



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Hermosillo

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“METODOLOGÍA DE PROTOTIPADO VIRTUAL EN EL
DISEÑO Y MANUFACTURA DE MOLDES DE INYECCIÓN
DE PLÁSTICOS”**

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

JOSÉ LUIS MARTÍNEZ MONTAÑO

Director:

M.C. RODOLFO ULISES RIVERA LANDAVERDE

Hermosillo Sonora, México

Fecha: Noviembre 2019





Instituto Tecnológico de Hermosillo

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

SECCIÓN: DIV. EST. POS. E INV.
No. OFICIO: DEPI/315/19.
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN
DE TESIS.

11 Diciembre de 2019

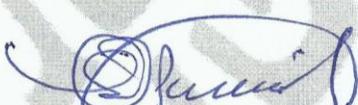
**C. JOSÉ LUIS MARTÍNEZ MONTAÑO,
PRESENTE.**

Por este conducto, y en virtud de haber concluido la revisión del trabajo de tesis que lleva por nombre **"METODOLOGÍA DE PROTOTIPADO VIRTUAL EN EL DISEÑO Y MANUFACTURA DE MOLDES DE INYECCIÓN DE PLÁSTICOS"**, que presenta para el examen de grado de la MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL, y habiéndola encontrado satisfactoria, nos permitimos comunicarle que se autoriza la impresión del mismo a efecto de que proceda el trámite de obtención de grado.

Deseándole éxito en su vida profesional, quedo de usted.

ATENTAMENTE


M.C. RODOLFO ULISES RIVERA LANDAVERDE
DIRECTOR


M.C. GILBERTO ORRANTIA DANIEL
SECRETARIO


DR. GERMÁN ALONSO RUIZ DOMÍNGUEZ
VOCAL


M.C. ROSA IRENE SÁNCHEZ FERMÍN
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN


S.E.P.

INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE HERMOSILLO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO

RISF/momv*



Agradecimientos

Quiero agradecer primeramente a Dios por darme salud y proporcionarme los medios para desarrollarme en todos los ámbitos de mi vida; agradezco todos los apoyos por parte de mi familia, maestros, amigos, compañeros de trabajo. Agradezco a mi esposa Eliana por su comprensión durante este proceso, y profundamente agradezco también a mi director de tesis y al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Hermosillo por las facilidades y los medios otorgados para la realización de este proyecto de tesis. Por último, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico brindado y reconozco que sin el apoyo no hubiera sido posible culminar con este proyecto, gracias a todos ellos por ayudar a superarme.

RESUMEN

En el estado de Sonora, están establecidas plantas manufactureras que utilizan el proceso de moldeo por inyección de plásticos, las cuales, debido al desconocimiento, en el diseño y manufactura de moldes de inyección, compran este servicio a terceros. Las pérdidas económicas debido a la falta del dominio en moldes de inyección provienen principalmente de: ineficiente servicio de mantenimiento preventivo, alto tiempo de reparación, lento proceso de *setup* de moldes, alto tiempo en la selección de parámetros de operación en la máquina de moldeo, y malas decisiones tomadas en la fase de lanzamiento de nuevos productos. Actualmente, las plantas importan los moldes de inyección, mayormente de Asia. Esta investigación propone una “Metodología de Prototipado Virtual en el Diseño y Manufactura de Moldes de Inyección de Plásticos”, que ayuda a dominar el tema acerca de los moldes de inyección, partiendo de la identificación de los parámetros del proceso de inyección; las partes constitutivas de un molde; las fases del diseño y fabricación del mismo; la mejora de tiempos en el proceso de lanzamiento de nuevos productos; la reducción de *scrap* debido al correcto *setup* del molde, que permite menos pruebas o corridas en la máquina de inyección. Esto, es posible de realizar, a través de la simulación del proceso con el uso de *Software CAD/CAE Solidworks Plastics®*. Esta investigación propone, diseñar y manufacturar piezas, insertos, y hasta un molde completo en taller de moldes; con el uso de equipos de última generación, de control numérico computarizado (CNC), y maquinados por descarga eléctrica (tales como, *Wire-EDM, EDM-Sinker*).

Con *Solidworks Plastics®* se obtuvieron resultados del proceso de inyección virtual, para un estudio de caso en específico. Siguiendo las recomendaciones de fabricantes de resinas poliméricas, para el diseño óptimo de parte moldeada, se crearon diferentes escenarios, y configuraciones; para que después, con sencillos diseños de experimentos robustos, alcanzar estadísticamente, la óptima configuración del diseño de un prototipo, de molde de inyección. Con el uso de *CATIAV5®* se diseñó el molde, los planos de fabricación; y por medio de manufactura aditiva se reprodujo el prototipo

del molde. Además, con *CATIAV5®* se puede realizar la manufactura asistida por computadora, sacar tiempos y costos de fabricación. Esta metodología propone a la industria manufacturera local, diseñar y manufacturar sus propios moldes de inyección, hacer eficiente la reparación de moldes capacitando al personal del área de taller de moldes; también deja abierta la posibilidad de ser, una alternativa para la reingeniería y reutilización de moldes.

Palabras Claves:

Metodología, Moldes de Inyección, Diseño, Manufactura, Prototipado Virtual, Polímeros.

ABSTRACT

In the state of Sonora, manufacturing plants are established that use the plastic injection molding process, which, due to ignorance, in the design and manufacture of injection molds, buy this service from third parties. The economic losses due to the lack of dominance in injection molds come mainly from: inefficient preventive maintenance service, high repair time, slow mold setup process, high time in the selection of operating parameters in the molding machine, and bad decisions made in the launch phase of new products. Currently, plants import injection molds, mostly from Asia. This research proposes a "Virtual Prototyping Methodology in the Design and Manufacturing of Plastic Injection Molds", which helps to dominate the issue of injection molds, based on the identification of the injection process parameters; the constituent parts of a mold; the phases of the design and manufacture thereof; the improvement of times in the process of launching new products; the reduction of scrap due to the correct setup of the mold, which allows fewer tests or runs on the injection machine. This is possible, through the simulation of the process with the use of CAD / CAE Solidworks Plastics® Software. This research proposes, design and manufacture parts, inserts, and even a complete mold in mold shop; with the use of state-of-the-art equipment, computerized numerical control (CNC), and electrical discharge machining (such as, Wire-EDM, EDM-Sinker).

With Solidworks Plastics® results of the virtual injection process were obtained, for a specific case study. Following the recommendations of polymeric resin manufacturers, for the optimal design of molded part, different scenarios and configurations were created; so that later, with simple designs of robust experiments, statistically achieve the optimal configuration of the design of a prototype, injection mold. With the use of CATIAV5® the mold, the manufacturing drawings were designed; and by means of additive manufacturing the prototype of the mold was reproduced. In addition, with CATIAV5® you can perform computer-aided manufacturing, take time and manufacturing costs. This methodology proposes to the local manufacturing industry, to design and manufacture their own injection molds, to make mold repair efficient by

training the personnel of the mold workshop area; it also leaves open the possibility of being, an alternative for the reengineering and reuse of molds.

Keywords:

Methodology, Injection Molds, Design, Manufacturing, Virtual Prototyping, Polymers.

Índice de contenido

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1. Antecedentes	3
1.1.1. Revisión de Artículos	3
1.1.2. Información de la situación actual antes del estudio	4
1.1.3. Justificación de la problemática	5
1.2. Planteamiento del problema	5
1.3. Preguntas de investigación	5
1.4. Hipótesis	6
1.5. Objetivos	7
1.5.1. Objetivo general	7
1.5.2. Objetivos específicos	7
1.6. Delimitaciones	7
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS CONCEPTUALES Y MARCO TEÓRICO	9
2.1. Generalidades	9
2.2. Propiedades y características del Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno	14
2.3. Procesamiento de polímeros	16
2.3.1. Moldeo por inyección	17
2.3.2. Componentes de una máquina de moldeo por inyección	18
2.4. Tipos de moldes	23
2.4.1. Molde de dos placas	24
2.4.2. Molde de tres placas	25
2.5. Materiales para la construcción de los moldes	26
2.6. Estructura básica de un molde	28
2.7. Comportamiento reológico de los polímeros	29
2.7.1. Flujo laminar y flujo turbulento	31
2.7.2. Frente de flujo Fountain flow	31
2.7.3. Tasa de Cizallamiento	32
2.7.4. Ley de la viscosidad de Newton	33
2.7.5. Modelos de viscosidad comunes	34
2.8. Simulación para la fabricación de moldes de inyección	35
2.9. Generalidades de los productos moldeados	37
2.10. Recomendaciones para el diseño de moldes	39
2.10.1. Sistema de venteos o escape de aire	39
2.10.2. Diseño de bebedero sprue bushing	41
2.10.3. Sistema de Alimentación runners	41
2.10.4. Diseño de compuertas gate	42
2.10.5. Sistema de enfriamiento	43
2.11. Procesos de fabricación	44
2.12. Conceptos de estadística	46
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA Y MATERIALES	49

3.1.	<i>Metodología para el diseño y fabricación de molde de inyección</i>	49
3.2.	<i>Metodología del desarrollo de los diseños de experimentos</i>	52
3.3.	<i>Recursos tecnológicos</i>	53
3.4.	<i>Materiales</i>	54
CAPÍTULO 4. DESARROLLO Y RESULTADOS		55
4.1.	<i>Desarrollo del estudio</i>	55
4.2.	<i>Diseño del producto a moldear por el molde de inyección</i>	56
4.3.	<i>Arreglo L8 de Taguchi para los DOE que evalúan la calidad del producto</i>	57
4.4.	<i>Resultados de la primera fase de los DOE que evalúan la calidad del producto arrojados por Minitab</i>	59
4.4.1.	<i>Resultados para la tensión de cizalla</i>	59
4.4.2.	<i>Resultados para la fuerza de cierre</i>	61
4.4.3.	<i>Resultados para el alabeo</i>	62
4.4.4.	<i>Resultados para la contracción</i>	63
4.5.	<i>Arreglo L18 de Taguchi para el DOE que evalúa el tiempo y configuración del sistema de enfriamiento</i>	65
4.6.	<i>Resultado de la segunda fase del DOE que evalúa el tiempo de enfriamiento arrojado por Minitab</i>	68
4.7.	<i>Resultados a usar para el diseño y construcción del molde de inyección en óptimas condiciones</i>	71
4.8.	<i>Resultados del proceso virtual de inyección con la configuración ideal, resultado del DOE que evalúa la calidad del producto</i>	74
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		79
5.1.	<i>Conclusiones</i>	79
5.2.	<i>Recomendaciones</i>	80
BIBLIOGRAFÍA		81
ANEXOS		84
<i>Anexo 1. Plano de construcción clamping plate</i>		84
<i>Anexo 2. Plano de construcción cavity plate</i>		85
<i>Anexo 3. Plano de construcción leader pin</i>		86
<i>Anexo 4. Plano de construcción locating ring</i>		87
<i>Anexo 5. Plano de construcción sprue bushing</i>		88
<i>Anexo 6. Plano de construcción core plate</i>		89
<i>Anexo 7. Plano de construcción core support plate</i>		90
<i>Anexo 8. Plano de construcción riserbar 1</i>		91
<i>Anexo 9. Plano de construcción riserbar 2</i>		92
<i>Anexo 10. Plano de construcción setting plate</i>		93
<i>Anexo 11. Plano de construcción bushing</i>		94
<i>Anexo 12. Plano de construcción ejector plate a</i>		95
<i>Anexo 13. Plano de construcción ejector plate b</i>		96
<i>Anexo 14. Plano de construcción stop pin</i>		97
<i>Anexo 15. Plano de construcción return pin</i>		98
<i>Anexo 16. Plano de construcción sprue puller</i>		99

Índice de figuras

<i>Figura 2-1 Polimerización del Etileno tomado de (Chanda & Roy, 2007)</i>	10
<i>Figura 2-2 Configuración molecular de los termoplásticos tomado de (Groover, 2007)</i>	12
<i>Figura 2-3 Diferentes procesos de transformación del plástico tomado de (Kalpakjian & Steven R., 2014)</i>	17
<i>Figura 2-4 Máquina de moldeo por inyección, diseño típico de 3 placas con unidad de sujeción con palanca, tomado de (Mennig & Stoeckhert, 2013)</i>	18
<i>Figura 2-5 Unidad de inyección tomado de (RJG Inc., 2005)</i>	19
<i>Figura 2-6 Inyección plástica a través de la válvula tomado de (RJG Inc., 2005)</i>	20
<i>Figura 2-7 Boquilla y válvula de descarga antirretorno tomado de (RJG Inc., 2005)</i>	20
<i>Figura 2-8 Tornillo dividido por zonas y actividad de inyección tomado de (RJG Inc., 2005)</i>	20
<i>Figura 2-9 Plastificación del polímero tomado de (RJG Inc., 2005)</i>	21
<i>Figura 2-10 Diferentes tipos de válvulas de descarga antirretorno tomado de (RJG Inc., 2005)</i>	21
<i>Figura 2-11 Diferentes tipos de cierres: a) hidráulico, b) cierre acodado, tomado de (RJG Inc., 2005)</i>	22
<i>Figura 2-12 Máquina de moldeo por inyección de la planta Te Connectivity Hermosillo Norte división Automotriz</i>	23
<i>Figura 2-13 Componentes de un molde, parte derecha es lado fijo y parte izquierda lado móvil</i>	24
<i>Figura 2-14 Molde de dos placas: a) cerrado y b) abierto, tomado de (Groover, 2007)</i>	25
<i>Figura 2-15 Molde de tres placas: a) cerrado y b) abierto, tomado de (Groover, 2007)</i>	26
<i>Figura 2-16 Sistema de canal caliente aislado a) cerrado y b) abierto, tomado de: (Beaumont, 2004)</i>	26
<i>Figura 2-17 Molde estándar básico tomado de (DSM Engineering Plastics, 2000)</i> ...	29
<i>Figura 2-18 Molde básico con guías o columnas, tomado de: (Mennig & Stoeckhert, 2013)</i>	29
<i>Figura 2-19 Frente de flujo, tomado de (Beaumont, 2004)</i>	32
<i>Figura 2-20 presentación gráfica de la ley de poder tomado de (Chanda & Roy, 2007)</i>	35
<i>Figura 2-21 Representación gráfica del modelo de viscosidad de cruzamiento modificado para el ABS+PA Bayer® Triax 1120 tomado de: Solidworks Plastics Premium Edition®</i>	35
<i>Figura 2-22 Fases y tareas para el diseño de un molde de inyección tomado de (Mennig & Stoeckhert, 2013)</i>	37
<i>Figura 2-23 Espesor de cavidad tomado de (Bayer Corporation, 2000)</i>	38
<i>Figura 2-24 Ángulo recomendado en diseño de costilla tomado de (Bayer Corporation, 2000)</i>	38
<i>Figura 2-25 Rango de profundidades recomendadas para resinas Bayer®, tanto amorfas como semicristalinas, tomado de (Bayer Corporation, 2000)</i>	40

<i>Figura 2-26 Localización de venteos alrededor del producto y alejado de la compuerta de alimentación, tomado de (Bayer Corporation, 2000).</i>	40
<i>Figura 2-27 Dimensionamiento del sprue bushing y el bebedero, tomado de (Bayer Corporation, 2000).</i>	41
<i>Figura 2-28 Figuras geométricas del diseño de "runners" en línea de partición, tomado de (Bayer Corporation, 2000).</i>	42
<i>Figura 2-29 Sistema de alimentación balanceado radialmente, tomado de (Bayer Corporation, 2000).</i>	42
<i>Figura 2-30 Diferentes diseños de compuertas, tomado de (Bayer Corporation, 2000).</i>	43
<i>Figura 2-31 Dimensiones recomendadas para líneas de enfriamiento, tomado de: (Bayer Corporation, 2000).</i>	44
<i>Figura 3-1 Diagrama de flujo de metodología de diseño y fabricación del molde de inyección</i>	49
<i>Figura 3-2 Continuación de diagrama de flujo de metodología de diseño y fabricación del molde de inyección.</i>	50
<i>Figura 3-3 Ángulo de desmolde positivo para el núcleo y ángulo de desmolde negativo para la cavidad.</i>	51
<i>Figura 3-4 Molde virtual para simulación del proceso dimensión de las placas de núcleo y cavidad.</i>	51
<i>Figura 3-5 Mallado sólido del molde virtual</i>	52
<i>Figura 4-1 Dimensiones del producto en vista frontal, superior, lateral y proyectada.</i>	56
<i>Figura 4-2 Señal a ruido lo menor es lo mejor para el factor tensión de cizalla</i>	60
<i>Figura 4-3 Señal a ruido lo menor es lo mejor para el factor fuerza de cierre</i>	62
<i>Figura 4-4 Señal a ruido lo menor es lo mejor para el alabeo.</i>	63
<i>Figura 4-5 Señal a ruido lo menor es lo mejor para la contracción.</i>	65
<i>Figura 4-6 Configuración "a" dos entradas y dos salidas de flujo.</i>	67
<i>Figura 4-7 Configuración "b" una entrada y una salida de flujo.</i>	67
<i>Figura 4-8 Configuración "c" líneas interconectadas entre sí, una entrada y una salida de flujo, seis líneas totales</i>	68
<i>Figura 4-9 Gráficas 4 en 1 para señal a ruido lo menor es lo mejor para tiempo de enfriamiento.</i>	70
<i>Figura 4-10 Señal a ruido lo menor es lo mejor para tiempo de enfriamiento.</i>	70
<i>Figura 4-11 Molde de inyección completo, diseñado con los resultados de la óptima configuración, de los mejores niveles de los factores involucrados.</i>	72
<i>Figura 4-12 Plano de ensamble de los componentes del molde de inyección.</i>	73
<i>Figura 4-13 Facilidad de llenado</i>	75
<i>Figura 4-14 Tiempo de refrigeración</i>	75
<i>Figura 4-15 Líneas de soldadura.</i>	76
<i>Figura 4-16 Rechupes por debajo de 0.013 mm</i>	76
<i>Figura 4-17 Promedio de cizalla al final del empaquetado shear rate.</i>	77
<i>Figura 4-18 Contracción del volumen al final del enfriamiento.</i>	77
<i>Figura 4-19 Desplazamiento total de alabeo por rechupes.</i>	78

Índice de tablas

<i>Tabla 2.1 Temperatura de transición vítrea T_g, Temperatura de fusión T_m, para algunos polímeros tomado de (Chanda & Roy, 2007).....</i>	13
<i>Tabla 2.2 Características básicas del ABS genérico tomado de (Groover, 2007).....</i>	14
<i>Tabla 2.3 Propiedades Bayer Triax® 1120 tomado de (Bayer Corporation, 2001) ...</i>	15
<i>Tabla 2.4 Propiedades Mecánicas Triax® 1120 tomado de (Bayer Corporation, 2001)</i>	15
<i>Tabla 2.5 Parámetros de Inyección Bayer Triax® 1120 Natural tomado de (Bayer Corporation, 2001)</i>	16
<i>Tabla 2.6 Acero para moldes calidad UDDEHOLM tomado de la fuente: (https://www.uddeholm.com/mexico/la/)</i>	27
<i>Tabla 2.7 Recomendaciones de selección de aceros para moldes calidad UDDEHOLM tomado de la fuente: (https://www.uddeholm.com/mexico/la/)</i>	28
<i>Tabla 2.8 Tasa de cizallamiento para algunos polímeros, tomado de: (Bayer Corporation, 2000)</i>	33
<i>Tabla 2.9 Tabla de análisis de varianza tomado de (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012)</i>	47
<i>Tabla 3.1 Arreglo ortogonal L8, generado por Minitab</i>	53
<i>Tabla 3.2 Arreglo ortogonal L18, generado por Minitab</i>	53
<i>Tabla 4.1 Arreglo L8, tiempo de llenado constante para todas las configuraciones..</i>	57
<i>Tabla 4.2 Arreglo L8, tiempo de empaquetamiento constante para todas las configuraciones</i>	57
<i>Tabla 4.3 Arreglo L8 tensión de cizalla.....</i>	58
<i>Tabla 4.4 Arreglo L8 fuerza de cierre</i>	58
<i>Tabla 4.5 Arreglo L8 alabeos</i>	58
<i>Tabla 4.6 Arreglo L8 contracción.....</i>	59
<i>Tabla 4.7 Análisis de varianza para tensión de cizalla</i>	60
<i>Tabla 4.8 Análisis de varianza para la fuerza de cierre</i>	61
<i>Tabla 4.9 Análisis de varianza para el alabeo</i>	62
<i>Tabla 4.10 Análisis de varianza para la contracción</i>	64
<i>Tabla 4.11 Arreglo L18 Tiempo de enfriamiento</i>	66
<i>Tabla 4.12 Análisis de varianza para tiempo de enfriamiento</i>	69

INTRODUCCIÓN

En la revista denominada *Plastics the Facts 2017* y publicada en 2018, por *Plastics Europe Market Research Group*; de una investigación realizada en el año 2016, se estimó que en el mundo se produjeron 335 millones de toneladas de productos plásticos y 322 millones de toneladas en el año 2015, y que solo en Europa en el año 2016 fueron 60 millones de toneladas; en estos datos se incluyen termoplásticos, poliuretanos, termoestables, adhesivos, revestimientos y selladores. Además, se encontró que Asia produjo el 50% del total, siendo China el mayor productor con 29%, Japón 4% y el resto de Asia con 17%. Europa contribuyó con el 19%, NAFTA (Estados Unidos, México, Canadá) con el 18%, África 7%, Latinoamérica 4% y CIS (Armenia, Azerbaiyán, Bielorrusia, Kazajistán, Kirguistán, Moldavia, Rusia, Tayikistán, Turkmenistán y Uzbekistán) 2%; siendo que, de esa producción, el 32% del plástico se procesa mediante moldeo por inyección, siendo el diseño del molde un aspecto muy crítico a considerar para lograr éxito en el proceso (Plastics Europe, 2018).

Actualmente, el moldeo por inyección representa el proceso más importante para manufacturar partes plásticas debido a la facilidad de fabricación de artículos de alta calidad, además; presenta algunas ventajas como una alta estabilidad dimensional, ciclos cortos de producción, superficies finas y limpias en los productos, moldeo fácil de formas complicadas y bajos costos en la producción. El moldeo por inyección involucra varios parámetros que deben verificarse para obtener resultados efectivos; esto debe hacerse en la etapa de diseño en sí (Tony, Karthikeyen, & Alex, 2017).

El diseño es una actividad crucial, se ha estimado que hasta un 80% del costo del desarrollo y la fabricación de un producto, es determinado por las decisiones tomadas en las etapas iniciales del diseño (Kalpakjian & Steven R., 2014). Por último, la cotización del diseño de piezas de plástico, puede ser difícil tanto para el cliente como para el proveedor del molde; ya que involucra el diseño y la fabricación del molde. El especialista en adquisiciones, envía solicitudes de cotización a varios fabricantes de moldes, después de esperar semanas, el cliente descubre que el tiempo de desarrollo

y el costo del molde pueden diferir de sus planes, por varios factores; si es un costo excesivo, el cliente deben preguntar sobre los detalles de las cotizaciones provistas, y verificar si los costos pueden ser reducidos a través del rediseño del molde de la pieza de plástico (Kazmer, 2007).

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Antecedentes

El proyecto se desarrolló en *TE Connectivity*, empresa líder global de componentes electrónicos de ingeniería, soluciones de redes, sistemas de telecomunicación y bienes de consumo en más de 150 países. La compañía diseña, fabrica y comercializa productos para varias industrias incluyendo la industria automovilística, sistemas de comunicación de datos, telecomunicaciones, industria aeroespacial, defensa y marina, medicina, energía e iluminación y electrónica de consumo. *TE Connectivity*, tiene experiencia en investigación en el campo de las ciencias de los materiales, tecnología de diseño y manufactura de procesos. En el estado de Sonora están establecidas 10 plantas de *TE Connectivity*, y solo en la ciudad de Hermosillo están cinco de ellas, desarrollando una gama de productos para diferentes sectores. Una de las plantas de *TE Connectivity* es la división Automotriz, y se localiza en el parque Industrial Hermosillo Norte, la cual, ha venido a contribuir en la economía de la ciudad y de la sociedad en general. Una de las áreas importantes en *TE Connectivity* es el área de moldeo, en dicha área se fabrican por inyección de plásticos y resinas, diversos componentes; que posteriormente serán ensamblados para obtener un producto final. El área de moldeo tiene áreas de oportunidad como son: el estudio y el análisis de los parámetros del proceso, para el mejoramiento de los tiempos del ciclo; y en el área de taller, con el mantenimiento, diseño y manufactura de los moldes (Rayas, 2017).

1.1.1. Revisión de Artículos

Después de una rigurosa búsqueda y varios artículos consultados, no se encontró ningún artículo que desarrollara el trabajo de esta investigación, es decir, el diseño óptimo de un molde de inyección de una única cavidad, con el mejor tiempo de enfriamiento sin afectar la calidad de su producto moldeado. Algunos investigadores estudiaron los factores que afectaban la calidad de las piezas, a partir de la perceptibilidad visual de rechupes, marcas y distorsiones. Otros estudiaron los factores de mejoramiento en los tiempos del ciclo. Otros cuantos estudiaron el diseño óptimo

del sistema de enfriamiento para un molde en específico. Y otros pocos, acerca del consumo energético de la máquina de inyección. Pero el estudio que más contribuyó, por ser una guía para esta tesis, fue el de, *Jamsheed, M. et. al.*, que en 2015 diseñaron y analizaron un molde de inyección de plásticos con *Unigraphics* y *Autodesk Mold Flow Insight*; ellos optimizaron el diseño para lograr el máximo resultado del producto, con un tiempo de ciclo mínimo en cada ciclo de producción (Jamsheed, Rahman, Moyeed, & Ahmed, 2015). Otro muy interesante, pero de menos contribución fue la metodología con enfoque de diseño de experimentos desarrollada por *Jahan, S. et. al.* en el 2016, para el diseño de canales confórmale de refrigeración, ellos usaron como respuesta, el rendimiento térmico y mecánico en el molde (Jahan et al., 2016). Estos artículos que solucionan una problemática en específico, enseñan las nuevas tecnologías que se pueden usar en el área de taller, en la solución de fallas en los moldes, tanto para mantenimiento, diseño y manufactura.

1.1.2. Información de la situación actual antes del estudio

La empresa no cuenta con una metodología de diseño y manufactura de moldes para inyección de plástico, con esta metodología se puede aumentar la vida útil del molde al conocer los parámetros óptimos del proceso, haciendo que el molde trabaje dentro del rango para lo cual fue diseñado. Las reparaciones por parte de los técnicos de taller, son tardías, pero al conocer el funcionamiento y componentes de un molde, se busca realizar reparaciones en el menor tiempo posible; es decir, la metodología propuesta brinda al personal mayores capacidades y habilidades con respecto al conocimiento de un molde de inyección. Una de las metas del área de taller, es asegurar que el mantenimiento correctivo fue realizado exitosamente, y el molde revisado, no cuente con el estatus de “retorno de molde a taller”, que da como resultado pérdida de eficiencia para la empresa, y un retraso para otros moldes que están en lista de espera, de recibir mantenimiento correctivo.

Además, aplicando esta metodología, se podría desarrollar la manufactura del molde en taller, reducir tiempos y costos generados por diseño, fabricación y envío por parte de los proveedores de moldes actuales.

1.1.3. Justificación de la problemática

En el taller de moldes se reciben trabajos de mantenimiento preventivo, correctivo y mantenimiento correctivo-predictivo, el principal problema del taller es resolver los problemas que se presentan en un tiempo corto, ya que generalmente deben desarmar todo el molde y revisar cavidad por cavidad los insertos que la componen, después de eso, se espera a la persona que debe autorizar los cambios de insertos y se debe hacer el vale para el material necesario. Hay muchos técnicos en taller de moldes, pero de esos técnicos solo pocos están destinados a la reparación de moldes, otros están destinados a la utilización de las máquinas de manufactura y el restante se avocan a mantenimientos preventivos, es muy complicado que un técnico nuevo o de pocos años de experiencia, pueda realizar una reparación a un molde, por no conocer la metodología que debe aplicar en un mantenimiento correctivo. Absolutamente nadie diseñaría y/o fabricaría un molde por completo.

1.2. Planteamiento del problema

Debido a ineficientes reparaciones, altos tiempos en la solución de fallas en moldes, al desconocimiento del uso del equipo; a las constantes variaciones en los parámetros del proceso de inyección, al desconocimiento y falta de capacitación del personal del área de moldeo, ha disminuido la vida útil de los insertos del molde, por ende, ha sido afectada la producción de los productos inyectados. Es decir, la empresa realiza mantenimientos y reparaciones de moldes con técnicos que no están familiarizados con la nueva generación de moldes, estar a la vanguardia y tener un método en el cual se identifican fallas posibles, maneras de contrarrestarlas y repararlas, sería en primera instancia, un cierre de fuga de dinero; ya que los técnicos que se encargan de estas actividades, en su gran mayoría terminan dejando los moldes inservibles, siendo el costo de ellos bastante elevado y su fabricación en otro continente. Por lo tanto, la empresa pierde dinero, al tener una máquina sin uso por falta de molde.

1.3. Preguntas de investigación

Al inicio de la investigación se tenían varias interrogantes, todas dirigidas al área de moldeo; cada pregunta podía determinar una serie de hipótesis sugeridas para un caso

en específico. A continuación, las más relevantes para buscar su respuesta y desarrollar este estudio fueron:

- ¿Qué se necesita conocer para diseñar un molde de inyección?
- ¿Cuánto tiempo tarda en diseñarse y fabricarse un molde?
- ¿Cuántos elementos deben componer un molde de inyección?
- ¿Cuánto tiempo tarda en repararse un molde?
- ¿Cuál es el valor económico de un molde?
- ¿Existen proveedores de moldes en la región?
- ¿Es recomendable para la empresa, diseñar y manufacturar sus propios moldes?
- ¿Qué *software* se puede usar para el diseño y fabricación de un molde de inyección?
- ¿Qué *software* se puede usar para el análisis de moldeo por inyección de manera virtual?

1.4. Hipótesis

A través de la hipótesis, se busca dar respuesta favorable a las preguntas de investigación, para solucionar las necesidades y/o mejorar los procesos en el área de moldeo de la empresa.

- H1.- Diseñar el molde en *software* CAD/CAE antes de su fabricación, permite predecir su vida útil, conocer su costo económico, y determinar sus componentes.
- H2.- Analizar el proceso de inyección en *software* CAD/CAE permite conocer los puntos críticos de los moldes y definir los parámetros de entrada del proceso.
- H3.- Fabricar el molde de inyección en taller usando CAM, permite reducir costos de producción, debido al ahorro de la fabricación y el envío.
- H4.- Capacitar al personal referente al diseño, manufactura, y fabricación de moldes, utilizando, la simulación virtual de la inyección con el uso del ordenador, permitirá realizar reparaciones eficientes en taller de moldes más rápido.

1.5. Objetivos

En el área de moldeo existe personal en proceso, que trabajan directamente con la máquina de inyección, y técnicos de taller de moldes, que son los que realizan las reparaciones; todos trabajan en equipo para cumplir las metas de producción establecidas; definir tareas y objetivos a corto, mediano y largo plazo es importante para la empresa, recibir capacitación constante, certificaciones y *coaching* cruzado es prioridad del área; un empleado bien entrenado siempre dará mejores resultados.

1.5.1. Objetivo general

Implementar una metodología para el diseño y manufactura de moldes, que permita a los trabajadores del área de moldeo, mejorar el proceso de inyección a través del uso correcto de parámetros en la máquina de inyección, así como mejorar los indicadores de desempeño en área de taller de moldes, con reparaciones más eficientes y construcción de componentes de los moldes, hasta un molde completo.

1.5.2. Objetivos específicos

Este estudio consiste en desarrollar una metodología para el diseño y manufactura de moldes de inyección, por medio del prototipado virtual incluyendo simulación del proceso de inyección, tomando como referencia el diseño e ingeniería asistida por computadora, además de trabajar con bases de moldes estándar normalizados, de una gama extensa de proveedores.

Realizar un diseño de un molde de una única cavidad, para probar la metodología propuesta, calcular la entrada de inyección, el tiempo de enfriamiento, el ángulo de desmolde y el esfuerzo cortante por cizallamiento; además, analizar parámetros indicadores de la calidad del producto, como son: la contracción, la deformación por alabeo, rechupes, líneas de soldadura; todo con el objeto de obtener los parámetros óptimos del proceso y diseñar el molde.

1.6. Delimitaciones

Se delimitará el alcance de la tesis a generar una propuesta a través de una metodología de diseño y manufactura de moldes, con el fin de optimizar recursos

financieros, materiales y humanos; con el objeto de mejorar los indicadores de desempeño y cumplir con las metas establecidas en el área de moldeo. La metodología se apoya en el prototipado virtual, recreando el proceso de inyección a través de la simulación, para obtener datos que apoyados en el diseño y la manufactura asistida, generan los planos de fabricación y condiciones de uso. En este proyecto se tendrán dos limitantes, el tiempo, que son dos años de duración de la maestría, y la falta de experiencia en el área de moldeo por inyección de plástico.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS CONCEPTUALES Y MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades

La palabra plástico procede del griego *plastikos*, que significa capaz de ser moldeado y formado. Los plásticos se pueden formar, maquinar, fundir y unir en diversas formas con relativa facilidad (Kalpakjian & Steven R., 2014). Los polímeros son moléculas de cadena larga que se forman por polimerización. Un monómero es el elemento básico de un polímero. La palabra mero, del griego *meros*, significa parte, e indica la unidad repetitiva más pequeña; el término polímero significa muchos meros, por lo general repetidos, cientos o miles de veces en una estructura similar a una cadena. La mayoría de los monómeros son materiales orgánicos en los que los átomos de carbono se unen mediante enlaces covalentes (compartiendo electrones) con otros átomos, como hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, flúor, cloro, silicio y azufre. Un ejemplo de un monómero simple es el etileno, que consta de átomos de carbono e hidrógeno (Chanda & Roy, 2007).

Debido a su gran tamaño molecular, los polímeros poseen propiedades químicas y físicas únicas. El proceso de transformación de monómero a una molécula de polímero se conoce como polimerización; el etileno, es muy reactivo porque tiene un doble enlace, bajo la influencia del calor, la luz o agentes químicos, este enlace se activa de tal manera que empieza una reacción en cadena de autoadición de moléculas lo que resulta en la producción de un polímero de alto peso molecular, conocido como polietileno. En la figura 2-1 se observa la polimerización del etileno.

Hay dos mecanismos de polimerización fundamentales, polimerización por adición y polimerización por condensación. En el proceso de adición (también conocida como reacción en cadena) no se obtiene un subproducto, la polimerización por adición se hace mediante la adición sucesiva de unidades monoméricas insaturadas en una reacción en cadena promovida por el centro activo, ejemplo, cloruro de vinilo. En el proceso de condensación, se obtiene como resultado un subproducto de bajo peso molecular, por ejemplo, H₂O, HCl, etc. De manera similar, la polimerización por

condensación se denomina polimerización por etapas dado que los polímeros en este caso están formados por condensación intermolecular paso a paso de grupos reactivos. Otro proceso de polimerización que ahora ha aparecido de interés como una nueva área de investigación y es poco común, es la polimerización supramolecular (Chanda & Roy, 2007).

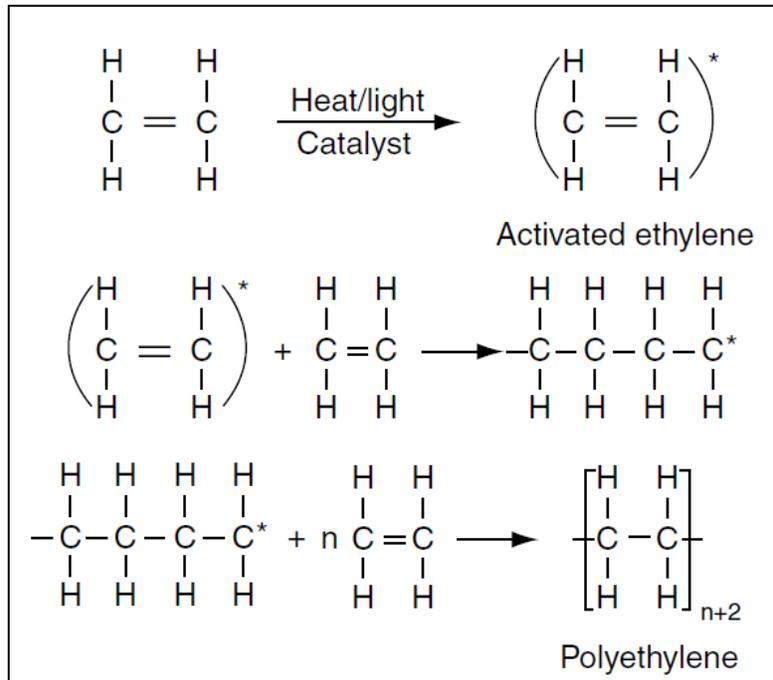


Figura 2-1 Polimerización del Etileno tomado de (Chanda & Roy, 2007)

Las cadenas de los polímeros pueden ser lineales, ramificadas, de enlaces entrelazados y en red. La composición de una cadena polimérica (macromoléculas) se divide en:

- Homopolímeros: todas con misma unidad de repetición, ejemplo, poliestireno.
- Copolímeros: dos unidades de repetición diferentes, estirenoacrilonitrilo.
- Terpolímeros: tres unidades de repetición diferentes, acrilonitrilo, butadieno y estireno.

El tipo del proceso de transformar *pellets* o fibras de plásticos a producto final terminado, depende de las propiedades y características del polímero, y en la forma del producto final. Los termoplásticos, así como los termoestables y elastómeros se

pueden procesar por medio de moldeo por inyección, aunque para los termoestables y los elastómeros se debe modificar el equipo y usar moldes adecuados; por lo que es más común en el proceso de inyección de plásticos usar termoplásticos (Mennig & Stoeckhert, 2013).

Las resinas termoplásticas consisten en moléculas de polímero largas, cada una de las cuales puede tener o no, de lado, cadenas o grupos. Las cadenas laterales o grupos, si están presentes, no están vinculados a otras moléculas de polímero, es decir, no tienen enlaces cruzados. Las resinas termoplásticas, generalmente obtenidas como un polímero granular, pueden por lo tanto ser repetidamente fundidas, el calor suaviza o derrite el material para que pueda ser formado y/o moldeado; el enfriamiento posterior solidifica al material en la forma dada. En resinas termoendurecibles, también conocidas como termoestables, contiene grupos reactivos a partir de enlaces cruzados entre las moléculas durante el proceso de fabricación. El material reticulado o "curado" no puede ablandarse por calentamiento.

Los materiales termoestables se suministran generalmente como un compuesto de moldeo parcialmente polimerizado o como un líquido de mezcla de monómeros y polímeros, en esta condición no curada, pueden formarse con o sin presión, y polimerizarlo al estado curado con productos químicos o calor; los termoestables tienen propiedades meritorias a altas temperaturas. Por ejemplo, el revestimiento de un alambre con polietileno reticulado está hecho, mediante la extrusión del polietileno termoplástico, que luego se retícula (ya sea químicamente o por irradiación) para formar lo que en realidad es un material termoestable que no se puede derretir de nuevo por calentamiento (Chanda & Roy, 2007).

El moldeo por compresión y transferencia son los métodos más comunes de procesamiento de termoestables, y para los termoplásticos, las técnicas de procesamiento más importantes son extrusión, inyección, y termoformado. Los termoplásticos según la configuración de sus moléculas son amorfos o semicristalinos, es decir, si presentan en su cadena o matriz de repetición un orden. Para los polímeros

semicristalinos, el ritmo de enfriamiento tiene mayor significado debido a que las dimensiones varían significativamente con el ritmo de enfriamiento, esto significa, que al enfriarse se contraen más. Los termoplásticos semicristalinos tienen estructura ordenada, punto de fusión exacto, son resistente a solventes, resistente a la fatiga y al desgaste, alto acercamiento molecular, alta contracción, lo que es un problema para el control de las dimensiones. Los termoplásticos amorfos, tienen estructura aleatoria, punto de fusión alto, sensible a solventes, poca resistencia a la fatiga y desgaste, poca contracción (Kalpakjian & Steven R., 2014). En la figura 2-2 se observa la configuración de la cadena molecular de los termoplásticos.

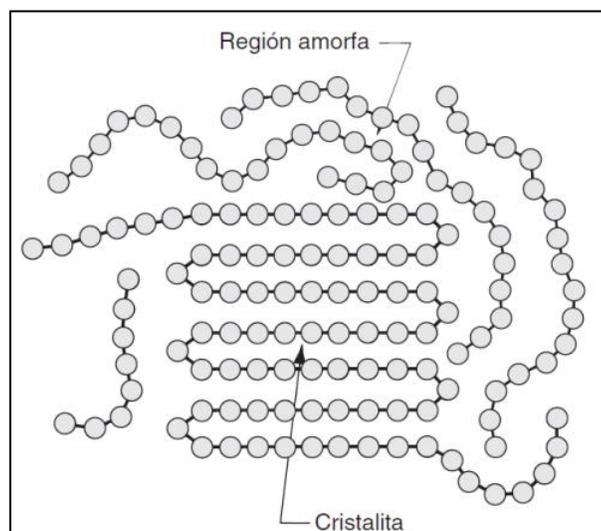


Figura 2-2 Configuración molecular de los termoplásticos tomado de (Groover, 2007)

Cuando una muestra de un polímero se calienta, pasa a través de una temperatura T_g , llamada temperatura de transición vítrea, por encima de la cual se ablanda y se vuelve similar al caucho; esta es una temperatura importante y marca el comienzo de un movimiento molecular extenso que se refleja en cambios marcados en las propiedades, como volumen específico, índice de refracción, rigidez y dureza. Por encima de T_g , el material puede deformarse más fácilmente o volverse dúctil, es decir, cambiar su forma con facilidad al aplicarse calor. En un polímero perfectamente cristalino, todas las cadenas estarían contenidas en regiones de orden tridimensional, llamadas cristalitas, y no se observaría transición cristalina, debido a la ausencia de

cadenas desordenadas en la muestra. Un polímero perfectamente cristalino, al calentarlo a una temperatura T_m llamada temperatura de fusión, se convertiría en un líquido viscoso, sin embargo, los polímeros perfectamente cristalinos no se encuentran en la práctica, y los polímeros reales pueden contener en cambio proporciones variables de regiones ordenadas y desordenadas en la muestra. Estos polímeros semicristalinos, generalmente exhiben tanto T_g como T_m , correspondientes a las regiones desordenadas y ordenadas respectivamente; tanto T_g como T_m , son parámetros importantes que sirven para caracterizar un polímero dado; por ejemplo, T_g establece un límite de temperatura superior, para el uso de termoplásticos amorfos, como el polimetacrilato de metilo (PMMA $C_5O_2H_8$)_n y un límite inferior de temperatura, para el comportamiento gomoso de un elastómero, como el caucho SBR o 1,4-cis-polibutadieno. Como una regla general, los polímeros semicristalinos se utilizan a temperaturas entre T_g y T_m , que es el inicio del ablandamiento, y generalmente nos indica, el rango de temperatura requerida para que un polímero particular, deforme una cantidad dada bajo una carga especificada (Chanda & Roy, 2007). En la tabla 2.1 se observan algunas temperaturas de transición vítrea y temperaturas de fusión para algunos polímeros comerciales.

Tabla 2.1 Temperatura de transición vítrea T_g , Temperatura de fusión T_m , para algunos polímeros tomado de (Chanda & Roy, 2007)

Polymer	T_g (°C)	T_m (°C)
Polyethylene (high density)	-115	137
Polyoxymethylene	-85	181
Polyisoprene (natural rubber)	-73	28
Polyisobutylene	-73	44
Polypropylene	-20	176
Poly(vinylidene chloride)	-19	190
Poly(chlorotrifluoroethylene) (kel-F)	45	220
Poly(hexamethylene adipamide) (nylon-6,6)	53	265
Poly(ethylene terephthalate) (Terylene, Dacron)	69	265
Poly(vinyl chloride)	81	212
Polystyrene	100	240
Poly(methyl methacrylate) (Perspex, Lucite)	105	200
Cellulose triacetate	105	306
Polytetrafluoroethylene (Teflon)	127	327

2.2. Propiedades y características del Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno

El Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS, por sus siglas en inglés), es un plástico de gran uso en la ingeniería por sus notables propiedades mecánicas; es un terpolímero de dos fases, una es la de copolímero duro de estireno-acrilonitrilo, y la otra es de copolímero de estireno-butadieno similar al caucho. El nombre del plástico se deriva de los tres monómeros iniciales, que están mezclados en proporciones diferentes. Las aplicaciones comunes del ABS, incluyen componentes para automóviles, juguetes, aparatos electrodomésticos, máquinas de oficina, tubos y accesorios (Groover, 2007). En la tabla 2.2 se observan algunas características básicas del ABS genérico.

Tabla 2.2 Características básicas del ABS genérico tomado de (Groover, 2007)

Polímero:	Terpolímero de acrilonitrilo (C_3H_3N), butadieno (C_4H_6), y estireno (C_8H_8).	Resistencia a la tensión:	50 MPa (7 000 lb/in ²)
Símbolo:	ABS	Elongación:	10% a 30%
Método de polimerización:	Adición	Gravedad específica:	1.06
Grado de cristalinidad:	Ninguno (amorfo)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 3%
Módulo de elasticidad:	2 100 MPa (300 000 lb/in ²)		

Los miembros más importantes de la familia de las poliamidas PA, son los nylon; los dos principales grados son el nylon 6 y el nylon 6,6 (los números, son códigos que indican el número de átomos de carbono en el monómero). El nylon es fuerte, muy elástico, inflexible, resistente a la abrasión y autolubricante; a temperaturas alrededor de 125 °C, conserva buenas propiedades mecánicas; una desventaja es que absorbe agua y esto implica la degradación de sus propiedades (Groover, 2007). El ABS conocido como *Bayer-Triax® 1120*, se conforma de una aleación de poliamida PA, y Acrilonitrilo, Butadieno, Estireno, ABS; este polímero, según ficha técnica del fabricante, tiene una relación de compresión en el tornillo de 2.5 a 1.0, una dureza de 105 *HRC*, y un calor específico 0.6 *Btu-°F/lb* (Bayer Corporation, 2001). En la tabla 2.3 se muestran ciertas propiedades y características; en la tabla 2.4 las propiedades físicas y mecánicas; y en la tabla 2.5 los parámetros de inyección.

Tabla 2.3 Propiedades Bayer Triax® 1120 tomado de (Bayer Corporation, 2001)

Properties	
General	
Recycled Content	• No
Material Status	• Commercial: Active
Availability	• North America
Features	<ul style="list-style-type: none"> • Abrasion Resistance, Good • Chemical Resistance, Good • Fatigue Resistant • General Purpose • Impact Resistance, High • Processability, Good • Surface Finish, Good
Uses	<ul style="list-style-type: none"> • Appliance Components • Automotive Exterior Parts • Automotive Interior Parts • Electrical Parts • Gears • General Purpose • Handles • Housings • Lawn and Garden Equipment • Sporting Goods • Tools, Power & Others
Appearance	• Opaque
Forms	• Pellets
Processing Method	• Injection Molding

Tabla 2.4 Propiedades Mecánicas Triax® 1120 tomado de (Bayer Corporation, 2001)

Physical	Nominal Values	Test
Specific Gravity	1.06 -	ASTM D792
Mold Shrink, Linear-Flow	10 mil/in	ASTM D955
Water Absorption @ 24 hrs	1.1 %	ASTM D570
Water Absorption @ Sat.	4.3 %	ASTM D570
Water Absorb@Sat.Temp	73 °F	
Mechanical	Nominal Values	Test
Tensile Modulus	295000 psi	ASTM D638
Tensile Strength @ Yield	6300 psi	ASTM D638
Tensile Elongation @ Brk	140 %	ASTM D638
Flexural Modulus	300000 psi	ASTM D790
Flexural Strength @ Yield	10900 psi	ASTM D790
Poisson's Ratio	0.38 -	ASTM E132

Tabla 2.5 Parámetros de Inyección Bayer Triax® 1120 Natural tomado de (Bayer Corporation, 2001)

Injection	Nominal Values	Test
Drying Temperature	190 °F	
Drying Time	2-4 h	
Suggested Max Moisture	0.35 %	
Suggested Max Re grind	20 %	
Suggested Shot Size	50-70 %	
Rear Temperature	450-510 °F	
Middle Temperature	450-510 °F	
Front Temperature	450-510 °F	
Nozzle Temperature	480-500 °F	
Processing (Melt) Temp	460-520 °F	
Mold Temperature	100-150 °F	
Injection Pressure	6000-12000 psi	
Injection Rate	Fast -	
Back Pressure	50-100 psi	
Clamp Tonnage	3-5 tons/in ²	
Screw L/D Ratio	20.0:1.0 -	

2.3. Procesamiento de polímeros

Los termoplásticos son fáciles de moldear y se dispone de una gran variedad de operaciones para procesarlos, por ejemplo, la inyección, la compresión, el rotomoldeo, el soplado, y el termoformado. Por lo general, el moldeo de termofijos es más complicado, debido a que requieren curarse, es decir, entrecruzar sus cadenas; los procesos más comunes para los termofijos son: el moldeo por compresión, la pultrusión y el moldeo por transferencia. El procesamiento del caucho, tiene una historia más larga que la de los termoplásticos y termofijos, las industrias asociadas con estos materiales han estado tradicionalmente separadas, aunque su procesamiento sea similar de muchos modos (Groover, 2007).

En la figura 2-3 se pueden observar diferentes operaciones del procesamiento de polímeros, inclusive la producción rápida de prototipos, también conocida como impresión 3D y/o manufactura aditiva.

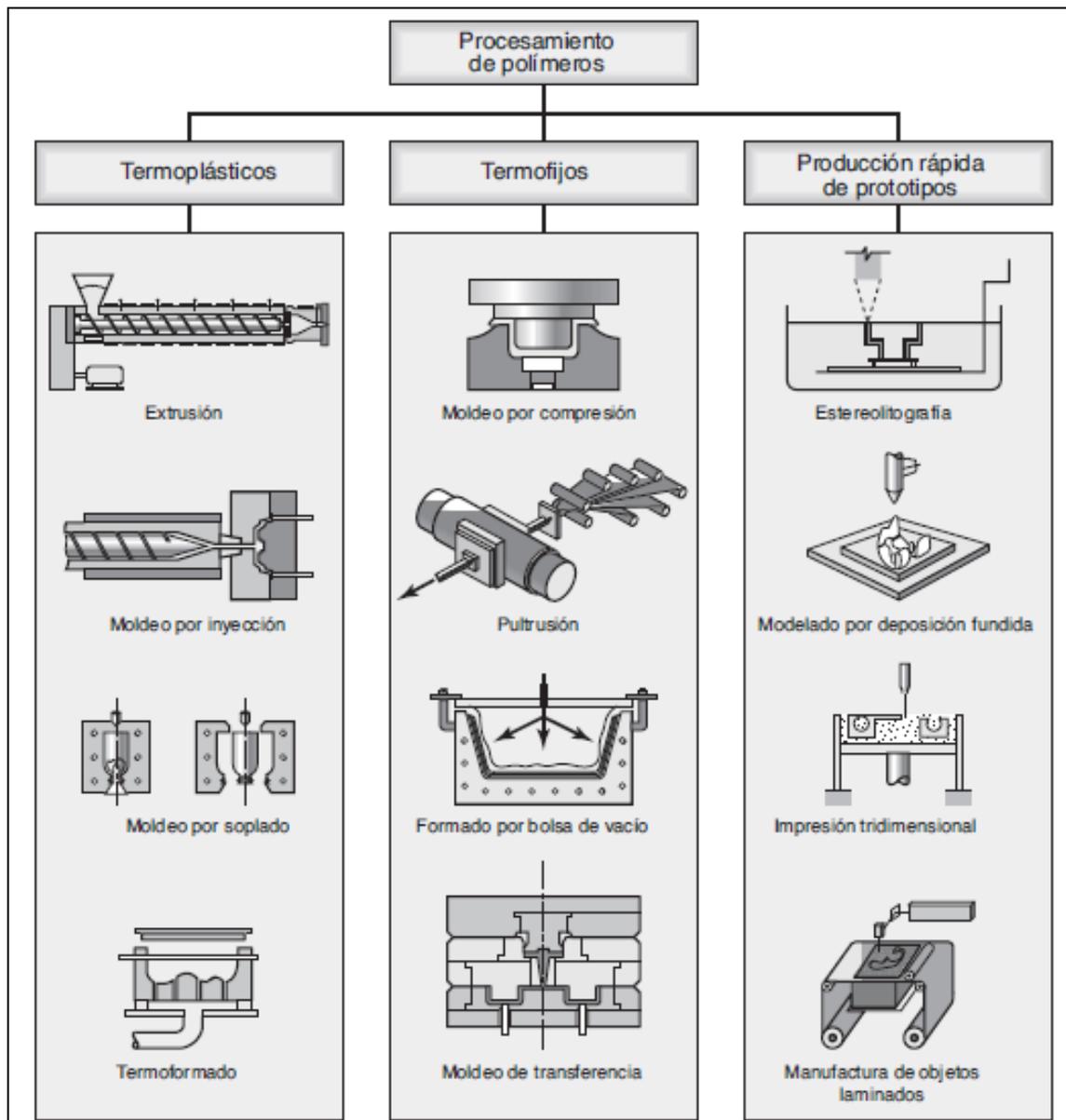


Figura 2-3 Diferentes procesos de transformación del plástico tomado de (Kalpakjian & Steven R., 2014)

2.3.1. Moldeo por inyección

El moldeo por inyección es un proceso típico para la producción de piezas moldeadas en grandes volúmenes, frecuentemente utilizados en la producción de gran masa. Los costos de moldes asociados, son en comparación con otros procesos, relativamente altos; los moldes de inyección generalmente son artículos individuales y, por lo tanto, recursos de producción muy valiosos, su disponibilidad puede ser de

mucha importancia. Es posible que se requiera una mayor inversión en el molde que en la propia máquina. El proceso consiste en ablandar el plástico de la misma manera en la que se ablanda en el método de extrusión e inyectarlo bajo presión en la cavidad de un molde, donde es endurecido por enfriamiento. El material granulado cae de una tolva a un barril donde con un tornillo sin fin lo conduce a la zona de calentamiento donde se funde y se desplaza hacia delante a través de una boquilla que está en contacto con el molde. El polímero fundido fluye a través de una abertura en la matriz, hacia la cavidad del molde. El molde se mantiene bien cerrado por la sujeción de la prensa, el polímero es forzado a llenar toda la cavidad, dando como resultado un producto bien definido (Mercado-Colmenero, Rubio-Paramio, Vizán-Ildoipe, & Martín-Doñate, 2017).

2.3.2. Componentes de una máquina de moldeo por inyección

Una máquina de moldeo por inyección tiene dos secciones principales, la unidad de inyección, y la unidad de sujeción o cierre. Además, tiene los controles de mando de la máquina y el molde; (Mennig & Stoeckhert, 2013). En la figura 2-4 se muestra una máquina de inyección completa.

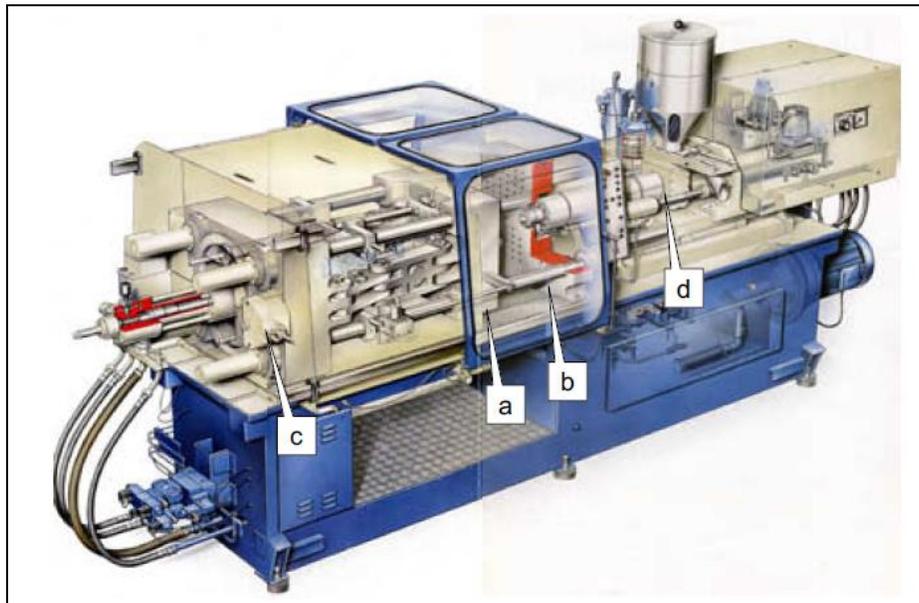


Figura 2-4 Máquina de moldeo por inyección, diseño típico de 3 placas con unidad de sujeción con palanca, tomado de (Mennig & Stoeckhert, 2013).

- a. Placa expulsora
- b. Placa fija
- c. Ajuste de la altura del molde.
- d. Unidad de inyección con cilindro de plastificación y boquilla de cierre.

Se puede observar en la figura 2-5, los elementos esenciales de una unidad de inyección: la tolva de alimentación, el sistema de dosificación, plastificación e inyección, y la unidad de moldeo-desmolde. La tolva de alimentación se conecta mediante un conducto al cilindro o barril donde tiene lugar la plastificación. El sistema de dosificación, plastificación e inyección admite la cantidad necesaria de resina, la funde y la inyecta en el molde a través de una boquilla que, al adaptarse a presión al bebedero del molde, abre una válvula de descarga localizada en su extremo; en la figura 2-6, se observa el proceso de inyección plástica que, al finalizar el proceso, la boquilla desacopla del molde y se cierra automáticamente; en la figura 2-7, se observan los elementos de la boquilla y válvula de descarga antirretorno. En la actualidad casi todas las máquinas de inyección disponen de un pistón de dosificación-plastificación en forma de tornillo que, al girar cierto número de vueltas, realiza la carga del material, siendo obligado por éste a retroceder hasta una posición tope previamente regulada, quedando el cilindro o barril completamente lleno de material. En la figura 2-8 se observa el tornillo dividido por zonas de dosificación (RJG Inc., 2005).

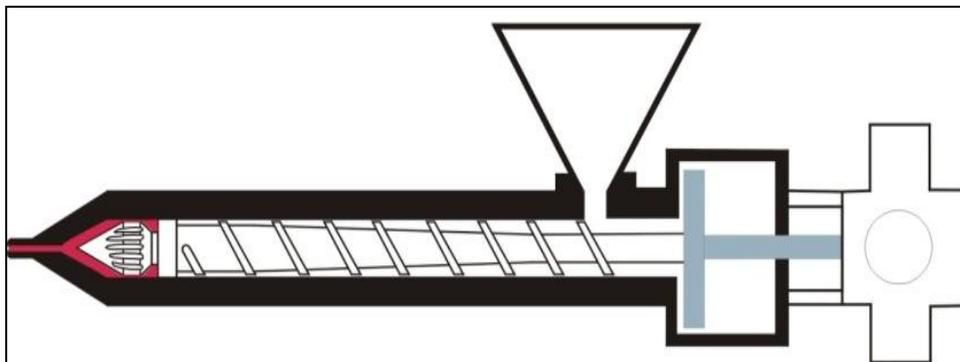


Figura 2-5 Unidad de inyección tomado de (RJG Inc., 2005)

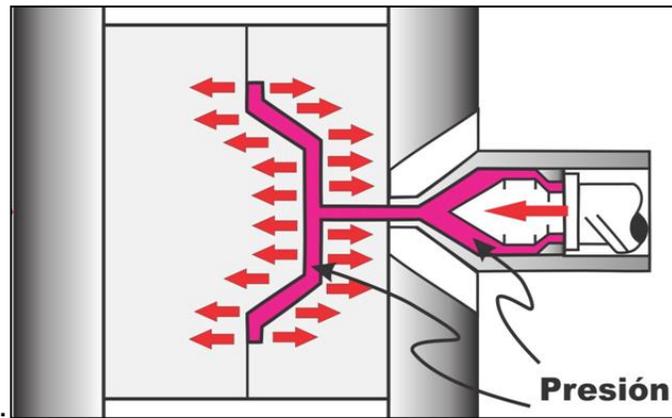


Figura 2-6 Inyección plástica a través de la válvula tomado de (RJG Inc., 2005)

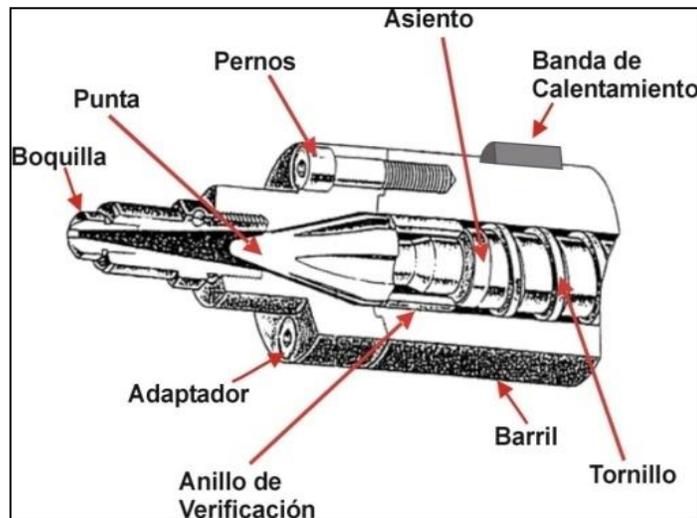


Figura 2-7 Boquilla y válvula de descarga antirretorno tomado de (RJG Inc., 2005)

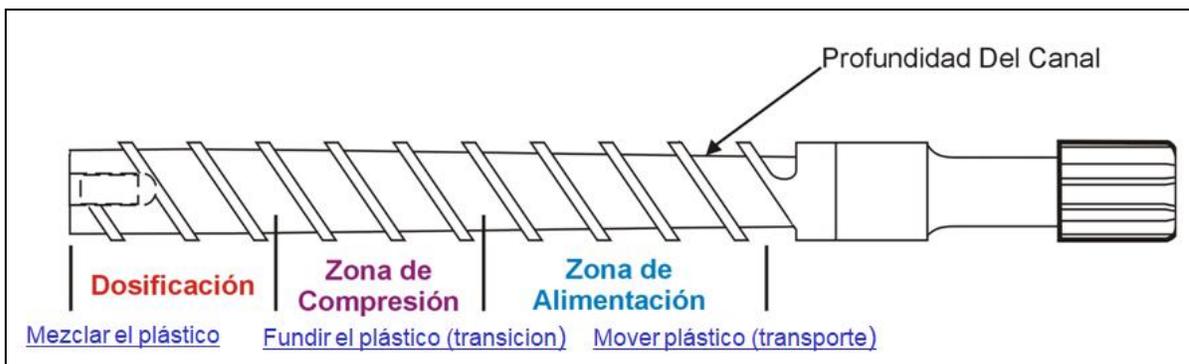


Figura 2-8 Tornillo dividido por zonas y actividad de inyección tomado de (RJG Inc., 2005)

La plastificación mediante tornillo proporciona una fusión regular y homogénea, con poco riesgo de degradación térmica, y posibilita un llenado del molde a presiones más

bajas, combinando el movimiento giratorio con su desplazamiento longitudinal. El trabajo que realiza el tornillo es el siguiente: cuando termina la inyección anterior se queda en la posición más adelantada, al empezar a girar, toma el material frío de la tolva y lo transporta hacia la parte delantera, al tiempo que lo calienta, figura 2-9; estando la válvula de descarga cerrada, el tornillo ejerce grandes esfuerzos de cortadura sobre el material, a la vez que retrocede y, cuando tiene acumulada suficiente cantidad para llenar el molde, deja de girar, quedando en espera; al acoplarse la boquilla al bebedero del molde, se abre la válvula de descarga y ahora el tornillo, actúa como émbolo, comprimiendo el material y haciéndolo fluir a través de la boquilla, hasta llenar el molde; transmitiendo al interior de éste, toda la presión (RJG Inc., 2005). Diferentes tipos de válvulas de descarga antirretorno se observan en la figura 2-10.

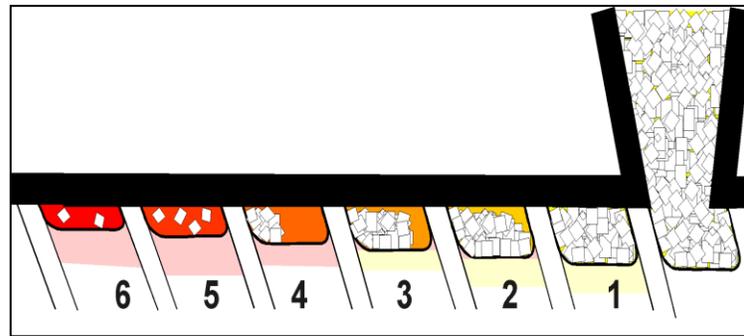


Figura 2-9 Plastificación del polímero tomado de (RJG Inc., 2005)

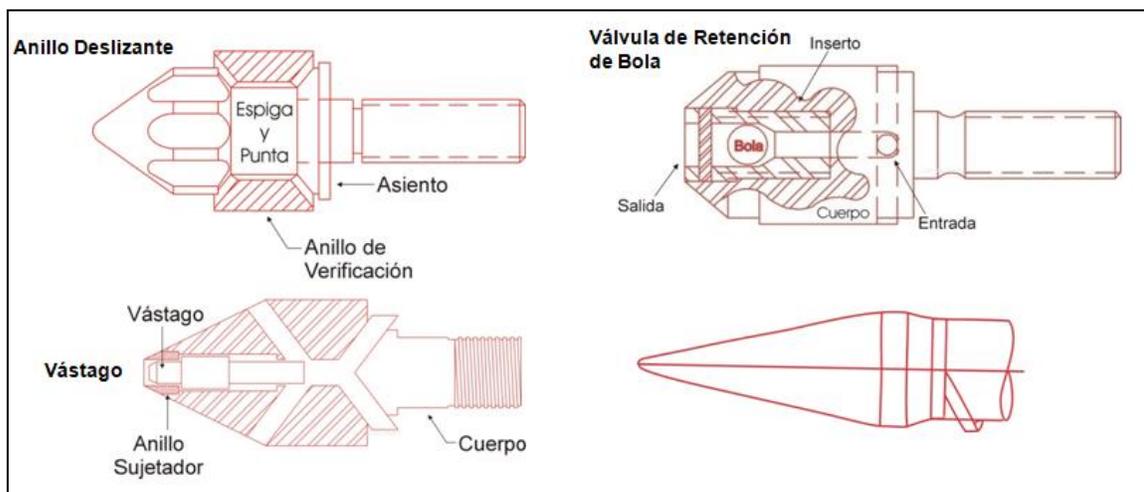


Figura 2-10 Diferentes tipos de válvulas de descarga antirretorno tomado de (RJG Inc., 2005)

La cámara del cilindro o barril de plastificación-inyección va provista de un sistema de calentamiento mediante resistencias individuales (banda de calentamiento), que permiten una regulación de la temperatura de la pared por zonas y mantiene la resina plastificada entre inyección e inyección. La temperatura de fusión del plástico es la variable principal del proceso y debe monitorearse, la temperatura del cilindro o barril, la contrapresión, y las revoluciones por minuto del tornillo son parámetros que afectan la temperatura de fusión del plástico, por lo que su control es importante. La unidad de cierre consta de las dos partes del molde sujetas mediante piezas portamolde y ciertos mecanismos, generalmente hidráulicos que tienen por misión su abertura y cierre. Estos mecanismos tienen que ser suficientemente robustos para resistir la presión del material en la etapa final de la inyección, que puede superar los 50 MPa y llegar a los 200 MPa (RJG Inc., 2005). En la figura 2-11 se observa diferentes tipos de cierres.

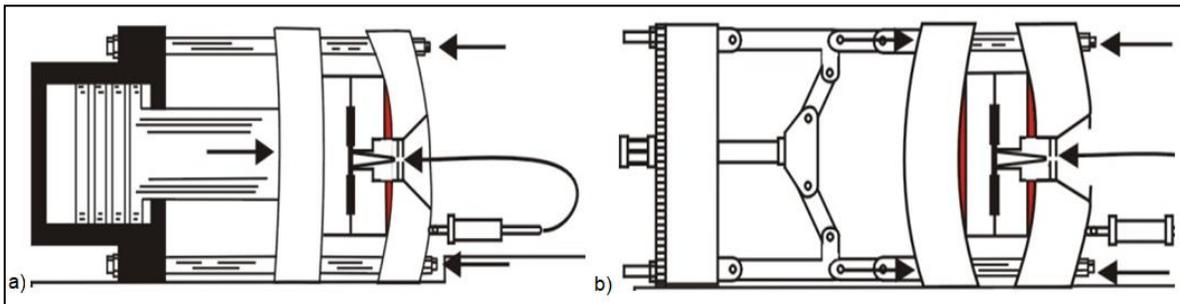


Figura 2-11 Diferentes tipos de cierres: a) hidráulico, b) cierre acodado, tomado de (RJG Inc., 2005)

En resumen, el proceso de moldeo por inyección, necesita de una máquina de moldeo también llamada moldeadora, en la actualidad, estas son muy sofisticadas, como contar con un controlador numérico computarizado, un sistema estadístico integrado de funcionalidad y muchos más elementos de los que aquí, son descritos. En la figura 2-12, se observa una imagen real del modelo $\alpha 150SiA$ de *Milacron-Fanuc® Roboshot®*, máquina moldeadora con la que se cuenta en la planta *Te Connectivity* Hermosillo Norte división Automotriz.



Figura 2-12 Máquina de moldeo por inyección de la planta Te Connectivity Hermosillo Norte división Automotriz

2.4. Tipos de moldes

El molde es probablemente el elemento más importante de una máquina de moldeo. Los moldes estandarizados están disponibles en diferentes tamaños, comercialmente los moldes van desde 75 x 75 hasta 796 x 996 milímetros y grosores de placa desde 10 a 196 mm; aunque el molde realiza varios propósitos, el principal es determinar la forma de la pieza moldeada; el molde recibe el material caliente en la cavidad, ventila el aire caliente y los gases atrapados durante el proceso, enfría la pieza hasta que esta, esté rígida y la expulsa sin dejar marcas o causar daños. El diseño y manufactura del molde, el número de cavidades, el material empleado en la construcción, el sistema de alimentación, el método de eyección, y el acabado final, determinaran la calidad de la pieza y el costo de fabricación que esta tendrá (Mennig & Stoeckhert, 2013); en la figura 2-13 se observan las dos mitades de un molde completo, por un lado la parte fija o *injection side* y por el otro, la parte móvil o *ejection side*.

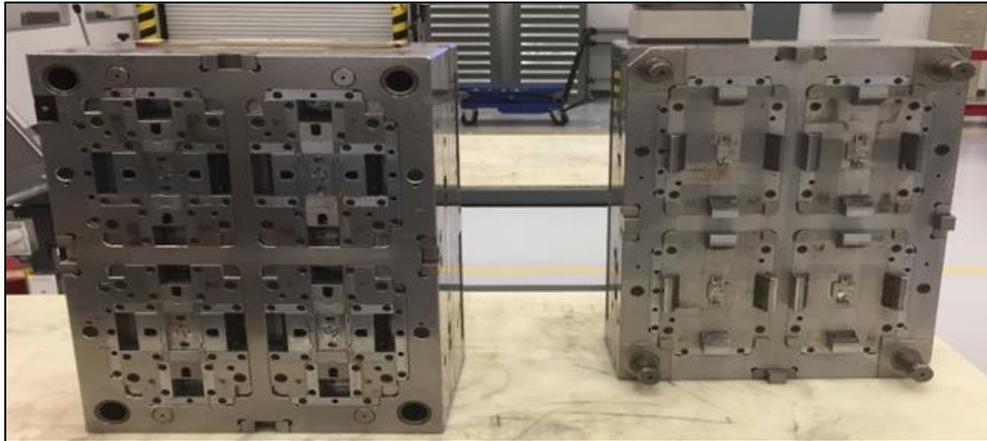


Figura 2-13 Componentes de un molde, parte derecha es lado fijo y parte izquierda lado móvil.

2.4.1. Molde de dos placas

Es el molde más común en el moldeo por inyección, es el más sencillo de diseñar, y controlar; se puede componer de una cavidad o varias cavidades (multifamiliar), y un lado central; es decir el bebedero, los canales, las compuertas, y las cavidades se encuentran de un mismo lado; está dividido por la línea de partición, que separa la parte móvil de la parte fija; contiene un sistema de expulsión para la parte moldeada. Este tipo de molde, tiene un sistema de alimentación de canales de colada fríos que, a diferencia del molde con canales de colada caliente, son de mayor diámetro; la razón de utilizar un diámetro mayor, es formar una película de material solidificado en la superficie interior del canal, que servirá como aislamiento al núcleo central del flujo del polímero, permitiendo que este permanezca fundido durante toda la inyección. Al igual que en el molde de canales de colada caliente, en caso de solidificación el molde se desmontará y se limpiará. Una vez que se vuelva a iniciar el proceso de moldeo se formará una nueva capa aislante en el interior de la superficie del canal de colada. Una consideración a destacar en el uso de este molde es que no es recomendable cuando el material a inyectar sean polímeros o pigmentos que tienen una baja estabilidad térmica o una viscosidad elevada, ya que una parte del flujo del material puede quedar en estado semi-fundido dentro del canal durante largos periodos de tiempo (Bayer Corporation, 2000). En la figura 2-14 se observa este tipo de molde.

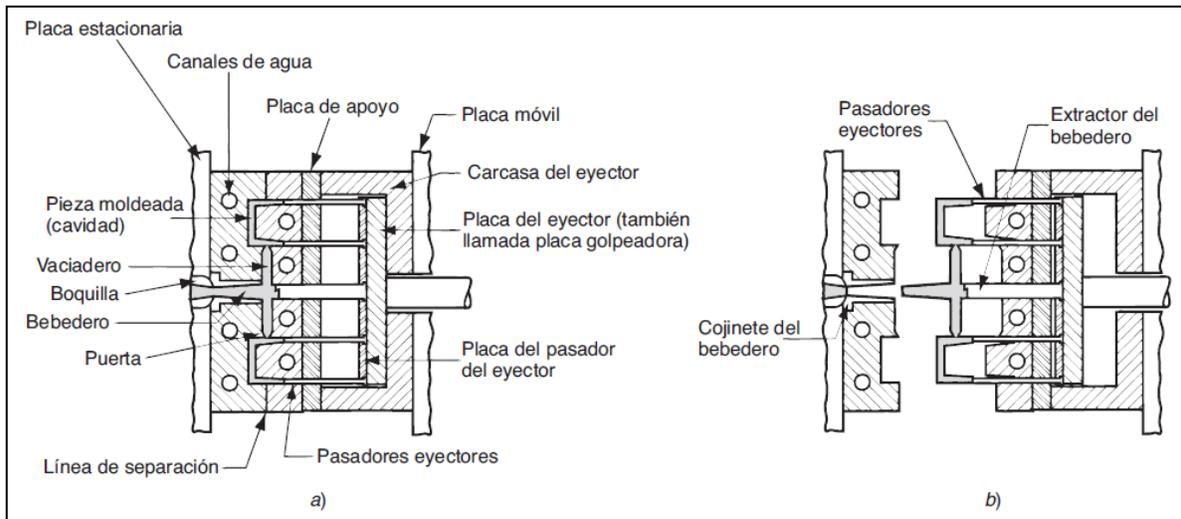


Figura 2-14 Molde de dos placas: a) cerrado y b) abierto, tomado de (Groover, 2007)

2.4.2. Molde de tres placas

Este tipo de molde se utiliza, cuando se requiere tener diferentes planos para la unión de placas del molde, y para el sistema de colada; existen las dos variantes en cuanto al sistema de alimentación, canales de colada fríos y canales de colada caliente, también conocidos como *runnerless*. En los moldes de tres placas con canales de colada fríos, la compuerta es separada automáticamente y el sistema de canales y bebederos son expulsados por separado, de la parte moldeada; ver figura 2-15. En los moldes de tres placas con canales de colada caliente, el sistema de canales y bebederos no son moldeados, por lo que solamente, la parte moldeada es expulsada, evitando así el desperdicio de polímero y mejorando la productividad; el molde de tres placas de canales de colada caliente, se usa en aplicaciones en las que no se debe triturar material; por eso los sistemas de canales de colada calientes tienen ligera ventaja en comparación con sistemas de canales de colada fríos. Sus desventajas son que, en caso de presentar un error y los canales se solidifiquen, se tendrá que desmontar para su limpieza, la cual es una actividad laboriosa; además, la fabricación del molde es más compleja y costosa, debido al diseño del sistema de resistencias que mantienen el material fundido dentro del plato (Beaumont, 2004). En la figura 2-16 se observa un molde de tres placas con sistema de canales de colada caliente.

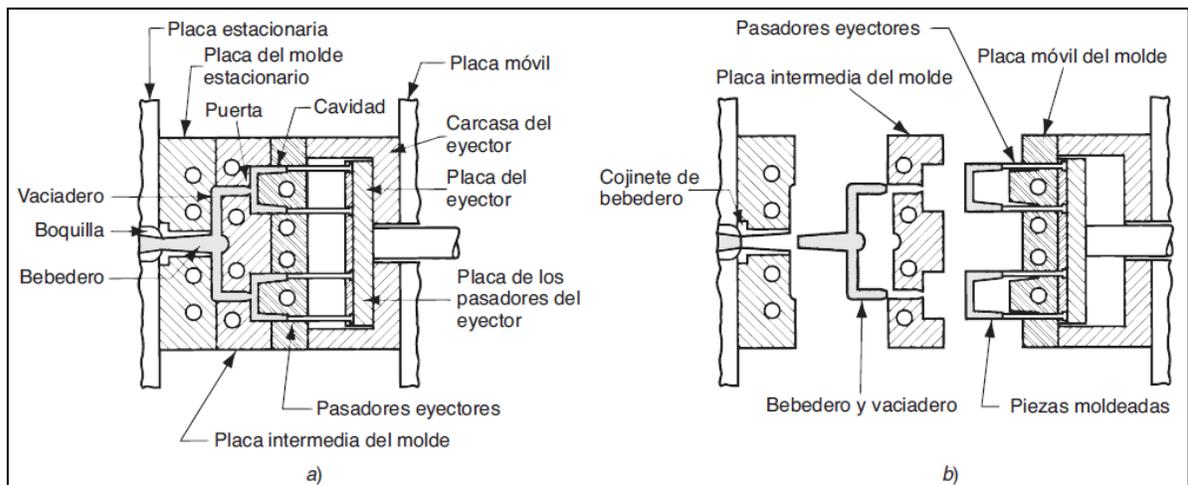


Figura 2-15 Molde de tres placas: a) cerrado y b) abierto, tomado de (Groover, 2007)

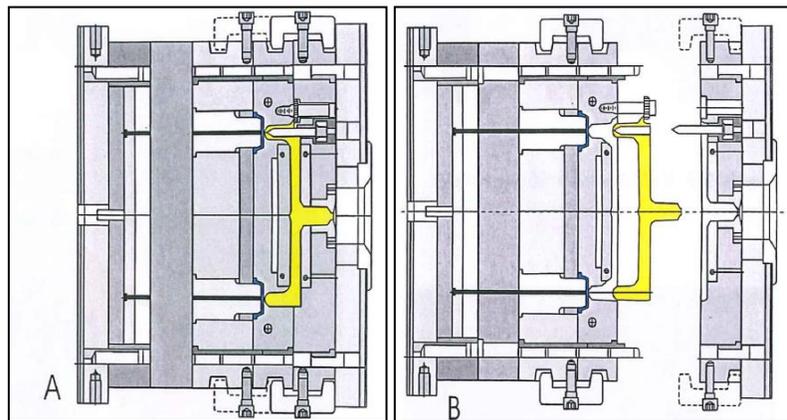


Figura 2-16 Sistema de canal caliente aislado a) cerrado y b) abierto, tomado de: (Beaumont, 2004)

2.5. Materiales para la construcción de los moldes

Debido a las condiciones severas a los que son sometidos y alta precisión en los acabados, en la construcción de moldes para inyección de plásticos, es recomendable utilizar aceros de cementación, aceros de nitruración, aceros templados, aceros pre-templados, materiales de colada, materiales no metálicos, y materiales cerámicos; por mencionar un ejemplo típico, se tiene el acero para herramientas *AISI P-20*, el cual, es un acero pre-templado de uso general con una dureza estándar aproximada entre los 30 y 34 *HRc* (Menges & Mohren, 1983). En la tabla 2.6, se observan diferentes tipos de acero y sus características principales, así como su nombre comercial; y en la tabla 2.7, se observan algunas recomendaciones especiales, para la selección de aceros

para moldes, según el uso y proceso de transformación del plástico, todos ellos, calidad *UDDEHOLM*.

Tabla 2.6 Acero para moldes calidad *UDDEHOLM* tomado de la fuente:
(<https://www.uddeholm.com/mexico/la/>)

Acero para moldes <i>IMPAX® SUPREME</i> (1.2738)	Acero pretemplado al Ni-Cr-Mo que se suministra a 290–330 Brinell, cuenta con excelentes propiedades de pulido y fotograbado. Adecuado para una amplia gama de moldes de inyección, soplado y extrusión.
<i>CALMAX GRANE</i>	Acero de temple al Cr-Mo-V que cuenta con buena combinación de tenacidad y resistencia al desgaste. Recomendado en moldes para largas series de fabricación y para moldeo de plásticos reforzados.
<i>STAVAX® ESR</i> (1.2083)	Acero inoxidable de temple para moldes con buena resistencia a la corrosión y muy buena pulibilidad.
<i>POLMAX™</i> (1.2083)	Acero inoxidable de temple para moldes con buena resistencia a la corrosión y pulibilidad extremadamente buena.
<i>CORRAX</i>	Acero de temple por precipitación que cuenta con una excepcional resistencia a la corrosión, fácil tratamiento térmico y buena capacidad de soldadura.
<i>ORVAR® SUPREME</i> (1.2344)	Acero de temple muy versátil al 5% de Cr para moldes y trabajo en caliente, con buena resistencia al desgaste y buena pulibilidad.
<i>RIGOR®</i> (1.2363)	Acero de temple recomendado para largas series de producción de piezas pequeñas con diseño complicado.
<i>ELMAX™</i> <i>VANADIS 4</i> <i>VANADIS 6</i> <i>VANADIS 10</i>	Aceros para moldes fabricados pulvimetalúrgicamente que se caracterizan por su buena estabilidad dimensional, buena pulibilidad y resistencia al desgaste. <i>ELMAX</i> es resistente a la corrosión, <i>VANADIS 4</i> cuenta con la más alta tenacidad y <i>VANADIS 10</i> tiene la mejor resistencia al desgaste. Recomendados para complicadas y/o plásticos abrasivos.
Acero para portamoldes y placas <i>HOLDAX®</i> (1.2312)	Acero pretemplado con muy buena mecanibilidad y alta resistencia a la tensión.
<i>RAMAX® S</i> (1.2085)	Acero pretemplado inoxidable para placas soporte con excelente mecanibilidad, alta resistencia a la tensión y buena resistencia a la corrosión.
Aluminio <i>ALUMEC</i>	Aleación de aluminio de alta resistencia suministrada a 160 HB. Recomendada para prototipos y series cortas de fabricación con bajos requisitos en resistencia y resistencia al desgaste.
Aleación de Cobre <i>MOLDMAX® HH</i> <i>MOLDMAX® XL</i>	Aleación de cobre de alta resistencia para moldes con alta conductividad térmica. Para aplicaciones como noyos, insertos, boquillas de inyección y piezas para sistemas de cámaras calientes.
Aleación de Cobre Berilio <i>PROTHERM®</i>	Aleación de cobre berilio de alta conductividad para moldes. Para aplicaciones donde se requiera muy alta conductividad térmica pero con demandas de resistencia moderada.

. Tabla 2.7 Recomendaciones de selección de aceros para moldes calidad UDDEHOLM tomado de la fuente: (<https://www.uddeholm.com/mexico/la/>)

Proceso/Material	Calidad	Dureza HRC (HB)	
Moldeado por inyección	Termoplásticos		
	– Acero pretemplado para moldes	ALUMEC IMPAX SUPREME	(~160) 33 (~310)
	– Acero de temple para moldes	CALMAX GRANE ORVAR SUPREME STAVAX ESR, POLMAX CORRAX ELMAX, VANADIS 4 VANADIS 6	45–58 45–56 45–54 45–54 34–48 58–60 60–64
	Plásticos termoestables	CALMAX GRANE RIGOR, ELMAX, VAN. 4 VANADIS 6	52–58 52–56 58–60 60–64
Compresión/ Moldeado por transferencia	Plásticos termoestables	CALMAX GRANE STAVAX ESR CORRAX ELMAX, VANADIS 4 VANADIS 6	56–58 54–56 45–54 46–48 58–60 60–64
Moldeado por soplado	General	ALUMEC IMPAX SUP.	(~160) 33 (~310)
	PVC	STAVAX ESR RAMAX S CORRAX	45–54 37 (~340) 33 (~310)
Extrusión	General	IMPAX SUPREME	33 (~310)
	PVC	STAVAX ESR RAMAX S CORRAX	45–54 37 (~340) 34–48
Portamoldes	1. Alta resistencia al desgaste, pretemplado, sin mecanizado	HOLDAX	33 (~310)
	2. Igual al punto 1 más resistencia a la corrosión para series de producción con escaso mantenimiento. También para operaciones en condiciones «higiénicas». No se requiere recubrimiento.	RAMAX S	37 (~340)

2.6. Estructura básica de un molde

Los moldes básicos de inyección están hechos de dos mitades: la mitad fija y la mitad móvil (eyección), separados por la línea de partición como se muestra en la figura 2-17. Por lo general un molde básico puede contener un sistema de guías o columnas que sirve para un perfecto acoplamiento entre la parte móvil y la parte fija, evitando así, un movimiento de una parte respecto a la otra al recibir la presión del plástico fundido; el número de guías, varía según el tamaño del molde, normalmente

suelen ser cuatro para tamaños pequeños o medianos. En la figura 2-18 se visualizan las guías o columnas de un molde básico de inyección (Mennig & Stoeckert, 2013).

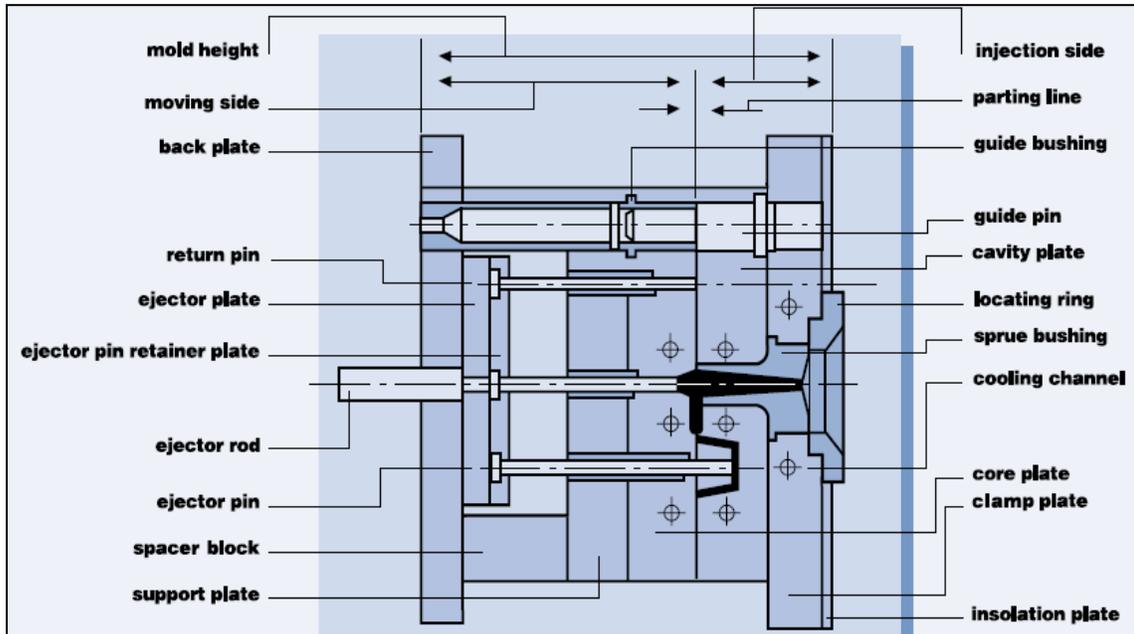


Figura 2-17 Molde estándar básico tomado de (DSM Engineering Plastics, 2000)

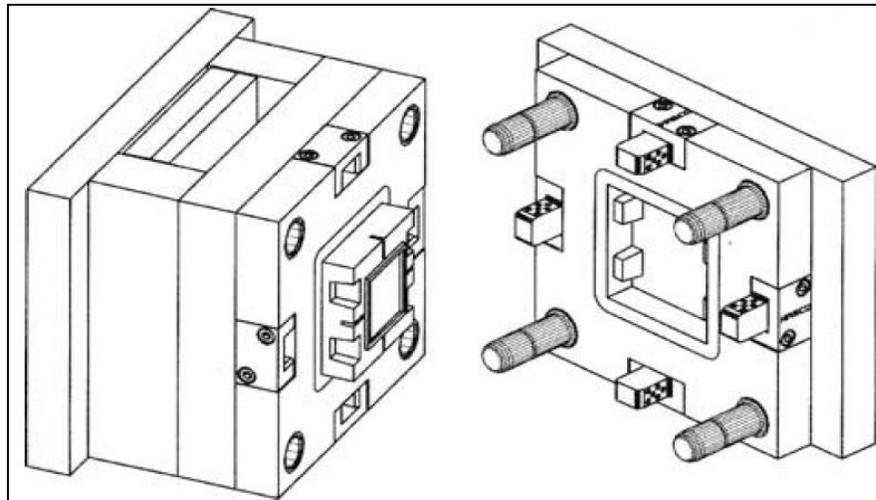


Figura 2-18 Molde básico con guías o columnas, tomado de: (Mennig & Stoeckert, 2013)

2.7. Comportamiento reológico de los polímeros

La reología es la ciencia de la deformación y el flujo de la materia; el comportamiento reológico de los polímeros, se refiere al proceso de las resinas termoplásticas y termoestables, cuando experimentan flujo en estado fundido, durante su uso en la

fabricación de un producto. Los procesos de fabricación, como la inyección, la extrusión y el calandrado, implican el flujo de polímeros fundidos. En la fabricación de plásticos, es importante comprender el efecto de la viscosidad de la masa fundida, de factores como la temperatura, la presión, la velocidad de corte, el peso molecular y la estructura. También es igualmente importante contar con medios confiables para medir las propiedades viscosas de los materiales. El comportamiento del flujo de las masas fundidas poliméricas no puede considerarse de carácter puramente viscoso, la respuesta de tales materiales es más compleja, involucra características que son tanto viscosas como elásticas. Durante el flujo, las moléculas de polímero no solo se deslizan unas sobre otras, sino que también tienden a desenrollarse, o al menos se deforman a causa de su configuración de equilibrio, enrollada al azar. Al liberarse de los esfuerzos de deformación, estas moléculas tienden a revertirse a formas enrolladas al azar (Chanda & Roy, 2007).

Dentro del estudio de los fluidos, Isaac Newton formuló una hipótesis asociada al estado simple de cizalladura (o corte): “La resistencia derivada de la falta de deslizamiento de las capas de un líquido es proporcional a la velocidad con que se separan unas de otras dentro de él”. Esta necesidad de deslizamiento es lo que ahora se denomina “viscosidad”, sinónimo de fricción interna; dicha viscosidad es una medida de la resistencia a fluir. La fuerza por unidad de área que se requiere para el movimiento de un fluido se define como F/A y se denota como τ (tensión o esfuerzo de cizalla). Según Newton la tensión de cizalla o esfuerzo cortante es proporcional al gradiente de velocidad $\delta v/\delta y$, si se duplica la fuerza, se duplica el gradiente de velocidad. Cuando dos capas de un fluido se mueven una en relación con la otra, se desarrolla una fuerza de fricción entre ellas y la capa más lenta trata de desacelerar a la más rápida. Esta resistencia interna al flujo se cuantifica mediante la propiedad, viscosidad del fluido, la cual es una medida de la adherencia interna de éste. La viscosidad es causada por las fuerzas de cohesión entre las moléculas, en los líquidos, y por las colisiones moleculares en los gases. No existe fluido con viscosidad cero y, en consecuencia, en todos los flujos de fluidos intervienen los efectos viscosos en

cierto grado. Los flujos en donde los efectos de la fricción son significativos se llaman flujos viscosos (Cengel & Cimbala, 2012).

2.7.1. Flujo laminar y flujo turbulento

Debido a la alta viscosidad de los polímeros comerciales, generalmente el flujo en el proceso de inyección, es laminar; inclusive cuando el polímero fundido pasa por una restricción como una compuerta; rara vez en el proceso ocurre un flujo turbulento, pero dicha turbulencia se puede calcular con el número de Reynolds Re , ver ecuación (1); si $Re > 2300$, entonces el flujo se considera turbulento. En los polímeros el número de Reynolds está por debajo de 10 y este depende solo de la forma del canal de flujo (Beaumont, 2004).

$$Re = \frac{\text{velocidad} \times \text{diámetro}}{\text{viscosidad cinemática}} \dots \dots \dots \text{ecuación (1)}$$

Donde:

$$\text{velocidad} = \frac{\text{flujo volumétrico}}{\text{área de sección}} \dots \dots \dots \text{ecuación (2)}$$

$$\text{viscosidad cinemática} = \frac{\text{viscosidad dinámica}}{\text{densidad de fusión}} \dots \dots \dots \text{ecuación (3)}$$

2.7.2. Frente de flujo *Fountain flow*

Independientemente del tipo de canal de alimentación o *runners*, en un flujo laminar de un polímero fundido, que se desplaza por un orificio, se tiene en el frente de flujo un comportamiento como fuente, es decir, una velocidad máxima en el centro de la lámina, que va hacia el exterior disminuyendo progresivamente; debido a esto, se forma una parábola hacia los extremos (Beaumont, 2004); ver figura 2-19.

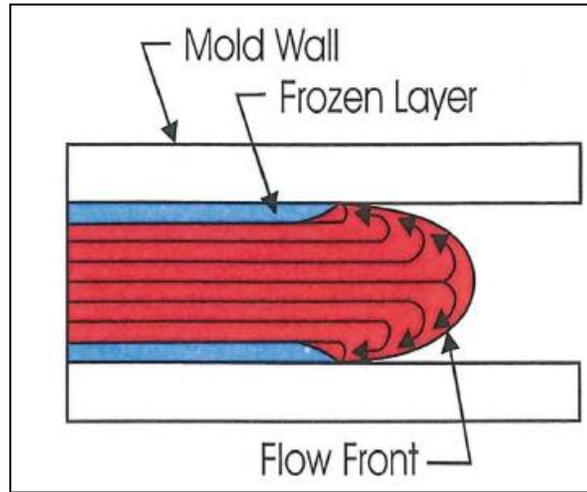


Figura 2-19 Frente de flujo, tomado de (Beaumont, 2004)

2.7.3. Tasa de Cizallamiento

“*shear rate*” o tasa de cizallamiento, es la velocidad a la que se aplica una deformación de corte progresiva a algún material; en la tabla 2.8 se muestra para algunos polímeros comunes dicha tasa. La velocidad de corte para un fluido que fluye entre dos placas paralelas, una que se mueve a una velocidad constante y la otra estacionaria se define por la ecuación (4); la velocidad de corte para un fluido que fluye a través de una compuerta circular, se define por la ecuación (5) y la velocidad de corte para un fluido que fluye a través de una compuerta rectangular, se define por la ecuación (6); (Beaumont, 2004):

$$\text{shear rate} = \gamma \frac{v}{h} = \frac{x}{h} \frac{dx}{dt} \dots \dots \dots \text{ecuación (4)}$$

$$\text{shear rate} = \frac{4Q}{\pi r^3} \text{ para compuertas redondas } \dots \dots \text{ecuación (5)}$$

$$\text{shear rate} = \frac{6Q}{wt^2} \text{ para compuertas rectangulares } \dots \dots \text{ecuación (6)}$$

Dónde:

γ . es la tasa de corte, medida en segundos recíprocos

v . es la velocidad de la placa móvil o velocidad de flujo

h . es la distancia entre las dos placas paralelas o diámetro de canal

t . es tiempo, en segundos

x . es longitud del canal de flujo

Q . flujo volumétrico (pulg³/segundo)

r . radio de compuerta circular (pulgada)

t. espesor de compuerta (pulgada)
w. ancho de la compuerta (pulgada)

Tabla 2.8 Tasa de cizallamiento para algunos polímeros, tomado de: (Bayer Corporation, 2000)

Polymer Family	Shear Rate 1/s
Makrolon	40,000
Apec	40,000
Bayblend	40,000
Makroblend	40,000
Triax (PA/ABS)	50,000
Lustran ABS	40,000
Lustran SAN	40,000
Cadon	15,000
Centrex	40,000
Durethan	60,000
Durethan (reinf.)	40,000
Texin TPU	20,000
Texin PC/TPU	10,000
Desmopan	20,000

Note: Use 1/2 these values for flame-retardant grades and for critical transparent or cosmetic applications.

2.7.4. Ley de la viscosidad de Newton

En condiciones ideales se dice que un fluido es *Newtoniano* cuando a una temperatura constante, la tensión de corte es lineal y directamente proporcional a la velocidad de corte, ver ecuación (7); en la práctica, el comportamiento *Newtoniano* se limita a fluidos de bajo peso molecular. Los polímeros fundidos, obedecen la ley de Newton solo a velocidades de corte cercanas a cero, el comportamiento reológico se define mediante la ecuación (8), pero la ecuación es poco realista, por lo que se considera una variable principal a la vez, asumiendo que los demás permanecen constantes (Chanda & Roy, 2007).

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \dots \dots \dots \text{ecuación (7)}$$

Dónde:

γ . es la tasa de corte, medida en segundos recíprocos.

τ . esfuerzo cortante.

μ . coeficiente de viscosidad, o fricción interna del fluido.

$$\mu = f(\gamma, T, t, P, c, \dots) \dots \dots \dots \text{ecuación (8)}$$

Dónde:

γ . es la tasa de corte, en función del esfuerzo cortante

T . temperatura

t . tiempo

P . presión, en función del volumen

c . concentración, en función de peso molecular, distribución molecular

μ . coeficiente de viscosidad, o fricción interna del fluido

f . constante

2.7.5. Modelos de viscosidad comunes

Una descripción matemática, que relacione la tasa de cizallamiento y la viscosidad, es necesaria para desarrollar la simulación del proceso de inyección, a través del software CAD/CAE en el llenado de la cavidad; los modelos matemáticos más utilizados son: la ley de poder, ver ecuación (9), y la de cruzamiento modificado, ecuaciones (10) y (11). Una representación gráfica del modelo de viscosidad, ley de poder para diferentes tipos de fluidos, se observa en la figura 2-20; y una representación gráfica para un polímero en particular del modelo de viscosidad de cruzamiento modificado, se observa en la figura 2-21 (Chanda & Roy, 2007).

$$\mu = m\gamma^{n-1} \dots \dots \dots \text{ecuación (9)}$$

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + \left(\frac{\mu_0\gamma}{\tau}\right)^{1-n}} \dots \dots \dots \text{ecuación (10)}$$

$$\mu_0 = D_1 e^{\left[\frac{-A(T-T^*)}{-A+(T-T^*)}\right]} \dots \dots \dots \text{ecuación (11)}$$

Dónde:

γ . es la tasa de corte

m . constante (índice de consistencia)

n . índice de la ley de poder

μ , coeficiente de viscosidad, o fricción interna del fluido

γ . es la tasa de corte

τ . desconocido

T^* . $D_2 + D_3P$
 T . temperatura
 A_1, A_2 . desconocidos
 D_1, D_2, D_3 . desconocidos
 μ_0 . desconocido
 μ . coeficiente de viscosidad, o fricción interna del fluido.

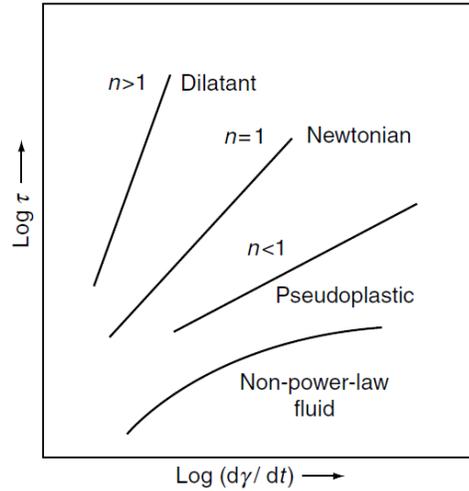


Figura 2-20 presentación gráfica de la ley de poder tomado de (Chanda & Roy, 2007)

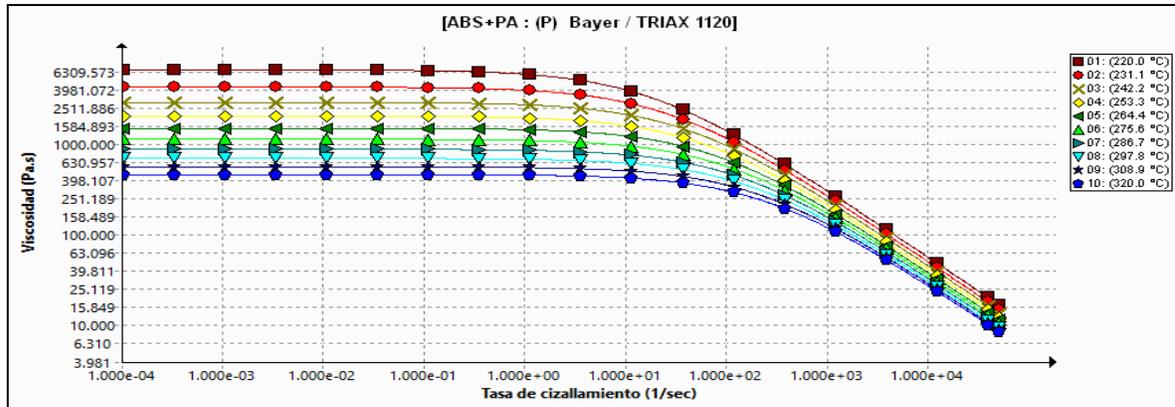


Figura 2-21 Representación gráfica del modelo de viscosidad de cruzamiento modificado para el ABS+PA Bayer® Triax 1120 tomado de: Solidworks Plastics Premium Edition®

2.8 Simulación para la fabricación de moldes de inyección

La simulación del proceso de moldeo por inyección, se ha generalizado cada vez más, en los diseños de componentes plásticos y en la fabricación de moldes de inyección. El cálculo de los parámetros óptimos del proceso del flujo, a partir de un modelo matemático en base a la viscosidad, y sus propiedades resultantes, generalmente se le denomina “diseño reológico” (Mennig & Stoeckert, 2013). Este

diseño apoyado con ingeniería asistida por computadora, y análisis de elementos finitos, puede determinar varios parámetros del proceso, como son: patrón de llenado, presión de llenado, tasa de corte, esfuerzo cortante, temperaturas en diferentes tiempos del proceso; y de los resultados obtenidos, se derivan indicadores de calidad para el producto moldeado, como son: contracción, comportamiento de alabeo, fuerza de cierre, orientaciones, trampas de aire, líneas de soldadura y distorsiones. Al realizar simulación con anterioridad, se puede asegurar la calidad excluyendo ciertos errores que podrían presentarse en el proceso real; además, si se realizan diseños experimentales con los resultados obtenidos a partir de la simulación, se podría diseñar un molde óptimo, al usar la mejor configuración de las variables involucradas “mejores niveles” (Berti & Monti, 2013).

En la figura 2-22 se especifican tres fases para el diseño de moldes de inyección: en la primera, el principio básico de identificación tiene que ser determinado, es decir, seleccionar el tipo de molde, el material, las características específicas que necesita, el tipo de máquina de moldeo, los tiempos, los costos, la cantidad de productos moldeados. La segunda fase consiste en el dimensionamiento, para esto se analiza el diseño mecánico, el diseño térmico y el diseño reológico, los tres diseños deben analizarse con extrema precaución; para todo el dimensionamiento, los métodos numéricos, y las simulaciones por análisis de elemento finito son indispensables. La última fase consiste en el diseño virtual, el prototipo, la construcción física, y las pruebas de validación, todo esto, se implementan en planos detallados. Las computadoras que son particularmente necesarias para el análisis e ingeniería; y los *softwares* de diseño mediante los cuales se pueden procesar todas las superficies de forma libre, han llevado a la industria de la fabricación de moldes, a convertir el diseño y la fabricación en tareas especializadas (Mennig & Stoeckhert, 2013).

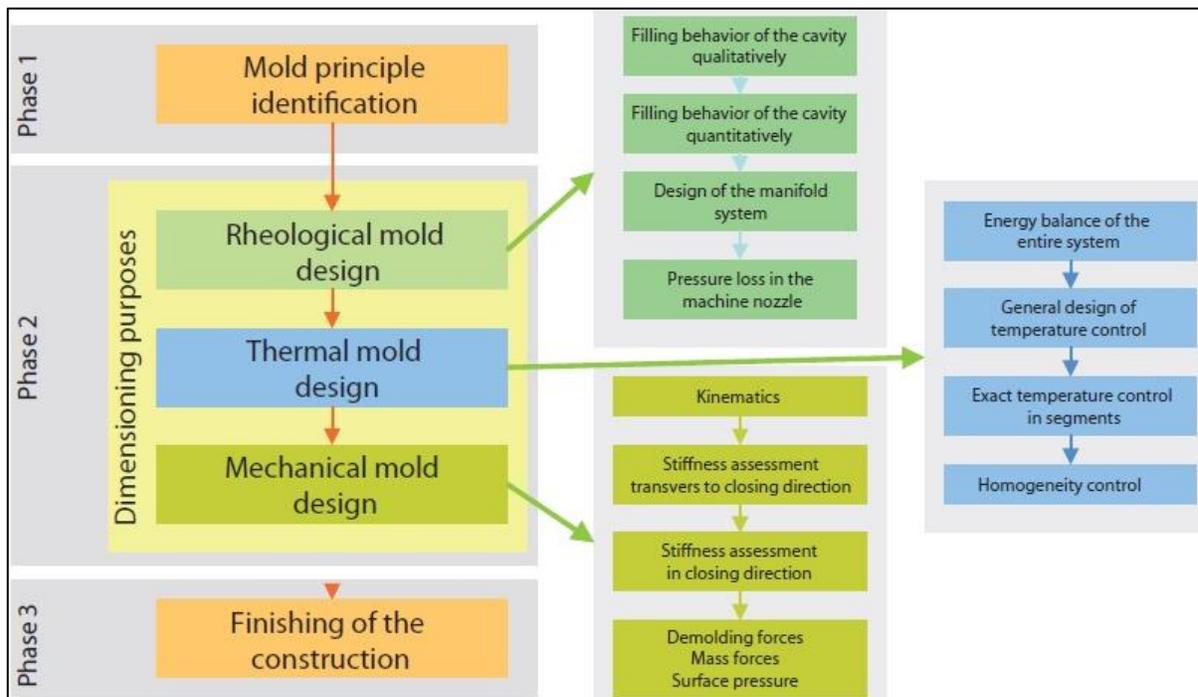


Figura 2-22 Fases y tareas para el diseño de un molde de inyección tomado de (Mennig & Stoeckert, 2013).

2.9 Generalidades de los productos moldeados

En el diseño de productos plásticos hay que tener en cuenta algunos elementos comunes, y que son importantes en su gran mayoría, estos son: costillas, grosor de pared, adelgazamientos, etc. Las paredes excesivamente delgadas pueden desarrollar altos esfuerzos, rechupes, problemas cosméticos, y problemas de llenado. Por el contrario, las paredes excesivamente gruesas pueden extender los tiempos de ciclo y crear problemas en el empaquetamiento. Se debe mantener la pared nominal uniforme y evitar las variaciones de espesor de la pared, que dan como resultado trampas de aire. Para evitar posibles problemas de alabeo y contracción, el límite del espesor no debe ser mayor del 25% de la pared nominal para materiales de baja contracción (amorfos); y del 15% para resinas cristalinas (Bayer Corporation, 2000). En la figura 2-23 se observa el correcto espesor de pared en una cavidad.

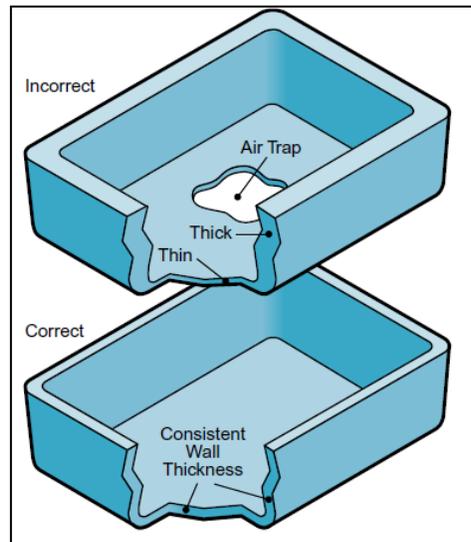


Figura 2-23 Espesor de cavidad tomado de (Bayer Corporation, 2000).

El uso de costillas permite proporcionar alineación en las partes de acoplamiento y actuar como guías para los mecanismos. El diseño adecuado de las costillas implica cinco puntos principales a considerar: grosor, altura, ubicación, cantidad y moldeabilidad; las costillas generalmente se proyectan desde la pared principal en la dirección de apertura del molde. Para facilitar la expulsión de la pieza del molde, las costillas generalmente requieren al menos medio grado de tiro por lado; más de un grado, puede llevar a una excesiva reducción del grosor de las costillas, y obtener así, problemas de llenado (Bayer Corporation, 2000). En la figura 2-24, se observa el ángulo recomendado para el diseño de costillas.

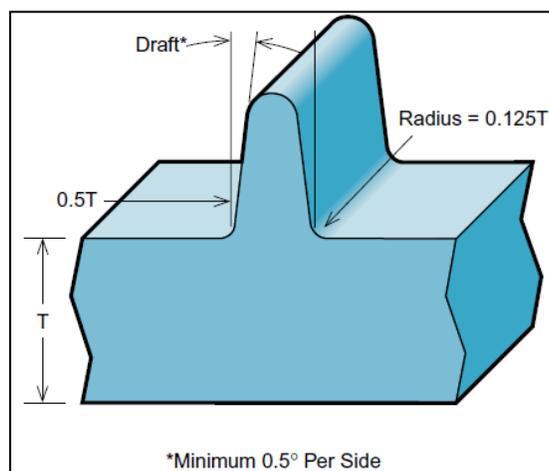


Figura 2-24 Ángulo recomendado en diseño de costilla tomado de (Bayer Corporation, 2000).

2.10. Recomendaciones para el diseño de moldes

El diseño del molde es crítico para la calidad y la economía de la pieza moldeada; la apariencia, resistencia, tenacidad, tamaño, forma y costo de las piezas dependen de la calidad del molde. Las consideraciones clave, para el diseño de moldes para resinas termoplásticas son: diseño adecuado para soportar la alta presión involucrada, materiales de construcción correctos, rutas de flujo balanceadas, ventilación adecuada del aire, transferencia de calor cuidadosamente diseñada para controlar el enfriamiento y la solidificación, expulsión fácil y uniforme de las piezas. El tiempo de ciclo puede estar limitado por las capacidades de transferencia de calor del molde, excepto cuando el ciclo de secado de la máquina o las capacidades de plastificación son limitadas (Dupont Corporation, 2000). Las resinas termoplásticas comerciales de mayor uso son de las marcas *Dupont®* y *Bayer®*.

2.10.1. Sistema de venteos o escape de aire

A medida que el plástico fundido entra en el molde, desplaza al aire rápidamente; una opción brillante, es diseñar los respiraderos a lo largo de la línea de separación del molde o línea de partición, ya que allí, son fáciles de maquinar; si estas rejillas de ventilación se colocan alejadas de la entrada del material, proporcionan un camino directo, seguro y rápido al escape del aire a la atmosfera. Para evitar que el material fluya hacia el respiradero durante el llenado, la primera sección de longitud del respiradero debe ser entre 0.150 a 0.300 pulgadas, y la profundidad de esta sección, por lo general menos de 0.0020 pulgadas, pero para resinas amorfas menos de 0.0015 pulgadas. La cantidad de ventilación necesaria aumenta con el volumen de la pieza y velocidad de llenado. Los canales de ventilación después de esta primera sección deben ser mayores o iguales a 0.040 pulgadas. Los respiraderos deben colocarse en varios lugares a lo largo del sistema de alimentación y del perímetro de la parte moldeada, en especial las áreas que están ubicadas en la línea de separación y se encuentran más alejadas de la compuerta. Las profundidades típicas de venteo para resinas amorfas comerciales como: *makrolon*, *apec*, *bayblend*, *makroblend*, *texin*, *desmopan*, *cadon*, *lustran*, y *centrex* lo recomendable es de 0.0010 a 0.0020 pulgadas.

Las profundidades típicas de venteo para resinas semicristalinas comerciales como: *durethan*, *triax* y *pocan*, lo recomendable es de 0.0005 a 0.0015 pulgadas (Bayer Corporation, 2000). En la figura 2-25, se observan profundidades recomendadas para resinas comerciales Bayer®. En la figura 2-26 se observa la localización de venteos y escapes de gas alrededor del producto.

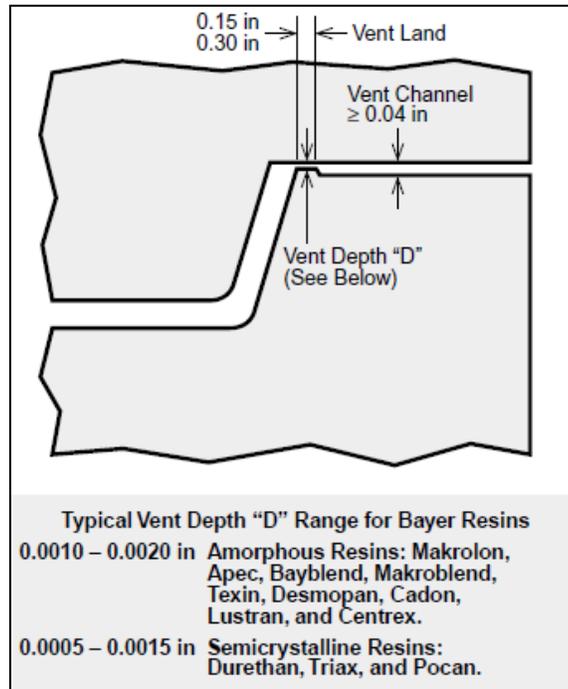


Figura 2-25 Rango de profundidades recomendadas para resinas Bayer®, tanto amorfas como semicristalinas, tomado de (Bayer Corporation, 2000).

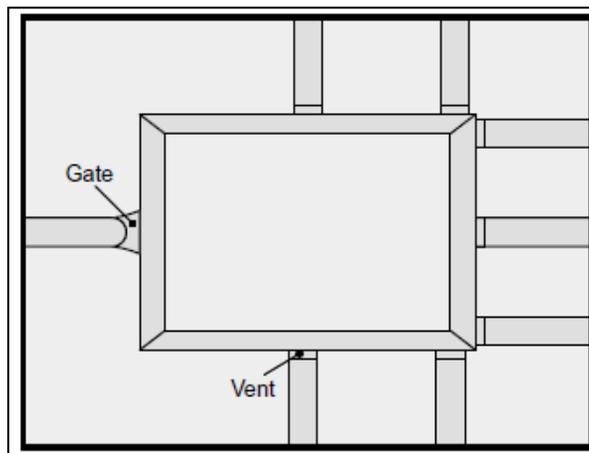


Figura 2-26 Localización de venteos alrededor del producto y alejado de la compuerta de alimentación, tomado de (Bayer Corporation, 2000).

2.10.2. Diseño de bebedero *sprue bushing*

El *sprue bushing* transporta la masa fundida desde la punta de la boquilla de la máquina, hasta la línea de separación del molde, al material moldeado del *sprue bushing* se le conoce como bebedero, y este se conecta al sistema de alimentación *runners*. El *sprue bushing* se diseña con un rebaje esférico (generalmente un radio de 0.5 o 0.75 pulgadas) para recibir y sellar contra la punta redondeada de la boquilla de la máquina de inyección. El diámetro del canal del *sprue bushing* se estrecha más hacia la línea de separación a una razón de 0.5 pulgadas por pie; esto facilita la eliminación de la boquilla moldeada (bebedero). El tamaño del diámetro del orificio del bebedero en el extremo pequeño, de manera estándar debe diseñarse a $1/32$ y de $5/32$ a $11/32$ pulgadas (Bayer Corporation, 2000). En la figura 2-27 se visualiza dicho dimensionamiento.

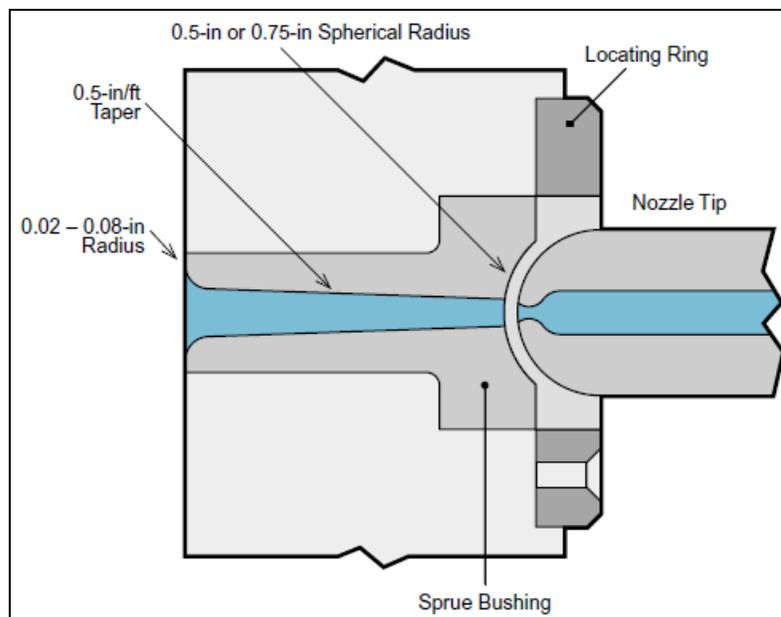


Figura 2-27 Dimensionamiento del *sprue bushing* y el bebedero, tomado de (Bayer Corporation, 2000).

2.10.3. Sistema de Alimentación *runners*

Los *runners* transportan material a través de ellos desde el bebedero hasta la cavidad; el diseño del *runner* influye en la calidad de las piezas y en la eficiencia del moldeo. Los *runners* demasiado gruesos pueden alargar innecesariamente el tiempo

de ciclo, de lo contrario, los *runners* delgados pueden causar presiones de llenado excesivas. El mejor diseño es el de la geometría circular usando los dos lados del molde, una buena alternativa sería el trapezoidal, con la ventaja de solo maquinarse en una mitad del molde, ver figura 2-28. El sistema de alimentación debe de estar balanceado, es decir que todas las cavidades se llenen al mismo tiempo, para lograr esto, se hace uso de un análisis computacional (Bayer Corporation, 2000). En la figura 2-29 se observa un sistema balanceado radialmente.

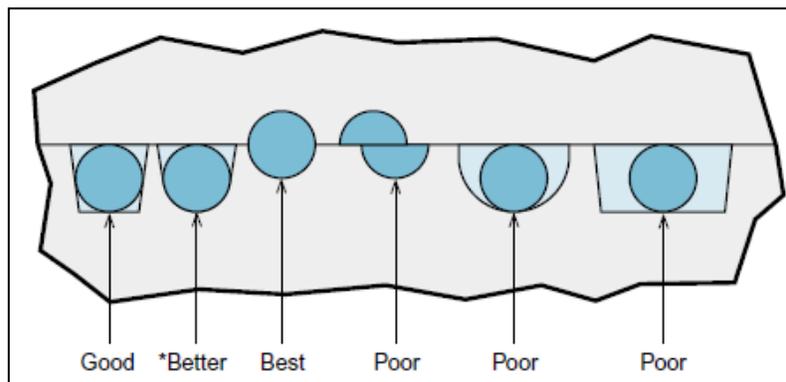


Figura 2-28 Figuras geométricas del diseño de "runners" en línea de partición, tomado de (Bayer Corporation, 2000).

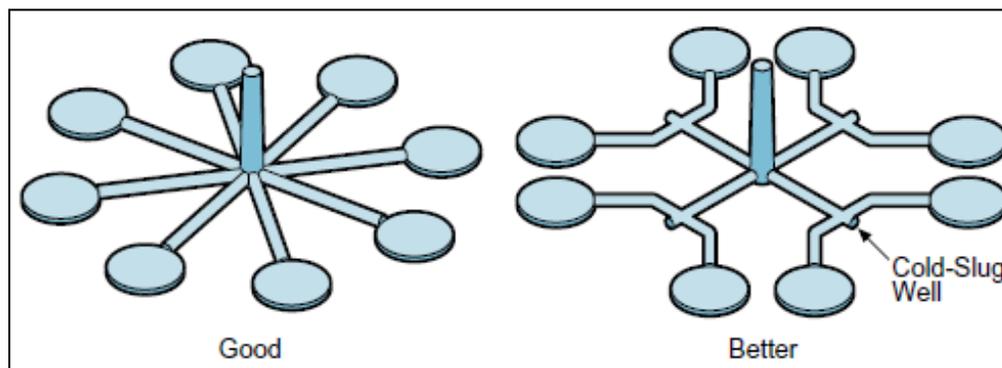


Figura 2-29 Sistema de alimentación balanceado radialmente, tomado de (Bayer Corporation, 2000).

2.10.4. Diseño de compuertas *gate*

Las compuertas, las cuales requieren que el grosor sea menor que el *runner* y la pared parcial, realizan dos funciones principales: primero, se congelan y evitan que el material presurizado en la cavidad, retroceda después de las fases de empaquetamiento y sostenimiento; en segundo lugar, las compuertas proporcionan un

área de espesor reducido, para facilitar la separación de la parte moldeada del sistema de alimentación. La de borde común, la de cincel y la de ventilador, son los diseños más comunes; en la figura 2-30, se observan las distintas dimensiones en la línea de separación de dichas compuertas (Bayer Corporation, 2000).

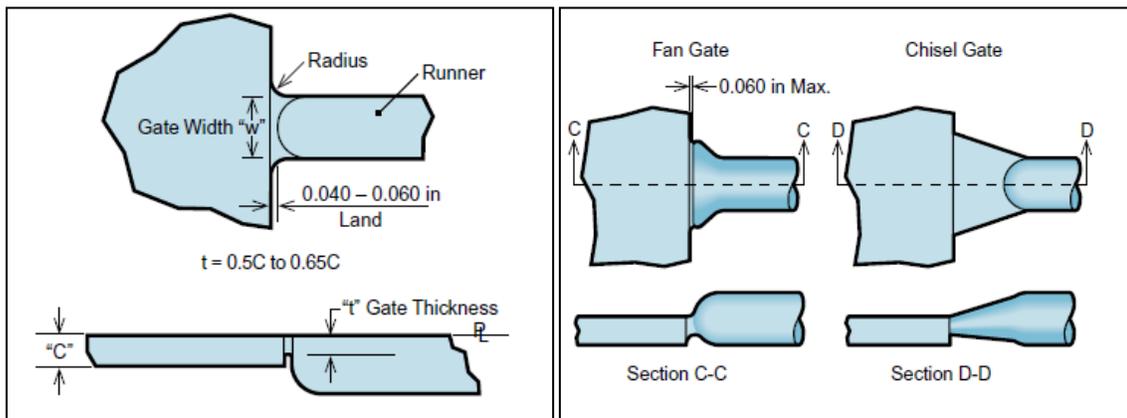


Figura 2-30 Diferentes diseños de compuertas, tomado de (Bayer Corporation, 2000).

2.10.5. Sistema de enfriamiento

El buen diseño del sistema de enfriamiento, mantiene la temperatura del molde requerida, proporciona un enfriamiento uniforme y logra ciclos cortos de moldeo; la temperatura de la pared del molde puede afectar el aspecto de la superficie de las partes moldeadas. El enfriamiento incorrecto puede provocar niveles elevados de esfuerzos térmicos y de contracción, que resultan de las variaciones de la velocidad de enfriamiento en toda la pieza. Las diferencias en la velocidad de enfriamiento, hacen que las áreas se contraigan, y se solidifiquen a diferentes velocidades y en diferentes cantidades. En partes hechas de resinas semicristalinas como PA6 o PBT, la velocidad de enfriamiento afecta el grado de cristalización y contracción. A través de ingeniería asistida por computadora, se puede diseñar un óptimo sistema de enfriamiento; para lograr esto, se recomienda colocar el sistema de enfriamiento a una distancia de la línea de partición de $2.5D$, ver figura 2-31 (Bayer Corporation, 2000). El enfriamiento es la fase del ciclo que dura mayor tiempo, independientemente del número de cavidades de un molde, esta fase oscila entre el 60 y 65% del consumo energético total (Matarrese et al., 2017).

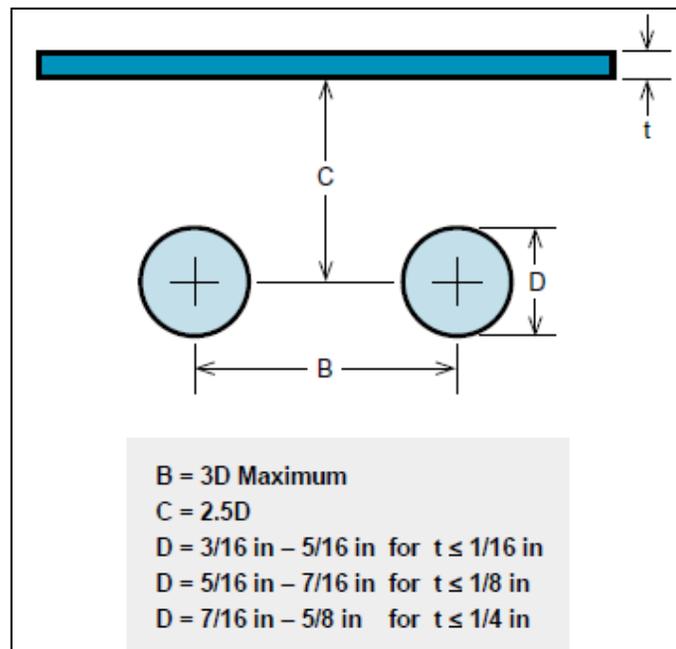


Figura 2-31 Dimensiones recomendadas para líneas de enfriamiento, tomado de: (Bayer Corporation, 2000).

2.11. Procesos de fabricación

Se le conoce como procesos de fabricación convencionales aquellos que se realizan con máquinas y herramientas manuales, es decir no automatizadas y sin control numérico computarizado. Al proceso de fabricación que usa la tecnología control numérico computarizado *CNC* se les denomina no convencional. A los procesos de fabricación ya sean, convencionales o no convencionales, que realicen desbaste por arranque de viruta, se le denominan procesos de fabricación tradicional, ejemplos de ellos son, el torneado y el fresado. A los procesos de fabricación que realicen maquinado por abrasión para la remoción del material, se les denomina como proceso de fabricación no tradicional, y generalmente son procesos controlados con equipos con control numérico computarizado, ejemplos de ellos son, el maquinado por descarga eléctrica *EDM*, corte por chorro de agua *waterjet* y corte por plasma. Para poder fabricar todos los elementos de un molde de inyección de plásticos se utilizan tanto procesos tradicionales como no tradicionales, siendo este último el de mayor uso debido a los materiales tan duros de los que se componen el molde (Chattopadhyay & Paul, 2005).

El maquinado tradicional se basa principalmente en la remoción del material usando herramientas más duras que los materiales a maquinar, pero debido a las propiedades químicas, mecánicas y térmicas de algunos materiales a veces es imposible maquinaslos utilizando procesos tradicionales. Los procesos no tradicionales son usados en materiales duros como cerámicos, materiales compuestos y algunos aceros tratados térmicamente. También en aquellos componentes que se debe evitar un daño superficial resultado de las tensiones creadas por el maquinado tradicional; ejemplo, la industria aeroespacial, electrónica, los moldes y los troqueles se clasifican bajo el dominio de los procesos de fabricación por maquinados no tradicionales (Groover, 2007).

El Maquinado de descarga eléctrica *EDM* es un proceso de fabricación no tradicional electro-térmico, donde la energía eléctrica se utiliza para generar chispas eléctricas y la eliminación de material se produce principalmente debido a la energía térmica de la chispa. Es un proceso en el cual se extrae metal, mediante una serie de descargas eléctricas recurrentes, entre una herramienta de corte que actúa como electrodo y una pieza conductora, en presencia de un fluido dieléctrico. La electroerosión por *ram-EDM*, también conocido como *sinker-EDM* arranca partículas de la pieza hasta conseguir reproducir en ella las formas del electrodo. Ambos, pieza y electrodo, deben ser conductores para que pueda establecerse, el arco eléctrico que provoque la remoción del material. La electroerosión por *wire-EDM* permite hacer perfiles muy precisos, debido a que un hilo o alambre muy delgado, generalmente de latón, realiza el perfilado o contorneado de la pieza; el hilo se enrolla en un sistema de carretes que solamente permite usarse una sola vez. En la mayoría de las maquinas el hilo permite rotar hasta 45°, desde la mesa base, hasta la posición del carrete superior, permitiendo así, piezas de mucha complejidad. La descarga eléctrica se produce en un hueco *gap* de voltaje entre el electrodo y la pieza. Nunca tiene contacto el electrodo o el hilo con la pieza. El calor de la descarga, vaporiza partículas diminutas del material de la pieza y del electrodo, que seguidamente se eliminan del hueco por el dieléctrico que fluye continuamente (Jameson, 1983).

El diseño de experimentos *DOE* por sus siglas en inglés, es una técnica de garantía de calidad fuera de línea, que se utiliza para lograr el mejor rendimiento, desempeño de productos y procesos. El diseño de experimentos *DOE* es un proceso formal estructurado, para estudiar cualquier situación que involucre una respuesta, que varía en función de una o más variables independientes. El *DOE* está diseñado específicamente para abordar problemas complejos donde más de una variable puede afectar una respuesta y dos o más variables pueden interactuar entre sí. Desafortunadamente, el *DOE* estudia el efecto de una variable a la vez (Mathews, 2005). El diseño robusto es una metodología utilizada para diseñar productos y procesos tales que su rendimiento es insensible a los factores de ruido (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

2.12 . Conceptos de estadística

Si cada objeto en la población tiene la misma oportunidad de ser seleccionado, se le llama una muestra aleatoria; esta definición es aplicable para la población infinita y finita. Una muestra aleatoria de tamaño n si se selecciona se distribuirá de manera independiente e idéntica. Los parámetros de población para la media y la desviación estándar se indican con μ y σ respectivamente; el valor del parámetro de población es siempre constante; es decir, para cualquier conjunto de datos de población, hay un solo valor μ y de σ . Una distribución normal, es una distribución de variables aleatorias continuas que describen el comportamiento de distintas variables y la forma de la curva de distribución tiene forma de campana. La distribución F , se define por dos números de grados de libertad, los grados de libertad del numerador y los grados de libertad del denominador; la distribución está sesgada hacia la derecha y disminuye con el aumento de los grados de libertad; este estadístico de prueba, se utiliza para probar la hipótesis en el análisis de varianza. El análisis de varianza *ANOVA*, es un método de división de la variación total, dentro de la variación de las entradas contables responsables en un experimento, es decir, es un método estadístico utilizado para interpretar datos experimentados y tomar decisiones sobre los parámetros de estudio, ver tabla 2.9. El valor F se calcula dividiendo la varianza del factor/el cuadrado medio,

con la varianza del error/el cuadrado medio; sin embargo, en el caso de diseños multifactoriales con efectos aleatorios o modelo de efectos mixtos, el denominador para calcular el valor F se determina calculando los cuadrados medios esperados (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

El valor P , es definido como el valor más pequeño del nivel de significancia α en el cual la hipótesis nula fijada es rechazada; para una prueba de una cola, el valor P viene dado por el área en la cola de la curva de distribución de muestreo, más allá del valor observado del estadístico de la muestra. Para una prueba de dos colas, el valor P es el doble del área en la cola de la curva de distribución de muestreo, más allá del estadístico de la muestra observada. En una prueba de hipótesis, si el valor $P < \alpha$ se rechaza la hipótesis nula. En un análisis de varianza, si un factor cumple que su valor $P < \alpha$, se dice, que existe suficiente evidencia estadística del factor afectando a la variable respuesta (Mathews, 2005).

Tabla 2.9 Tabla de análisis de varianza tomado de (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012)

Source of variation	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean square/ variance	F_0
Factor	SS_F	$K - 1$	$V_F = SS_F / K - 1$	V_F / V_e
Error	SS_e	$N - K$	$V_e = SS_e / N - K$	
Total	SS_{Total}	$N - 1$		

where

- N = total number of observations
- SS_F = sum of squares of factor
- K = number of levels of the factor
- SS_e = sum of squares of error
- F_0 = computed value of F
- V_F = variance of factor
- V_e = variance of error

Un diseño factorial completo es aquel en el que se estudian todas las combinaciones posibles de los diversos factores en diferentes niveles; con el aumento en el número de factores y sus niveles, el número de experimentos aumentaría, y para realizar tantos experimentos, resultaría inviable; para solucionar este problema, los estadísticos desarrollaron diseños factoriales fraccionarios. El diseño robusto de Taguchi, es un

diseño factorial fraccionario, que se resuelve con ayuda de un arreglo ortogonal del modelo experimental. Como investigador en el laboratorio de control electrónico japonés, a finales de la década de los 40's, el Dr. Genichi Taguchi dedicó gran parte de su esfuerzo por mejorar la calidad en la simplificación y estandarización de la aplicación de la técnica *DOE*. Aunque el Dr. Taguchi aplicó con éxito la técnica en muchas compañías en todo el mundo, se introdujo en Estados Unidos y otros países occidentales solo a principios de los años 80's (Taguchi, Chowdhury, & Wu, 2005).

El Dr. Taguchi propuso conceptos para mejorar la calidad en todas las fases de diseño y fabricación. Su filosofía de calidad es que la calidad debe diseñarse en el producto y no inspeccionarse en él; es decir, la calidad no se logra a través de la inspección. Su segunda filosofía es que la calidad se puede lograr minimizando la desviación del valor objetivo, y el diseño del producto debe ser tal que su rendimiento sea insensible a factores incontrolables. Los diseños Robustos de Taguchi reconocen que no todos los factores que causan variabilidad pueden ser controlados. Estos factores que no se pueden controlar se denominan factores de ruido (Krishnaiah & Shahabudeen, 2012).

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA Y MATERIALES

Para poder cumplir los objetivos planteados en esta tesis, se diseñaron dos metodologías: la primera ilustrada en las figuras 3-1 y 3-2; y la segunda desarrollada a través de diseños de experimentos, descrita en el punto 3.2. También se usaron varios recursos tecnológicos, *softwares* e impresión 3D para el prototipo final.

3.1. Metodología para el diseño y fabricación de molde de inyección

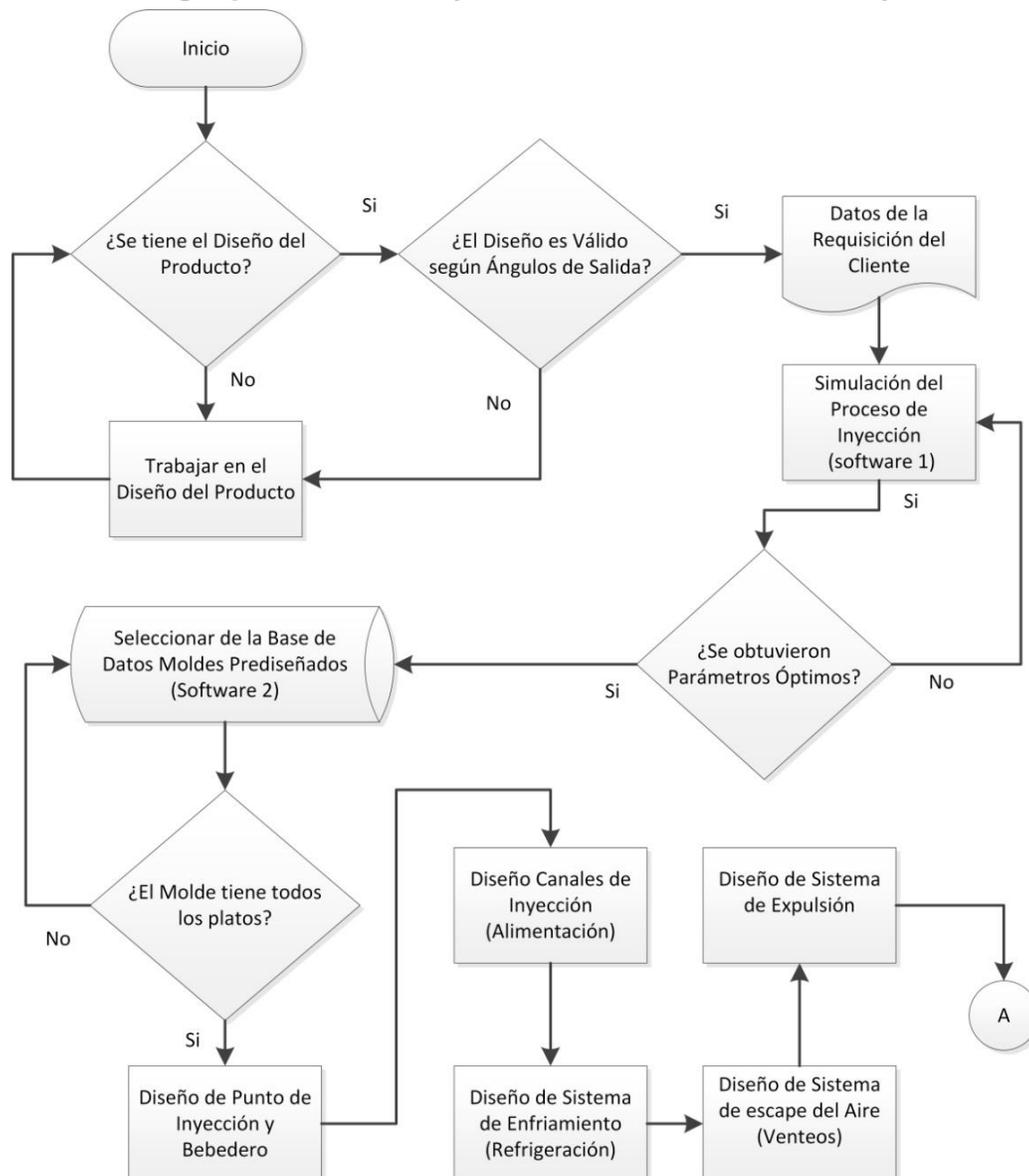


Figura 3-1 Diagrama de flujo de metodología de diseño y fabricación del molde de inyección

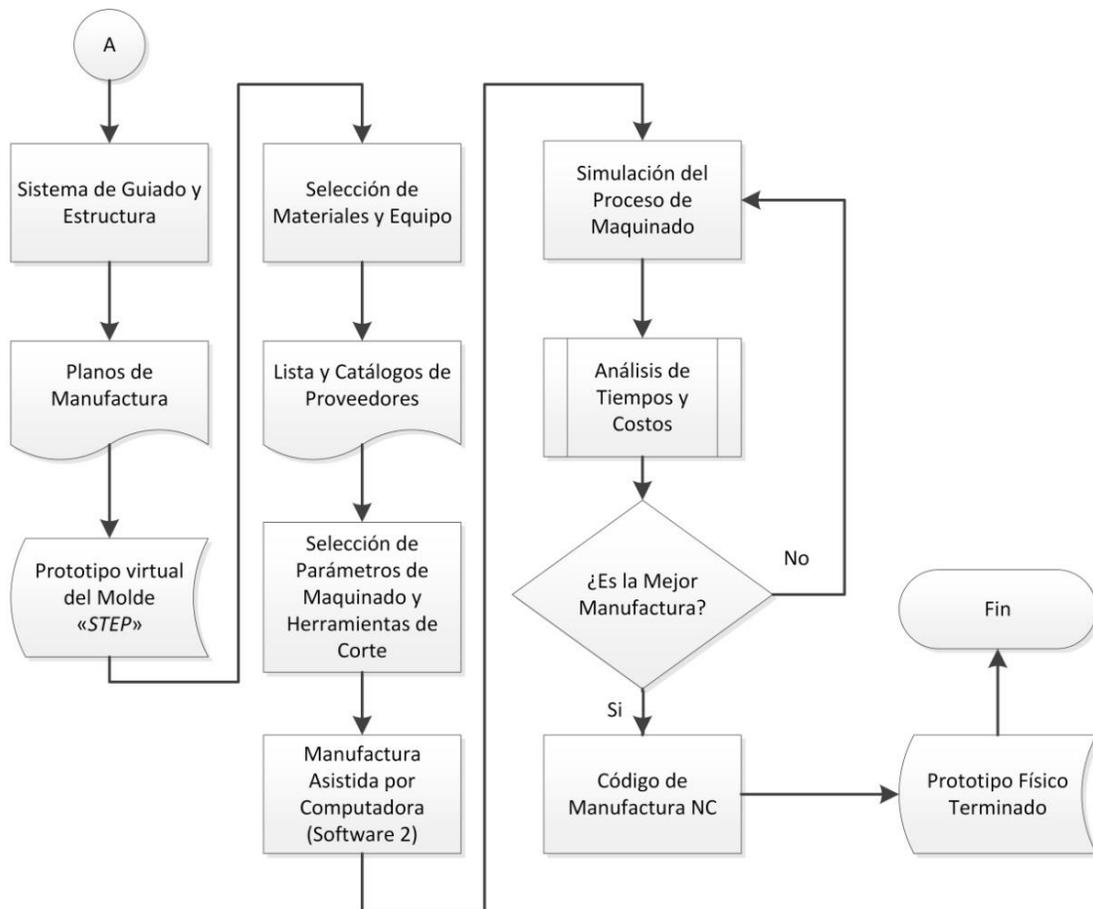


Figura 3-2 Continuación de diagrama de flujo de metodología de diseño y fabricación del molde de inyección.

Existen varios programas que, a través de la ingeniería asistida, pueden desarrollar una simulación del proceso de inyección de plásticos; por ejemplo, los *softwares* comerciales, *Polyflow-Ansys®* de *Autodesk®*, y *Moldflow Insight* de *Autodesk®*. Para desarrollar la simulación del proceso en esta metodología, se determina que se utilizara el *software Solidworks-Plastics Premium Edition® 2018*, y como primer requisito para desarrollar las simulaciones, es tener un producto válido. Un producto válido, es aquel que tiene la capacidad de ser desmoldado fácilmente del molde de inyección. Un producto con correcto ángulo de desmolde es el primer paso en el ciclo del diseño del molde, en general, el rango oscila entre 1° a 3°; también dependerá mucho de la altitud o profundidad de nuestro producto, así como, de la resina del polímero a utilizar. En la figura 3-3 se muestra un ejemplo claro del ángulo de desmolde

positivo y negativo. El segundo paso, es crear virtualmente un dimensionamiento de un molde (incluye núcleo y cavidad), una configuración de su sistema de enfriamiento, y el producto o parte a ser moldeada en el centro; a estos tres, se le conocen con el nombre de dominios, como se ilustra en la figura 3-4.

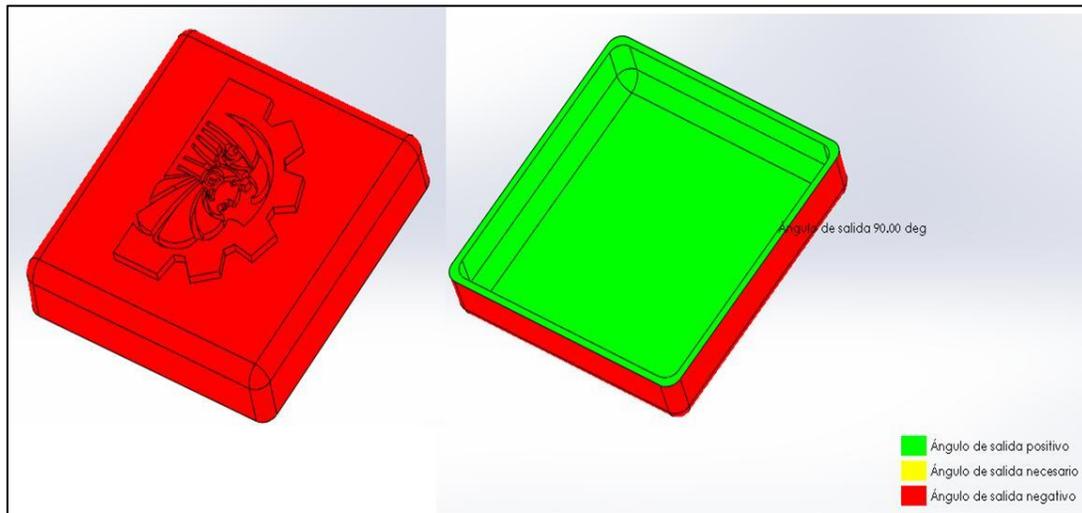


Figura 3-3 Ángulo de desmolde positivo para el núcleo y ángulo de desmolde negativo para la cavidad.

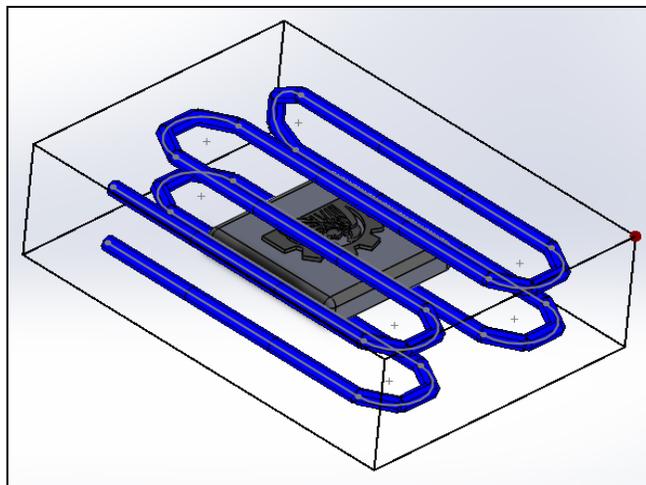


Figura 3-4 Molde virtual para simulación del proceso dimensión de las placas de núcleo y cavidad.

Como tercer paso, se requiere convertir el molde virtual en un modelo matemático (modelo de viscosidad de cruzamiento modificado o modelo de viscosidad ley de poder), primero a través de un mallado superficial para delimitar las fronteras de los dominios, y después con un mallado sólido para realizar el estudio por análisis de

elemento finito del proceso de inyección; ver figura 3-5. De los resultados obtenidos en las simulaciones, se procede a seguir con los diseños robustos de Taguchi para resolver los *DOE* y obtener así, tanto los parámetros óptimos del proceso de inyección como la configuración del diseño del molde completo. Por último, se realiza la construcción virtual del molde y sus componentes con el uso de *CATIA V5® R20*.

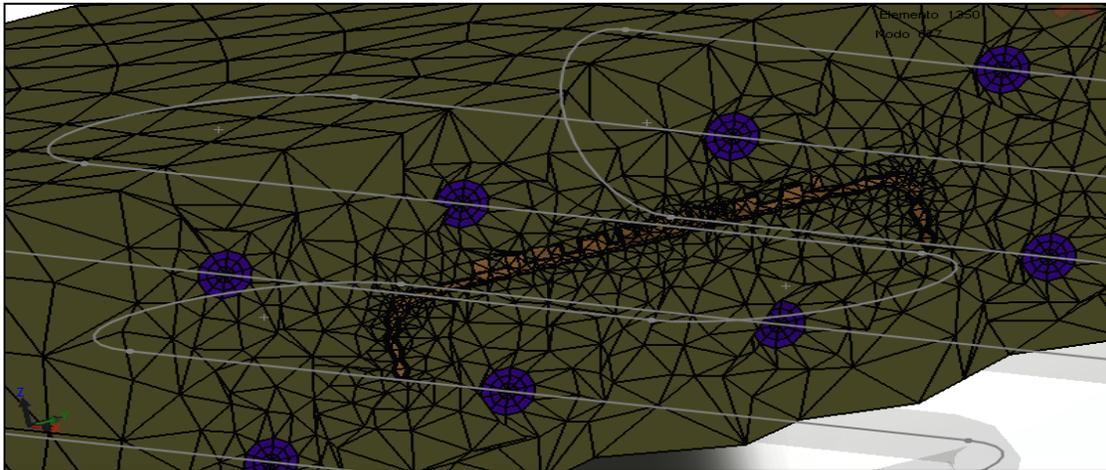


Figura 3-5 Malla sólida del molde virtual

3.2. Metodología del desarrollo de los diseños de experimentos

Esta metodología da como resultado la configuración y características del molde de inyección, por ejemplo, el dimensionamiento, el sistema de enfriamiento, el punto de inyección, la temperatura del molde, la temperatura del refrigerante, el flujo del refrigerante. Este estudio consiste en desarrollar, dos diseños de experimentos robustos en base a la filosofía de Taguchi. El primer *DOE* evalúa la relación entre los factores y la calidad del producto terminado, como es, la contracción del producto, los alabeos o distorsiones, el esfuerzo de cizallamiento, y la fuerza de cierre; para esto se tomó en cuenta seis factores a dos niveles cada uno; el arreglo ortogonal a seguir es un L8 como se muestra en la tabla 3.1. El segundo *DOE*, evalúa la relación entre los factores involucrados, y el tiempo de enfriamiento del producto moldeado; es decir, se busca la mejor configuración y/o mejores niveles, de aquellos factores que no afectan la calidad del producto y que si minimicen el tiempo de enfriamiento; para esto se toma

en cuenta un factor a dos niveles y cuatro factores a tres niveles cada uno; el arreglo ortogonal a seguir es un L18 como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.1 Arreglo ortogonal L8, generado por Minitab

Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6	Respuesta
1	1	1	1	1	1	corrida 1
1	1	1	2	2	2	corrida 2
1	2	2	1	1	2	corrida 3
1	2	2	2	2	1	corrida 4
2	1	2	1	2	1	corrida 5
2	1	2	2	1	2	corrida 6
2	2	1	1	2	2	corrida 7
2	2	1	2	1	1	corrida 8

Tabla 3.2 Arreglo ortogonal L18, generado por Minitab

Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Respuesta
1	1	1	1	1	corrida 1
1	1	2	2	2	corrida 2
1	1	3	3	3	corrida 3
1	2	1	1	2	corrida 4
1	2	2	2	3	corrida 5
1	2	3	3	1	corrida 6
1	3	1	2	1	corrida 7
1	3	2	3	2	corrida 8
1	3	3	1	3	corrida 9
2	1	1	3	3	corrida 10
2	1	2	1	1	corrida 11
2	1	3	2	2	corrida 12
2	2	1	2	3	corrida 13
2	2	2	3	1	corrida 14
2	2	3	1	2	corrida 15
2	3	1	3	2	corrida 16
2	3	2	1	3	corrida 17
2	3	3	2	1	corrida 18

3.3. Recursos tecnológicos

Para el desarrollo de esta investigación se usaron:

- Equipo de cómputo: *HP, Windows 10 Home 64bits, RAM 8 GB, Intel® Core™ i7, 2.80 Ghz. Pantalla 15.6", 1 Tb. de disco duro a 7200 rpm, NVIDIA® GeForce®*

GTX™ 1050. Puede soportar y correr los softwares de diseño y de análisis estadístico sin problema alguno.

- *Softwares de diseño: CAD/CAE/CAM, Dassault Systemes: Solidworks premium Edition® 2018, y CatiaV5® R20. Solidworks®* es la versión más completa y competitiva del mercado, a través del módulo *plastics*, se puede ejecutar la simulación del proceso de inyección de manera virtual, se crean varios escenarios y se obtienen los parámetros para los diseños de experimentos. *CatiaV5®* es el *software* de mayor gama de *Dassault Systemes*, se puede utilizar para diseñar el molde de inyección y realizar los planos de manufactura, ya que cuenta con los potentes módulos de *core and cavity design, mold tooling design y prismatic machining*.
- *Software para análisis estadístico: Minitab17*, puede resolver los diseños robustos de Taguchi, a diferencia de otros *softwares*, es sencillo de usar y cuenta con una potente interfaz gráfica.
- *Impresora 3D: Airwolf3d Axiom DD*; esta impresora puede imprimir piezas de hasta 200 x 200 milímetros, fue posible utilizar ya que se contaba con acceso.

3.4. Materiales

Los materiales que más se utilizan para la manufactura aditiva e impresión 3D, son exactamente los que se requieren para la elaboración del prototipo del molde de inyección, por su versatilidad y economía. Estos materiales son *ABS* (acrilonitrilo butadieno estireno) y *PLA* (ácido poli-láctico).

CAPÍTULO 4. DESARROLLO Y RESULTADOS

4.1. Desarrollo del estudio

Al inicio de la metodología propuesta, se determinó que el diseño del producto a moldear fuera sencillo de inyectarse, eso da como resultado una pieza de una cavidad; el molde de dos platos con canales de colada fríos de una única cavidad, resultó ser el más adecuado a las necesidades del producto, aparte de ser el molde con mayor facilidad de control en los parámetros del proceso. El producto se diseñó con *Solidworks® Premium Edition 2018*, porque se contaba con licencia oficial para su uso. El material seleccionado para el producto, debía cumplir ciertas características, entre ellas, tener baja contracción y excelentes propiedades mecánicas. El ABS es un polímero amorfo, como ya se mencionó con anterioridad, estos, aunque tienen baja contracción, tienen poca resistencia al desgaste, a la fatiga y a la degradación; sin embargo, la poliamida es un polímero semicristalino con alta resistencia al desgaste, a la fatiga y a la degradación, pero de alta contracción. Por lo tanto, se determinó que el material contara con las mejores propiedades para su durabilidad, sin afectar la calidad del mismo, y la marca seleccionada fue: *Bayer® ABS+PA Triax® 1120*, debido a su alta calidad, que lo hace muy aceptable en el mercado, es de fácil acceso a bajo costo, y se encuentra en la librería de materiales precargados en *Solidwork® Plastics*. Para los platos del molde, se eligió que el material fuese acero *P-20*, excluyendo *SAE1030*, *AISI400* y *AISI4130*, este último con la misma dureza que el *P-20* (*28-34 HRC*), por ser un material más comercial, económico y con más facilidad de acceso a la compra. El mejor diseño del molde debe contar con el mejor tiempo de refrigeración, pero sin afectar la calidad del producto (alabeos, contracciones, rechupes). Usando Taguchi, se determinó la configuración óptima de los factores de control para obtener así, la mejor configuración para el diseño del molde. La filosofía Taguchi enseña que, para un primer *DOE*, es recomendable muchos factores a pocos niveles, y del resultado, en un segundo *DOE*, pocos factores significativos, a muchos niveles; por lo tanto, siguiendo esta filosofía, las características de la máquina de inyección, y las

propiedades del material, se determinó que los seis factores principales de control y sus niveles son: Punto de Inyección "A" (3mm - 6mm), Temperatura del Material "B" (240°C - 270°C), Temperatura del Molde "C" (38°C - 65°C), Configuración Sistema de Enfriamiento "D" (A - B), Diámetro de las Líneas de Enfriamiento "E" (10mm - 15mm), Flujo de Refrigerante "F" (150cm³/s - 200cm³/s).

4.2. Diseño del producto a moldear por el molde de inyección

Se consideró como base una máquina de inyección, de la marca *Arburg®* tipo *Allrounder 270C Golden Edition*. La recomendación del tamaño del molde, respecto a las platinas de la moldeadora, según la asociación americana de constructores de moldes *AMBA*, por sus siglas en inglés, es que su longitud transversal sea 2/3 partes de la distancia entre barras; y el producto a moldear, tenga una dimensión de área proyectada de 1/3 a 2/3 del área total del plato. Debido a estas consideraciones, se procedió a diseñar una cavidad de forma cuadrangular con 2.50 mm de espesor, con ángulo de desmolde 1.5° y altitud de 20 mm; como distintivo, en su parte frontal el logo del Tecnológico Nacional de México, ver figura 4-1.

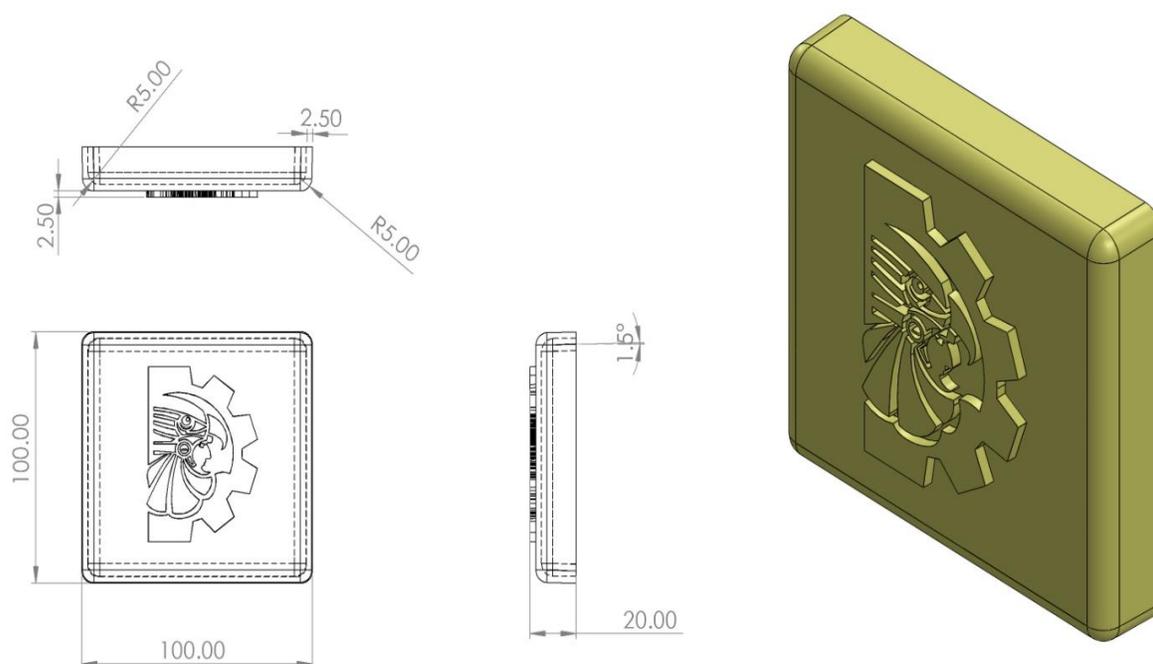


Figura 4-1 Dimensiones del producto en vista frontal, superior, lateral y proyectada.

4.3. Arreglo L8 de Taguchi para los *DOE* que evalúan la calidad del producto

A continuación se muestran en tablas, los resultados obtenidos de las simulaciones del proceso de inyección arrojados por el software *Solidworks® Plastics*; las combinaciones del diseño robusto de arreglo L8 fue descrito en el capítulo 3; las respuestas, como indicadores de calidad del producto, son los factores a ruido: tiempo de llenado, ver tabla 4.1; tiempo de empaquetamiento, ver tabla 4.2; tensión a la cizalla (su efecto es una marca en el producto), ver tabla 4.3; fuerza de cierre (un cierre defectuoso producirá *flash* en el producto), ver tabla 4.4; alabeos *warping*, ver tabla 4.5; y contracción *shrinking* ver tabla 4.6.

Tabla 4.1 Arreglo L8, tiempo de llenado constante para todas las configuraciones.

DISEÑO ROBUSTO 6 FACTORES PRINCIPALES A 2 NIVELES							TIEMPO DE LLENADO [Seg]
	A	B	C	D	E	F	REPLICA 1
Trial 1	3mm	240°C	38°C	Config. A	10mm	150cc	4.62
Trial 2	3mm	240°C	38°C	Config. B	15mm	200cc	4.61
Trial 3	3mm	270°C	65°C	Config. A	10mm	200cc	4.61
Trial 4	3mm	270°C	65°C	Config. B	15mm	150cc	4.61
Trial 5	6mm	240°C	65°C	Config. A	15mm	150cc	4.61
Trial 6	6mm	240°C	65°C	Config. B	10mm	200cc	4.61
Trial 7	6mm	270°C	38°C	Config. A	15mm	200cc	4.61
Trial 8	6mm	270°C	38°C	Config. B	10mm	150cc	4.61

Tabla 4.2 Arreglo L8, tiempo de empaquetamiento constante para todas las configuraciones

DISEÑO ROBUSTO 6 FACTORES PRINCIPALES A 2 NIVELES							TIEMPO DE PACKING [Seg]
	A	B	C	D	E	F	REPLICA 1
Trial 1	3mm	240°C	38°C	Config. A	10mm	150cc	5.35
Trial 2	3mm	240°C	38°C	Config. B	15mm	200cc	5.34
Trial 3	3mm	270°C	65°C	Config. A	10mm	200cc	5.34
Trial 4	3mm	270°C	65°C	Config. B	15mm	150cc	5.34
Trial 5	6mm	240°C	65°C	Config. A	15mm	150cc	5.34
Trial 6	6mm	240°C	65°C	Config. B	10mm	200cc	5.34
Trial 7	6mm	270°C	38°C	Config. A	15mm	200cc	5.34
Trial 8	6mm	270°C	38°C	Config. B	10mm	150cc	5.34

Tabla 4.3 Arreglo L8 tensión de cizalla

DISEÑO ROBUSTO 6 FACTORES PRINCIPALES A 2 NIVELES							TENSION DE CIZALLA [Mpa]
	A	B	C	D	E	F	REPLICA 1
Trial 1	3mm	240°C	38°C	Config. A	10mm	150cc	1.31
Trial 2	3mm	240°C	38°C	Config. B	15mm	200cc	1.32
Trial 3	3mm	270°C	65°C	Config. A	10mm	200cc	1.33
Trial 4	3mm	270°C	65°C	Config. B	15mm	150cc	1.33
Trial 5	6mm	240°C	65°C	Config. A	15mm	150cc	1.05
Trial 6	6mm	240°C	65°C	Config. B	10mm	200cc	1.05
Trial 7	6mm	270°C	38°C	Config. A	15mm	200cc	1.08
Trial 8	6mm	270°C	38°C	Config. B	10mm	150cc	0.93

Tabla 4.4 Arreglo L8 fuerza de cierre

DISEÑO ROBUSTO 6 FACTORES PRINCIPALES A 2 NIVELES							FUERZA DE CIERRE [Ton]
	A	B	C	D	E	F	REPLICA 1
Trial 1	3mm	240°C	38°C	Config. A	10mm	150cc	19.06
Trial 2	3mm	240°C	38°C	Config. B	15mm	200cc	17.83
Trial 3	3mm	270°C	65°C	Config. A	10mm	200cc	13.16
Trial 4	3mm	270°C	65°C	Config. B	15mm	150cc	12.91
Trial 5	6mm	240°C	65°C	Config. A	15mm	150cc	16.01
Trial 6	6mm	240°C	65°C	Config. B	10mm	200cc	16.01
Trial 7	6mm	270°C	38°C	Config. A	15mm	200cc	15.04
Trial 8	6mm	270°C	38°C	Config. B	10mm	150cc	11.73

Tabla 4.5 Arreglo L8 alabeos

DISEÑO ROBUSTO 6 FACTORES PRINCIPALES A 2 NIVELES							RESPUESTA WARP [mm]
	A	B	C	D	E	F	REPLICA 1
Trial 1	3mm	240°C	38°C	Config. A	10mm	150cc	0.6305
Trial 2	3mm	240°C	38°C	Config. B	15mm	200cc	0.817
Trial 3	3mm	270°C	65°C	Config. A	10mm	200cc	0.8986
Trial 4	3mm	270°C	65°C	Config. B	15mm	150cc	0.8115
Trial 5	6mm	240°C	65°C	Config. A	15mm	150cc	1.2708
Trial 6	6mm	240°C	65°C	Config. B	10mm	200cc	1.0422
Trial 7	6mm	270°C	38°C	Config. A	15mm	200cc	0.7476
Trial 8	6mm	270°C	38°C	Config. B	10mm	150cc	0.7218

Tabla 4.6 Arreglo L8 contracción

DISEÑO ROBUSTO 6 FACTORES PRINCIPALES A 2 NIVELES							CONTRACCION [%]
	A	B	C	D	E	F	REPLICA 1
Trial 1	3mm	240°C	38°C	Config. A	10mm	150cc	2.0856
Trial 2	3mm	240°C	38°C	Config. B	15mm	200cc	2.1220
Trial 3	3mm	270°C	65°C	Config. A	10mm	200cc	3.3934
Trial 4	3mm	270°C	65°C	Config. B	15mm	150cc	3.3865
Trial 5	6mm	240°C	65°C	Config. A	15mm	150cc	2.8618
Trial 6	6mm	240°C	65°C	Config. B	10mm	200cc	2.8618
Trial 7	6mm	270°C	38°C	Config. A	15mm	200cc	2.5838
Trial 8	6mm	270°C	38°C	Config. B	10mm	150cc	2.7376

4.4. Resultados de la primera fase de los *DOE* que evalúan la calidad del producto arrojados por *Minitab*

Se valida que ninguno de los factores involucrados, afecta el tiempo de llenado y el tiempo de empaquetamiento, esto debido a que los resultados se mantienen constantes; por lo tanto, no es necesario realizar diseño de experimentos para estas dos variables. En consecuencia, con uso del software *Minitab17®*, se buscó encontrar la relación estadísticamente significativa de los factores que podrían afectar la calidad del producto, en las señales a ruido: tensión de cizalla, fuerza de cierre, alabeo y contracción, ya que muestran variabilidad en los resultados.

4.4.1. Resultados para la tensión de cizalla

El estudio se realizó con 95% de confianza y con el resultado tan alto de $R^2= 98.2\%$, se puede decir que el análisis estadístico es válido. Para todos los factores $P > \alpha$, el valor P es mayor a la significancia (0.05). El resultado de este primer diseño de experimentos, muestra, que no se tiene suficiente evidencia estadística para decir que algún factor, afecta la tensión de cizalla, ver tabla 4.7. En la figura 4-2, se pueden observar los mejores niveles de estudio, destacando sobre los demás el factor punto de inyección, siendo el mejor nivel para lo menor es lo mejor 6 mm.

Tabla 4.7 Análisis de varianza para tensión de cizalla

Estimated Model Coefficients for SN ratios

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-1.32458	0.1541	-8.596	0.074
Punto de 3mm	-1.10316	0.1541	-7.159	0.088
Temperat 240°C	-0.07653	0.1541	-0.497	0.707
Temperat 38°C	0.12582	0.1541	0.817	0.564
Sistema Configur	-0.15410	0.1541	-1.000	0.500
Diametro 10mm	0.17061	0.1541	1.107	0.468
Flujo de 150cc	0.17061	0.1541	1.107	0.468

S = 0.4358 R-Sq = 98.2% R-Sq(adj) = 87.6%

Analysis of Variance for SN ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Punto de Inyección	1	9.7357	9.73566	9.73566	51.25	0.088
Temperatura del Material (Melt)	1	0.0469	0.04686	0.04686	0.25	0.707
Temperatura del Molde	1	0.1267	0.12666	0.12666	0.67	0.564
Sistema de Enfriamiento	1	0.1900	0.18996	0.18996	1.00	0.500
Diametro Lineas de Enfriamiento	1	0.2329	0.23286	0.23286	1.23	0.468
Flujo del Refrigerante	1	0.2329	0.23286	0.23286	1.23	0.468
Residual Error	1	0.1900	0.18996	0.18996		
Total	7	10.7548				

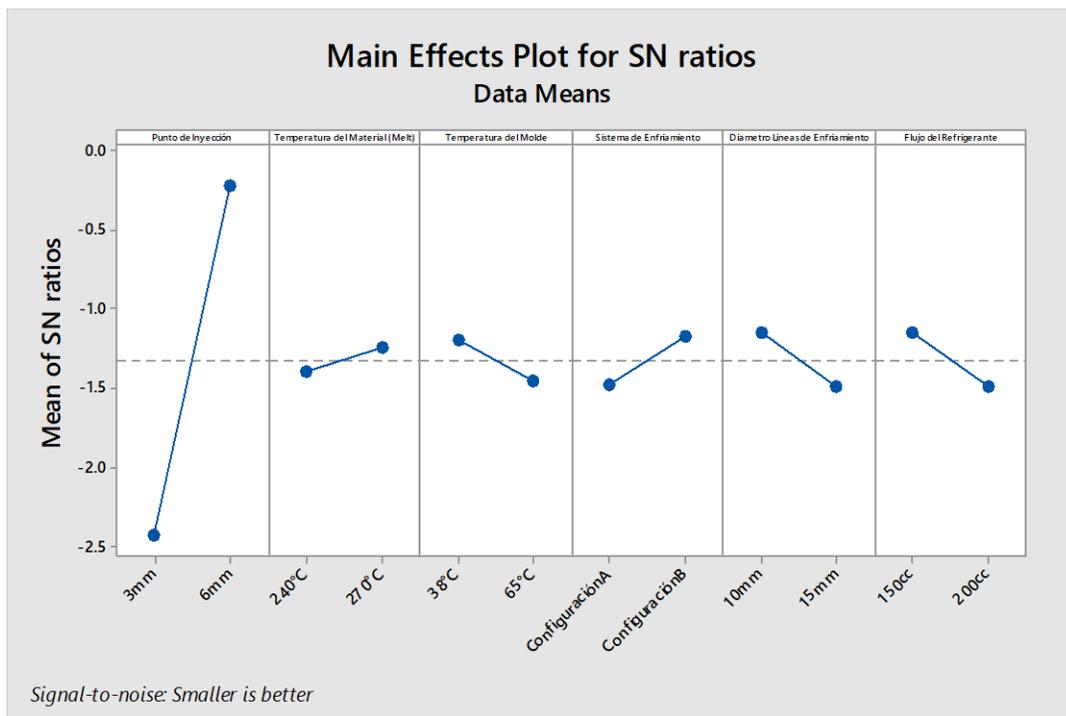


Figura 4-2 Señal a ruido lo menor es lo mejor para el factor tensión de cizalla

4.4.2. Resultados para la fuerza de cierre

El estudio se realizó con 95% de confianza y con el resultado tan alto de $R^2= 94.4\%$, se puede decir que el análisis estadístico es válido. Para todos los factores $P > \alpha$, el valor P es mayor a la significancia (0.05). El resultado de este segundo diseño de experimentos, muestra que, no se tiene suficiente evidencia estadística para decir que algún factor, afecta la fuerza de cierre, ver tabla 4.8. En la figura 4-3, se pueden observar los mejores niveles del estudio, destacando sobre los demás el factor temperatura del material, siendo el mejor nivel para lo menor es lo mejor 270°C . Cuando un factor, tiene la pendiente con mayor inclinación entre sus niveles, se dice que, este factor tiene mayor relación entre la variable respuesta señal a ruido.

Tabla 4.8 Análisis de varianza para la fuerza de cierre

Estimated Model Coefficients for SN ratios

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-23.5420	0.3215	-73.230	0.009
Punto de 3mm	-0.2653	0.3215	-0.825	0.561
Temperat 240°C	-1.1583	0.3215	-3.603	0.172
Temperat 38°C	-0.3471	0.3215	-1.080	0.476
Sistema Configur	-0.3631	0.3215	-1.130	0.461
Diametro 10mm	0.1766	0.3215	0.549	0.680
Flujo de 150cc	0.2183	0.3215	0.679	0.620

S = 0.9093 R-Sq = 94.4% R-Sq(adj) = 60.8%

Analysis of Variance for SN ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Punto de Inyección	1	0.5632	0.5632	0.5632	0.68	0.561
Temperatura del Material (Melt)	1	10.7337	10.7337	10.7337	12.98	0.172
Temperatura del Molde	1	0.9640	0.9640	0.9640	1.17	0.476
Sistema de Enfriamiento	1	1.0549	1.0549	1.0549	1.28	0.461
Diametro Lineas de Enfriamiento	1	0.2496	0.2496	0.2496	0.30	0.680
Flujo del Refrigerante	1	0.3811	0.3811	0.3811	0.46	0.620
Residual Error	1	0.8268	0.8268	0.8268		
Total	7	14.7733				

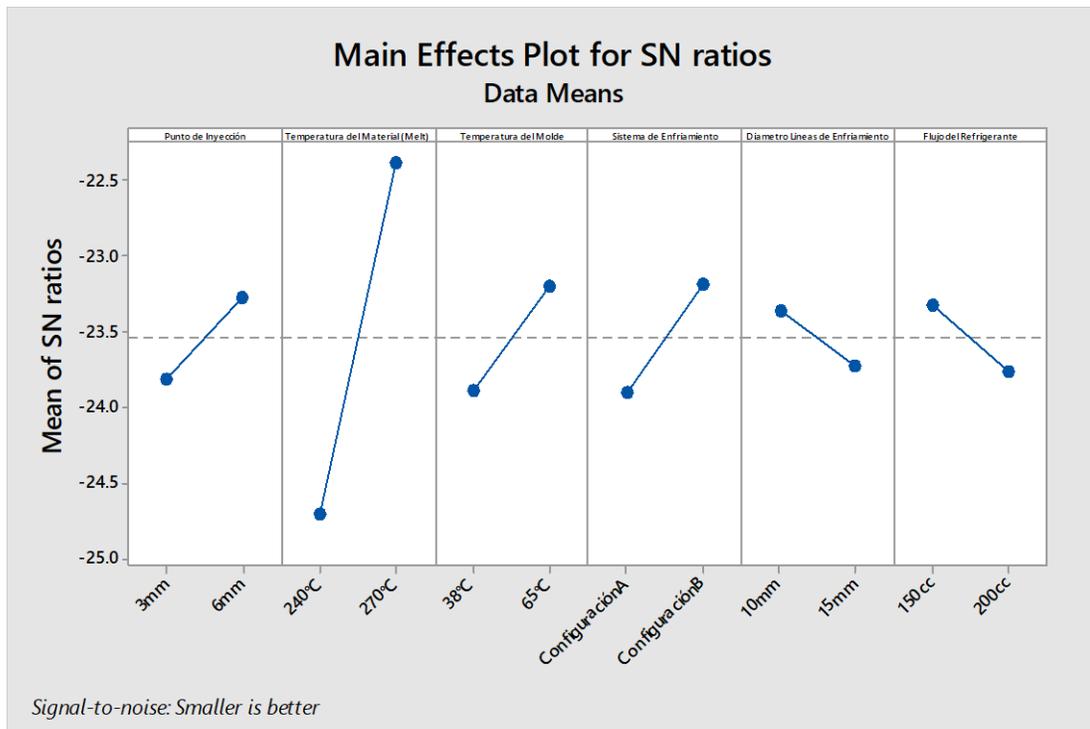


Figura 4-3 Señal a ruido lo menor es lo mejor para el factor fuerza de cierre

4.4.3. Resultados para el alabeo

El estudio se realizó con 95% de confianza y con el resultado tan alto de $R^2= 90.0\%$, se puede decir que el análisis estadístico es válido. Para todos los factores $P > \alpha$, el valor P es mayor a la significancia (0.05). El resultado de este tercer diseño de experimentos, muestra que, no se tiene suficiente evidencia estadística para decir que algún factor, afecta el alabeo, ver tabla 4.9. En la figura 4-4, se pueden observar los mejores niveles del estudio, destacando sobre los demás el factor temperatura del molde, siendo el mejor nivel para lo menor es lo mejor 38°C.

Tabla 4.9 Análisis de varianza para el alabeo

Estimated Model Coefficients for SN ratios

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1.42781	0.5692	2.508	0.242
Punto de 3mm	0.69838	0.5692	1.227	0.435
Temperat 240°C	-0.59749	0.5692	-1.050	0.485
Temperat 38°C	1.35222	0.5692	2.376	0.254
Sistema Configur	-0.08280	0.5692	-0.145	0.908
Diametro 10mm	0.42409	0.5692	0.745	0.592
Flujo de 150cc	0.21485	0.5692	0.377	0.770

S = 1.610 R-Sq = 90.0% R-Sq(adj) = 29.8%

Analysis of Variance for SN ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Punto de Inyección	1	3.9019	3.9019	3.9019	1.51	0.435
Temperatura del Material (Melt)	1	2.8559	2.8559	2.8559	1.10	0.485
Temperatura del Molde	1	14.6281	14.6281	14.6281	5.64	0.254
Sistema de Enfriamiento	1	0.0548	0.0548	0.0548	0.02	0.908
Diametro Lineas de Enfriamiento	1	1.4388	1.4388	1.4388	0.56	0.592
Flujo del Refrigerante	1	0.3693	0.3693	0.3693	0.14	0.770
Residual Error	1	2.5921	2.5921	2.5921		
Total	7	25.8410				

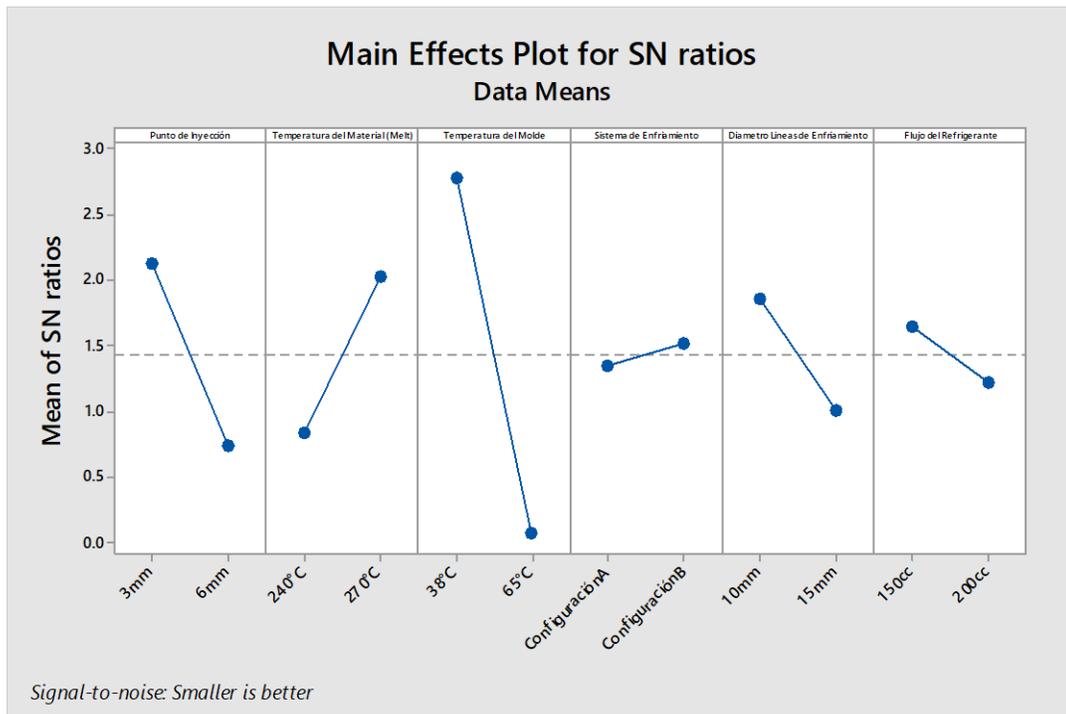


Figura 4-4 Señal a ruido lo menor es lo mejor para el alabeo

4.4.4. Resultados para la contracción

El estudio se realizó con 95% de confianza y con el resultado tan alto de $R^2 = 99.7\%$, se puede decir que el análisis estadístico es válido. Para cinco de seis factores $P > \alpha$, el valor P es mayor a la significancia (0.05); en el factor, temperatura del molde se observa que $P < \alpha$, el valor P es menor a la significancia. El resultado de este cuarto diseño de experimentos, muestra que se tiene suficiente evidencia estadística, para decir que, el factor temperatura del molde, si afecta significativamente a la contracción del producto; el análisis de varianza para este factor, muestra que el estadístico de prueba valor P , es de 0.045; ver tabla 4.10. Para este experimento, en la figura 4-5, se

pueden observar los mejores niveles: 3 mm para el tamaño del punto de inyección, 240°C para la temperatura del material, 38°C para la temperatura del molde, configuración A para el sistema de enfriamiento, 10 mm para el diámetro de las líneas de enfriamiento, y 150 cm³ para el flujo del refrigerante. En esta primera fase de estudio, los factores: tamaño del punto de inyección, temperatura del material, configuración del sistema de enfriamiento, diámetro de líneas de enfriamiento y flujo del refrigerante, no afectan significativamente a la calidad del producto; solo la temperatura del molde, afecta en la contracción como único factor indicador estadísticamente significativo.

Por lo tanto, es posible determinar una configuración óptima del molde en una segunda fase de estudio, desarrollando un *DOE* con ciertos factores involucrados y sus mejores niveles. Para esta segunda fase, se buscó reducir el tiempo de enfriamiento, sin afectar la calidad del producto, se determinó que el diámetro del orificio de inyección fuese 3 mm por ser el mejor nivel del estudio anterior, además que la temperatura del molde permaneciera constante a 38 °C, por ser el mejor nivel del estudio anterior y el único factor que afecta a la calidad del producto; que la temperatura del aire para el estudio, permaneciera constante a 20 °C, y la presión del aire a 1 atmosfera, por ser considerados valores de laboratorio.

Tabla 4.10 Análisis de varianza para la contracción

Estimated Model Coefficients for SN ratios

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-8.67349	0.08409	-103.141	0.006
Punto de 3mm	0.14104	0.08409	1.677	0.342
Temperat 240°C	0.87722	0.08409	10.431	0.061
Temperat 38°C	1.19547	0.08409	14.216	0.045
Sistema Configur	0.07903	0.08409	0.940	0.520
Diametro 10mm	-0.04652	0.08409	-0.553	0.678
Flujo de 150cc	-0.04146	0.08409	-0.493	0.708

S = 0.2379 R-Sq = 99.7% R-Sq(adj) = 97.8%

Analysis of Variance for SN ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Punto de Inyección	1	0.1591	0.1591	0.1591	2.81	0.342
Temperatura del Material (Melt)	1	6.1561	6.1561	6.1561	108.82	0.061
Temperatura del Molde	1	11.4332	11.4332	11.4332	202.09	0.045
Sistema de Enfriamiento	1	0.0500	0.0500	0.0500	0.88	0.520
Diametro Lineas de Enfriamiento	1	0.0173	0.0173	0.0173	0.31	0.678
Flujo del Refrigerante	1	0.0138	0.0138	0.0138	0.24	0.708
Residual Error	1	0.0566	0.0566	0.0566		
Total	7	17.8860				

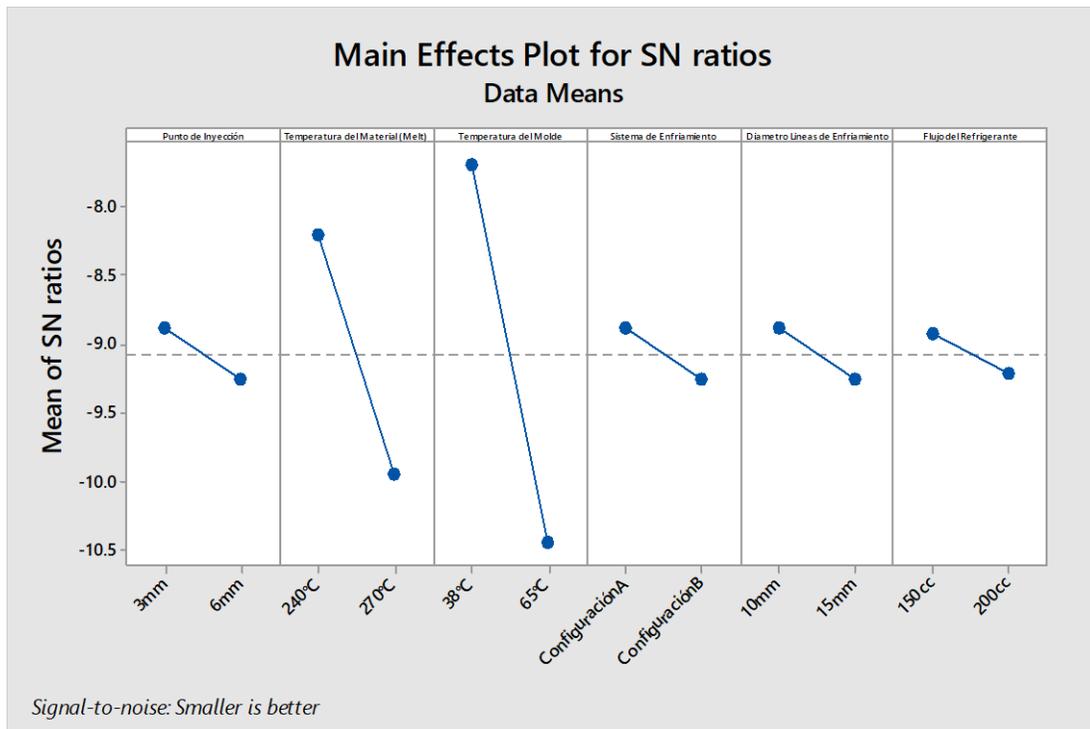


Figura 4-5 Señal a ruido lo menor es lo mejor para la contracción.

4.5. Arreglo L18 de Taguchi para el DOE que evalúa el tiempo y configuración del sistema de enfriamiento.

Para el nuevo diseño de experimentos de la segunda fase, se determinó un arreglo L18, que es un factor a dos niveles y cuatro factores a tres niveles, como se muestra en la tabla 4.11. Las configuraciones del sistema de enfriamiento, se determinaron a partir del número de líneas a considerar, que cubrieran por completo el tamaño del producto a moldear; los diámetros involucrados de dichas líneas deben ser posibles de fabricar dentro de las dimensiones de los platos: núcleo y cavidad; otro punto que se consideró, fue la entrada y salida del refrigerante (agua) del molde. En las figuras

4-6, 4-7 y 4-8 se proponen tres configuraciones de enfriamiento A, B y C respectivamente. Los cinco factores principales de control y sus niveles son: Temperatura del Agua "A" (20°C, 30°C); Configuración del Sistema de Enfriamiento "B" (A, B, C); Diámetro de las Líneas de Enfriamiento "C" (5mm, 10mm, 15mm); Tamaño del molde "D" (180mm x 180mm - 200 mm x 200 mm - 230 mm x 230 mm), Flujo de Refrigerante "E" (100 cm³/s, 130cm³/s, 160cm³/s).

Tabla 4.11 Arreglo L18 Tiempo de enfriamiento

DISEÑO ROBUSTO 1 FACTOR A 2 NIVELES Y 4 FACTORES A 3 NIVELES						Tiempo [seg]
	A	B	C	D	E	Replica 1
Trial 1	20	a	5	180X180	100	25.09
Trial 2	20	a	10	200X200	130	24.89
Trial 3	20	a	15	230X230	160	24.89
Trial 4	20	b	5	180X180	130	24.89
Trial 5	20	b	10	200X200	160	24.69
Trial 6	20	b	15	230X230	100	25.09
Trial 7	20	c	5	200X200	100	25.29
Trial 8	20	c	10	230X230	130	24.89
Trial 9	20	c	15	180X180	160	24.89
Trial 10	30	a	5	230X230	160	26.89
Trial 11	30	a	10	180X180	100	27.29
Trial 12	30	a	15	200X200	130	28.29
Trial 13	30	b	5	200X200	160	26.89
Trial 14	30	b	10	230X230	100	26.89
Trial 15	30	b	15	180X180	130	27.29
Trial 16	30	c	5	230X230	130	27.49
Trial 17	30	c	10	180X180	160	27.69
Trial 18	30	c	15	200X200	100	27.69

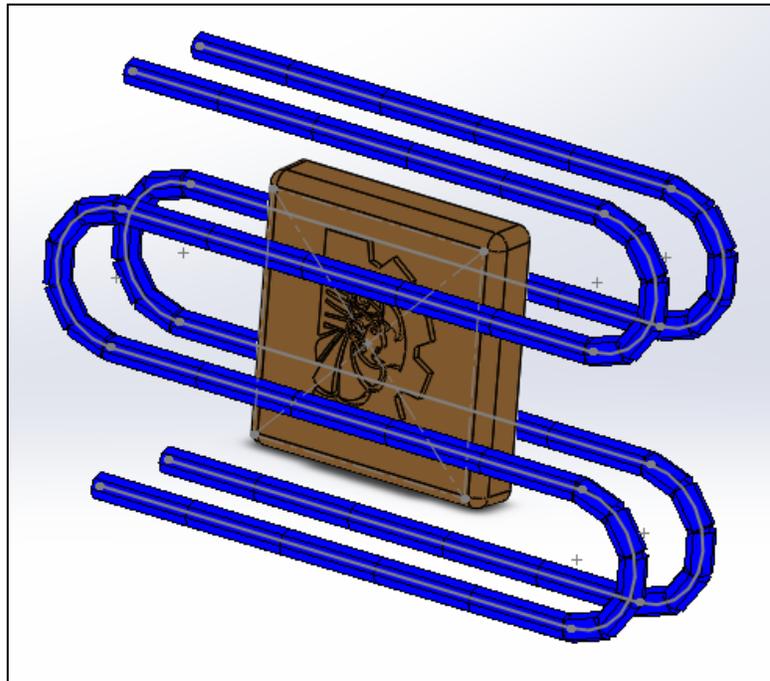


Figura 4-6 Configuración "a" dos entradas y dos salidas de flujo.

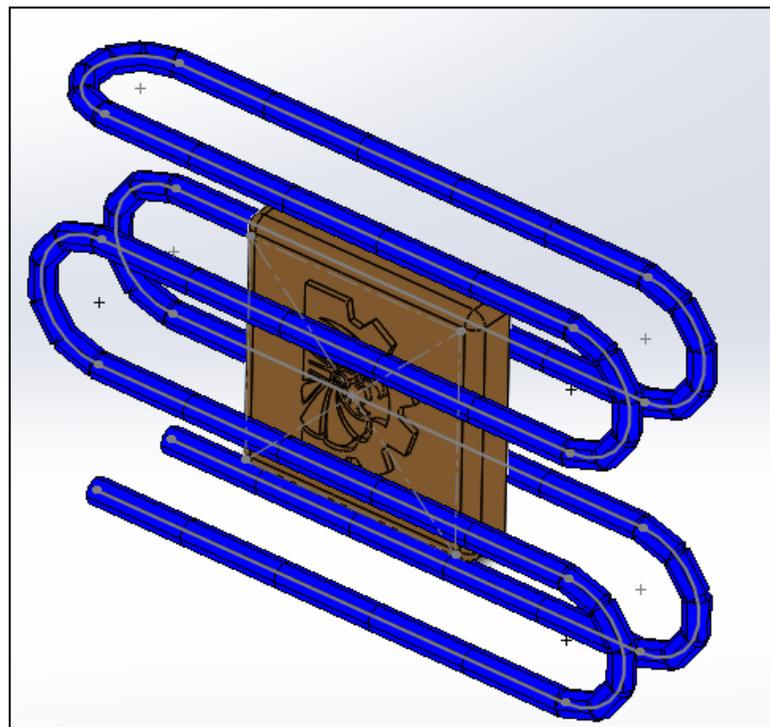


Figura 4-7 Configuración "b" una entrada y una salida de flujo.

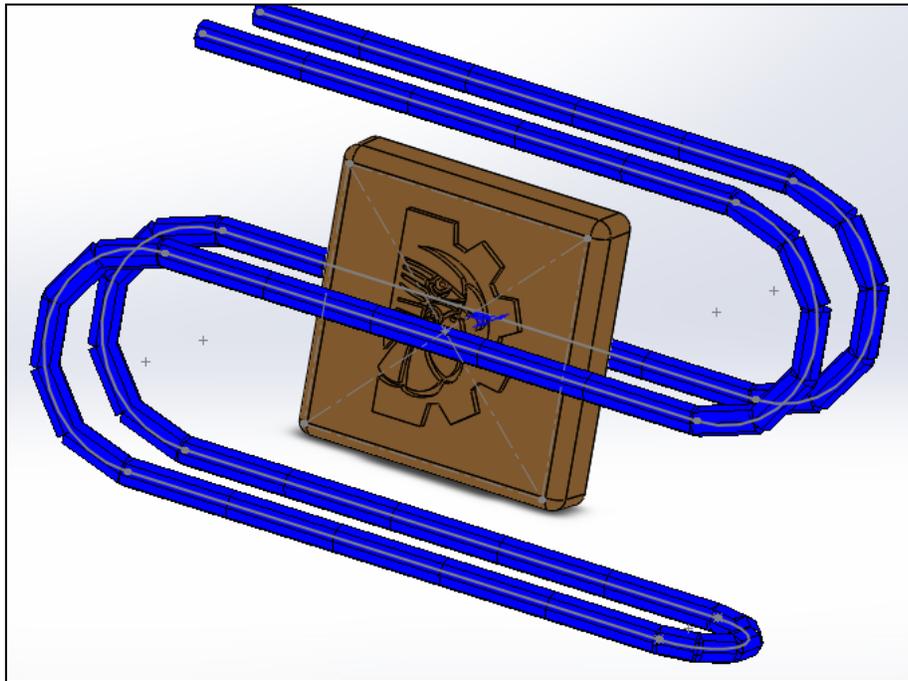


Figura 4-8 Configuración "c" líneas interconectadas entre sí, una entrada y una salida de flujo, seis líneas totales.

4.6. Resultado de la segunda fase del DOE que evalúa el tiempo de enfriamiento arrojado por *Minitab*

El estudio se realizó con 95% de confianza y con el resultado tan alto de $R^2= 97.6\%$, podemos decir que el análisis estadístico es válido. Para cuatro de cinco factores $P > \alpha$, el valor P es mayor a la significancia (0.05); y en el factor, temperatura del agua se observa que $P < \alpha$, el valor P es menor a la significancia. Los resultados de este quinto y último diseño de experimentos (segunda fase), muestra que se tiene suficiente evidencia estadística, para decir, que el factor temperatura del agua, si afecta significativamente al tiempo de enfriamiento del producto moldeado, el análisis de varianza del experimento muestra que el estadístico de prueba valor P , es de un valor de 0.000, el cual es menor a valor de significancia 0.050. Los demás factores no afectan estadísticamente al tiempo de enfriamiento, ver tabla 4.12.

En la figura 4-9 se muestran las gráficas de control del estudio, los datos graficados son los residuales, en dichas gráficas los supuestos se cumplen, por lo tanto, la regresión de mínimos cuadrados ordinarios produce estimaciones de coeficientes sin

sesgo, es decir, con la varianza mínima; en *Normal Probability Plot*, los puntos se alinean a la recta, por lo tanto, se dice que los datos del estudio son distribuidos normalmente; en *Histogram* se puede observar que los datos son asimétricos; en *Residual versus Fitted Value* se observa que los datos no siguen una varianza constante y en *Residual versus Observation Order* se aprecia que no siguen un patrón, es decir, no están correlacionados entre sí. En la figura 4-10, se pueden observar los mejores niveles de los factores involucrados, destacando sobre los demás, la temperatura de ingreso del agua (refrigerante), siendo su mejor nivel 20°C; todos estos factores son necesarios para la construcción del molde de inyección.

Tabla 4.12 Análisis de varianza para tiempo de enfriamiento

Estimated Model Coefficients for SN ratios

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-28.3454	0.02277	-1244.785	0.000
temperat 20	0.4018	0.02277	17.646	0.000
configur a	-0.0172	0.03220	-0.535	0.607
configur b	0.0679	0.03220	2.109	0.068
lineas 5	0.0226	0.03220	0.702	0.503
lineas 10	0.0371	0.03220	1.151	0.283
tamaño 180	-0.0076	0.03220	-0.235	0.820
tamaño 200	-0.0381	0.03220	-1.183	0.271
flujo 100	-0.0209	0.03220	-0.648	0.535
flujo 130	-0.0376	0.03220	-1.167	0.277

S = 0.09661 R-Sq = 97.6% R-Sq(adj) = 94.9%

Analysis of Variance for SN ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
temperatura agua	1	2.90626	2.90626	2.90626	311.38	0.000
configuracion	2	0.04489	0.04489	0.02244	2.40	0.152
lineas	2	0.03267	0.03267	0.01634	1.75	0.234
tamaño	2	0.02157	0.02157	0.01079	1.16	0.362
flujo	2	0.03158	0.03158	0.01579	1.69	0.244
Residual Error	8	0.07467	0.07467	0.00933		
Total	17	3.11164				

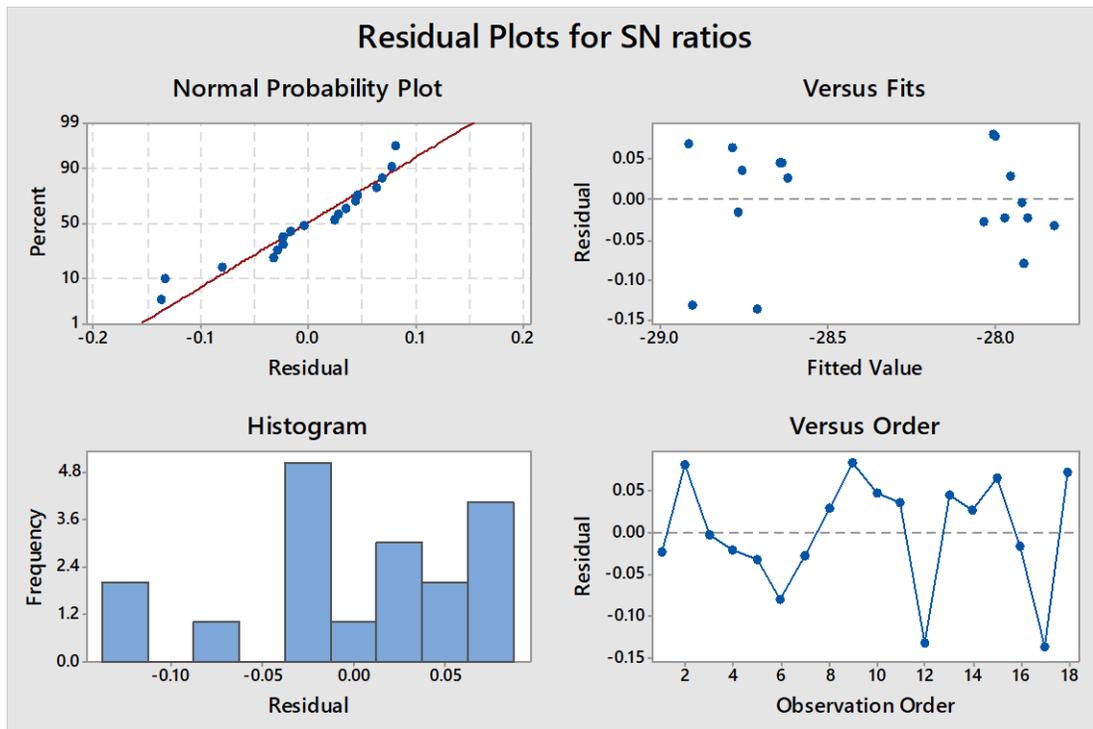


Figura 4-9 Gráficas 4 en 1 para señal a ruido lo menor es lo mejor para tiempo de enfriamiento.

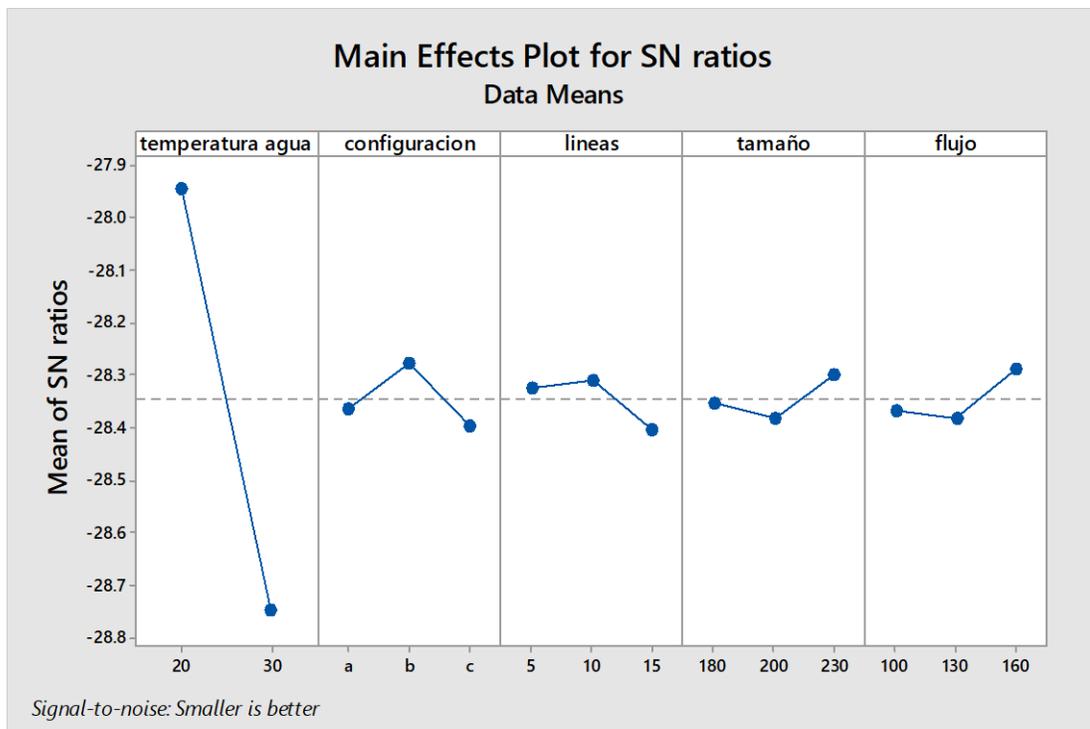


Figura 4-10 Señal a ruido lo menor es lo mejor para tiempo de enfriamiento.

4.7. Resultados a usar para el diseño y construcción del molde de inyección en óptimas condiciones.

Los resultados obtenidos de los diseños de experimentos para el diseño del molde tomando en cuenta una temperatura de ambiente de 20°C, y una presión interna del molde al iniciar el ciclo de inyección de 1 atmosfera son: 3mm de diámetro del orificio de inyección; 38°C de temperatura del molde; configuración b del sistema de enfriamiento; 10mm de diámetro de las líneas del sistema de enfriamiento; 160 cm³/s de flujo del agua; 20°C de temperatura del agua al ingreso; 240°C de temperatura de fusión del material. El factor tamaño del molde, no fue considerado en el estudio de calidad de la pieza moldeada, pero si en el estudio de tiempo de enfriamiento, lo cual no afectó significativamente al resultado; es decir, no se comprobó tener la suficiente evidencia estadística de su contribución. Debido a este resultado, se determinó seleccionar el valor medio del tamaño del molde, 200mm x 200mm, es decir, evitar el tamaño menor de 180mm x 180mm, por no realizar un estudio extra, acerca de esfuerzos mecánicos, y resistencia última de carga en el ciclo de sostenimiento (cierre del molde); así como, evitar el tamaño mayor 230 mm x 230 mm por costos excesivos del material. En la figura 4-11, se puede observar a escala, el dibujo dimétrico del prototipo del molde de inyección, con todo y sus componentes; en la figura 4-12, se muestra la localización de sus componentes, el nombre de cada uno de ellos, la cantidad a utilizar y un probable proveedor, a través de la lista de materiales *BOM (Bill of Material)*. Probablemente, el tamaño del molde sería de suma importancia en los estudios de resistencia y fuerza de cierre, cuando el estudio tratara acerca del ciclo de vida de un molde de inyección; los esfuerzos residuales y periódicos presentes, a las altas presiones que soporta durante el ciclo completo, serían un factor importante para este mencionado y nuevo estudio.

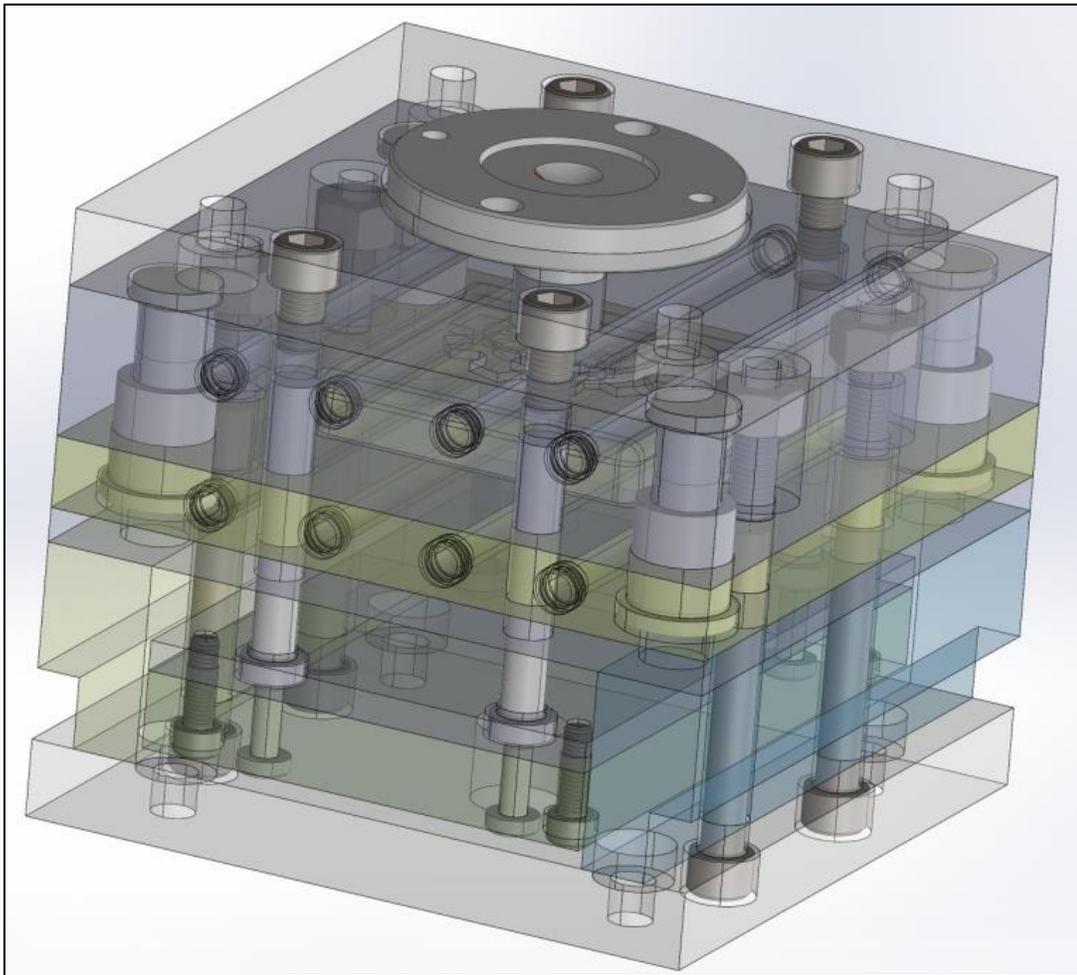


Figura 4-11 Molde de inyección completo, diseñado con los resultados de la óptima configuración, de los mejores niveles de los factores involucrados.

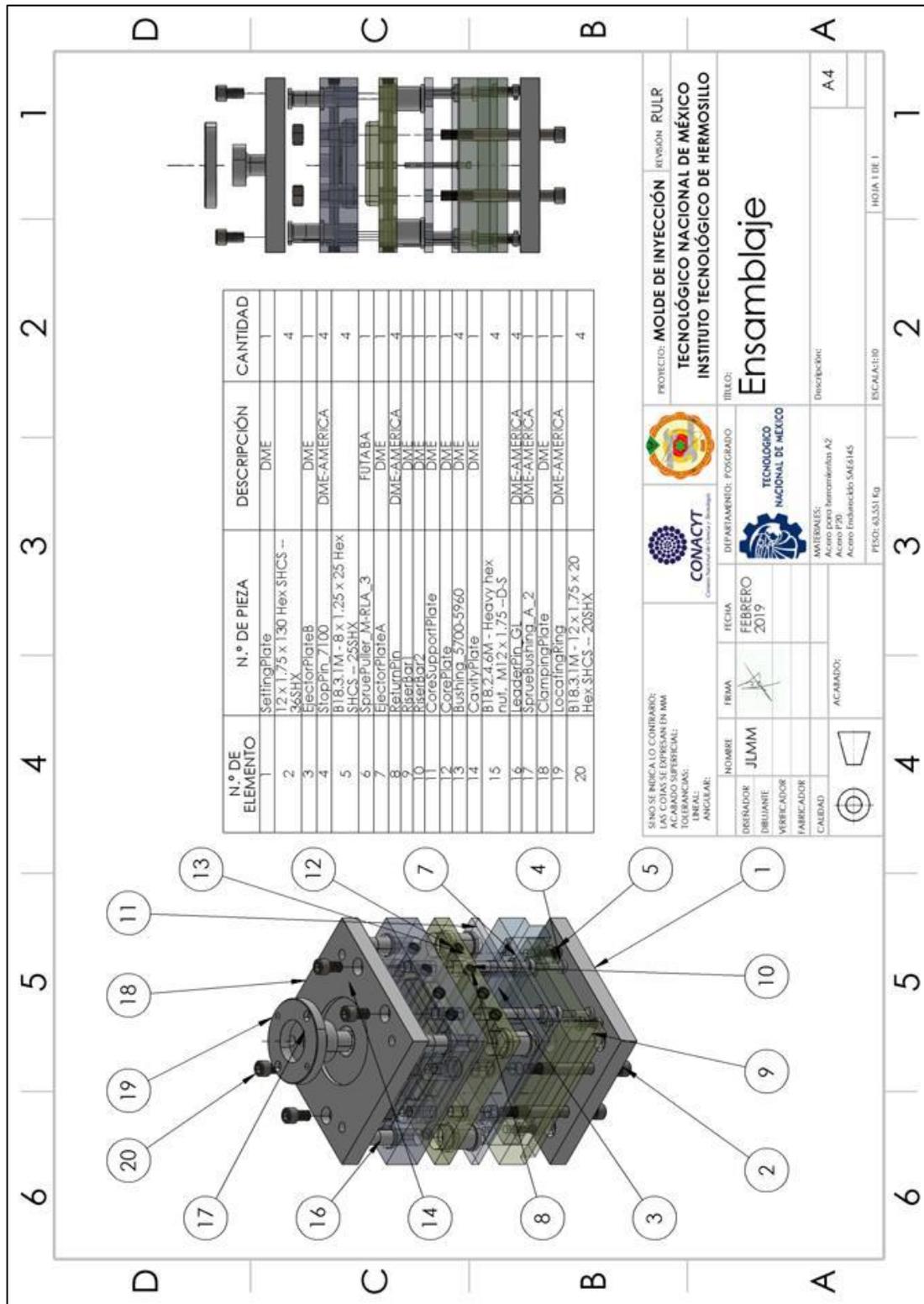


Figura 4-12 Plano de ensamble de los componentes del molde de inyección.

4.8. Resultados del proceso virtual de inyección con la configuración ideal, resultado del *DOE* que evalúa la calidad del producto.

El producto moldeado se puede llenar correctamente con una presión de inyección de 35.7MPa (5181.29Psi), la cual es inferior en 66% del límite de presión de inyección máxima especificado para este material; en la figura 4-13 se muestra la facilidad del llenado, ya que el producto se pinta de color verde, según la escala especificada. Se puede reducir el tiempo de refrigeración, si se reduce el espesor del producto, pero se tendría que ejecutar un análisis adicional, para asegurar que el llenado se realiza dentro del límite de presión de inyección especificado. En la figura 4-14, se muestra el tiempo medio de enfriamiento, la temperatura máxima al final del llenado, se ha mantenido dentro del rango de 10°C de la temperatura de fusión del material (230 a 240°C), por lo que no se tiene riesgo de degradación del plástico. La temperatura de frente de flujo se encuentra dentro del intervalo aceptable, en consecuencia, el llenado y el empaquetado del producto se realizan correctamente.

Las necesidades de presión de inyección se reducen al mínimo, por lo tanto, se consigue una buena apariencia (sin rechupes) e integración de las líneas de soldadura, y se obtiene la garantía de fabricar piezas con óptimas propiedades de calidad; en la figura 4-15, se muestra la calidad de las líneas de soldadura y en la figura 4-16, los posibles rechupes que se podrían producir, ambos indicadores dentro del rango permisible. En la figura 4-17, se muestra el *shear rate* al final del empaquetado, este es una variable importante en el comportamiento reológico del polímero, y base del modelo matemático para la solución por simulación, visualmente, se aprecia como el producto casi en su totalidad, está pintado en color azul, esto indica, el valor mínimo, según su escala. En la figura 4-18, se muestra la contracción en unidades de longitud, el valor máximo de 0.0130mm, está por debajo del 0.05% del volumen real. En la figura 4-19, se muestra el alabeo debido a rechupes, su valor máximo de 0.0859mm; es menos del 0.1% de la dimensión real, por lo tanto, debido a estos resultados, se dice que, se obtiene un producto de excelente calidad.

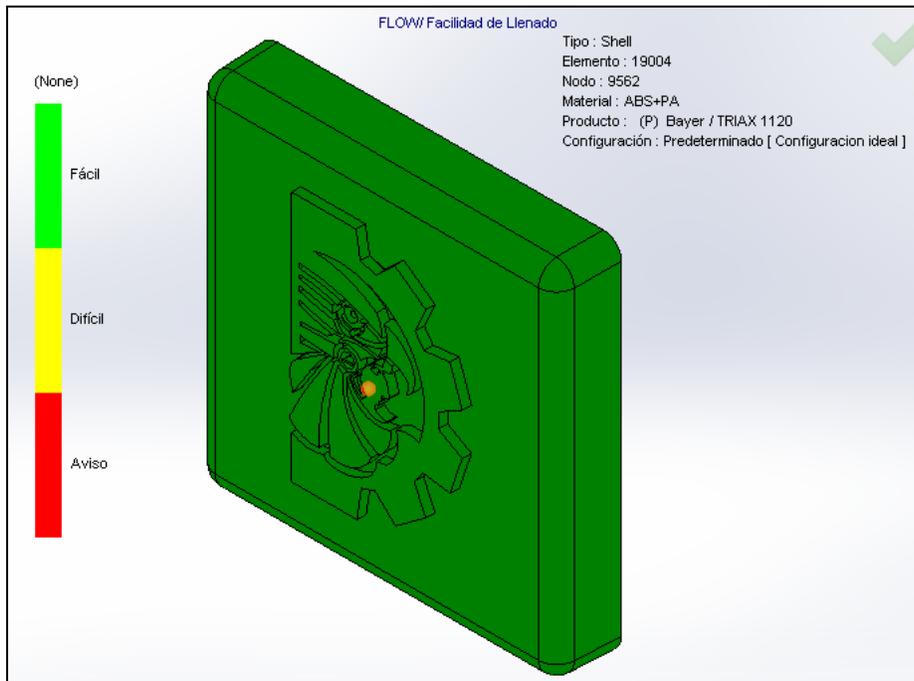


Figura 4-13 Facilidad de Llenado.

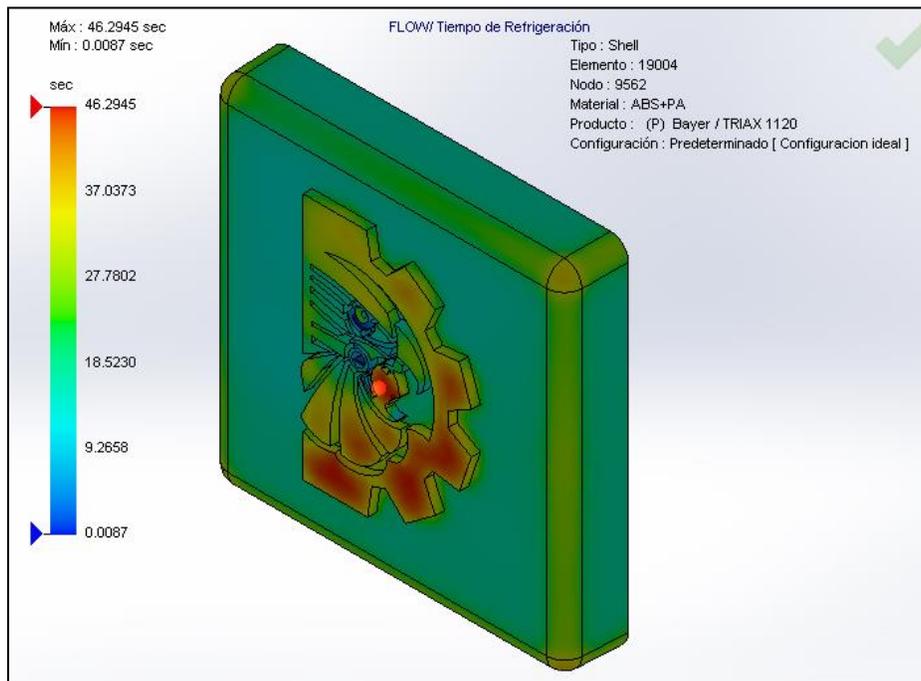


Figura 4-14 Tiempo de refrigeración.

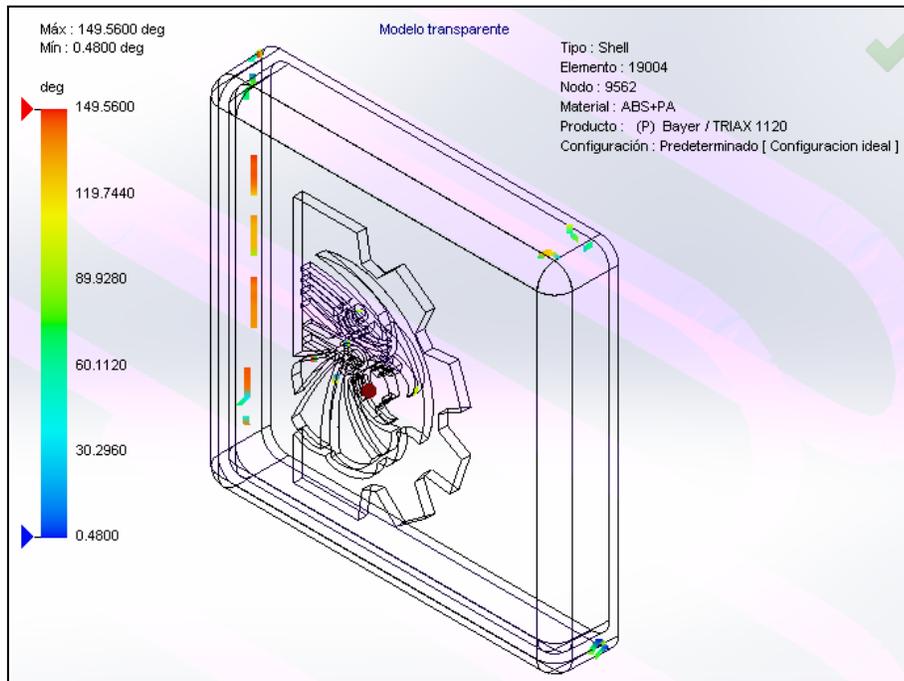


Figura 4-15 Líneas de soldadura.

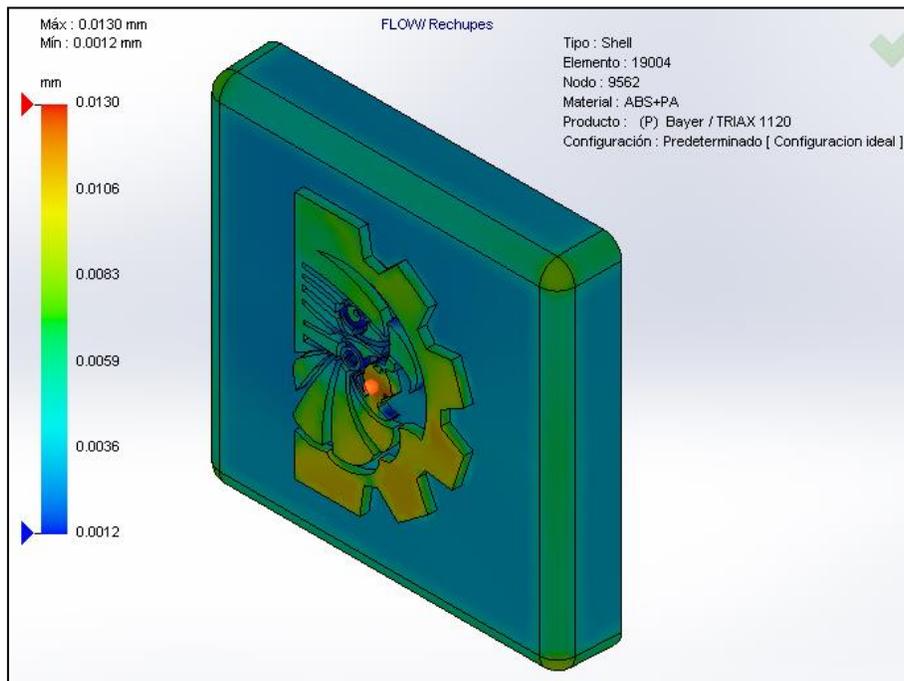


Figura 4-16 Rechupes por debajo del 0.013 mm.

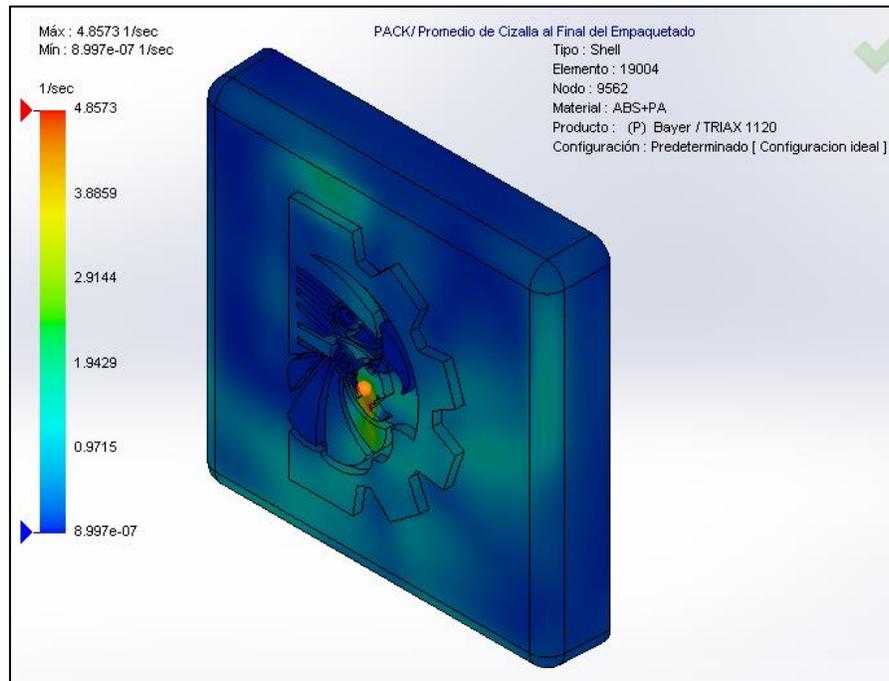


Figura 4-17 Promedio de cizalla al final del empaquetado shear rate.

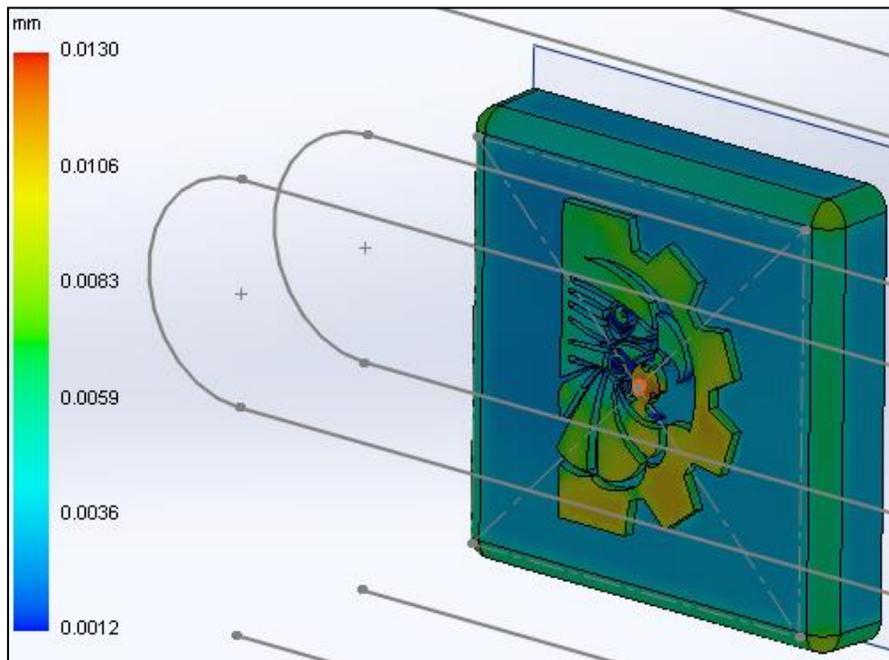


Figura 4-18 Contracción del volumen al final del enfriamiento.

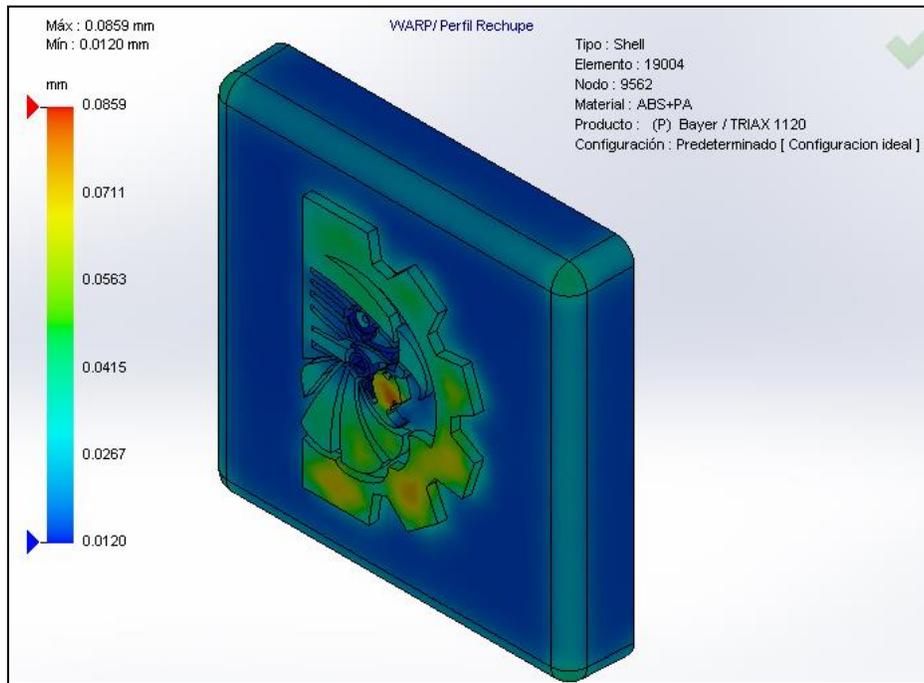


Figura 4-19 Desplazamiento total de alabeo por rechupes.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

En esta investigación, se analizaron seis factores en el proceso de moldeo por inyección. Para la ejecución de la simulación, *Solidworks Plastics®* solamente permite variar algunos parámetros del proceso, la restricción radica en el *solver* que usa el *software*, para resolver el modelo matemático del caso de estudio. De la primera hipótesis, se ha podido determinar sus componentes, y se ha cumplido satisfactoriamente con el diseño del molde, restando aun la cotización; aplicando la metodología propuesta, se comprueba que es posible diseñar desde cero un molde de inyección con características únicas, *Catia V5®* permite modelar en 3D el molde completo, realizar los planos de construcción y desarrollar la manufactura asistida para obtener los códigos para los equipos *CNC*. Aunque la presión de inyección es una respuesta y no un parámetro de entrada, la contribución de este estudio, es que en un proceso real, se puede utilizar la simulación antes de la puesta en marcha de la máquina de inyección, y determinar de antemano los parámetros de entrada del proceso, evitando así desperdicio, aceptando la segunda hipótesis planteada. La tercera hipótesis, que dice acerca de la fabricación del molde en taller, no se pudo comprobar por cuestión de tiempo. La cuarta hipótesis que dice acerca de capacitar al personal referente al diseño, manufactura, y fabricación de moldes, utilizando la simulación virtual, también fue aceptada, se desarrolló un programa técnico de estudio a nivel superior, donde la base, es la metodología propuesta y el objetivo principal, es que el estudiante y trabajador de la compañía, le permita realizar reparaciones eficientes en taller de moldes más rápido, y mejorar sus indicadores de desempeño.

Debido al cambio de jefe de recursos humanos de la compañía *TE Connectivity*, y de otros cambios de mandos medios, la metodología para el diseño y manufactura de moldes propuesta, no se ha implementado en su totalidad directamente en el área de moldeo, pero esta tesis demuestra su funcionalidad. Los objetivos específicos se cumplieron, al determinar los mejores niveles de los factores involucrados, en el diseño

de un molde de una única cavidad, calcular la entrada de inyección, el tiempo de enfriamiento, el ángulo de desmolde y el esfuerzo cortante por cizallamiento; y realizar un análisis de los parámetros indicadores de la calidad del producto, como son: la contracción, la deformación por alabeo, rechupes, líneas de soldadura; nos determinan los planos de manufactura, de los componentes del molde de inyección, localizados en el apartado Anexos de este trabajo.

5.2. Recomendaciones

Para estudios futuros es recomendable tener otros factores y otros niveles de control, todo depende de lo que se quiere investigar. Como continuidad a los resultados de esta investigación, sería interesante manufacturar el molde físicamente, y usarlo en una máquina de inyección para validar resultados. Sería trascendental y novedoso, investigar los esfuerzos mecánicos y térmicos (incluyendo esfuerzos residuales), en los platos que componen el molde de inyección, durante el proceso de inyección. Por último, sería de gran contribución, poder evaluar diferentes tipos de materiales (ejemplo, polímeros), en la construcción de los moldes, y no restringirlos a los aceros, ejemplo, como el *P20* usado en esta investigación.

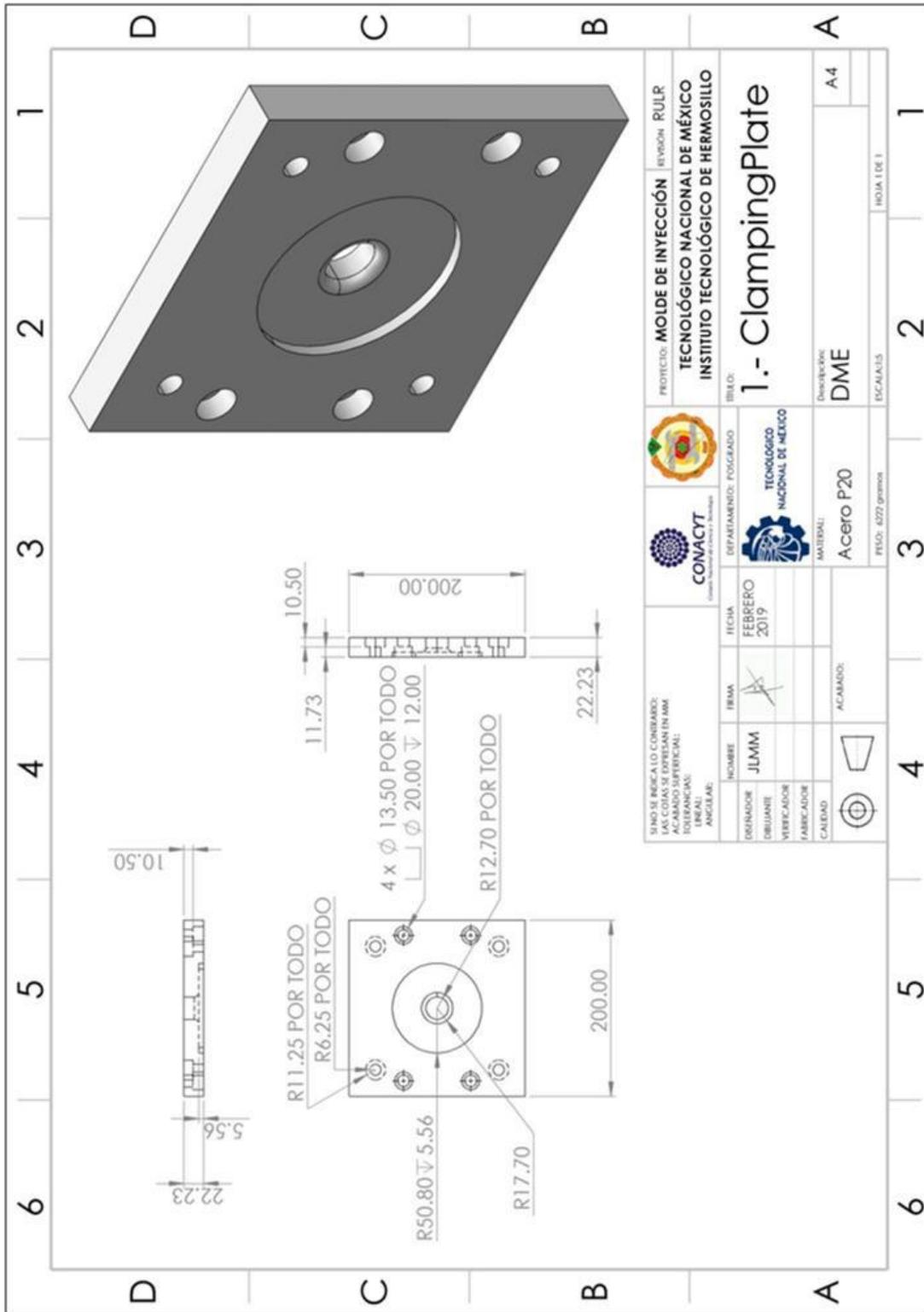
BIBLIOGRAFÍA

- Bayer Corporation. (2000). *Part and Mold Design - A Design Guide*. Bayer MaterialScience, 174. Retrieved from <http://www.bayer.com/polymers-usa>
- Bayer Corporation. (2001). *Plastics Division; TRIAX® 1120 (Dry), ABS+PA*.
- Beaumont, J. (2004). *Runner and Gating Design Handbook*. Cincinnati, Ohio: Hanser Gardner Publications, Inc.
- Berti, G., & Monti, M. (2013). *A virtual prototyping environment for a robust design of an injection moulding process*. Computers and Chemical Engineering, 54, 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.04.005>
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2012). *Mecánica de Fluidos, Fundamentos y Aplicaciones*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Chanda, M., & Roy, S. K. (2007). *Plastics Technology Handbook*. (D. Hudgin, Ed.) (Fourth Ed.). Boca Raton, FL.: Taylor & Francis Group, LLC.
- Chattopadhyay, A. B., & Paul, S. (2005). *Manufacturing Process II*. Retrieved November 17, 2018, from <http://www.infocobuild.com/education/audio-video-courses/mechanical-engineering/manufacturing-process-2-iit-kharagpur.html>
- DSM Engineering Plastics Corporation. (2000). *Designing for performance and value*, Retrieved from <http://www.dsmepl.com>
- Dupont Corporation. (2000). *General Design Principles for DuPont Engineering Polymers Design Guide Module I*. Retrieved from <http://www.dupont.com/enggpolymer>

- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna* (Tercera Edición ed.). (C. R. Cordero Pedraza, J. Enriquez Brito, & J. E. Murrieta Murrieta, Trads.) México, D.F., México: Mc-Graw Hill, Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Jahan, S. A., Wu, T., Zhang, Y., El-Mounayri, H., Tovar, A., Zhang, J., Lee, W. H. (2016). *Implementation of Conformal Cooling & Topology Optimization in 3D Printed Stainless Steel Porous Structure Injection Molds*. *Procedia Manufacturing*, 5, 901–915. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.077>
- Jameson, E. C. (1983). *Electrical Discharge Machining*. Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers. Retrieved from www.sme.org
- Jamsheed, M., Rahman, M. A., Moyeed, M. A., & Ahmed, G. M. S. (2015). *Design and Analysis of Plastic Injection Mould for Cam Bush with Submarine Gate*. *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), 2083–2093. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.203>
- Kalpakjian, S., & Steven R., S. (2014). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* (Séptima Edición ed., Vol. 1). (J. E. Murrieta Murrieta, Trad.) México, D.F., México: Pearson Educational, Inc.
- Kazmer, D. O. (2007). *Injection Mold Design Engineering*, (August 2007), 37–66. <https://doi.org/10.3139/9783446434196>
- Krishnaiah, K., & Shahabudeen, P. (2012). *Applied Design of Experiments and Taguchi Methods*. New Delhi, India: Phi Learning Private Limited.
- Matarrese, P., Fontana, A., Sorlini, M., Diviani, L., Specht, I., & Maggi, A. (2017). *Estimating energy consumption of injection moulding for environmental-driven mould design*. *Journal of Cleaner Production*, 168, 1505–1512. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.144>

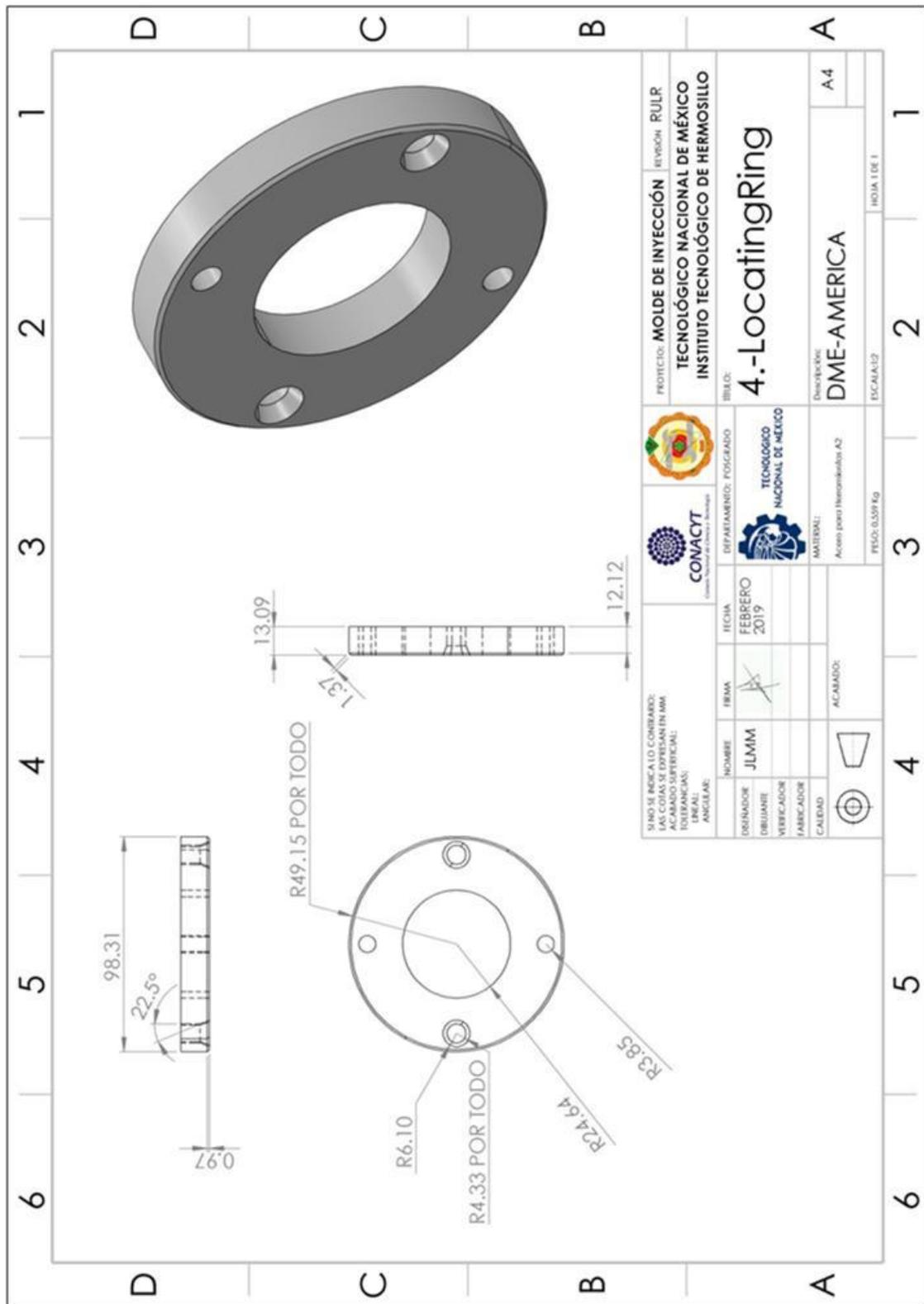
- Mathews, P. G. (2005). *Design of Experiments with Minitab*. (A. Hytinen, Ed.) Milwaukee, Wisconsin: American Society for Quality, Quality Press.
- Menges, G., & Mohren, G. (1983). *Moldes para inyección de plásticos* (3rd. Ed.). México, D. F.: Ediciones G. Gili, S.A.
- Mennig, G., & Stoeckert, K. (2013). *Mold-Making Handbook* (3rd Ed.). Cincinnati, Ohio: Hanser Publications. <https://doi.org/10.3139/9781569905500.fm>
- Mercado-Colmenero, J. M., Rubio-Paramio, M. A., Vizan-Isope, A., & Martín-Doñate, C. (2017). *A new procedure for the automated design of ejection systems in injection molds*. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, (December 2016), 68–85. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.12.006>
- Plastics Europe. (2018). *Plastics – the Facts 2017*, p. 44.
- Taguchi, G., Chowdhury, S., & Wu, Y. (2005). *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. (S. Taguchi & H. Yano, Eds.). Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc.
- Tony, B. J. A. R., Karthikeyan, S., & Alex, B. J. A. R. (2017). *Injection Mold Design Parameters Calculation Using Pro/Plastic Advisor for Spur Gear*. *Materials Today: Proceedings*, 4(10), 11118–11125. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.08.075>

ANEXOS

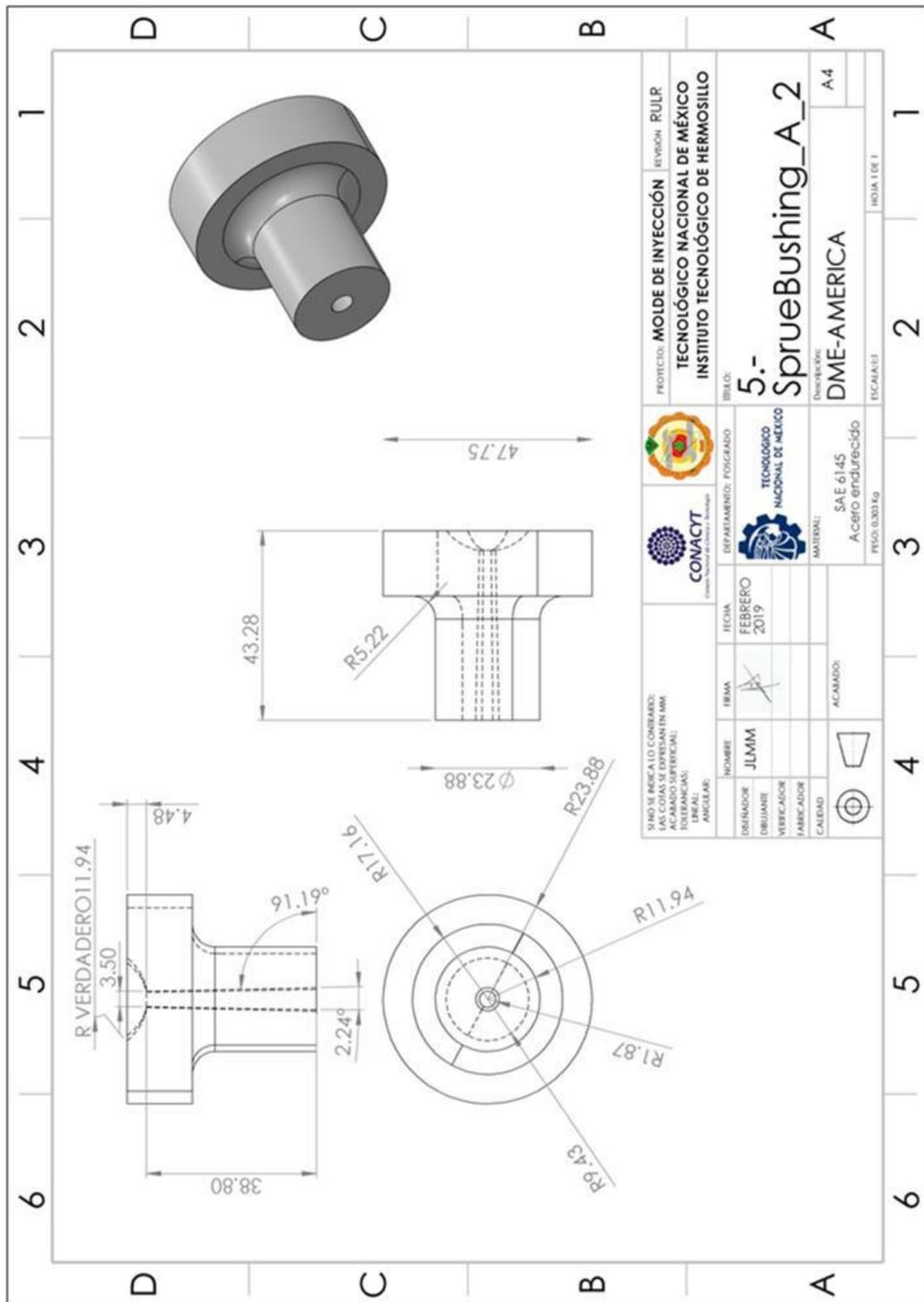


Anexo 1 Plano de construcción clamping plate

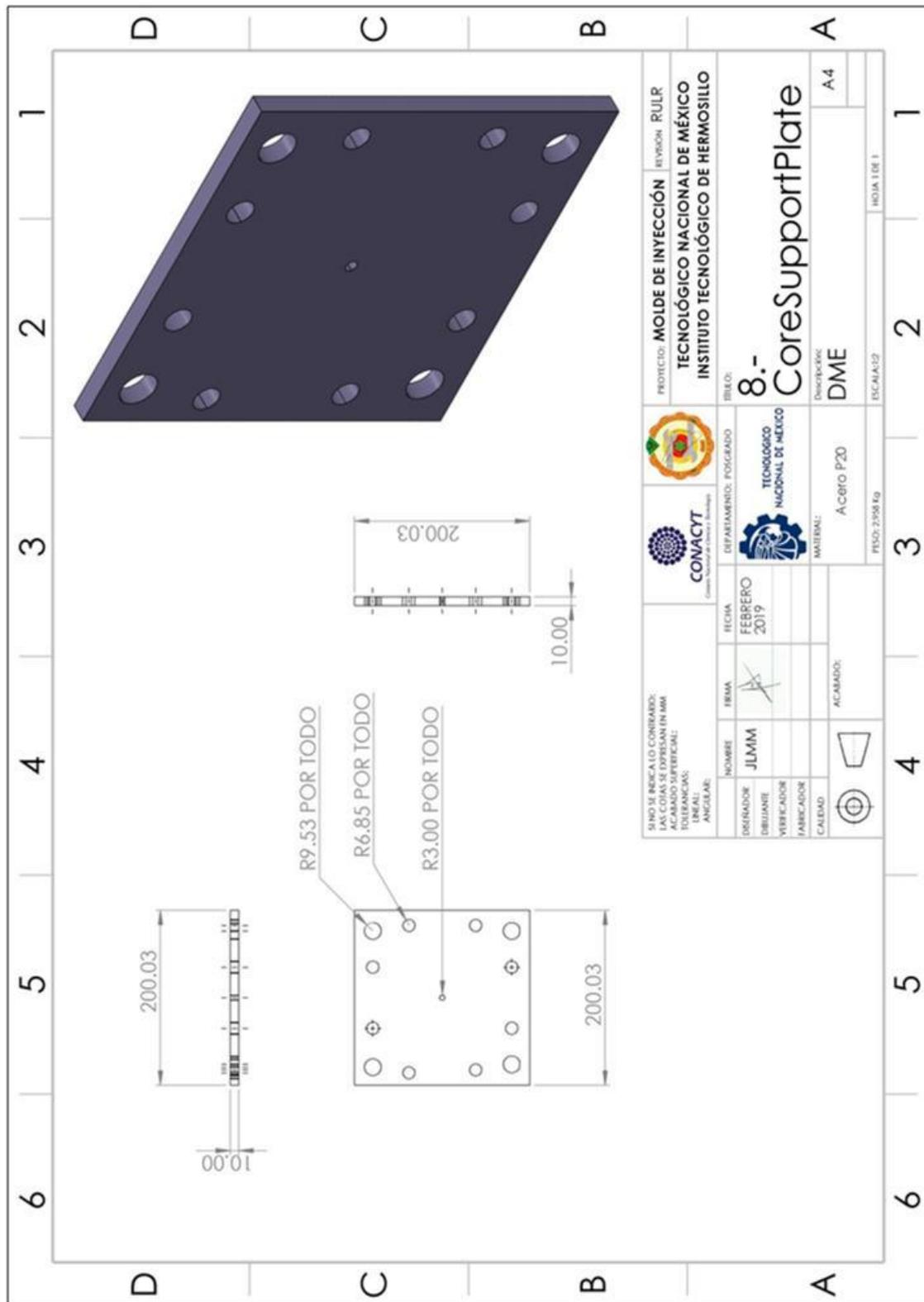
PROYECTO: MOLDE DE INYECCIÓN (REVISIÓN: RUIR) TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO INSTITUTO TECNOLÓGICO DE HERMOSILLO		DEPARTAMENTO: FOSGRADO TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO		FECHA: FEBRERO 2019	
TÍTULO: 1.- ClampingPlate		MATERIAL: Acero P20		DESCRIPCIÓN: DME	
ESCALA: 1:1		PESO: 6272 gramos		HOJA 1 DE 1	
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM TOLERANCIAS: ANGULAR:		NOMBRE: JLMJM		FIRMA:	
DISEÑADOR: VERIFICADOR: FABRICADOR: CALIDAD:		ACOMODADO:		ACABADO:	



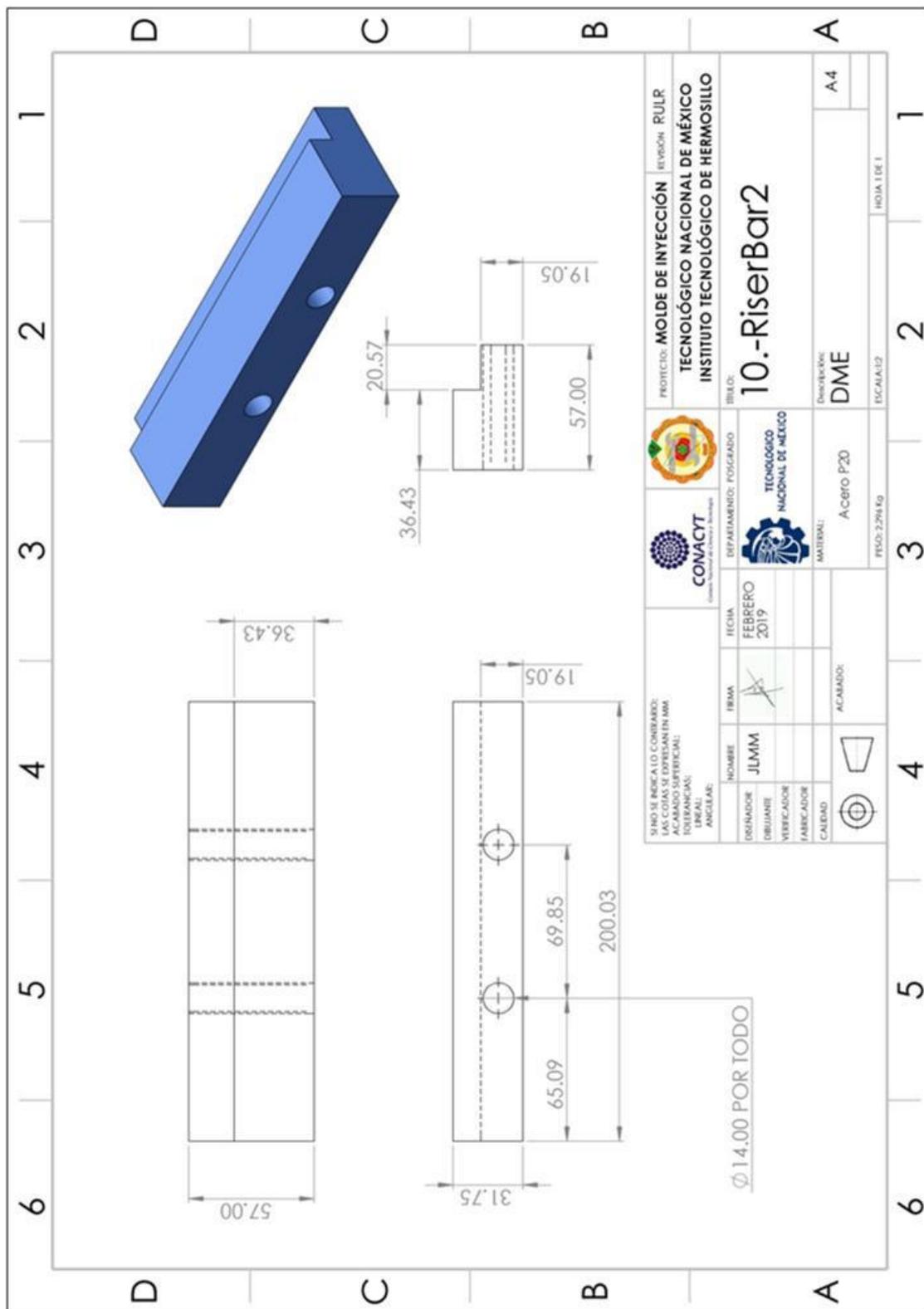
Anexo 4 Plano de construcción locating ring



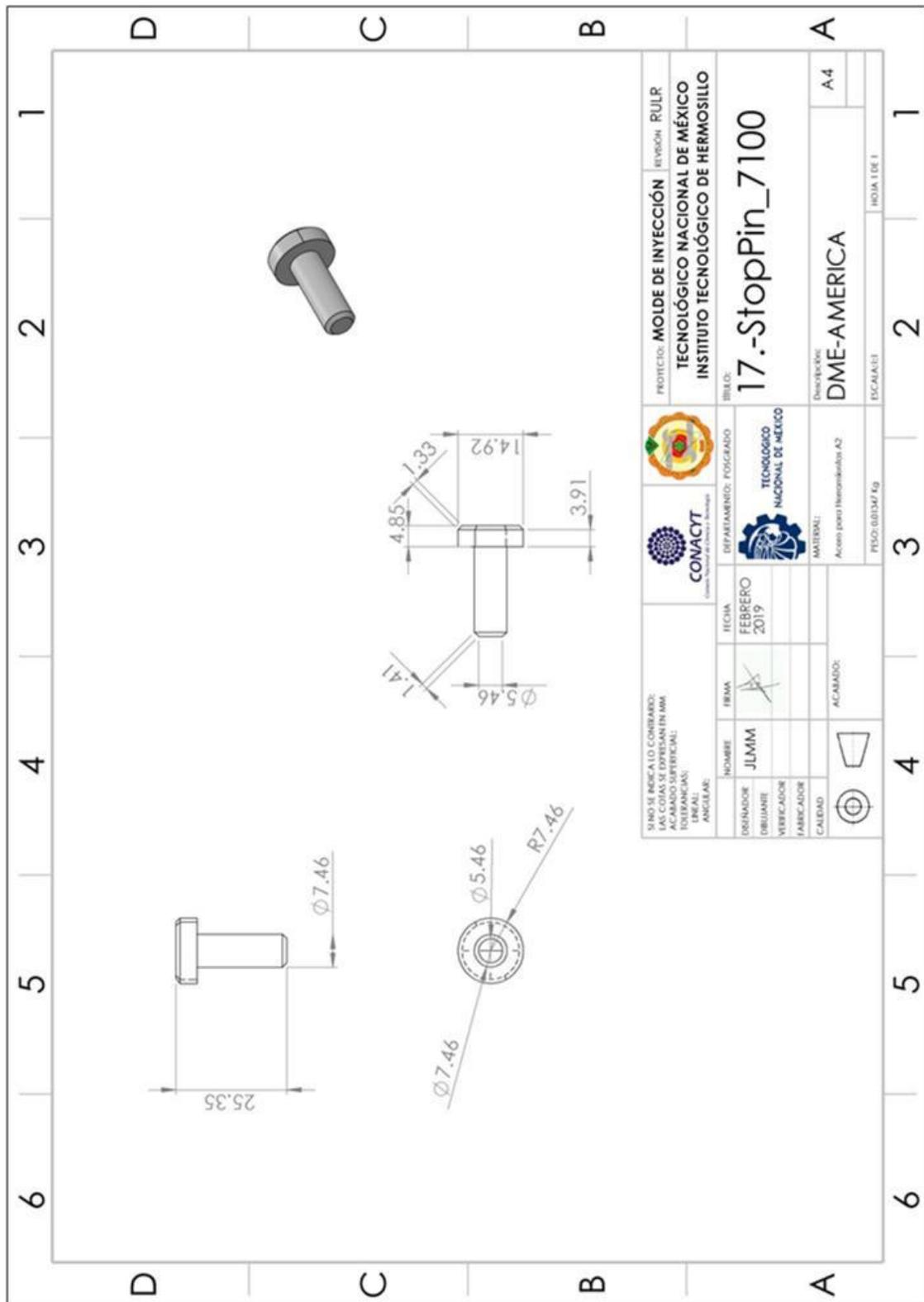
Anexo 5 Plano de construcción sprue bushing



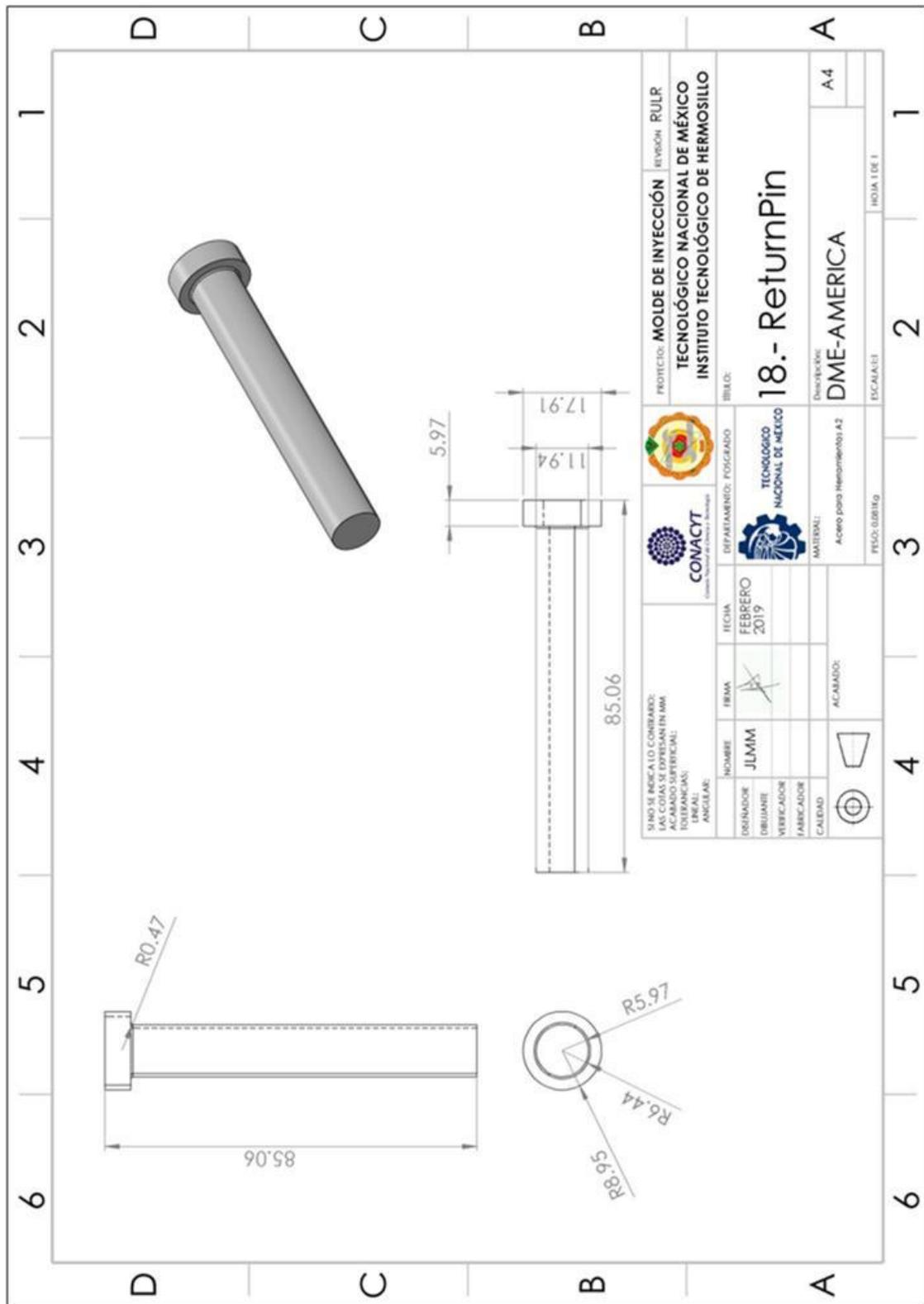
Anexo 7 Plano de construcción core support plate



Anexo 9 Plano de construcción riserbar 2



Anexo 14 Plano de construcción stop pin



Anexo 15 Plano de construcción return pin

