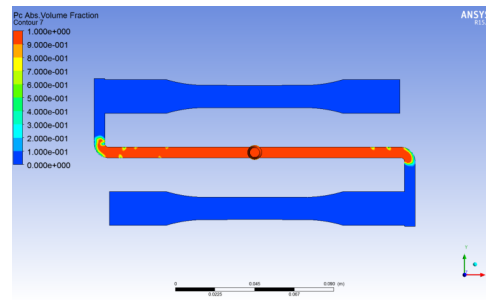
(e) Tiempo de llenado = 0.0650s Moldflow®



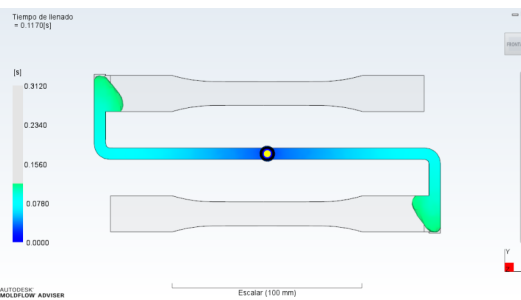
(f) Tiempo de llenado = 0.0650s Fluent®



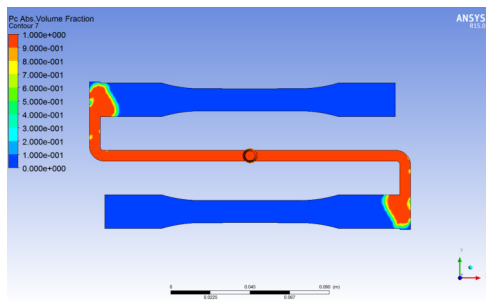
(g) Tiempo de llenado = 0.0910s Moldflow®



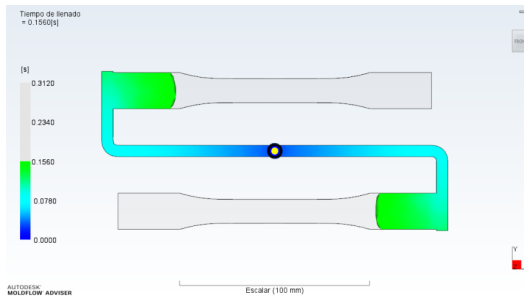
(h) Tiempo de llenado = 0.0910s Fluent®



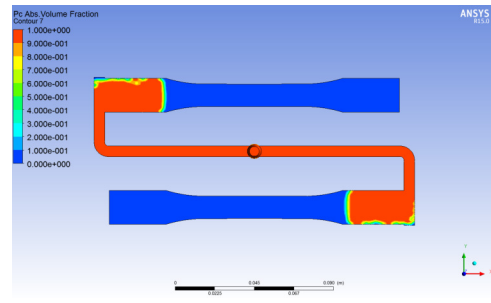
(i) Tiempo de llenado = 0.1170s Moldflow®



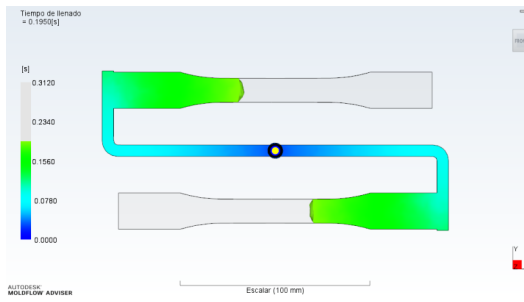
(j) Tiempo de llenado = 0.1170s Fluent®



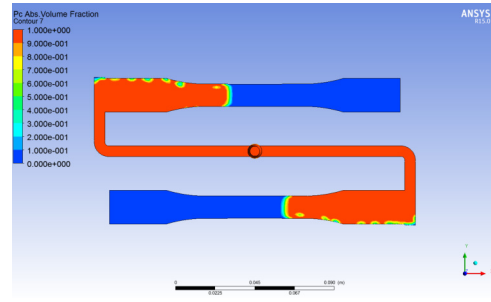
(k) Tiempo de llenado = 0.1560s Moldflow®



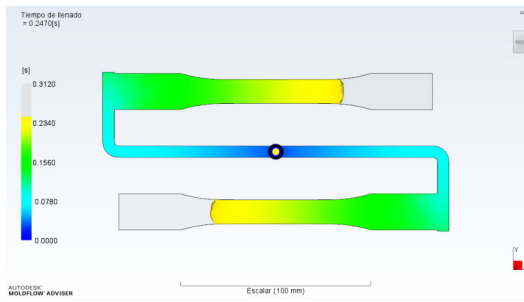
(l) Tiempo de llenado = 0.1560s Fluent®



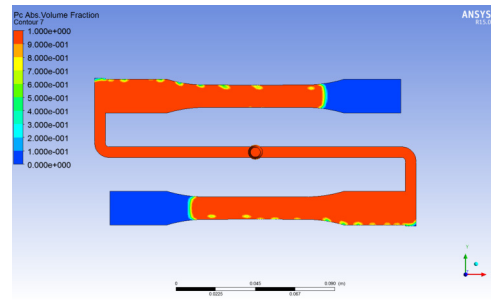
(m) Tiempo de llenado = 0.1950s Moldflow®



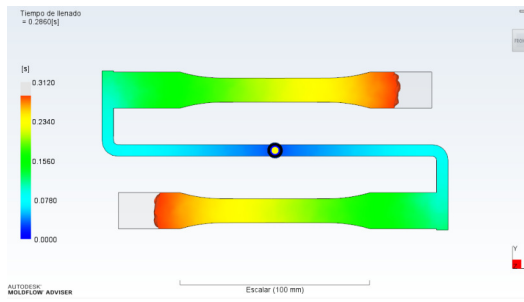
(n) Tiempo de llenado = 0.1950s Fluent®



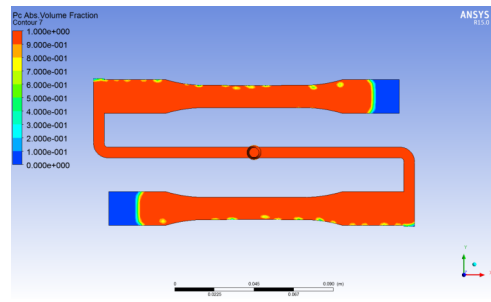
(ñ) Tiempo de llenado = 0.2470s Moldflow®



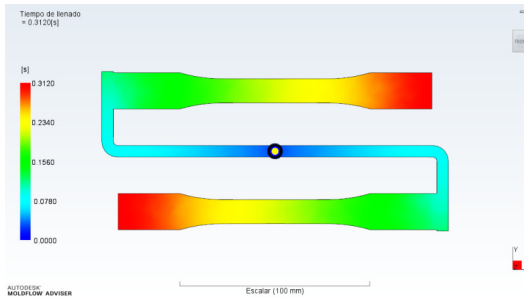
(o) Tiempo de llenado = 0.2470s Fluent®



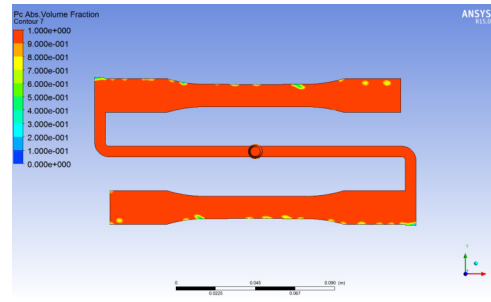
(p) Tiempo de llenado = 0.2860s Moldflow®



(q) Tiempo de llenado = 0.2860s Fluent®



(r) Tiempo de llenado = 0.3120s Moldflow®



(s) Tiempo de llenado = 0.3120s Fluent®

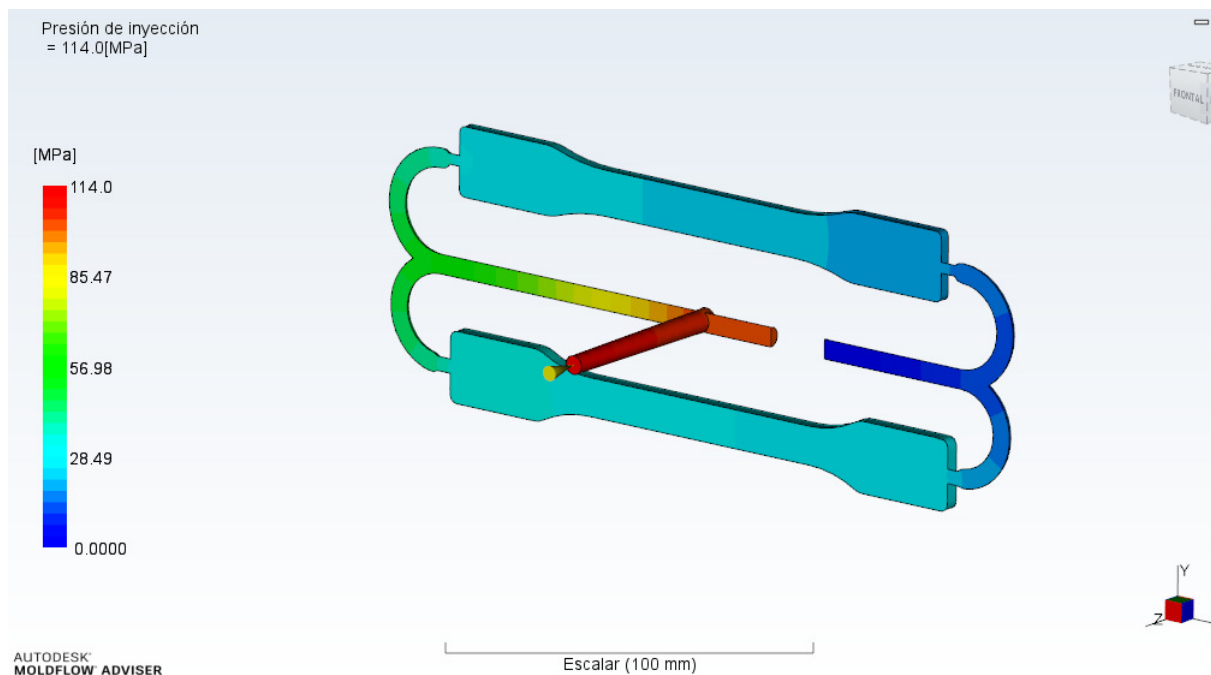
Figura 3.16: Seguimiento del frente de flujo a través del tiempo para Moldflow Adviser 2017 R2® y Fluent® de la geometría propuesta.

Se puede visualizar en los resultados de seguimiento del frente de flujo que en relación a la simulación de Moldflow Adviser 2017 R2, las simulaciones logradas en Fluent® cumplen correctamente con lo esperado en cuanto al tiempo y forma de llenado de las cavidades analizadas.

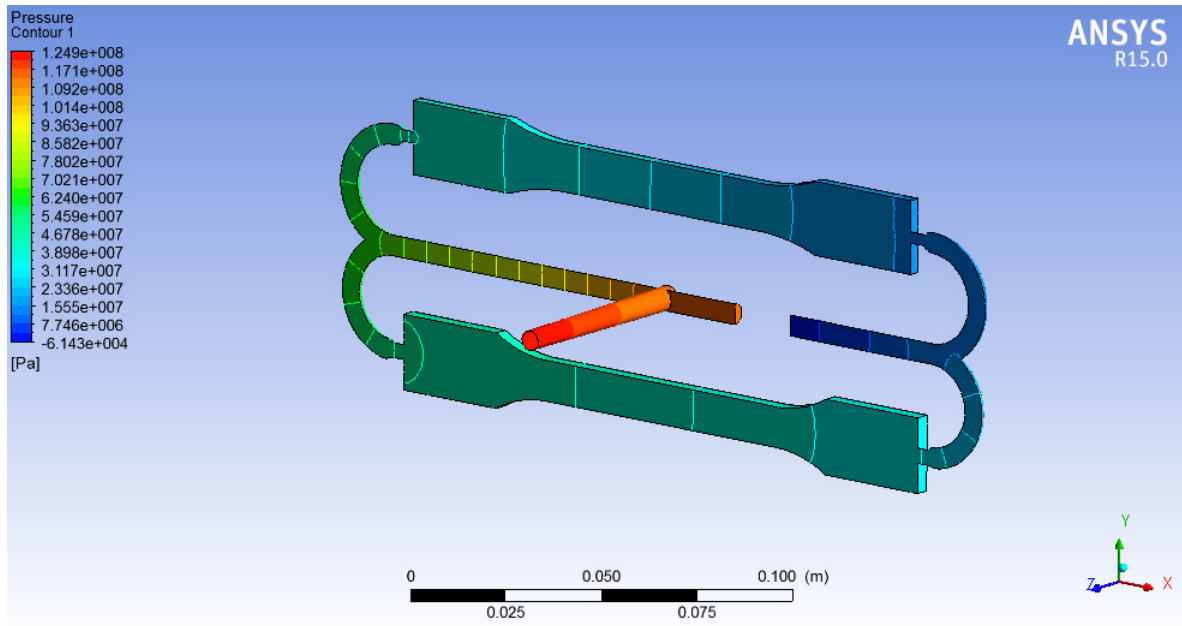
En el seguimiento del frente de flujo de la geometría digitalizada, se pudo observar que esta cuenta con dos modelos de probetas diferentes, una sigue la norma ASTM y la otra sigue la norma ISO, lo cual produce un llenado no uniforme de las cavidades. Al ser cavidades con distintas geometrías se buscó diseñar los corredores de manera que tuvieran la misma caída de presión y las cavidades se llenaran al mismo tiempo; pero se puede observar que no se tuvo éxito. Por último, también permitió ver que sin lugar a dudas la pieza que se obtendrá al final del proceso de inyección tendrá el defecto denominado línea de soldadura y tendrá dificultades de inyección en términos de presión y calidad.

En el seguimiento del frente de flujo de la geometría propuesta, es evidente que se diseñaron las cavidades para probetas idénticas tipo I de la norma ASTM D638, por lo que se tiene un llenado uniforme con canales de distribución balanceados, sin posibilidad de que se presente el defecto de línea de soldadura y con una notable mejora con respecto a la geometría digitalizada en cuanto a la calidad de inyección.

Comparando los resultados de presión de inyección tanto para la geometría digitalizado como para la geometría propuesta con los resultados en el paquete de cómputo Moldflow Adviser 2017 R2, se observa una desviación por debajo del 10 %, como se puede observar en las ecuaciones (3.8) a la (3.10), valor que se considera aceptable para el comparativo. Estos resultados se muestran en la figura 3.17 para la geometría digitalizada y en la figura 3.18 para la geometría propuesta.



(a) Presión de inyección Moldflow Adviser 2017 R2®= 114Mpa

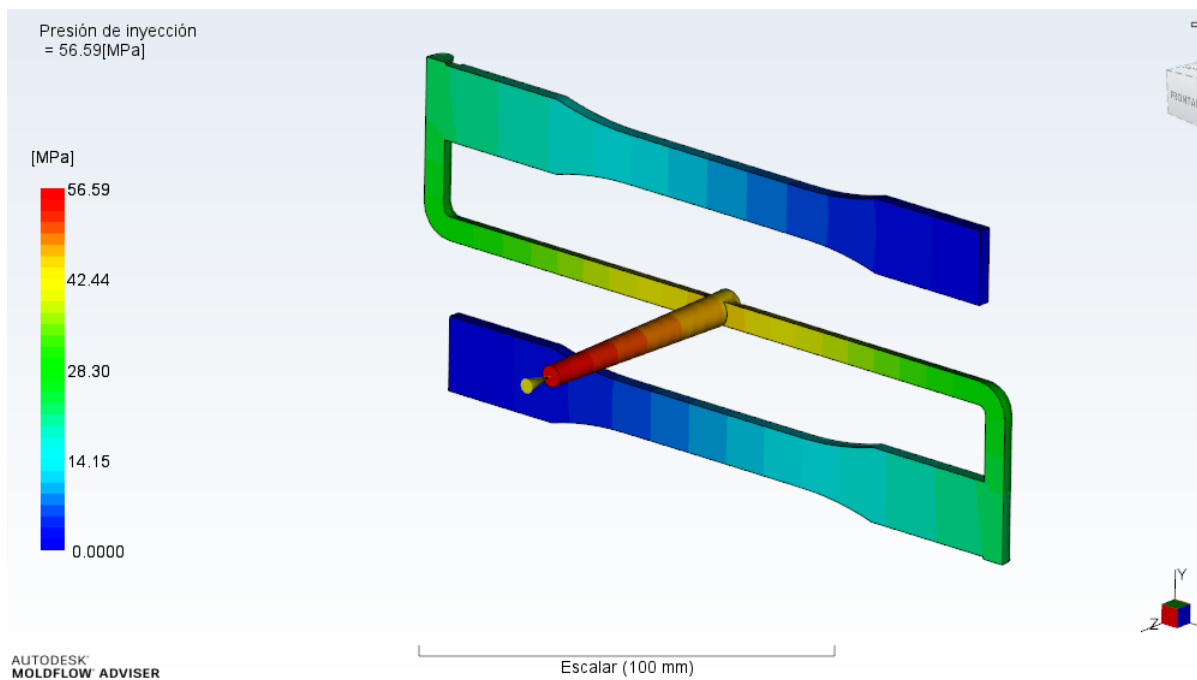


(b) Presión de inyección Fluent®= 124.9Mpa

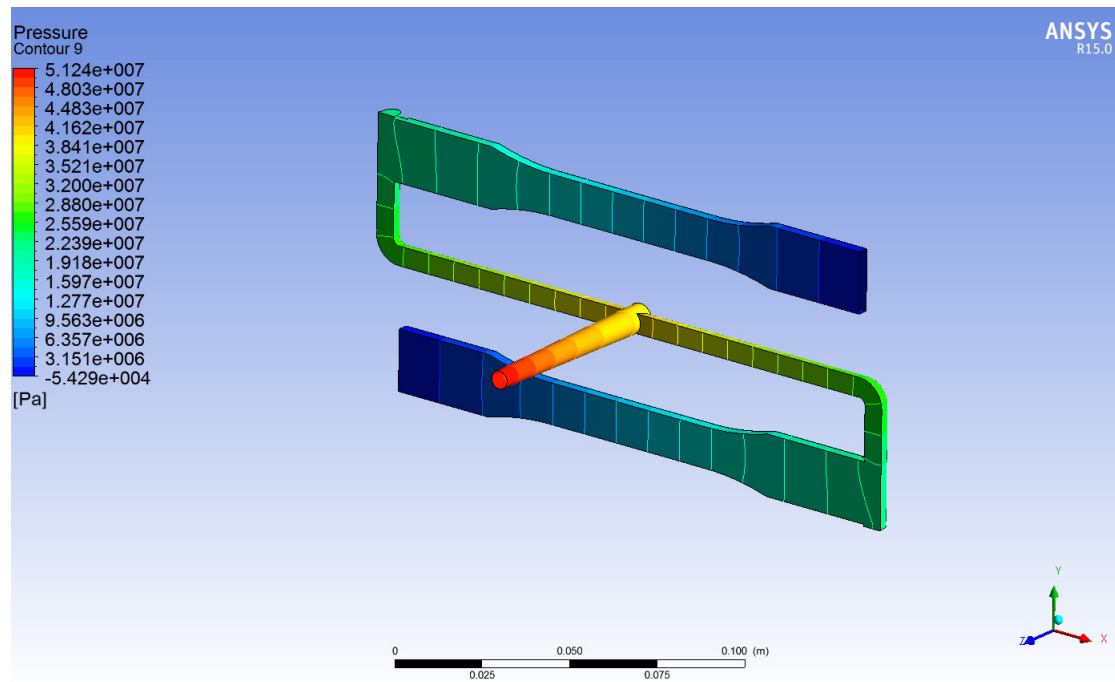
Figura 3.17: Resultados para la presión de inyección en la geometría digitalizada.

$$\%_{desviación} = \left| \frac{(124,9 - 114)}{114} \right| * 100 \quad (3.7)$$

$$\%_{desviación} = 9,56 \% \quad (3.8)$$



(a) Presión de inyección = 56.59Mpa



(b) Presión de inyección = 51.24Mpa

Figura 3.18: Resultados para la presión de inyección en la geometría propuesta.

$$\%_{desviación} = \left| \frac{(51,24 - 56,59)}{56,59} \right| * 100 \quad (3.9)$$

$$\%_{desviación} = 9,45 \% \quad (3.10)$$

Una alternativa a tener en cuenta si solo se desea hallar la presión de inyección necesaria para el llenado del molde es realizar una simulación en estado estable de la geometría de las cavidades. La simulación en estado estable genera el resultado en un tiempo corto y con baja desviación con respecto a los resultados obtenidos a través de la simulación multifásica, sin embargo, la simulación en estado estable no permite conocer el avance del frente de flujo a medida que se llena el molde, determinar el tiempo de llenado o prever defectos que dependen directamente del llenado del molde, como los denominados defectos de: disparo corto, línea de soldadura y atrapamiento de aire.

Se puede concluir que los resultados de presión de inyección se ajustan en buena forma a los resultados obtenidos mediante el paquete de cómputo especializado Moldflow Adviser 2017 R2, y comparando los resultados de presión de inyección entre la geometría digitalizada y la propuesta se puede igualmente concluir que la mejora es evidente, se reduce en más de un 50 % la presión de inyección necesaria para la obtención de las probetas, con lo cual ya es concluyente que el diseño propuesto cumple de forma más eficiente con las necesidades del proceso. De ahora en adelante se analizará únicamente los resultados que se obtengan para la geometría propuesta en las fases posteriores.

Una ventaja de simular el proceso de inyección de plásticos en un programa como Fluent® es que pueden desarrollarse análisis más profundos que los que hacen los programas especializados. Entre los parámetros que pueden analizarse dentro de Fluent® están los valores de velocidades y temperaturas al final de la fase de inyección del polímero. Para el caso de los valores de velocidades se observa como en las paredes de la geometría la velocidad de flujo es 0 [m/s], lo

que evidencia el efecto de la viscosidad del polímero, y en el centro de la geometría tendrá valores máximos de velocidad, generando un perfil parabólico de velocidades a lo largo del llenado de las cavidades. Para el caso de los valores de temperatura se puede visualizar temperatura de las paredes igual a 75°C , debido a que dicha temperatura corresponde con la temperatura del molde asignada y una temperatura de 275°C en el centro de la geometría debido a que es un proceso bastante rápido que no permite pérdida suficiente de temperatura asignada del polímero inyectado, estos resultados se muestran en las figuras 3.19 y 3.20.

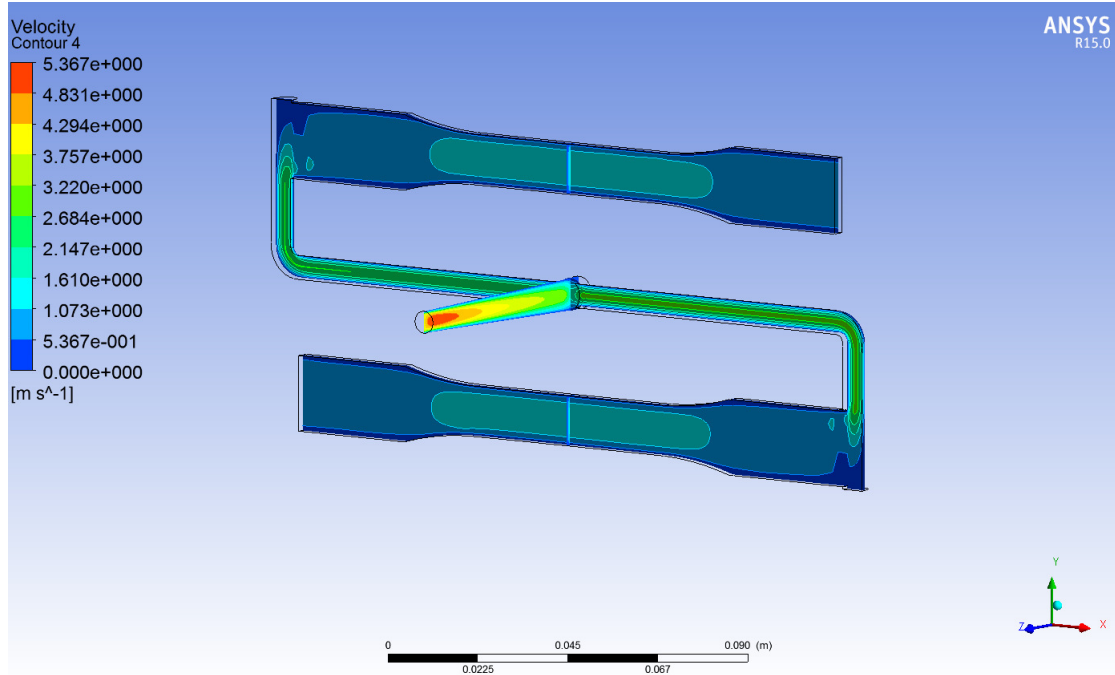


Figura 3.19: Resultado de las velocidades en el llenado de la cavidades de la geometría propuesta en Fluent®.

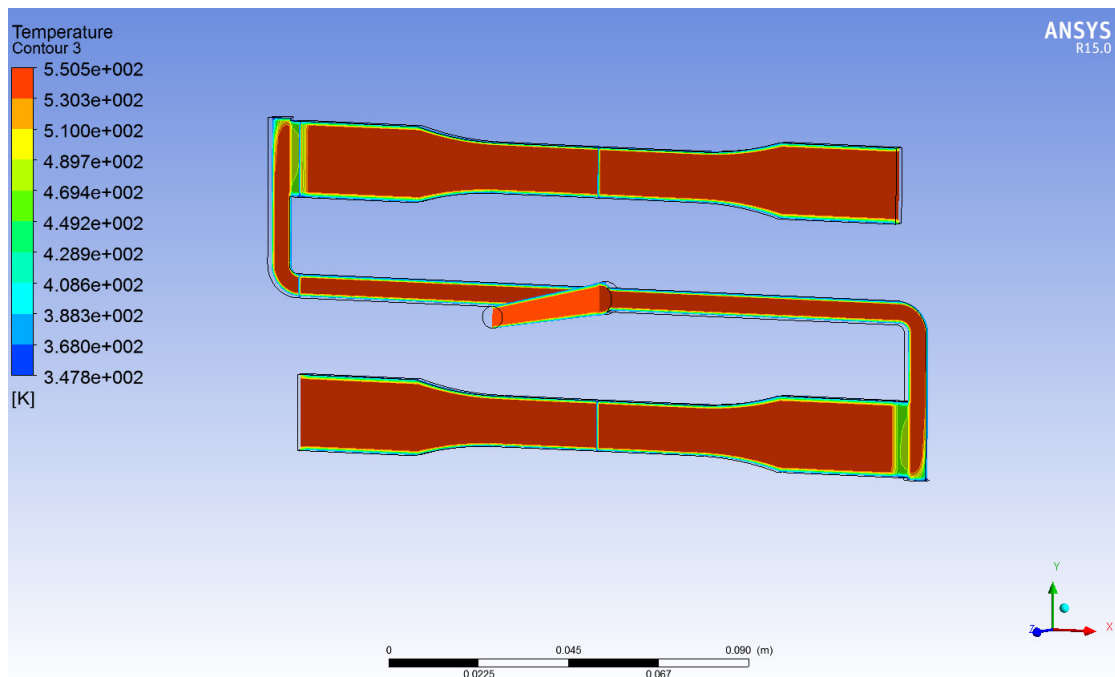


Figura 3.20: Resultado de las temperaturas en el llenado de la cavidades de la geometría propuesta en Fluent®.

Fue posible simular la fase de inyección dentro del módulo de Fluent de Ansys Workbench®), comparando los resultados con el paquete de cómputo especializado Moldflow Adviser 2017 R2, quedando pendiente realizar de manera experimental el proceso para validar los resultados obtenidos.

3.3. Simulación de la fase de solidificación

Posterior a la fase de inyección del polímero, comienza la fase de solidificación, en esta etapa se presenta un cambio de fase de líquido a sólido, para finalmente poder extraer la pieza terminada del molde.

Para llevar a cabo la simulación de la fase actual, es necesario contar con la curva de entalpía del material, esta curva puede obtenerse a partir de las curvas de calor específico C_p (figura 3.21) y volumen específico v (figura 3.22) ambas en función de la temperatura, estas curvas fueron obtenidas de la biblioteca del paquete de cómputo Moldflow Adviser 2017 R2. Obtener la curva de calor específico C_p y la curva de volumen específico v de manera experimental también es posible. Para la curva de calor específico C_p se requiere la técnica de calorimetría diferencia de barrido (DSC por sus siglas en ingles) en donde la diferencia de calor entre una muestra y una referencia es medida, obteniendo como resultado una curva de flujo calorífico versus temperatura o versus tiempo, este método cuenta con el estándar de la norma ASTM E1269. Para la curva de volumen específico v se requiere la técnica de dilatometría indirecta que mide el cambio dimensional de una sustancia en función de la temperatura mientras la sustancia es sometida a un programa de temperatura controlada, Varias normas internacionales, como: DIN 51045, ASTM E831, ASTM E228 y ASTM D3386 describen detalladamente esta técnica y sus procedimientos.

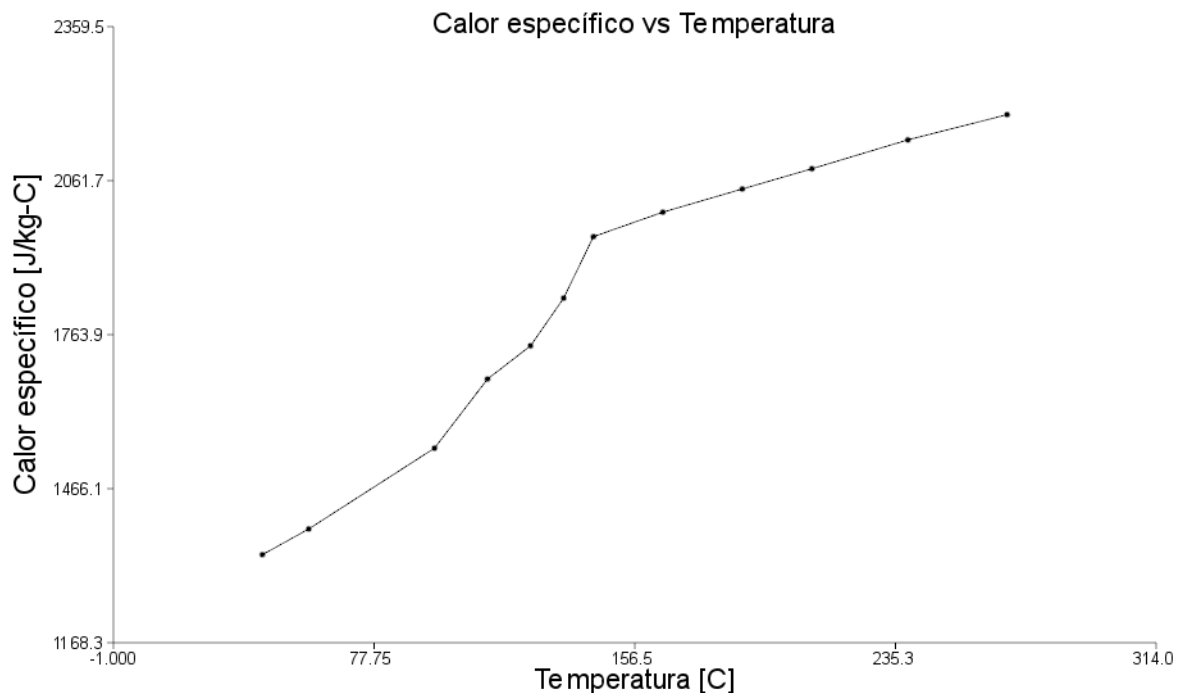


Figura 3.21: Variación del calor específico en función de la temperatura para el PC+ABS Moldflow Adviser 2017 R2®).

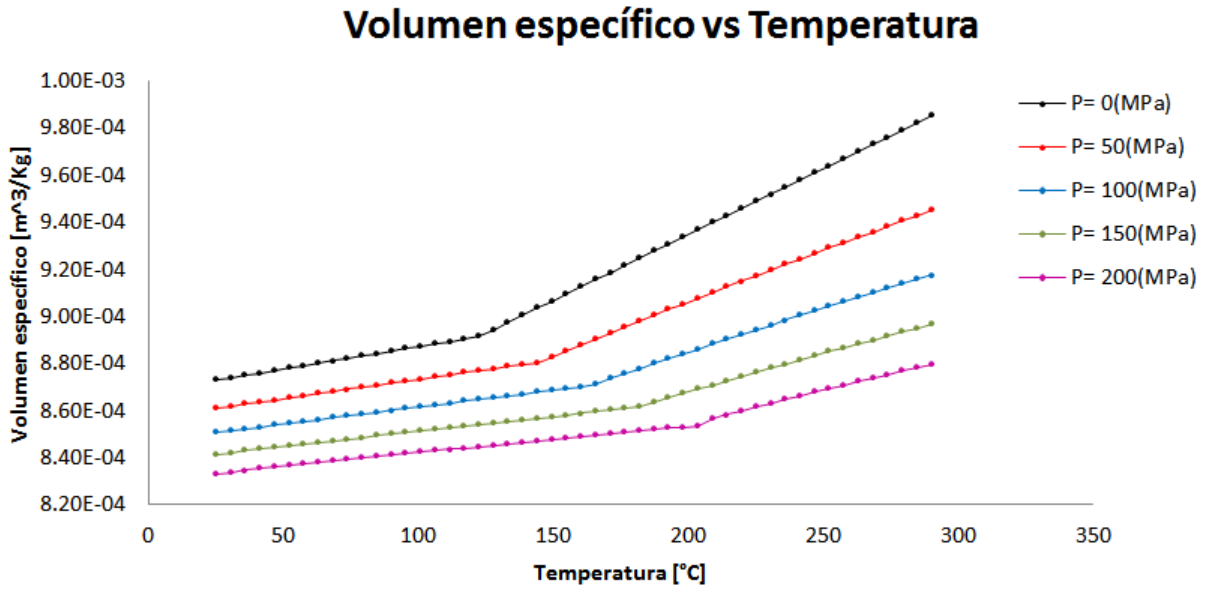


Figura 3.22: Variación del volumen específico en función de la temperatura para el PC+ABS Moldflow Adviser 2017 R2®.

Para encontrar la curva de entalpía se usó la siguiente ecuación (3.11), aplicable a sólidos y líquidos por ser incompresibles, el procedimiento se desarrolló tomando como guía a [5] y se describe a continuación:

$$Q_T(T) = \Delta H(T) \tag{3.11}$$

Por lo tanto, ecuación (3.12):

$$Q_T(T) = \Delta H(T) = mC_p(T) \Delta T \tag{3.12}$$

Dividiendo a ambos lados entre el volumen, obtenemos la ecuación (3.13):

$$\frac{\Delta H(T)}{V} = \frac{mC_p(T) \Delta T}{V} \tag{3.13}$$

En el segundo término se tiene la densidad ($\frac{m}{V}$), pero recordando que el volumen específico es igual a la inversa de la densidad y que se cuenta con este dato en función de la temperatura, se tiene la ecuación (3.14):

$$\Delta h(T) = \rho C_p(T) \Delta T = \frac{C_p(T) \Delta T}{v(T)} \tag{3.14}$$

Finalmente, es necesario encontrar la integral en la ecuación (3.15):

$$h(T) = \int \frac{C_p(T) \Delta T}{v(T)} \tag{3.15}$$

Como las curvas se tienen en forma numérica y no algebraica, fue necesario resolver la integral por métodos numéricos y así obtener la curva de entalpía en función de la temperatura como se observa en la figura 3.23.

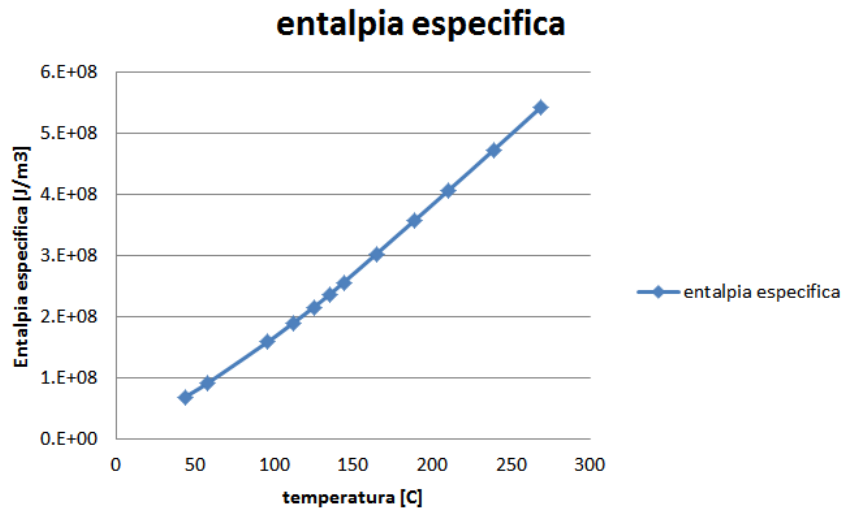
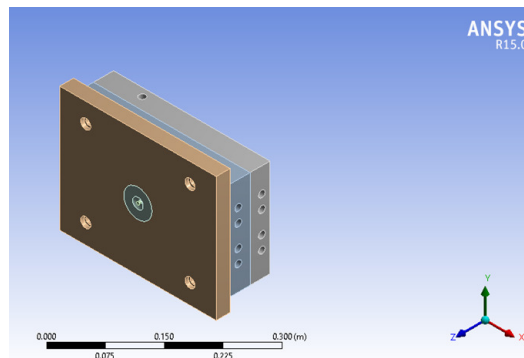


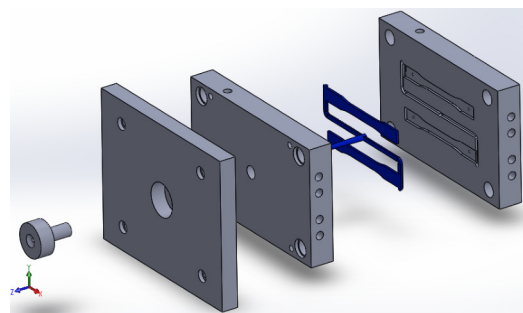
Figura 3.23: Variación de la entalpía específica en función de la temperatura para el PC+ABS.

Es importante visualizar de la figura 3.23, que para el caso del PC+ABS, al ser un polímero amorfo, no existe una zona de cambio de fase, simplemente se llega a la temperatura de reblandecimiento y las partículas rompen sus enlaces secundarios para pasar al estado líquido.

Para esta etapa no solo es necesario modelar la geometría de las cavidades en algún programa de CAD, para la fase de solidificación es necesario generar también la geometría de las placas del molde de inyección e importar desde Ansys® la geometría utilizada en la fase de inyección junto con esta última geometría generada del molde, figura 3.24, para poder analizar la transferencia de calor existente entre el polímero, el molde con sus canales de enfriamiento ya diseñados y el medio que los rodea.



(a) Vista acoplada



(b) Vista explosionada

Figura 3.24: Modelo CAD del molde de inyección de probetas para pruebas de tensión.

Para las condiciones de frontera en la fase de solidificación, se consideró que las superficies que se encuentran en contacto con la inyectora son adiabáticas, la temperatura inicial del molde se considera de $75^{\circ}C$ pues es la temperatura recomendada para el polímero y la temperatura del polímero inyectado en $275^{\circ}C$ ya que es la temperatura recomendada, el coeficiente de convección en las superficies donde el aire interactúa será $12 W/m^2K$, ya que según [31], el coeficiente de transferencia de calor por convección en gases bajo convección libre se puede considerar entre 2 a $25 W/m^2K$, y el coeficiente de convección forzada de agua a $20^{\circ}C$ fluyendo dentro de los canales de enfriamiento de $3116.523 W/m^2K$. En la Figura 3.25 podemos visualizar las condiciones de frontera mencionadas anteriormente.

El procedimiento para obtener el valor del coeficiente de convección del flujo de agua en los canales de enfriamiento se describen a continuación en las ecuaciones (3.16),(3.17),(3.18) y (3.19) con sus resultados, estas ecuaciones se obtuvieron de [31]. Se asumió un número de Reynolds (Re) de 8000 para garantizar flujo turbulento y permitir retirar mayor cantidad de calor, el diámetro (D) de los canales de enfriamiento es de 12 mm, tomando el criterio de la tabla 1.4, la viscosidad dinámica μ del agua a $20^{\circ}C$ es de $0.001 Pa-s$, su densidad ρ de $998.29 Kg/m^3$, su conductividad k de $0.58 W/mK$ y el número de Prandtl característico de 7.002, igualmente obtenidos de [31]:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu} = 8000 \quad (3.16)$$

$$f = (0,790 \ln(Re) - 1,64)^{-2} = 0,03355 \quad (3.17)$$

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} * (Re - 1000) Pr}{1 + 12,7(\frac{f}{8})^{\frac{1}{2}} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} = 64,48 \quad (3.18)$$

$$h_{canales} = \frac{Nu k}{D} = 3116,533 [W/m^2 K] \quad (3.19)$$

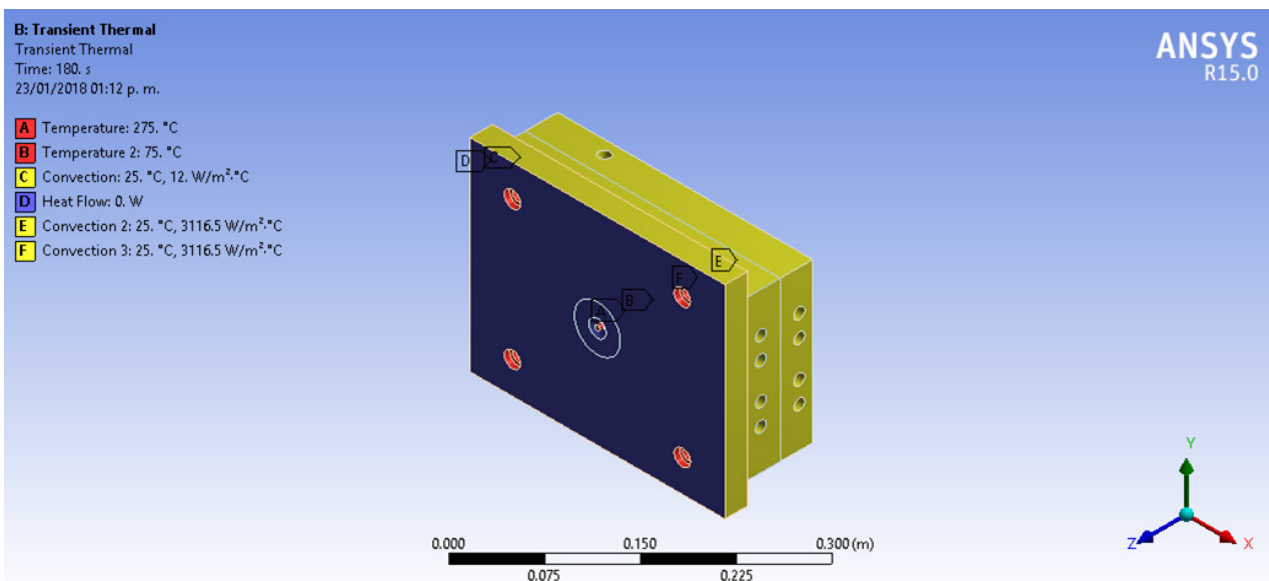
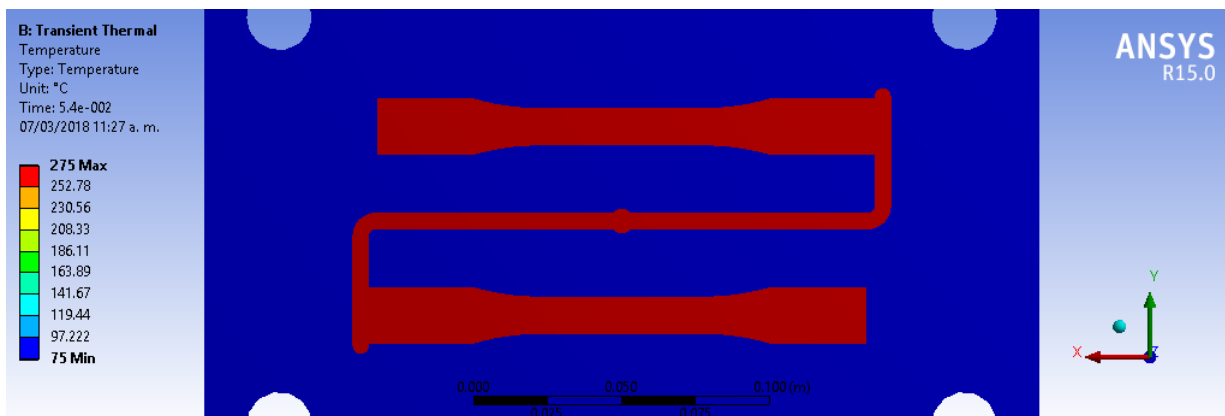


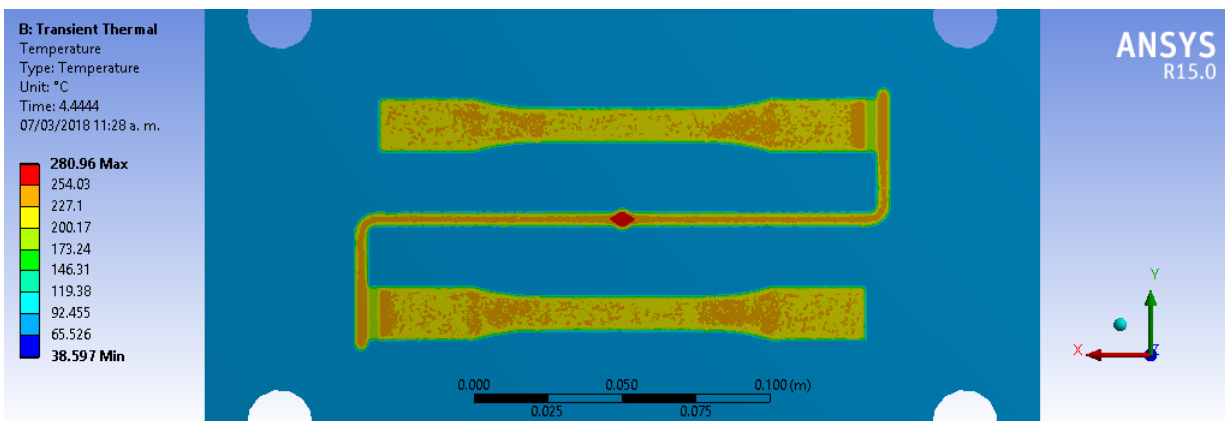
Figura 3.25: Condiciones de frontera térmicas en el molde de inyección.

La simulación se ajusta finalmente para que termine a los 180 segundos, tiempo suficiente para que el polímero inyectado baje su temperatura hasta alcanzar los 120°C en todo el volumen dentro de las cavidades, este valor es la temperatura de eyección sugerida para el PC+ABS tomada de la biblioteca de Moldflow Adviser 2017 R2.

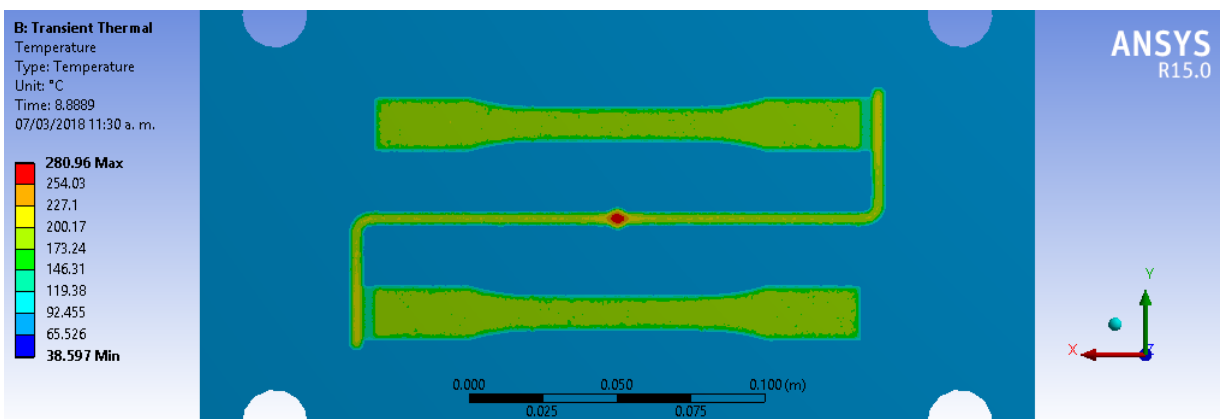
Después de obtener los resultados de la simulación se observa como el polímero inyectado se va enfriando iniciando por las paredes en contacto con el molde hasta su interior a través del tiempo, hasta alcanzar el equilibrio térmico con el molde de inyección en un tiempo mayor a 30 segundos, tal como se muestra en la figura 3.26, cabe resaltar que para producción en masa de probetas para pruebas de tensión, 30 segundos sería un buen tiempo para la expulsión de la pieza final, pero para motivos de investigación se puede dejar un mayor tiempo garantizando un total enfriamiento de la geometría y una expulsión algo más fácil.



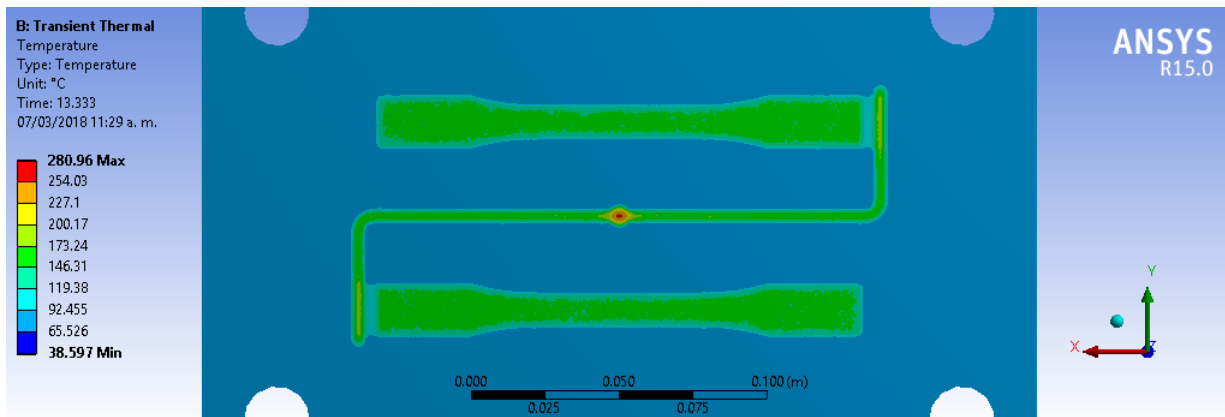
(a) Tiempo de solidificación = 0s



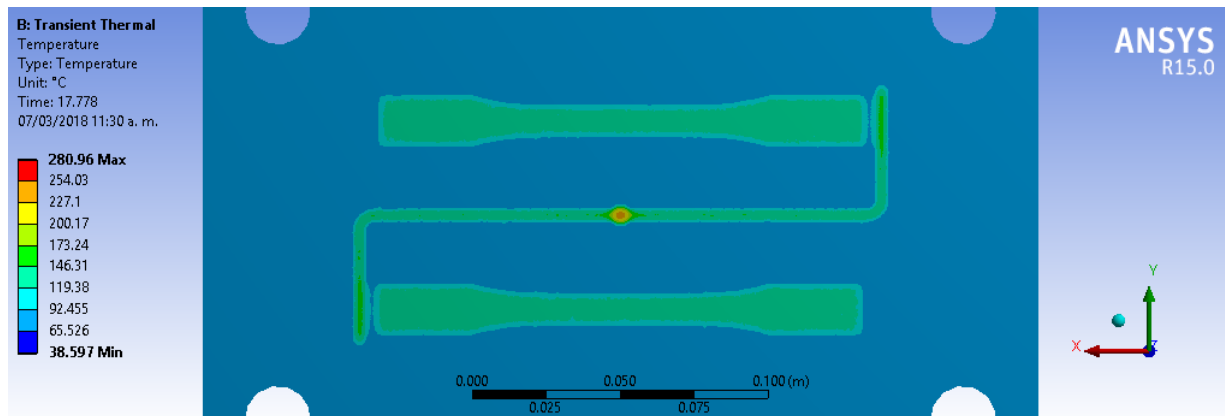
(b) Tiempo de solidificación = 4.4444s



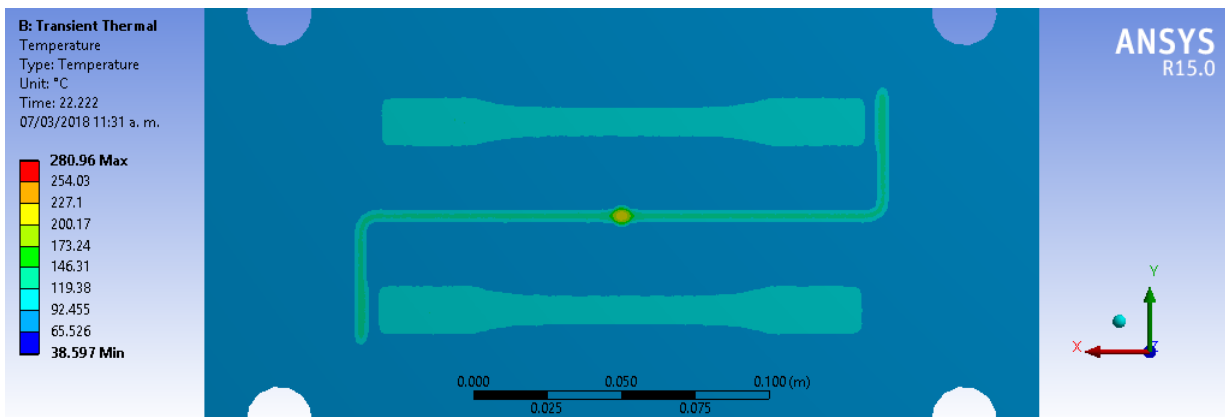
(c) Tiempo de solidificación = 8.8889s



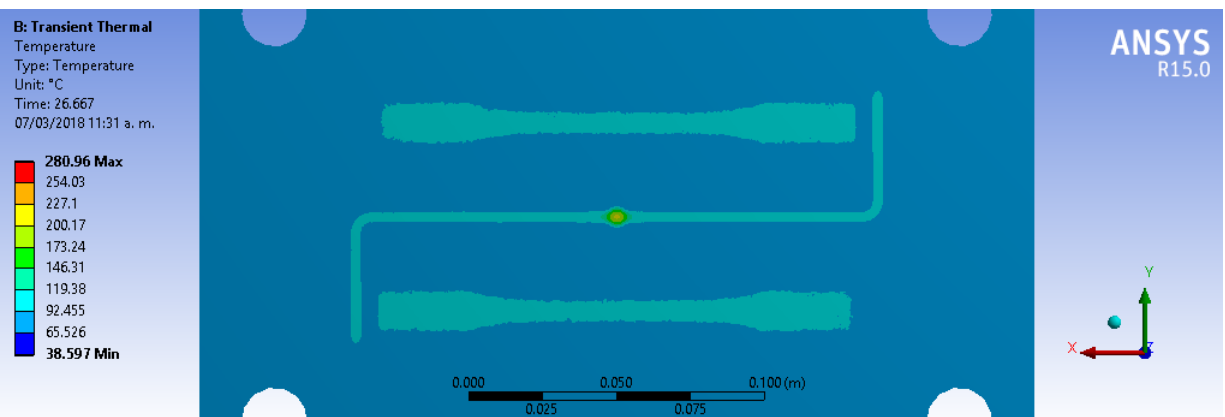
(d) Tiempo de solidificación = 13.333s



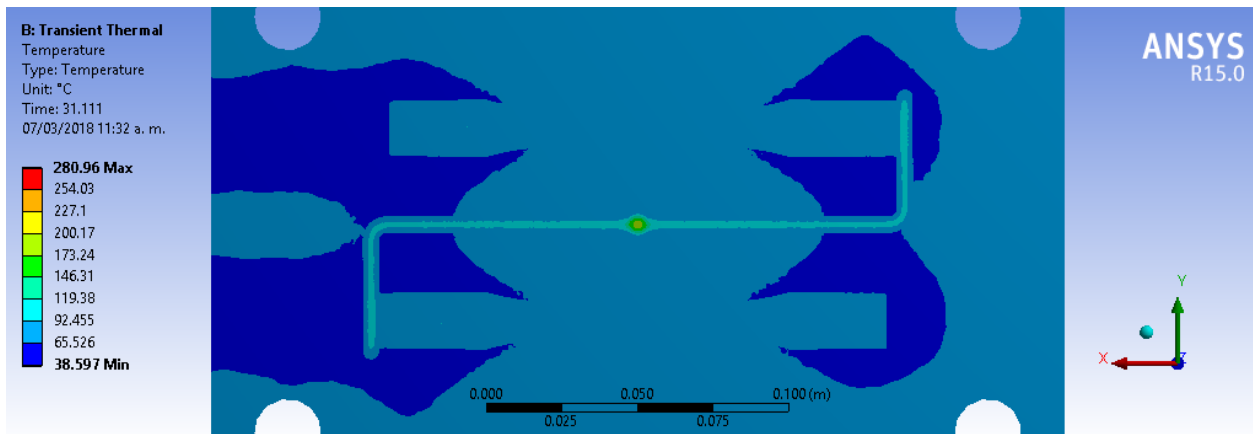
(e) Tiempo de solidificación = 17.778s



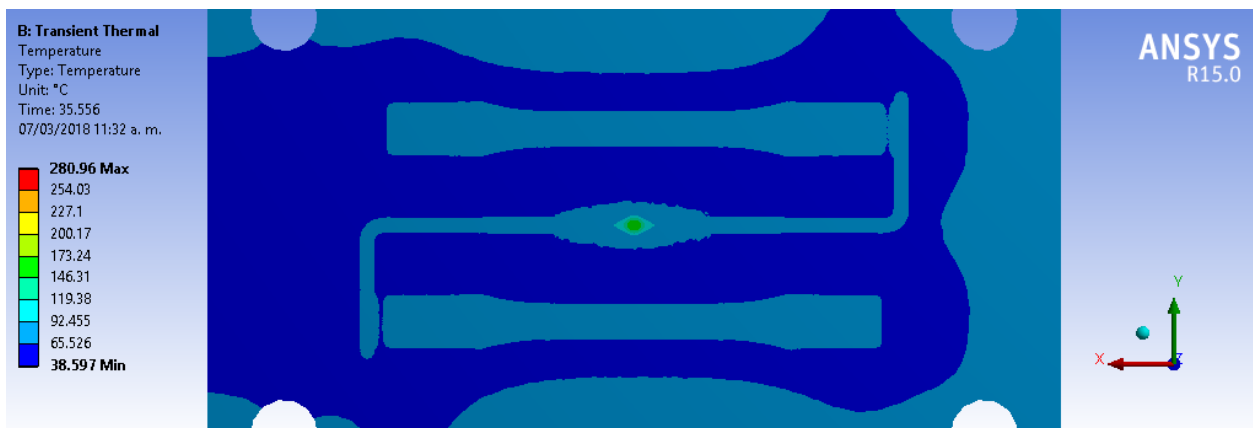
(f) Tiempo de solidificación = 22.222s



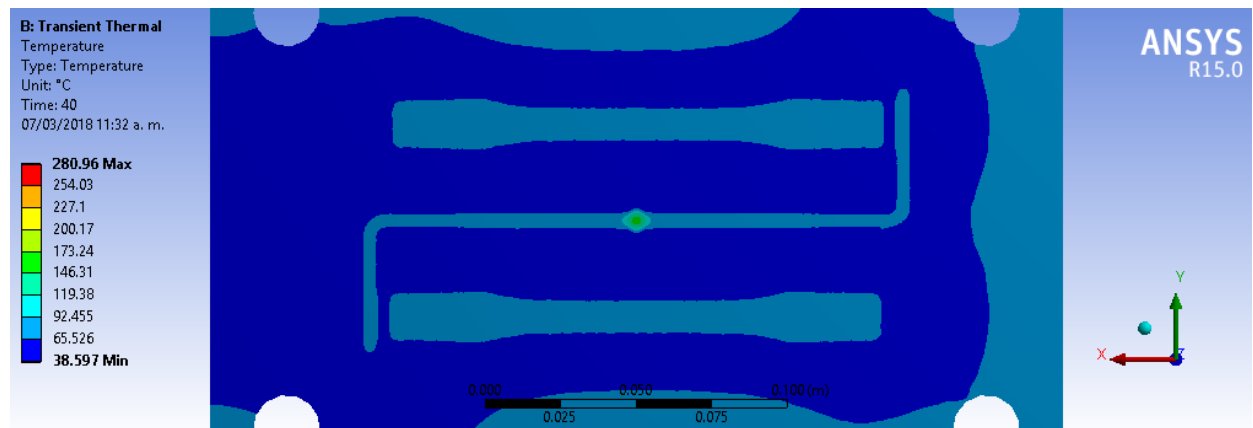
(g) Tiempo de solidificación = 26.667s



(h) Tiempo de solidificación = 31.111s



(i) Tiempo de solidificación = 35.556s



(j) Tiempo de solidificación = 40s

Figura 3.26: Resultados de la simulación de la fase de solidificación a través del tiempo.

Otra manera de garantizar que todo el polímero se encuentre a 120°C o por debajo de dicha temperatura de expulsión para el PC+ABS en la simulación de la fase de solidificación, es ubicando diferentes puntos de prueba estratégicamente en la geometría de las probetas (figura 3.28). Dado que los puntos se encuentran al interior del volumen, se muestran las secciones transversales que indican la distribución y posición exacta al interior de cada ubicación (figura 3.29). Las curvas resultado para cada uno de los puntos de prueba se muestran en la figura 3.27, puede observarse que las curvas alcanzan la temperatura deseada de expulsión en un tiempo aproximado a 30 segundos para todos los puntos de prueba.

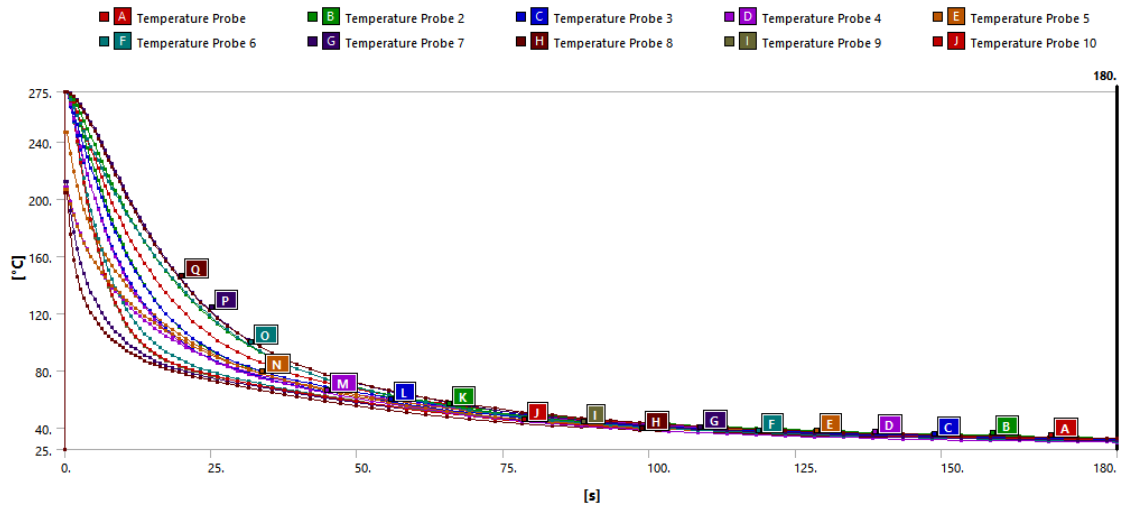


Figura 3.27: Resultados de la solidificación para los puntos de prueba dentro de la geometría de las probetas.

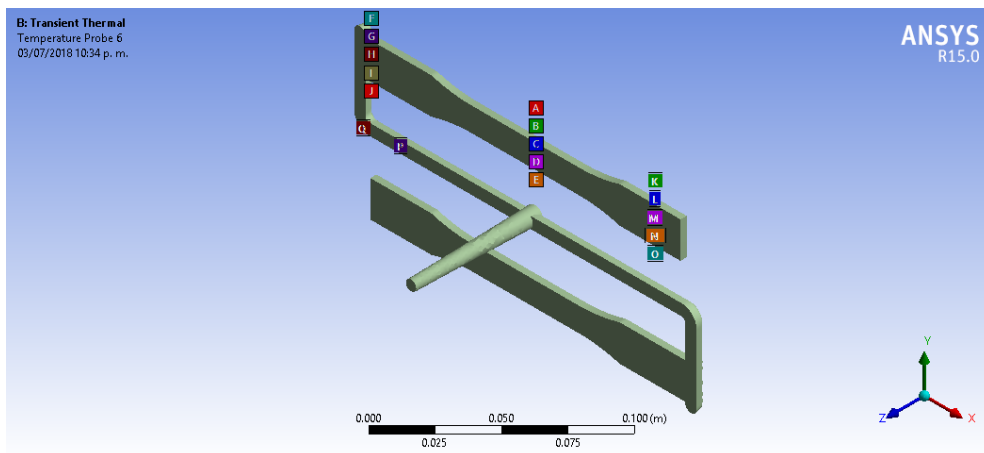
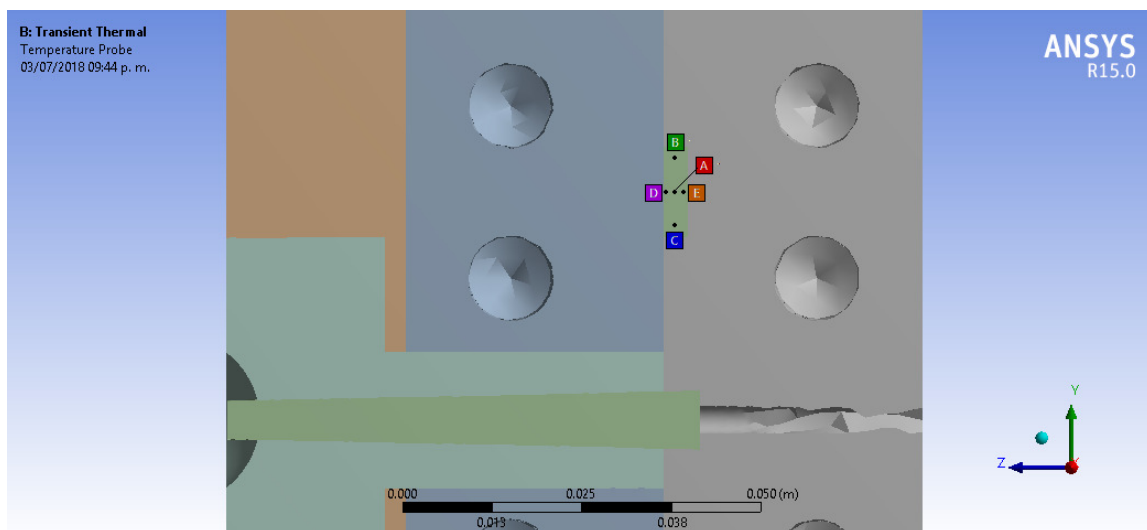
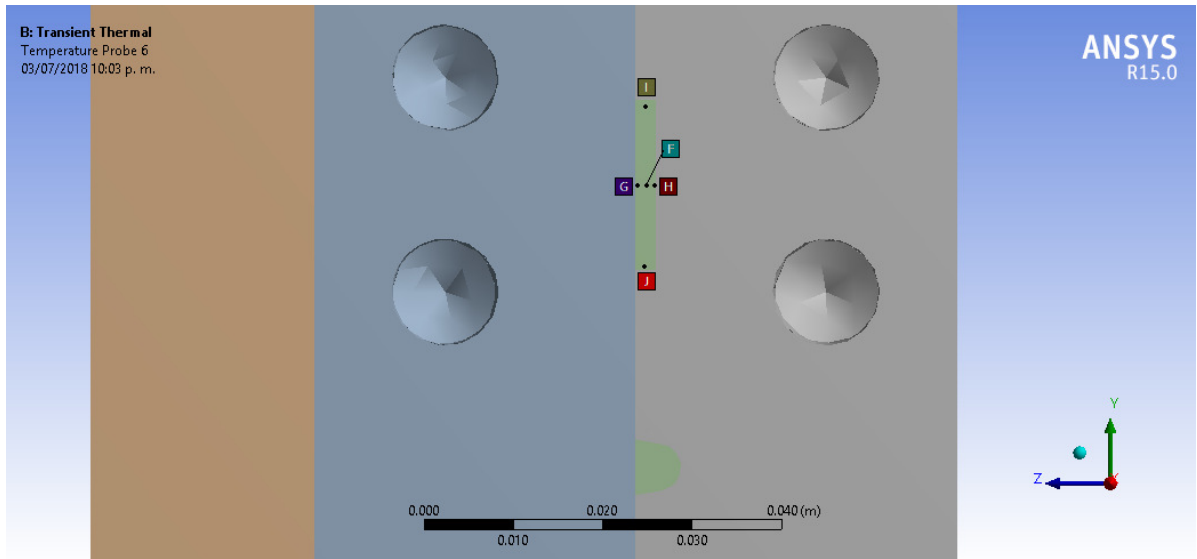


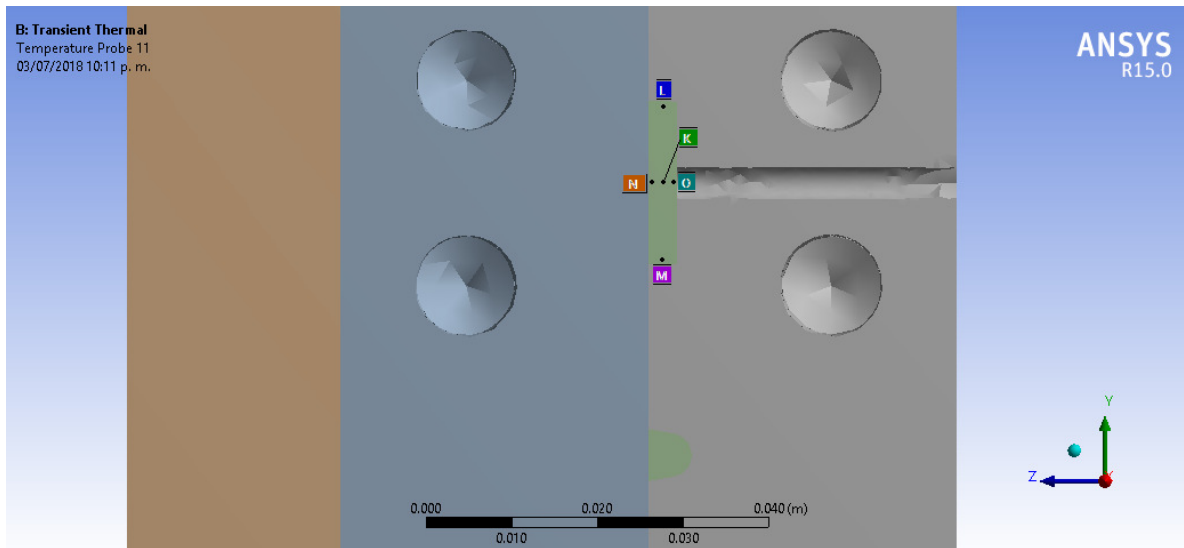
Figura 3.28: Ubicación puntos de prueba en la geometría de las probetas.



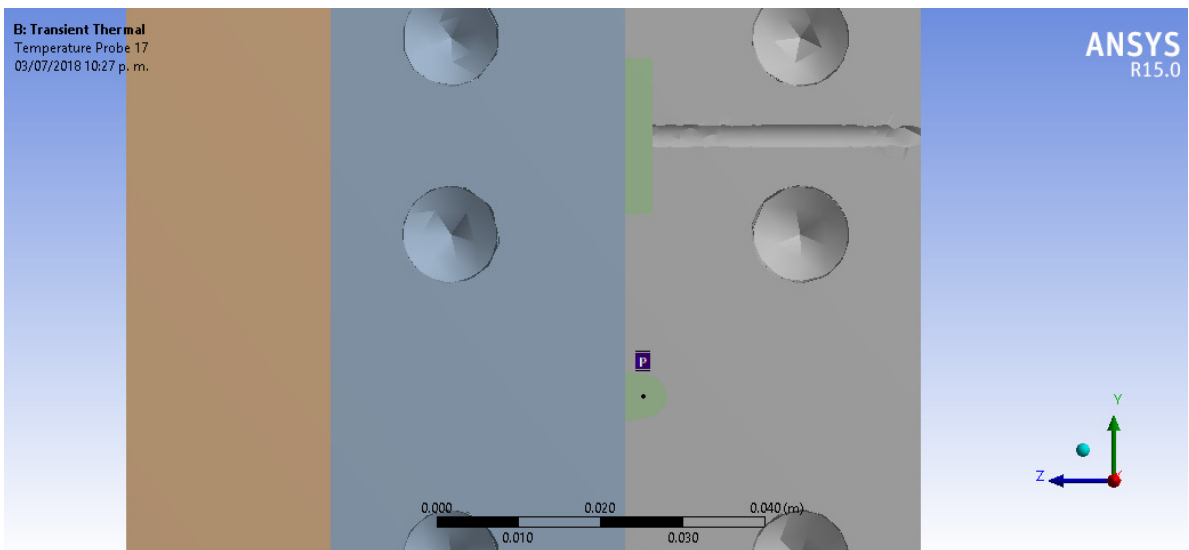
(a) ubicación: parte central de la probeta



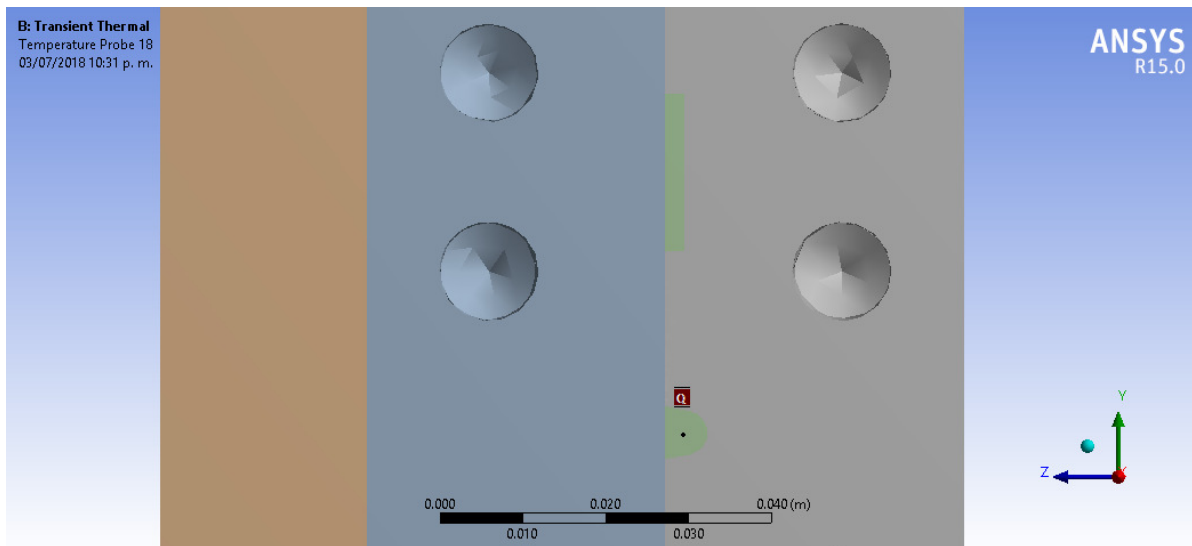
(b) ubicación: compuerta de la probeta



(c) ubicación: área de agarre de las mordazas



(d) ubicación: canal de distribución



(e) ubicación: canal de distribución

Figura 3.29: Secciones transversales de la ubicación de los puntos de prueba.

3.4. Simulación por interacción fluido estructural FSI

Mediante análisis por interacción fluido estructural se permite importar los resultados de la fase de inyección y solidificación del proceso de inyección de plásticos a un entorno de análisis estructural considerando las presiones y temperaturas como cargas que deben ser consideradas para el análisis del molde. Se buscó también por medio del análisis de fuerzas de reacción en las placas del molde, encontrar la fuerza de cierre necesaria para evitar el defecto denominado como rebaba.

La configuración para el análisis por interacción fluido estructural FSI para el proceso de inyección dentro de Ansys Workbench® se muestra en la figura 3.30.

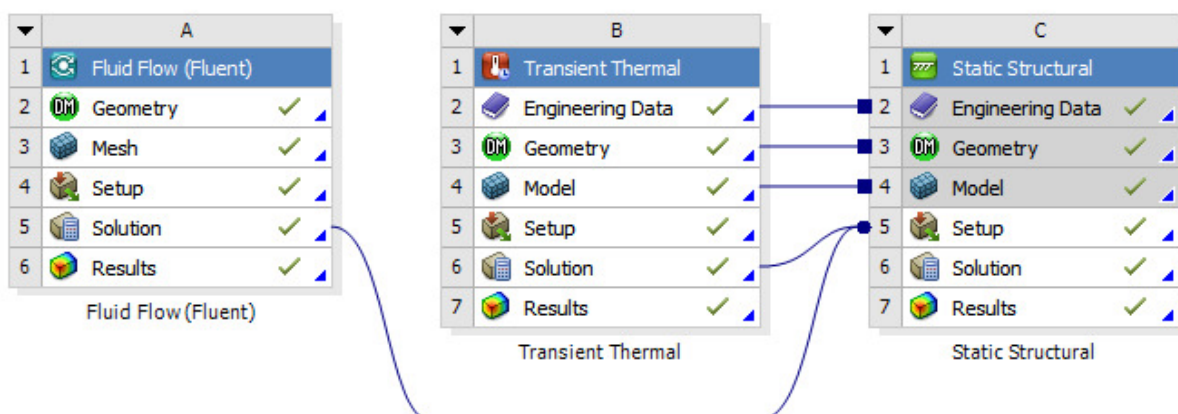


Figura 3.30: Análisis fluido estructural FSI para el proceso de inyección de plásticos dentro de Ansys Workbench®.

Para el análisis estructural se aplicaron restricciones de movimiento sobre el molde, evitando el desplazamiento en la dirección Z de las caras en contacto con la máquina inyectora, como estrategia para determinar a partir de la simulación la fuerza mínima de cierre necesaria para mantener el molde cerrado, se evitó la posibilidad de giro en los componentes del molde, y se permitió los desplazamientos en las direcciones XY para permitir la expansión del molde, como se muestra en la figura 3.31.

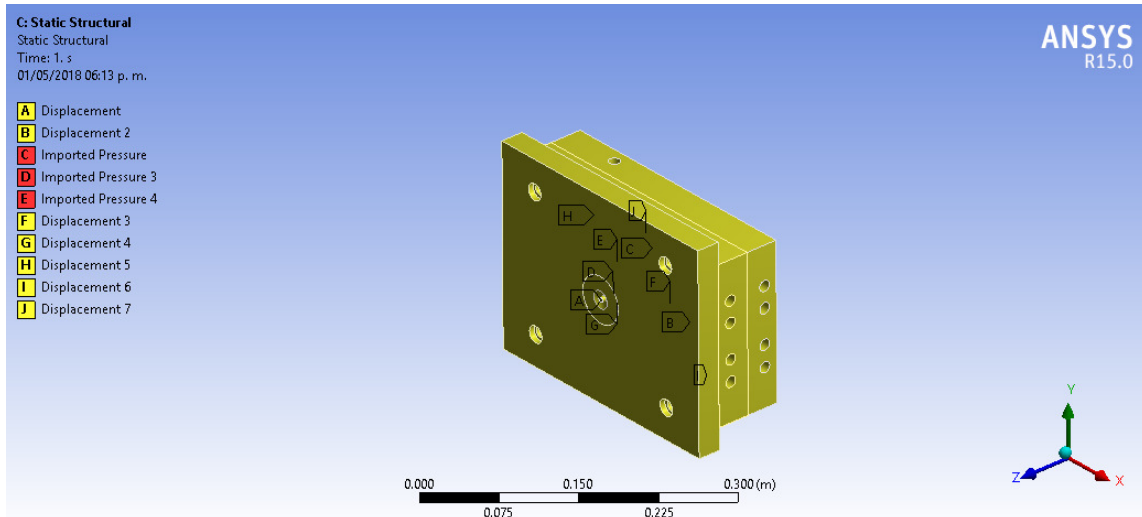
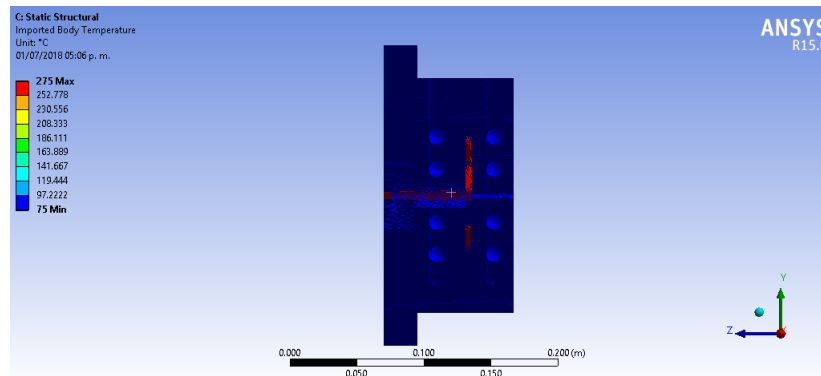
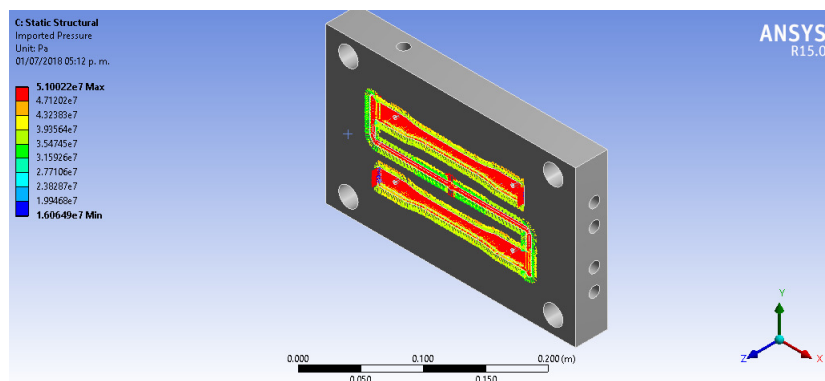


Figura 3.31: Restricciones de movimiento para el análisis fluido estructural FSI.

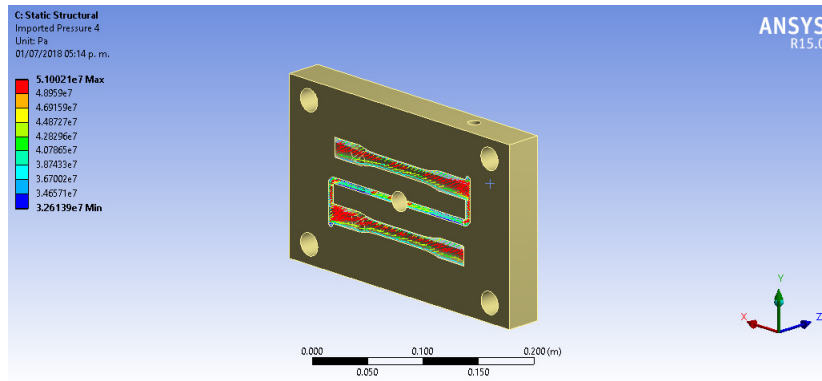
Se analizó estructuralmente la etapa final de la fase de inyección del polímero, considerando como crítica la presión y temperatura en esta etapa, es por esto que se importan dichos resultados de la fase de inyección y solidificación, como se muestra en la figura 3.32.



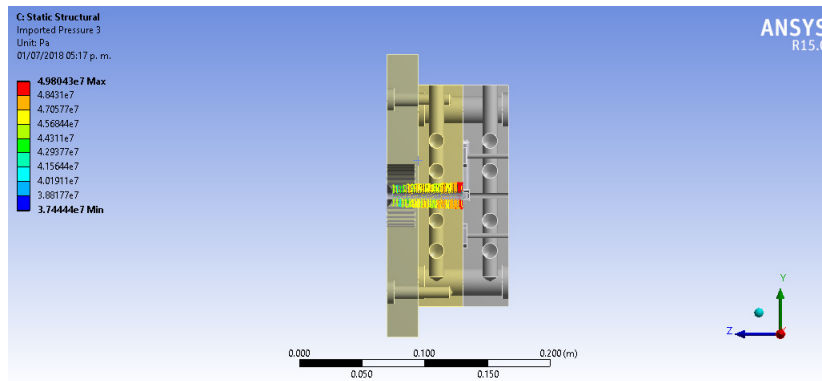
(a) Temperaturas al final de la fase de inyección



(b) Presión soportada por el negativo del molde de inyección



(c) Presión soportada por el positivo del molde de inyección



(d) Presión soportada por la boquilla del molde de inyección

Figura 3.32: Soluciones importadas por el análisis fluido estructural FSI.

Ya que se aplicaron las cargas y restricciones correspondiente fue posible correr la simulación y analizar esfuerzos, deformaciones y fuerzas de reacción en el molde de inyección durante el proceso.

En las caras en contacto con la máquina inyectora, donde se restringió el movimiento en la dirección Z, se obtuvieron las fuerzas de reacción correspondientes para ambos lados del molde. El negativo requiere de al menos 345.15 kN y el positivo requiere de al menos 302.81 kN, figura 3.33, por lo tanto, la fuerza de cierre crítica debe ser de al menos 345.15 kN para soportar la presión del plástico.

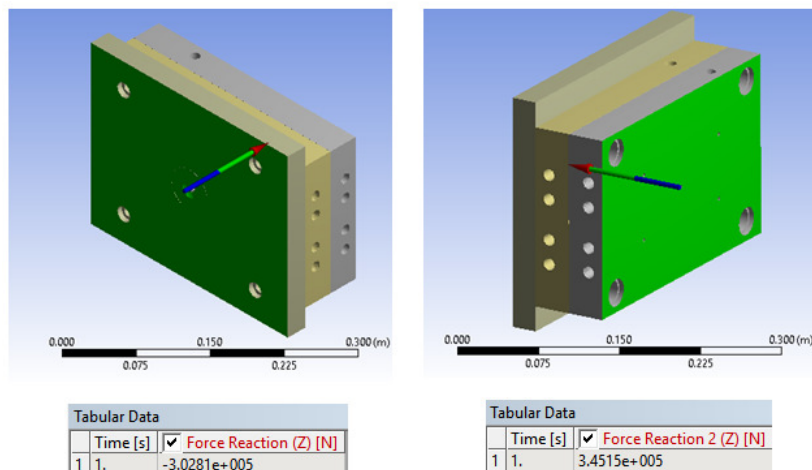


Figura 3.33: Resultado de las fuerza de reacción necesaria para mantener el molde cerrado.

Es posible validar de manera teórica el resultado de la fuerza de cierre obtenido por simulación, mediante la ecuación (3.20):

$$F_{cierre} = P_{inyeccion} * A_{proyectada} \quad (3.20)$$

El área proyectada es igual a la sección transversal de la pieza, se obtuvo un valor de 6800 mm^2 revisando el modelo CAD, y al no contar con una presión de inyección experimental para nuestro caso de estudio, se eligió una presión de 51.24 MPa , la cual se obtuvo de la simulación en la fase de inyección, con estos valores se obtiene como resultado una fuerza de cierre de 348.43 kN de manera teórica, con tan solo un 1.32% de error con respecto al resultado de simulación, tal como se muestra en la ecuación (3.21).

$$\%_{error} = \left| \frac{(345150 - 348432)}{348432} \right| * 100 = 1,32\% \quad (3.21)$$

Adicionalmente a las fuerzas de reacción, se obtuvieron los esfuerzos de Von Mises para los diferentes componentes del molde. En las figuras 3.34 a 3.37 se muestra la distribución de esfuerzos para cada uno de ellos y por medio de la tabla 3.4 el esfuerzo máximo para determinar el factor de seguridad que se tiene, tomando como referencia el esfuerzo de cedencia del material que se utilizará para construir cada componente del molde.

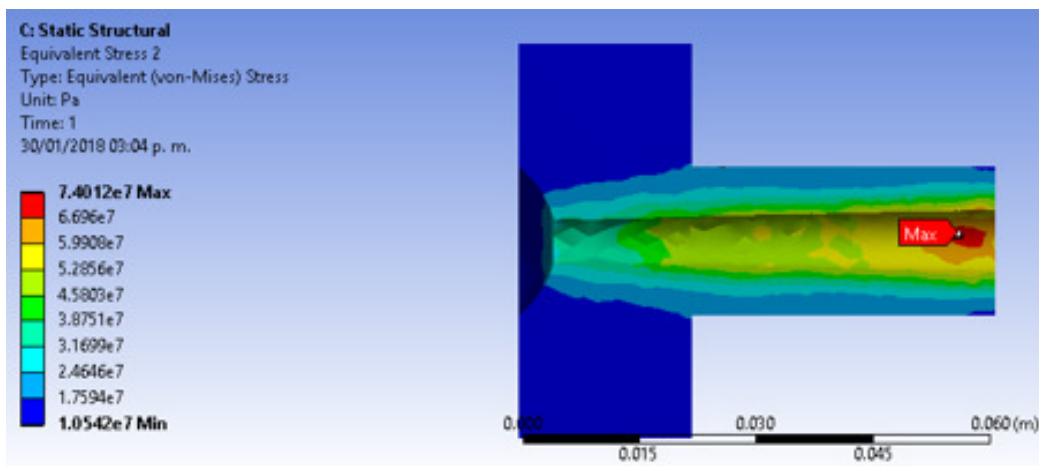


Figura 3.34: Esfuerzos de Von Mises para la boquilla del molde de inyección.

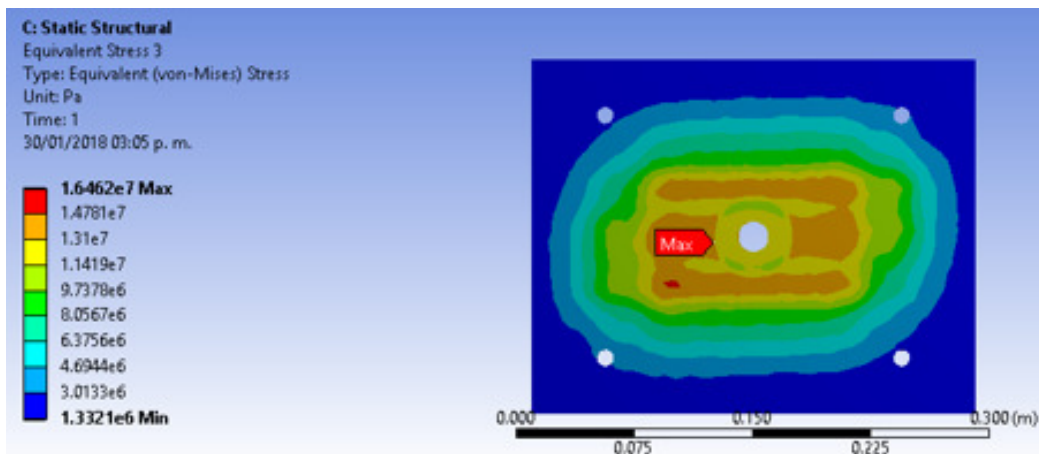


Figura 3.35: Esfuerzos de Von Mises para la placa fija del molde de inyección.

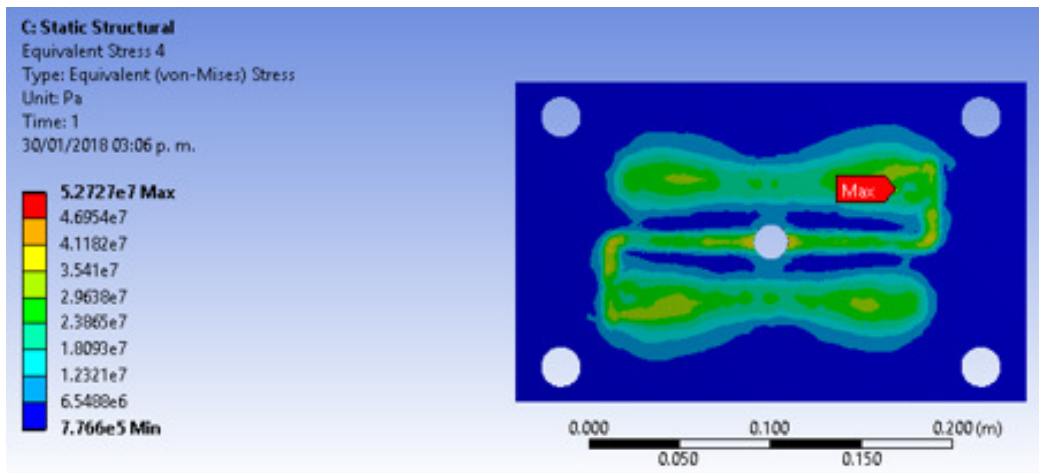


Figura 3.36: Esfuerzos de Von Mises para el positivo del molde de inyección.

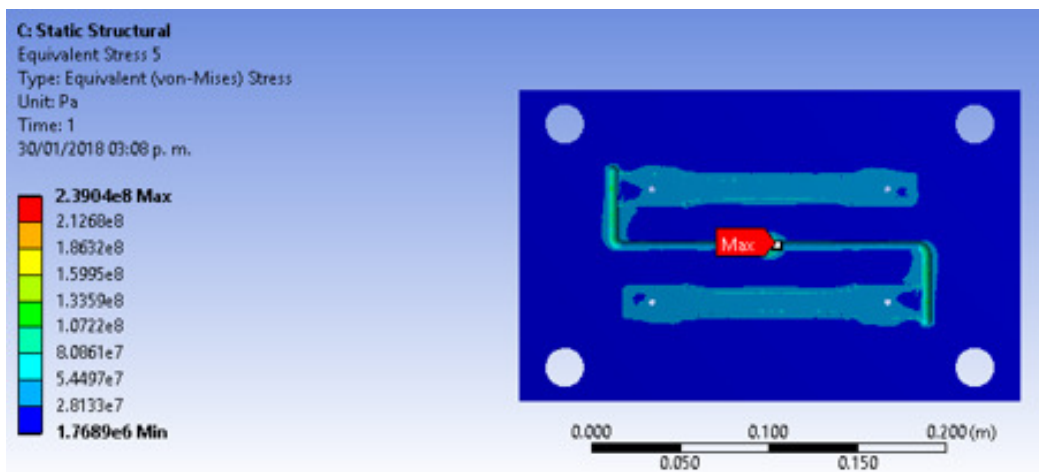


Figura 3.37: Esfuerzos de Von Mises para el negativo del molde de inyección.

Tabla 3.4: Esfuerzos máximos y factor de seguridad para cada componente del molde de inyección.

Componente	Material	Esfuerzo de cedencia [MPa]	Esfuerzo máximo [MPa]	Factor de seguridad
Boquilla	AISI H13	1650	74.0	22.3
Placa fija	AISI 9840T	1105	16.5	67.0
Positivo del molde	AISI 9840T	1105	53.0	20.8
Negativo del molde	AISI 9840T	1105	239.0	4.6

Es evidente que los resultados para los factores de seguridad obtenidos para cada componente del molde son lo suficientemente buenos para dar confiabilidad al diseño analizado mediante interacción fluido estructural del proceso de inyección.

Capítulo 4

DISEÑO DEL MOLDE CON CAVIDADES DE PROBETAS PARA ENSAYOS DE TENSIÓN

Es indispensable conocer todos los detalles que implican el diseño y la construcción de un molde de inyección de plásticos, para ahorrar tiempo y dinero en su fabricación.

La tarea principal del molde de inyección es recibir y distribuir el material plástico fundido, para formar, enfriar y finalmente expulsar una pieza terminada.

Al diseñar un molde de inyección es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Conocer los planos de la pieza a moldear, establecer las líneas de partición, zona de entrada, número de cavidades, tipo de corredor, tipo de compuerta, venteo, sistema de eyección, sistema de enfriamiento, acabado superficial, tolerancias, entre otros.
- Determinar el tipo de máquina de moldeo y el efecto que puede tener en el diseño del molde.
- A partir de las especificaciones del termoplástico, hay que tener en cuenta su contracción, las características de flujo, abrasión y los requisitos de calentamiento y enfriamiento.

En el actual proyecto, el diseño del molde de inyección se basó en tener claras las dimensiones geométricas que deben tener las probetas para pruebas de tensión de materiales inyectados, cumpliendo lo establecido en la norma ASTM D638, se tuvieron en cuenta las recomendaciones dadas por la norma ASTM D3641 para el dimensionamiento del molde y sus componentes, y aquellas consideraciones que no se establecían en las normas mencionadas anteriormente o que permitían cierta mejora fueron seleccionadas bajo criterios de diseño que permitían obtener de mejor manera las probetas con las características deseadas. Además de lo anterior se realizó la simulación de la geometría obtenida por medio de Ansys Workbench® mediante un análisis por interacción fluido estructural FSI (descrito a detalle en el capítulo 3), que permitió prever los resultados del diseño, bajo las consideraciones del proceso de inyección de nuestro material de estudio PC+ABS, sus especificaciones según el proveedor y bases de datos de paquetes de cómputo especializados en el análisis del proceso y finalmente teniendo en cuenta que el molde debía cumplir ciertas condiciones especiales para ser utilizado de manera didáctica y para fines de investigación en una máquina de moldeo diseñada en la Universidad de Guanajuato, por medio de otro trabajo de investigación de nivel maestría.

El presente capítulo describirá a detalle todas las características de diseño que fueron parte importante para la obtención final de los planos de construcción del molde de inyección de probetas de PC+ABS para pruebas de tensión.

4.1. Dimensionamiento de las probetas para pruebas de tensión según la norma ASTM D638

Según lo especifica la norma ASTM D638, las probetas para pruebas de tensión deben ajustarse a la configuración geométrica que se muestran en la figura 4.1. La probeta tipo I es el tipo más utilizado y debe utilizarse cuando se dispone de suficiente material con un espesor de 7mm (0.28in) o menos. La probeta tipo II se suele utilizar cuando la probeta tipo I no se rompe en la sección de estrechamiento. La probeta tipo V es usada cuando solo se dispone de material limitado con un grosor de 4mm (0.16in) o menos para las pruebas. La probeta tipo II se usa para todos los materiales con un espesor mayor a 7mm (0.28in) pero no más de 14mm (0.55in).

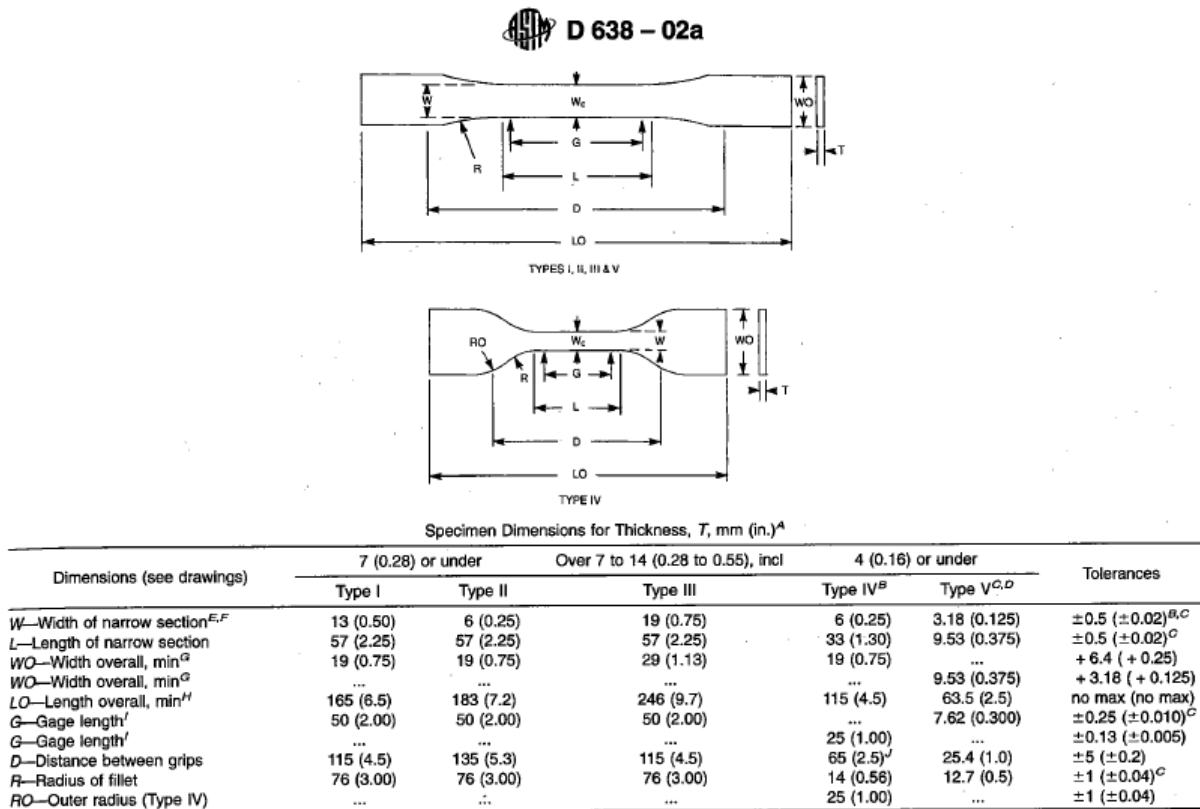


Figura 4.1: Configuración geométrica para probetas de tension según la norma ASTM D638.

Las probetas de ensayo deben prepararse mediante operaciones de mecanizado, troquelado o mediante moldeo por inyección. Estas últimas pueden tener diferentes propiedades de tensión que las muestras preparadas mediante mecanizado o troquelado debido a la orientación inducida. Este efecto puede ser mas pronunciado en probetas con sección de estrechamiento.

El espesor, debe ser de $3.2 \pm 0.4\text{mm}$ ($0.13 \pm 0.02\text{in}$) para todos los tipos de probetas moldeadas por inyección, y para otras probetas de tipo I y II cuando sea posible.

El ancho en el centro "W_c" debe ser de $(+0.00\text{mm} -10\text{mm})$ ($+0.000\text{in} -0.004\text{in}$) con respecto al ancho "W" en otras partes de la sección de estrechamiento. Cualquier estrechamiento en el

centro debe hacerse de manera gradual, para que no se produzcan cambios abruptos en las dimensiones.

Para probetas moldeadas por inyección, se puede permitir una dimension del cateto que compone el chaflán de desmolde de no más de 0.13mm (0.005in) para probetas tipo I y II de 3.2mm (0.13in) de espesor, lo cual debe tenerse en cuenta cuando se calcula el ancho de la probeta. Una sección típica de una probeta tipo I moldeada por inyección, que tenga el cateto máximo permisible, se muestra en la figura 4.2:

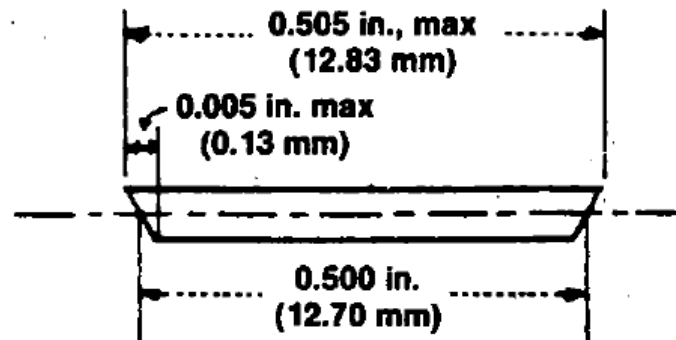


Figura 4.2: Sección transversal típica de una probeta tipo I moldeada por inyección.

Es clave observar en la sección transversal típica que las dimensiones proporcionadas en la figura 4.1, se encuentran en el centro del espesor de las probetas. Teniendo en cuenta toda la información mencionada anteriormente fue posible realizar el modelo CAD de una probeta tipo I para pruebas de tensión de materiales moldeados por inyección, en la figura 4.3 se muestra el perfil generado por medio de Solidworks®.

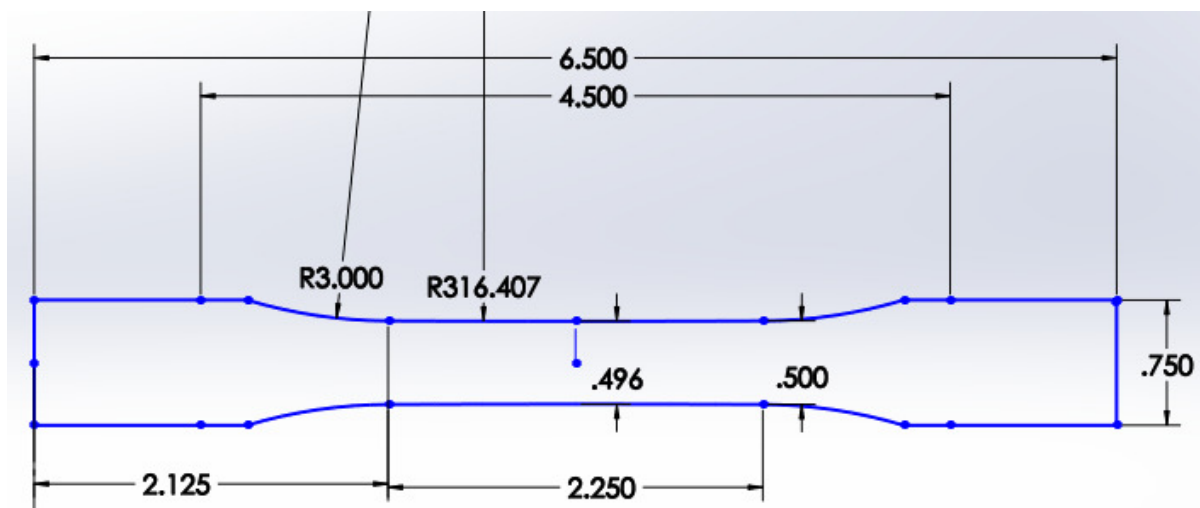


Figura 4.3: Perfil creado por medio de Solidworks® para una probeta tipo I según la norma ASTM D638 (cotas en pulgadas).

En la figura 4.3 es posible observar el estrechamiento gradual con un radio de 316.407in para promover la ruptura de la probeta en la zona media del cuello al momento de realizar la prueba de tensión, cabe resaltar esta característica de estrechamiento gradual que promueve más no obliga la ruptura en dicha zona como normalmente se hace mediante un concentrador de esfuerzo abrupto, adicionalmente se muestra el ancho de centro " W_c " con su respectiva tolerancia aplicada en comparación al ancho " W ".

De igual manera fue posible cumplir con las consideraciones especificadas para el perfil típico de la sección transversal de la probeta tipo I, como se muestra en la figura 4.4 obtenida de una vista seccionada de la probeta a la altura del ancho de centro " W_c ".

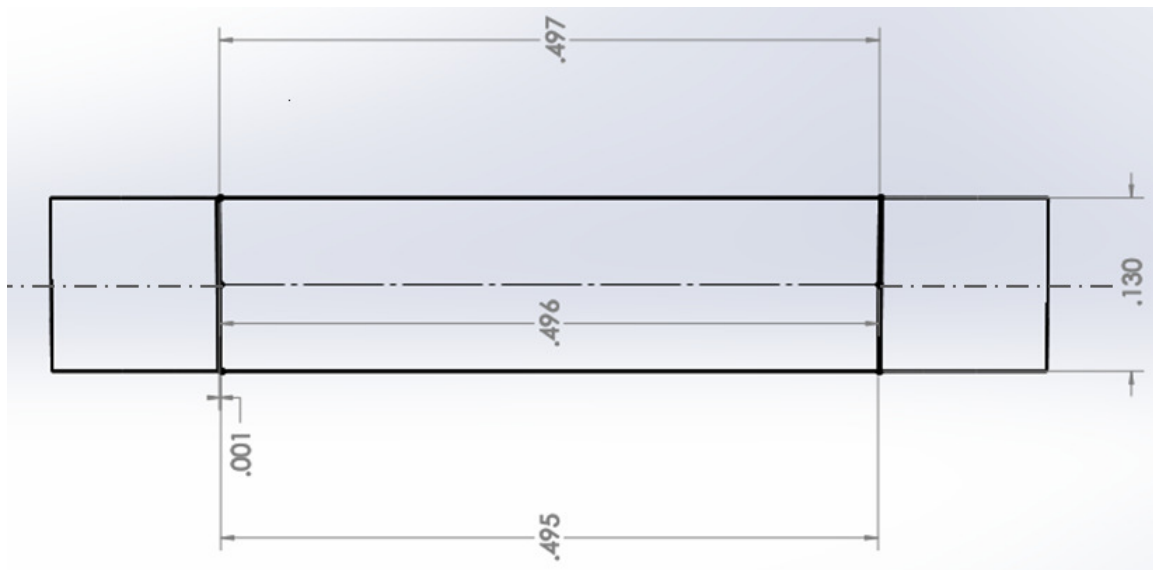


Figura 4.4: Sección transversal típica cumpliendo la norma ASTM D638 de la probeta generada mediante Solidworks® (cotas en pulgadas).

En la figura 4.5 se presenta la vista isométrica de la probeta tipo I generada mediante Solidworks®. Esta probeta cumple lo estipulado por la norma ASTM D638 y tiene en cuenta medidas nominales que permiten tener la posibilidad de tolerancias que ajusten el fenómeno de contracción del material de estudio.

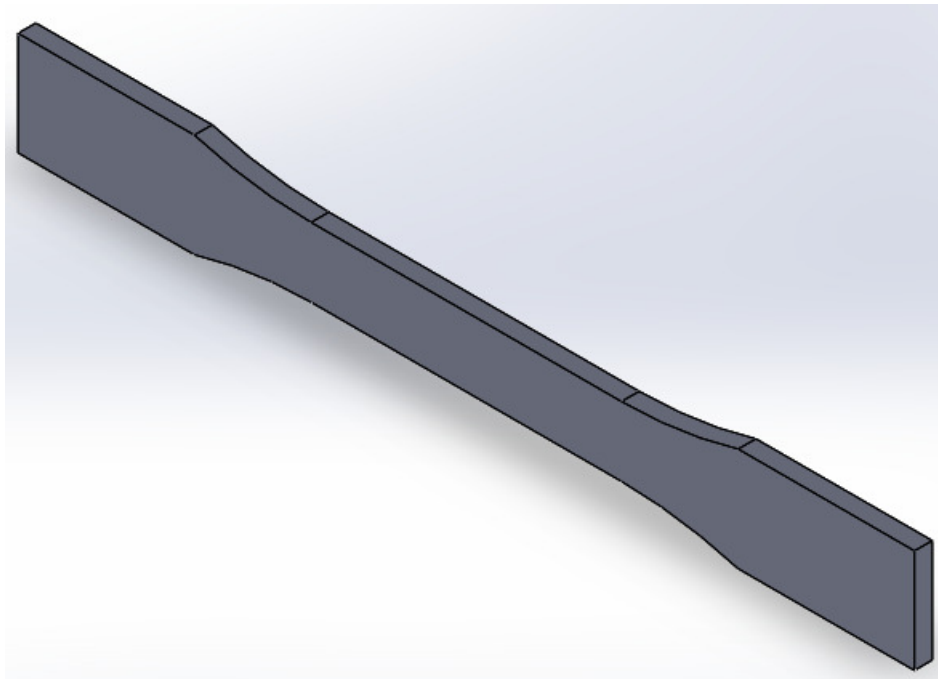


Figura 4.5: Vista isométrica probeta tipo I generada mediante Solidworks®.

4.2. Dimensionamiento del molde según la norma ASTM D3641

En la norma se asume una máquina de moldeo de tornillo recíprocante.

El diseño del molde uno de los factores que más afectan las propiedades de la probeta o probetas inyectadas. La reproducibilidad óptima requiere que moldes idénticos sean utilizados por diferentes partes que intentan obtener resultados comparables. Sin embargo, en ausencia de moldes idénticos, la adherencia a ciertas características del diseño ayudará a minimizar las diferencias entre los resultados obtenidos por diferentes partes.

4.2.1. Disposición de la cavidad

Se recomiendan moldes de cavidades múltiples con cavidades idénticas. El diseño de la cavidad debe ser tal que haya una distribución uniforme y simétrica del área de la superficie de la muestra en la superficie total del molde. No se aconseja el uso de moldes de una sola cavidad. Para muestras de prueba de tensión grandes y barras multipropósito, se prefiere una disposición "Z" de dos cavidades, pero es aceptable una disposición en "T". Para muestras y barras de ensayo de tensión pequeñas, se recomienda una disposición de "T" doble de cuatro cavidades. Otras probetas tienen su diseño de cavidad único, en la figura 4.6 se observan las disposiciones más comunes y aconsejables según la norma ASTM D3641.

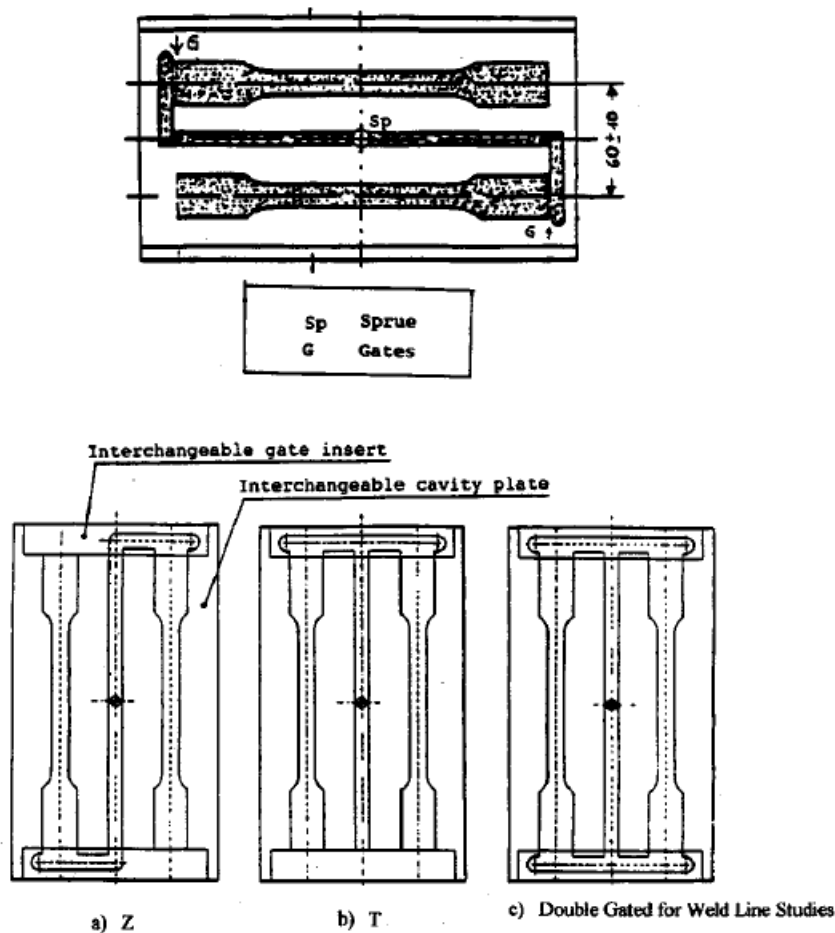


Figura 4.6: Disposición probable de las cavidades según la norma ASTM D3641.

Para el caso del diseño actual se seleccionó la disposición tipo "Z" con lo cual se obtendrán dos probetas idénticas del tipo I, en la figura 4.7 se muestra el modelo CAD generado por medio de Solidworks®.

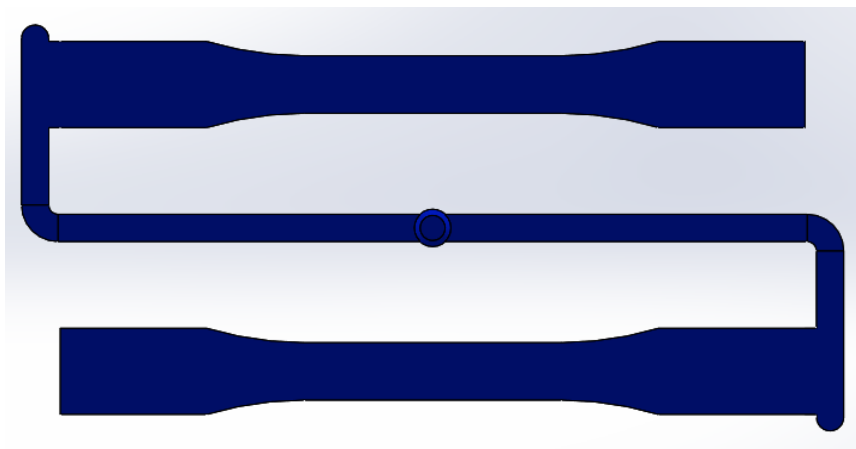


Figura 4.7: Disposición de la cavidad generada por medio de Solidworks®.

4.2.2. Corredores

Los corredores pueden ser del tipo circular completo o del tipo trapezoidal. Deberán tener un diámetro mínimo de 5 mm (0.2 pulgadas) o un área transversal equivalente si es trapezoidal. Un diseño simétrico de la cavidad permitirá el uso de sistemas idénticos de corredores para cada cavidad y, por lo tanto, facilitará el llenado uniforme de todas las cavidades con todos los materiales en todas las condiciones. Los ángulos de inclinación para las paredes trapezoidales deben ser de 10 a 30°. El diámetro del bebedero debe ser de un mínimo de 4 mm en el lado de la boquilla. Para el caso del diseño actual se prefirió corredor trapezoidal modificado, debido a que el tipo circular completo se tomó como una opción difícil desde el punto de vista de manufactura ya que es necesario maquinarse ambas placas del molde y se podrían producir desalineamientos y/o rebabas, y en cuanto al trapezoidal normal se tiene el conocimiento que se presenta un mejor comportamiento del flujo en el trapezoidal modificado y en cuanto a manufactura tienen similar complejidad, en la figura 4.8 se muestra la sección transversal del corredor del modelo CAD generado por medio de Solidworks®, en la cual se evidencia el cumplimiento del diámetro mínimo mencionado en la norma ASTM D3641.

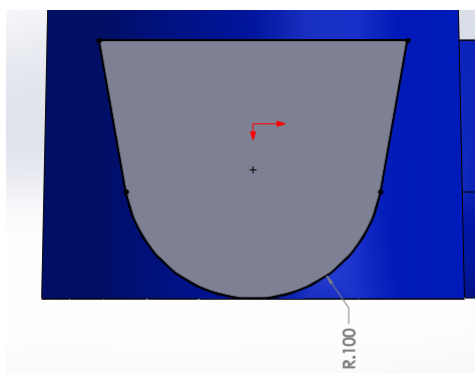


Figura 4.8: Sección transversal tipo Trapezoidal modificado generada para las probetas por medio de Solidworks® (cotas en pulgadas).

En cuanto al ángulo de inclinación para corredores de tipo trapezoidal se seleccionó un ángulo de 10° , tal como se muestra en la figura 4.9.

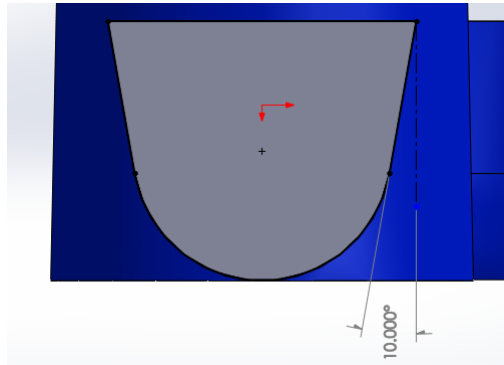


Figura 4.9: Ángulo de inclinación seleccionado para corredor tipo trapezoidal (cotas en pulgadas).

Finalmente se garantizó un diámetro del bebedero en el lado de la boquilla superior a 4 mm quedando finalmente de 5.6 mm (0.219 in) debido a las medidas estándar de boquillas, como se muestra en la figura 4.10.

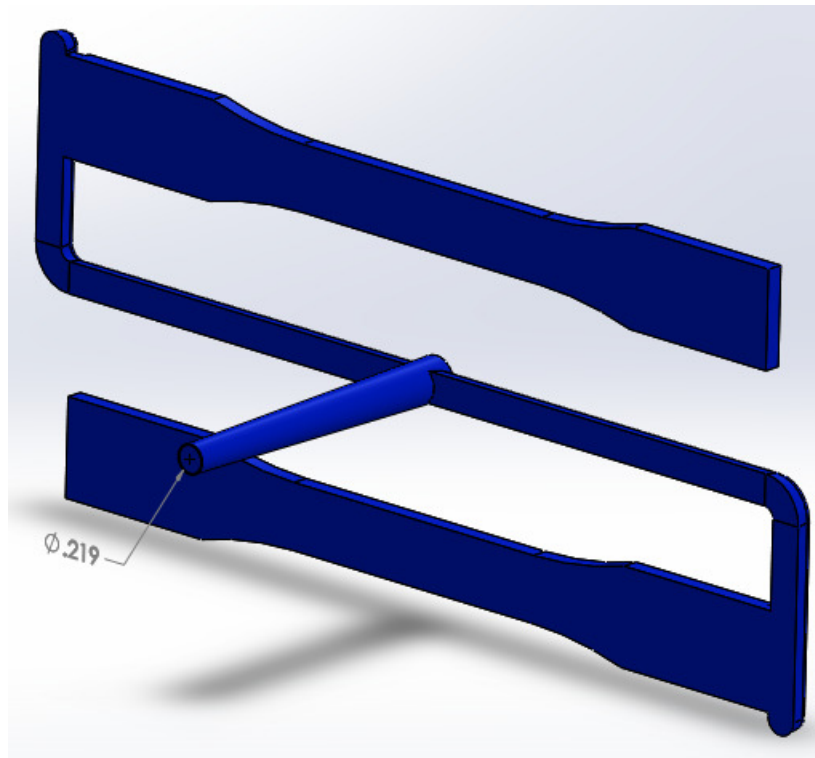


Figura 4.10: Diámetro del bebedero, lado boquilla (cotas en pulgadas).

4.2.3. Compuertas

A menos que se especifique lo contrario la profundidad de la compuerta debe ser al menos dos tercios la profundidad de las cavidades y el ancho de la puerta será preferiblemente igual al ancho de las cavidades, pero no menos de dos tercios del ancho. Las compuertas deben ser lo más cortas posible con una longitud máxima de 3 mm (0,12 in).

Para el caso del diseño actual se cumplieron las especificaciones mencionadas en la norma ASTM D3641, tal como se muestra en la figura 4.11.

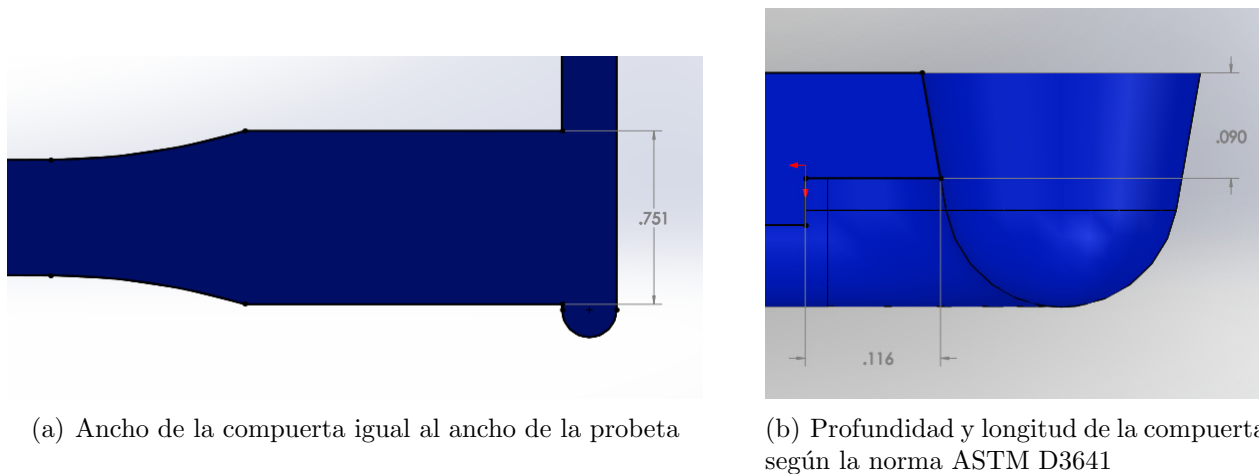


Figura 4.11: Dimensiones de la compuerta generada por medio de Solidworks® (cotas en pulgadas).

4.2.4. Cavidades

Las tolerancias de mecanizado de la cavidad o cavidades dependerán del material a moldear y de las tolerancias permitidas para los diferentes tipos de probetas de prueba. El dimensionamiento de las cavidades con respecto a la contracción anticipada dará lugar a variaciones de la cavidad. También se requieren diferentes moldes para cada material que se va a moldear. Se prefiere mecanizar la cavidad a las dimensiones nominales de la muestra y ajustar las dimensiones solo cuando la contracción conduce a una muestra que está fuera de especificación para el método de prueba deseado. Se recomiendan ángulos de desmoldeo en las paredes laterales de las cavidades para facilitar la expulsión parcial, pero no deben ser mayores de 1° . Se prefiere un ángulo de inclinación máximo de $1/2^\circ$ para todas las áreas, tal como se muestra en la figura 4.12.

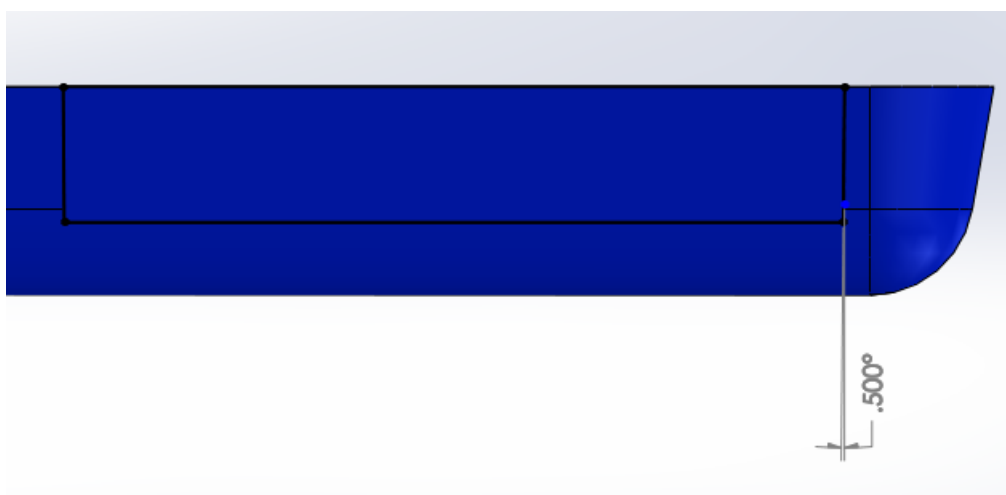


Figura 4.12: Ángulo de desmoldeo generado por medio de Solidworks®.

4.2.5. Pasadores eyectores

Los pasadores eyectores deben ubicarse donde sea necesario, pero no en el área de prueba de la probeta. Para probetas de prueba de tensión, se recomienda que los pasadores de eyección estén ubicados en los extremos anchos de las probetas (ver figura 4.13), esto porque durante la prueba de tensión estas zonas serán sujetas por las mordaza y están fuera del área de interés.

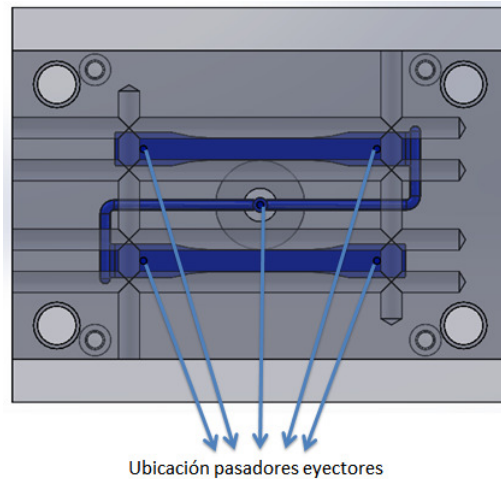


Figura 4.13: Ubicación seleccionada para los pasadores de eyección.

4.2.6. Canales de enfriamiento

Los canales de enfriamiento deben ubicarse de tal manera que cada una de las cavidades se enfríe de manera idéntica. Aunque esto puede no ser posible con moldes multicavidades no simétricos, es un criterio de diseño que debe seguirse lo más cerca posible.

Los accesorios utilizados para conectar las aberturas de los canales de enfriamiento al sistema de recirculación pueden ser del tipo de desconexión rápida con autosellado. Para una máxima eficiencia de enfriamiento, el flujo de refrigerante a través de los canales debe ser turbulento, como lo indica un número de Reynolds > 5000 .

Las consideraciones adicionales para el diseño de los canales de enfriamiento se mencionaron en el capítulo 1 y se observan en la figura 4.14.

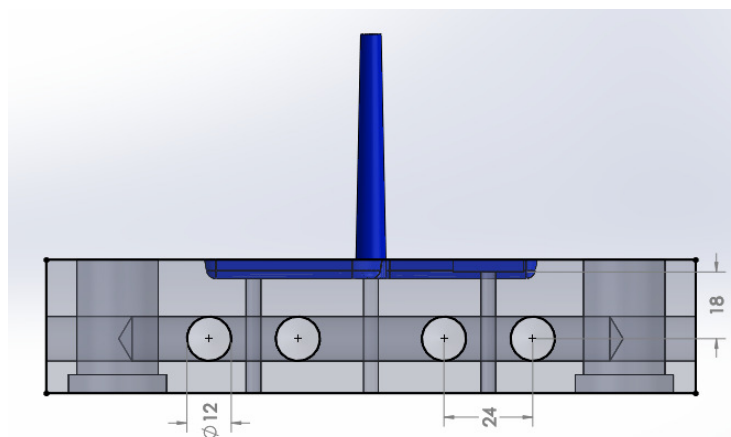


Figura 4.14: Dimensiones de los canales de enfriamiento generados en Solidworks®.

El arreglo de los canales de enfriamiento fue de tipo paralelo, alineados a lo largo de las probetas, suponiendo un enfriamiento más uniforme de dicha manera, se consideró suficiente un total de 4 canales de enfriamiento que no interfieren con la manufactura de los otros sistemas del molde, como se muestra en la figura 4.15. Un análisis comparativo entre varias configuraciones de arreglos sería un tema interesante para estudios futuros.

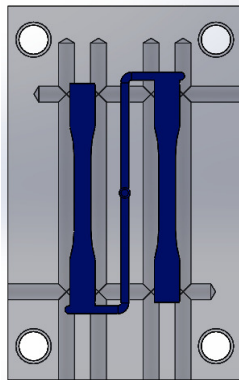


Figura 4.15: Tipo de arreglo paralelo para los canales de enfriamiento generados en Solidworks.

Finalmente se presenta en la figura 4.16 el molde de inyección de probetas para pruebas de tensión diseñado con todos sus accesorios para la máquina didáctica de moldeo que se utilizará dentro de la Universidad de Guanajuato, se decidió entregar para uso interno los planos de construcción a detalle junto con los materiales necesarios para su manufactura.

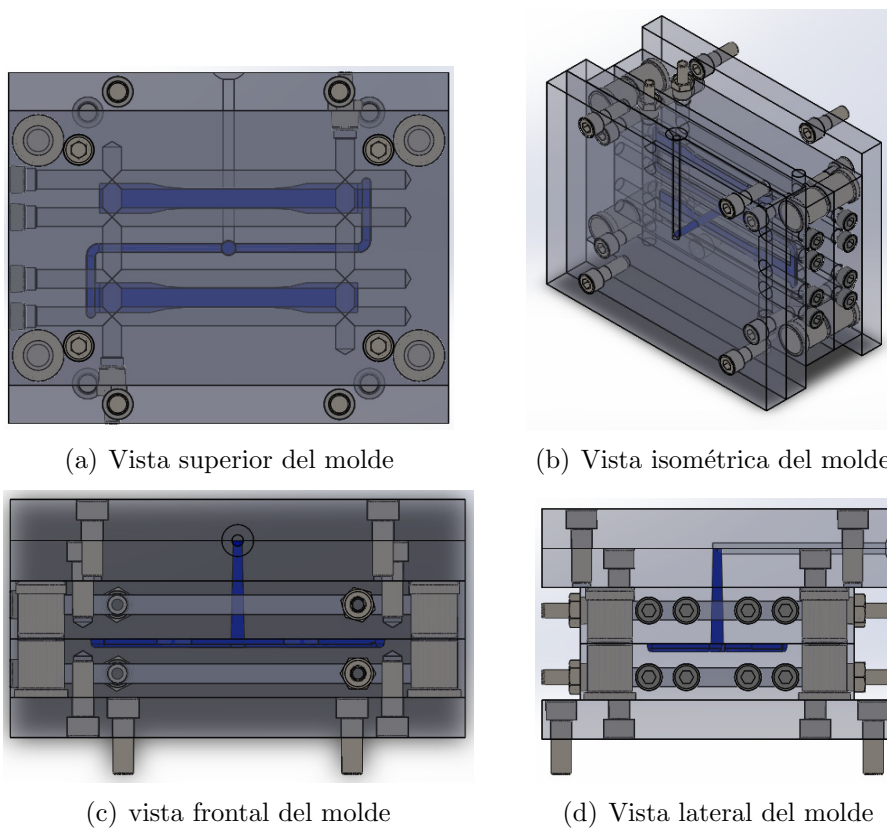


Figura 4.16: Molde de inyección de probetas para pruebas de tensión.

Capítulo 5

CONCLUSIONES

En este trabajo se diseñó un molde de inyección de probetas de PC+ABS para pruebas de tensión, considerando todos los sistemas que lo componen.

Se realizó dicho diseño mediante el cumplimiento de las normas ASTM D638 y ASTM D3641, contando con el desarrollo de un posterior análisis por interacción fluido estructural (FSI), que permite prever el resultado del diseño sin la necesidad de construir aún el prototipo y corregir errores posteriores que se encuentran una vez utilizado.

De esta manera se muestra un camino alternativo de diseño de moldes de inyección, que resulta más completo y eficaz, y que a pesar de ser más complejo, permite reducir costos y tiempo de trabajo durante el proceso de producción del molde que cumpla las características deseadas desde que se visualiza el concepto de diseño hasta que se logra el producto final.

Una vez desarrollado el trabajo de investigación se pudo concluir lo siguiente:

- La utilización de normas como base para el diseño brinda un amplio conocimiento empírico que permite acelerar el proceso de diseño y la obtención de geometrías lo suficientemente confiables para la etapa inicial de análisis por simulación, en busca de realizar mejoras o incluso innovar.
- Mejorar el ciclo de producción de moldes y productos de plástico con el apoyo de herramientas CAE, reduce costos y tiempos que generalmente perjudican en un ciclo normal de diseño. El diseño de moldes se basa fuertemente en la prueba y error de los diseños tanto del molde como del producto final.
- Mediante el paquete de cómputo Ansys Workbench®, específicamente su módulo de Fluent®, se logra reproducir las diferentes fases del proceso de inyección de plástico, y en comparación con paquetes de cómputo especializados en el tema tales como Moldflow Adviser 2017 R2 y moldex3D, obtener resultados bastante cercanos, controlando condiciones propias del proceso, para obtener parámetros de entrada que aceleran la obtención de los mejores resultados en cuanto a un producto inyectado.
- El análisis en Fluent® de la fase de inyección de manera multifásica permite conocer el seguimiento del frente de flujo a través del tiempo y de esta manera conocer si se logra llenar de manera balanceada y completa las cavidades diseñadas, evitando en gran medida defectos propios del avance del flujo de polímero dentro del molde de inyección, tales como: tiros cortos, burbujas, soldaduras, entre otros.
- El análisis en Fluent® de la fase de inyección brinda resultados confiables en cuanto a la presión de inyección necesaria para llenar las cavidades, los perfiles de velocidades que se

generan durante el proceso y la distribución de temperaturas al final del mismo, esto en comparación con paquetes de cómputo especializados en el tema. Las desviaciones encontradas no sobrepasan un 10 % entre los análisis.

- El análisis termodinámico de la fase de solidificación permite visualizar como es la distribución de temperaturas a través del tiempo, posterior a la inyección del polímero, ya cuando se inicia con la acción de los canales de enfriamiento, con el fin de realizar un enfriamiento uniforme en cada punto dentro del volumen de las cavidades, hasta llevar el plástico a la temperatura que garantiza su estado sólido, haciendo posible la expulsión de la pieza final en un tiempo determinado por la simulación.
- El análisis por interacción fluido estructural (FSI), genera ventajas sobre otro tipo de análisis, ya que permite importar los resultados de la fase de inyección y solidificación a un entorno de análisis estructural sumando en conjunto todos los efectos que pueden y deben ser considerados para obtener un diseño más robusto de estructuras que involucran interacción con algún tipo de fluido. Algunos paquetes de cómputo especializados pueden desarrollar este tipo de análisis pero es necesario comprar un módulo extra y los resultados tienen que ser exportados a programas como Ansys® , Cosmos® , entre otros.
- Por medio del análisis por interacción fluido estructural (FSI), se logran obtener las fuerzas de reacción mínimas necesarias para mantener el molde perfectamente cerrado durante toda la fase de inyección del plástico y hasta la apertura del mismo en la fase de expulsión de la pieza final. También es posible obtener los esfuerzos a los cuales estará sometido el molde durante el proceso, facilitando una adecuada selección de materiales para su construcción.

Es necesario validar los resultados obtenidos en el actual trabajo por medio de experimentación. Para realizar la experimentación básicamente es necesario disponer de la máquina inyectora de tipo tornillo recíprocante, material plástico de estudio y el molde de inyección. Adquirir estos requerimientos cuesta alrededor de 700.000 MXN difíciles de gestionar durante el tiempo de maestría, para ello se realizaron diferentes postulaciones en proyectos de apoyo a la investigación, se planteó como opción la realización de estancia de investigación en alguna institución que contara con estos requerimientos y se realizaron avances con respecto a la fabricación de una máquina de inyección didáctica dentro de los objetivos de otra tesis, se realizó internamente la entrega como parte de la actual tesis del listado de herramientas y planos para la fabricación del molde de probetas y se buscó la adquisición del material plástico PC+ABS para lograr validar los resultados obtenidos a través de simulación, por cuestión de tiempo y logística no se logró contar con los resultados de las postulaciones en proyectos que generarían el apoyo económico necesario, la máquina inyectora didáctica terminada, los materiales necesarios para iniciar la construcción del molde y el material plástico de estudio, razones que explican el tema pendiente de validar a través de experimentación y con ello generar un mayor impacto de lo aquí logrado, ampliando las posibilidades de aplicación del modelo de simulación por interacción fluido estructural (FSI) en el diseño de moldes y trabajos posteriores que puedan tomar como base este estudio y explotar en mayor medida las capacidades del paquete de cómputo en el análisis de problemáticas propias del proceso.

Referencias

- [1] M. P. Groover, FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA Materiales, procesos y sistemas, Tercera ed. 2007.
- [2] B. D. M. Bryce, Plastic Injection Molding Vol I: Manufacturing Process Fundamentals, vol. I. 1996.
- [3] D. V Rosato and M. G. Rosato, Injection molding handbook. 2000.
- [4] Disponible en web el 19/03/2018: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion11.MOLDEO.POR.INYECCION.pdf>
- [5] J. F. R. Arredondo, “MODELO FLUIDO-ESTRUCTURAL (FSI) PARA DISEÑO OPTIMO DE MOLDES DE INYECCION DE PLASTICOS,” (Tesis para obtener el grado de: Doctor en Ingeniería Mecánica), Universidad de Guanajuato, 2014.
- [6] Disponible en web el 25/03/2018: <http://inyeccionplasticomadrid.es/inyeccion-de-plastico-en-madrid-proceso-de-fabricacion/>
- [7] Disponible en web el 25/03/2018: <http://wikifab.dimf.etsii.upm.es/wikifab/images/f/f6/04Alimentacion08.pdf>
- [8] Disponible en web el 30/03/2018: <http://inyeccion-eficiente-de-plasticos.blogspot.mx/2013/04/siete-recomendaciones-para-optimizar-el.html>
- [9] Disponible en web el 30/03/2018: <https://www.pt-mexico.com/articulos/cmo-optimizar-el-ciclo-de-inyeccion-de-plastico-aplicando-los-principios-de-enfriamiento-cientifico>
- [10] Disponible en web el 31/03/2018: <https://prezi.com/0thdt-ncxyyl/sistemas-de-refrigeracion-moldes-de-inyeccion/>
- [11] M. R. Kamal and S. Kenig, “The injection molding of thermoplastics part I: Theoretical model,” Polym. Eng. Sci., vol. 12, no. 4, pp. 294–301, 1972.
- [12] P. -C Wu, C. F. Huang, and C. G. Gogos, “Simulation of the mold-filling process,” Polym. Eng. Sci., vol. 14, no. 3, pp. 223–230, 1974.
- [13] G. Williams and H. A. Lord, “Mold filling studies for the injection molding of thermoplastic materials. part 1: the flow of plastic materials in hot and cold walled circular channels”, Polym Eng Sci, vol. 15, no. 8, pp. 553–568, 1975.
- [14] H. W. Cox and C. C. Mentzer, “Injection molding: The effect of fill time on properties,” Polym. Eng. Sci., vol. 26, no. 7, pp. 488–498, 1986.

- [15] Bushko and Stokes, "Solidification of thermoviscoelastic melts .4. Effects of boundary conditions on shrinkage and residual stresses," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 36, no. A1996UB55700008, pp. 658–675, 1996.
 - [16] G. Kalay and M. J. Bevis, "Processing and physical property relationships in injection-molded isotactic polypropylene. 1. mechanical properties," *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, vol. 35, pp. 241–263, 1997.
 - [17] M. Bigerelle, A. Van Gorp, and A. Lost, "Multiscale Roughness Analysis in Injection-Molding Process," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 48, no. 9, pp. 1725–1736, 2008.
 - [18] M. Kurt, O. Saban Kamber, Y. Kaynak, G. Atakok, and O. Girit, "Experimental investigation of plastic injection molding: Assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 8, pp. 3217–3224, 2009.
 - [19] C. A. Hieber and S. F. Shen, "A finite-element/finite-difference simulation of the injection-molding filling process," *J. Nonnewton. Fluid Mech.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–32, 1980.
 - [20] C. A. Hieber, L. S. Socha, S. F. Shen, K. K. Wang, and A. I. Isayev, "Filling Thin Cavities of Variable Gap Thickness: A Numerical and Experimental Investigation," no. 6, 1983.
 - [21] H. H. Chiang, C. A. Hieber, and K. K. Wang, "A unified simulation of the filling and postfilling stages in injection molding. Part I: Formulation," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 31, no. 2, pp. 116–124, 1991.
 - [22] H. H. Chiang, C. A. Hieber, and K. K. Wang, "A unified simulation of the filling and postfilling stages in injection molding. Part II: Experimental Verification," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 31, no. 2, pp. 125–139, 1991.
 - [23] K. Himasekhar, J. Lottey, and K. K. Wang, "CAE of Mold Cooling in Injection Molding Using a Three- Dimensional Numerical Simulation," *J. Eng. Ind.*, vol. 114, no. May 1992, pp. 213–221, 2015.
 - [24] H. H. Chiang, K. Himasekhar, N. Santhanam, and K. K. Wang, "Integrated Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in Injection Molding for the Prediction of Shrinkage and Warpage," *J. Eng. Mater. Technol.*, vol. 115, no. 1, p. 37, 1993.
 - [25] G. Titomanlio, V. Speranza, and V. Brucato, "On the Simulation of Thermoplastic Injection Moulding Process," *Int. Polym. Process.*, vol. 10, no. 1, pp. 55–61, 1995.
 - [26] H. Zhou and L. Dequn, "Computer Filling Simulation of Injection Molding Based on 3D Finite Element Model," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 24, no. 8, pp. 823–830, 2005.
 - [27] P. Guerrier, G. Tosello, and J. H. Hattel, "Flow visualization and simulation of the filling process during injection molding," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 16, pp. 12–20, 2017.
 - [28] H. Zhou, *COMPUTER MODELING FOR INJECTION MOLDING Simulation, Optimization, and Control*. 2013.
 - [29] S. Kashyap and D. Datta, "Process parameter optimization of plastic injection molding: a review," *Int. J. Plast. Technol.*, vol. 19, no. 1, pp. 1–18, 2015.
 - [30] Z. Chen and L. S. Turng, "A review of current developments in process and quality control for injection molding," *Adv. Polym. Technol.*, vol. 24, no. 3, pp. 165–182, 2005.
-

- [31] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, “Fundamentos de transferencia de calor”, Prentice Hill México, 4a Ed., 1999, pp8.
 - [32] Disponible en web el 30/06/2018: <http://www.zhilianmould.com/blog/designing-runner-cross-sections/>
 - [33] Disponible en web el 30/06/2018:<http://wikifab.dimf.etsii.upm.es/wikifab/index.php/>
Usuario:14055158
 - [34] Ansys®Workbench, release 15.0, Help system, Fluent Chapter 11. Creating a Mesh, Ansys, Inc.
 - [35] Disponible en web el 18/08/2018: <https://www.sabic.com/en/products/polymers/polycarbonate-pc-acrylonitrile-butadiene-styrene-abs/cycloy-resin>
 - [36] Q. Like, Polymer Injection Molding Simulation Using ANSYS CFX “2008 International ANSYS Conference”, ANSYS Japan K.K.
-