

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

Diseño y construcción de un dado de extrusión para la producción de  
probetas de polímeros

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Sebastián Elías Acosta Andrade

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis abuelos, Helia y Augusto, que han sido como una segunda pareja de padres durante la mayor parte de mi vida. A mi abuela por su amor incondicional y su apoyo durante toda mi carrera, y a mi abuelo por sus consejos y su carácter, un ejemplo personal y profesional que he admirado durante toda mi vida. Esto es para ustedes.

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi profundo agradecimiento a padres, Claudia y Omar por su paciencia, apoyo, amor y enseñanzas durante toda mi vida y especialmente en mi etapa universitaria.

A mis tías Lorena y Karina por sus consejos y su amor, por siempre recibirme en sus hogares de la forma más cálida posible.

A mi otro papá, Vinicio, por sus consejos y sustento, especialmente durante la duración de este proyecto.

A mi hermano Nicolás, por su paciencia y sentido del humor, que fue un alivio en días pesados.

A mis amigos, tanto de la universidad como del colegio, con los que he vivido momentos y experiencias inolvidables, gracias por escucharme y apoyarme a lo largo de mi carrera.

Al ingeniero Eduardo Castillo, por guiarme con paciencia y amabilidad durante el transcurso del proyecto.

Al ingeniero Fausto Maldonado por su generosidad y altruismo durante la etapa de construcción.

A la ESPOL, al personal docente y administrativo por darme la oportunidad de convertirme en ingeniero.

## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Sebastián Elías Acosta Andrade* doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Sebastián Acosta

## EVALUADORES



---

**MSc. Jorge Marcial**  
PROFESOR DE LA MATERIA



---

**PhD. Eduardo Castillo**  
PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

El proceso de extrusión es un tipo de conformado de polímeros, el cual consiste en forzar un material a través de una sección determinada con el fin de obtener un producto largo y continuo cuya sección transversal se asemeje a la forma del pasaje conductor. El laboratorio de plásticos de la facultad de Mecánica de la ESPOL requiere el diseño y construcción de un dado de extrusión para producir probetas de plástico que serán utilizadas en ensayos mecánicos. Actualmente existe un modelo empleado para este propósito, sin embargo, presenta problemas de diseño que no permiten extruir las probetas a la razón óptima de funcionamiento de la extrusora. Para resolver el problema, se seleccionó polietileno de baja densidad como material de trabajo y se modeló su trayectoria a través de la cavidad del dado empleando el modelo de viscosidad de Cross, ya que los polímeros son fluidos no newtonianos, cuya viscosidad es variante con la tensión de corte, determinando que existió un gradiente de presión significativo que provocó atascamiento y forzó el sistema de sujeción del dado. Un diseño mejorado fue propuesto, en el cual se pudo reducir el gradiente de presión a aproximadamente la mitad del valor original y se estimuló el flujo de velocidad a la salida. Se propone una metodología en caso de que se consideren condiciones de energía y se recomienda que la fabricación sea de aluminio por su facilidad de mecanización y calidad superficial.

**Palabras Clave:** extrusión, polietileno de baja densidad, Cross, viscosidad, presión.

## **ABSTRACT**

*The extrusion process is a type shaping process, which consists of forcing a material through a certain section in order to obtain a long and continuous product whose cross section resembles the shape of the passage. The plastics laboratory of the Mechanical Engineering Faculty of ESPOL requires the design and construction of an extrusion die to produce plastic specimens that will be used in mechanical tests. There is currently a model used for this purpose, however, it has design problems that do not allow the sheets to be extruded at the optimum operating rate of the extruder. To solve the problem, low density polyethylene was selected as work material and its trajectory through the die cavity was modeled using the Cross viscosity model, since polymers are non-Newtonian fluids, whose viscosity is variant with shear rate, it was determined that there is a significant pressure gradient that caused clogging and forced the fixing flange system. An improved design was proposed, in which the pressure gradient could be reduced to approximately half of the original value and velocity flow was stimulated. A methodology is proposed in case that energy conditions were to be considered and it is recommended selecting aluminum to manufacture the die due to its ease of mechanization and surface quality.*

**Keywords:** *extrusion, low density polyethylene, Cross, viscosity, pressure.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA .....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
ÍNDICE DE PLANOS.....	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1.    Introducción .....	1
1.1    Descripción del problema .....	2
1.2    Justificación del proyecto .....	2
1.3    Objetivos .....	2
1.3.1    Objetivo General .....	2
1.3.2    Objetivos Específicos.....	2
1.4    Marco teórico.....	2
1.4.1    Diseño del molde .....	2
1.4.2    Optimización automática y avances en CFD .....	3
1.4.3    Modelamiento del fluido .....	4
CAPÍTULO 2.....	9
2.    Metodología .....	9
2.1    Metodología de diseño .....	9
2.2    Condiciones de operación .....	9
2.3    Selección de materiales .....	9
2.3.1    Selección del polímero.....	9
2.3.2    Selección del material para el molde .....	12
2.4    Selección del modelo matemático .....	13
2.4.1    Viscosidad dependiente de la velocidad de corte .....	13
2.4.2    Viscosidad dependiente de la temperatura .....	14
2.5    Alternativas de diseño .....	15
2.6    Estado de la cavidad original.....	16
2.7    Creación de una nueva forma .....	17

2.8	Parámetros de la simulación .....	18
CAPÍTULO 3.....		19
3.	Resultados y Análisis.....	19
3.1	Selección del Modelo Matemático .....	19
3.2	Validación del Modelo Matemático .....	21
3.3	Diseño detallado.....	23
3.4	Simulación del diseño original .....	24
3.5	Simulación del diseño dado mejorado.....	25
3.6	Selección del material del molde .....	27
3.7	Ciclo de fabricación .....	28
3.8	Dilatación térmica .....	29
3.9	Análisis de Costos .....	30
CAPÍTULO 4.....		31
4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	31
4.1	Conclusiones .....	31
4.2	Recomendaciones.....	33
BIBLIOGRAFÍA.....		35
APÉNDICES.....		37

## **ABREVIATURAS**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
AISI	American Iron and Steel Institute
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
PVC	Polyvinyl chloride
PE	Polyethylene
LDPE	Low Density Polyethylene
HDPE	High Density Polyethylene
LLDPE	Linear Low-Density Polyethylene
PEBD	Polietileno de baja densidad
PEAD	Polietileno de alta densidad
PEBDL	Polietileno de baja densidad lineal
CFD	Computational Fluid Dynamics
RPM	Revoluciones por minuto
WLF	Williams-Landel-Ferry Equation
CAD	Computer Assisted Design
CAM	Computer Assisted Manufacturing

## SIMBOLOGÍA

kg	Kilogramo
h	Hora
min	Minutos
g	gramo
W	Watts
J	Joules
K	Grados Kelvin
°C	Grados Celsius
Pa	Pascal
m	Metro
mm	Milímetro
$V_x$	Componente del eje x de la velocidad
$\eta$	Viscosidad Dinámica
$\sigma_{yx}$	Esfuerzo cortante
$\dot{\gamma}_{yx}$	Velocidad de corte
$\eta_0$	Viscosidad de corte cero
$\eta_\infty$	Viscosidad de corte infinita
$n$	Índice de potencia
$\lambda$	Constante de tiempo
$\tau^*$	Esfuerzo de corte crítico
$a$	Índice de Yasuda
$De$	Número de Deborah
$G$	Módulo de rigidez
L	Longitud
D	Diámetro
$E_0$	Energía de activación

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Elementos básicos de una extrusora de tornillo simple.....	1
Figura 1.2 Datos experimentales de las viscosidades de corte cero e infinita para una solución polimérica .....	6
Figura 2.1 Diagrama del proceso de diseño .....	9
Figura 2.2 Estructura química de polietileno puro .....	10
Figura 2.3 Curva de Viscosidad para el PEBD LD700A .....	12
Figura 2.4 Dado extrusor de filamentos.....	15
Figura 2.5 Sección transversal de la probeta .....	16
Figura 2.6 Cavidad a la entrada del molde original .....	17
Figura 2.7 Cavidad interna del molde original .....	17
Figura 2.8 Diseño de forma del dado mejorado.....	18
Figura 2.9 Flujo másico en función de los RPM del tornillo .....	18
Figura 3.1 Curvas de Viscosidad para distintos modelos matemáticos: Potencia (gris), Cross (amarillo), Carreau-Yasuda (verde).....	19
Figura 3.2 Curva de Viscosidad para el modelo de Carreau-Yasuda.....	20
Figura 3.3 Curva de Viscosidad para el modelo de Cross.....	21
Figura 3.4 Caída de presión en FLUENT .....	22
Figura 3.5 Caída de presión en CFX .....	23
Figura 3.6 Diseño de la cavidad del modelo de dado mejorado .....	23
Figura 3.7 Caída de presión en la cavidad interna del dado original.....	24
Figura 3.8 Distribución de velocidad en el plano medio de la cavidad del dado original.....	25
Figura 3.9 Mallado del dominio del fluido .....	25
Figura 3.10 Caída de presión del flujo dentro de la cavidad del dado mejorado .....	26
Figura 3.11 Distribución de la velocidad del flujo en la sección media dentro de la cavidad del dado mejorado.....	27
Figura 3.12 Distribución de la viscosidad aparente en la sección media dentro de la cavidad del dado mejorado.....	27
Figura 3.13 Sección transversal del dado de extrusión .....	29
Figura 3.14 Fotografía del dado mejorado.....	29

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Propiedades de la resina utilizada .....	11
Tabla 2.2 Datos del reómetro utilizado .....	11
Tabla 2.3 Matriz de decisión del material para el dado .....	13
Tabla 2.4 Matriz de decisión del modelo matemático de viscosidad para dependencia de velocidad de corte .....	14
Tabla 2.5 Matriz de decisión del modelo matemático de viscosidad para dependencia de temperatura .....	15
Tabla 3.1 Datos geométricos y reológicos del modelo empleado por Vlachopoulos y Scott .....	22
Tabla 3.2 Análisis de costos del material .....	28
Tabla 3.3 Costo de las herramientas utilizadas .....	30

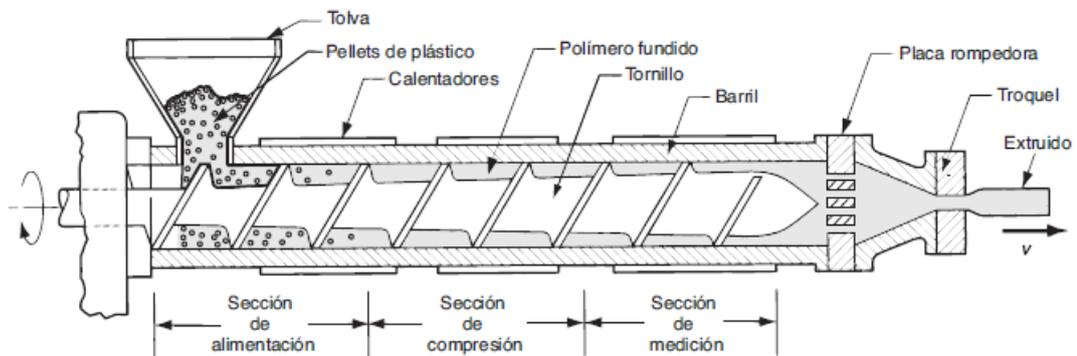
# ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Dado de extrusión mejorado (apéndices).

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

La extrusión es un tipo de proceso de conformado de polímeros (aunque también se puede extruir metales y cerámicos), el cual consiste en forzar a un material a fluir a través de una determinada sección (perpendicular a la dirección de flujo), con la finalidad de obtener un producto largo y continuo cuya sección transversal se asemeje a la forma del pasaje conductor. Este proceso se emplea para la producción continua de tuberías, ductos, mangueras, hojas, películas, filamentos continuos, formas estructurales, donde se cortan los extruidos de acuerdo a la longitud deseada. En el proceso de extrusión, el material ingresa en forma de pellets o polvo granular, a través de una tolva o boquilla, en donde se calienta (mediante calentadores eléctricos externos) y funde para que fluya por la cavidad de un tornillo giratorio que lo empuja para hacerlo pasar por la abertura de un molde o troquel, cuyo diseño varía dependiendo de la forma particular del extruido. [1]



**Figura 1.1 Elementos básicos de una extrusora de tornillo simple [1]**

El equipo utilizado en este proyecto, es una extrusora de tornillo simple donada a la ESPOL por la compañía AMANCO PLASTIGAMA S.A. (Actualmente PLASTIGAMA WAVIN), diseñada originalmente para extruir tuberías PVC. En 2008 fue rehabilitada por Ferret J. [2], y se emplea actualmente para extruir piezas utilizadas en ensayos e investigación, introduciendo Polietileno como material base. El alcance de este proyecto consiste en modelar el flujo de polietileno a través de un dado de extrusión, diseñar y construir una forma adecuada para la cavidad de este, de tal forma que produzca probetas de las dimensiones requeridas para ensayos mecánicos y a una tasa óptima de acuerdo a las condiciones de operación de la extrusora.

## **1.1 Descripción del problema**

La facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, FIMCP requiere el diseño y construcción de un dado de extrusión para la producción de probetas de polímeros. El laboratorio de Plásticos de la FIMCP cuenta actualmente con un modelo empleado para esta finalidad, sin embargo, este dado no permite la producción de probetas a la razón óptima de funcionamiento de la línea extrusora de plásticos.

## **1.2 Justificación del proyecto**

El laboratorio de materiales plásticos de la FIMCP necesita producir probetas de un material polímero empleada para ensayos mecánicos. Actualmente, estas probetas son fabricadas a partir de varios filamentos del material producidos por un dado y una máquina extrusora, y luego son compactados para tomar la forma final de la probeta mediante una prensa. Es importante para la FIMCP el diseño y construcción de un dado de extrusión que omita el proceso de prensado y permita producir las probetas de forma automática y eficiente.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar y construir un dado de extrusión que permita la producción óptima de probetas de plástico para ensayos mecánicos.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Analizar el funcionamiento del dado actual y concluir las razones por las cuales éste no funciona a las condiciones de operación establecidas.
2. Diseñar el dado de extrusión utilizando herramientas de modelado computacional.
3. Realizar rectificaciones mecánicas al dado actual o fabricar uno nuevo.
4. Realizar ensayos de operación para verificar la mejora de rendimiento del dado.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Diseño del molde**

Antes de la era tecnológica, el diseño de los moldes de extrusión implicaba un costo significativo dentro del proceso de producción (aproximadamente la mitad de los costos totales según JFT Pittman [3]) debido a la naturaleza

iterativa del proceso de fabricación de prototipos físicos necesarios para cumplir con la forma del producto.

La introducción de métodos computacionales ha representado una reducción significativa en los costos dentro de la industria de procesamiento de polímeros, y ha dado lugar a numerosas investigaciones para la optimización del diseño de la herramienta de extrusión [4]. Sin embargo, sigue dependiendo en su gran mayoría de la experiencia y habilidad del diseñador, cuya tarea debe ser obtener un producto de la mejor calidad, a la mejor tasa de producción, con precisión dimensional, estética y propiedades mecánicas óptimas, anticipando efectos de post extrusión y asegurando una tasa de flujo uniforme a la salida y control sobre la caída de presión total. [5]

Se han publicado varios artículos detallando el procedimiento de diseño de moldes mediante el método de elementos finitos, como el troquel araña diseñado y fabricado por Kuzilos et al. [6] para producir tuberías de 32 mm en el que se comparan los datos de la simulación y los experimentales, concluyendo que el método de fluido generalizado newtoniano mediante el modelo de Carreau-Yasuda es adecuado para describir la reología del fluido (polietileno de alta densidad), sin embargo, se presentaron grandes diferencias en las temperaturas debido a la fallida asunción de que existen condiciones adiabáticas.

Choudary & Kulkarni [7] realizaron una simulación comparativa entre 2 diseños distintos de molde para extruir espuma de poliestireno, tomando en cuenta los mismos efectos de viscosidad y también de temperatura, en el que concluyeron que un efecto de “percha” en el que la curva de perfil del dado es más suave, hace que la distribución de velocidades sea más uniforme a la salida, sin embargo se recomienda que la caída de presión sea máxima en la región de salida, y el efecto de “percha” no contribuye en este aspecto. La distribución de temperaturas fue casi la misma para ambos diseños.

#### **1.4.2 Optimización automática y avances en CFD**

El proceso de diseño del molde requiere una gran inversión de tiempo, incluso con la ayuda de los métodos computacionales, por lo que se han desarrollado nuevos métodos de optimización geométrica automática

(especialmente en la región de salida) mediante algoritmos iterativos, para corregir los problemas de distribución de flujo, caída de presión o temperatura.

El proceso de optimización se basa en la solución de un problema matemático específico, que se define: especificando una o varias funciones objetivo, cuya minimización permite mejorar el rendimiento del dado; variables de diseño, que generalmente implican dimensiones específicas en la geometría del diseño; y variables de comportamiento, que permite eliminar opciones de diseño que son innecesarias o no aceptables según el requerimiento. Actualmente, varios programas de CFD incluyen un paquete de optimización que permiten la optimización del molde basado en el balance de flujo, como el empleado en este trabajo (ANSYS Polyflow) que incluso provee un método de diseño inverso basado en la forma final de la pieza requerida, ya que incorpora pre y post procesadores de gran capacidad. Este procedimiento de diseño es empleado mayormente en extrusión de perfiles. [3]

Investigaciones utilizando algoritmos de optimización se han realizado de forma exitosa, como es el caso de Pradeep [8], en donde plantea estrategias para asegurar flujo uniforme a la salida del dado y para comprobar la efectividad de un código desarrollado por Plastic Flow LLC, que permite una optimización automática del diseño del molde. Otro método para el mismo propósito fue propuesto por Lebaal et al. [9] en el que desarrolló un procedimiento de optimización para un troquel de percha basado utilizando software que aplicaba interpolación de Kriging y algoritmo SQP con la finalidad de obtener una distribución uniforme de velocidad a la salida. Este requerimiento es uno de los más comunes en el diseño de moldes para perfiles, puesto que, si la distribución de velocidad no es uniforme, puede afectar el espesor a lo ancho de la matriz del extruido.

#### **1.4.3 Modelamiento del fluido**

Otro de los retos más grandes en el proceso de diseño del molde es el correcto modelamiento del fluido, ya que, al tratarse de un polímero en estado derretido, se comporta como un fluido no newtoniano, cuya viscosidad no es constante, sino que tiende a disminuir inversamente proporcional a la tasa de corte, la temperatura o la memoria viscoelástica,

según el tipo de polímero y las condiciones a las cuales se encuentra sujeto. [10]

La dinámica del fluido se puede describir mediante dos métodos dependiendo del tipo de análisis a realizar: si es invariante en el tiempo se pueden utilizar ecuaciones constitutivas modelando el fluido como “Newtoniano generalizado” [11]; en cambio, si existe mayor dependencia en la duración del esfuerzo de corte o la historia cinemática del fluido, se lo modela como “fluido viscoelástico lineal”. [12]

El comportamiento de newtoniano generalizado, se caracteriza por que el hecho de que la velocidad de corte en un punto del fluido solo depende de su correspondiente esfuerzo cortante y viceversa, por lo que se entiende que estos fluidos no registran memoria en el tiempo. [10]

Uno de los mayores casos de fluido no newtoniano independiente del tiempo, es el de los pseudo plásticos (shear-thinning en inglés), que se caracterizan por que su viscosidad aparente disminuye gradualmente con el incremento en la tasa de esfuerzo cortante. Para el caso más simple, donde solo existe una componente de la velocidad,  $V_x$ , que es una función de  $y$ :

$$\eta = \frac{\sigma_{yx}}{\dot{\gamma}_{yx}} \quad (1.1)$$

En el caso de los polímeros, a bajas tasas de corte, su viscosidad alcanza un límite newtoniano, en donde esta se vuelve independiente de la tasa de corte, se conoce como viscosidad de corte cero:

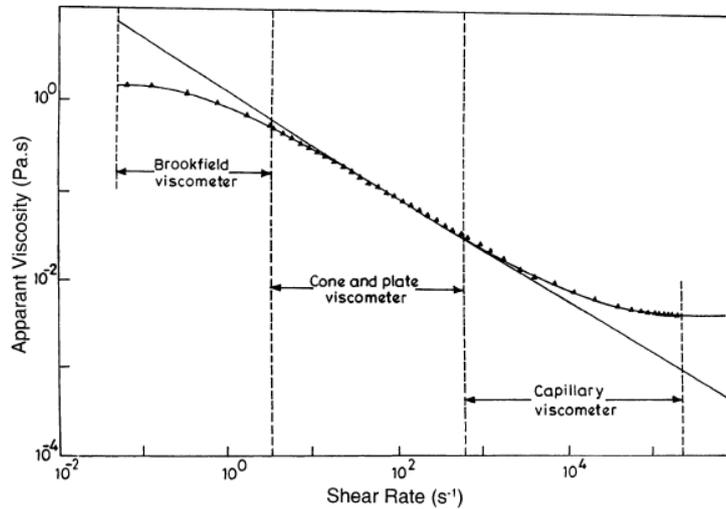
$$\lim_{\dot{\gamma}_{yx} \rightarrow 0} \frac{\sigma_{yx}}{\dot{\gamma}_{yx}} = \eta_0 \quad (1.2)$$

El valor de la velocidad de corte en donde empieza la disminución en la viscosidad depende de varios factores, como la naturaleza y concentración del polímero, sin embargo, generalmente muchas sustancias poliméricas muestran viscosidad de corte cero por debajo de  $\dot{\gamma}_{yx} < 10^{-2}$ . [13]

Además, las soluciones poliméricas también convergen a un límite a tasas de corte muy altas, en donde la viscosidad de corte se aproxima como infinita:

$$\lim_{\dot{\gamma}_{yx} \rightarrow \infty} \frac{\sigma_{yx}}{\dot{\gamma}_{yx}} = \eta_\infty \quad (1.3)$$

Es evidente que este límite no puede ser medido experimentalmente para polímeros fundidos y mezclas, espumas, emulsiones o suspensiones, sin embargo, se puede despreciar debido a que generalmente es muy pequeño comparado con  $\eta_0$ .



**Figura 1.2 Datos experimentales de las viscosidades de corte cero e infinita para una solución polimérica [10]**

Se han realizado varios intentos para aproximar el comportamiento del fluido, ya sea ajustando ecuaciones a los datos experimentales de las curvas, o también aplicando mecánica estadística como una extensión de teoría cinemática del estado del líquido, para plantear modelos matemáticos semi empíricos.

La ley de Potencia (o ecuación de Ostwald de Waele) [14] aproxima la relación entre el esfuerzo de corte y la tasa de corte como una línea recta (gráfica log-log) para un determinado intervalo de tasa de corte:

$$\eta = m(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (1.4)$$

En donde  $n$  es el índice de potencia, al ser menor que la unidad, representa el comportamiento pseudo plástico del fluido; y la constante  $m$  es el índice de consistencia, que es una medida de la concentración de la sustancia (viscosidad para velocidad de corte 1 [s<sup>-1</sup>]).

Sin embargo, este modelo falla en predecir los límites de viscosidad de corte (por esta razón solo se emplea dentro de un rango determinado de tasas de corte), por lo que Cross [15], propuso un modelo empírico que ha sido mayormente aceptado en la literatura:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + (\lambda\dot{\gamma})^{1-n}} \quad (1.5)$$

Donde  $\lambda$  es una constante de tiempo y  $n$  es el índice de potencia, y se puede notar fácilmente que para  $\eta \ll \eta_0$  y  $\eta \gg \eta_{\infty}$ , el modelo de Cross se reduce a la ley de potencia.

Si la viscosidad de corte infinita es despreciable, la ecuación se puede escribir de la forma:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0\dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (1.6)$$

En donde  $\tau^*$  es el esfuerzo de corte crítico en donde empieza la transición desde el límite newtoniano de viscosidad de corte cero. Si no se realiza la corrección de Weissenberg-Rabinowitsch, el esfuerzo de corte aparente puede ser escrito como:

$$\tau^* = \left(\frac{4n}{3n+1}\right)^{\frac{n}{1-n}} \quad (1.7)$$

Además, la viscosidad de corte cero puede ser calculada utilizando la ecuación WLF [16]:

$$\eta_0 = D_1 e^{\left[\frac{A_1(T-D_2)}{A_2+T-D_2}\right]} \quad (1.8)$$

Donde  $D_1$  es la viscosidad a una temperatura de referencia  $D_2$ ; y  $A_1$ ,  $A_2$  describen su dependencia en temperatura.

El modelo de Bird-Carreau-Yasuda [17] [18] que involucra cinco parámetros, ha sido también muy aceptado como una expresión analítica que se ajusta a la curva de viscosidad no newtoniana de distintos fluidos:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = [1 + (\lambda\dot{\gamma})^a]^{\frac{n-1}{a}} \quad (1.9)$$

Donde  $a$  es un parámetro dimensional que describe la transición entre la zona de viscosidad de corte cero y la región de la ley de potencia. Para la mayoría de soluciones poliméricas,  $a = 2$  se ajusta a los resultados experimentales.

Un método para verificar que el fluido se puede tratar como newtoniano generalizado es mediante el parámetro adimensional llamado Número de Deborah [19], que relaciona el tiempo de relajación con el tiempo del proceso, mediante la fórmula:

$$De = \frac{\lambda}{t_p} \quad (1.10)$$

Donde  $\lambda$  representa el tiempo de relajación, y es el inverso de la velocidad de corte a la que el polímero entra en la zona en la que rige la ley de potencia. Un número de Deborah igual a cero representa un fluido viscoso, en cambio un número de Deborah muy grande representa un sólido elástico.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Metodología de diseño

El procedimiento de diseño para la solución del problema fue esquematizado en el siguiente diagrama:

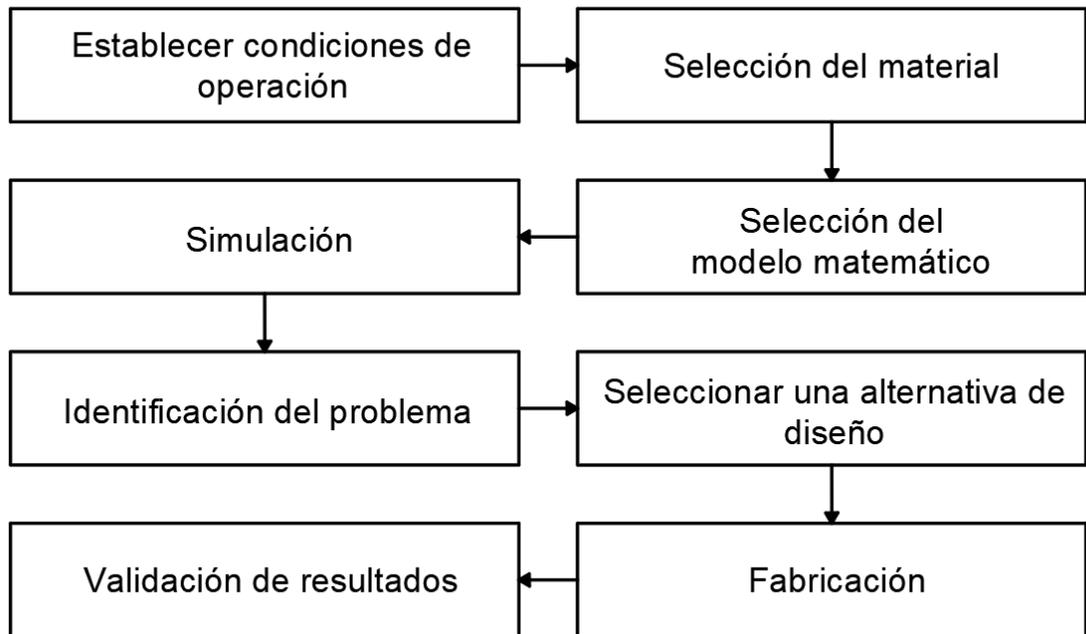


Figura 2.1 Diagrama del proceso de diseño [elaboración propia]

### 2.2 Condiciones de operación

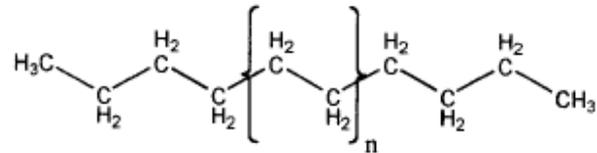
La extrusora marca Construzioni de tornillo simple, con una relación  $L/D = 22.5$ , impulsada por un motor que gira 1800 rpm, y a través de un reductor se transmite la potencia al tornillo, que, para este trabajo, gira a 40 rpm, expulsando el polietileno a una tasa aproximada de 35 kg/h. Una serie de calentadores programados a 190 °C derriten el polímero en forma de pellets hasta llevarlo a un estado líquido viscoso. Estos datos se utilizaron como condiciones de frontera en la simulación.

### 2.3 Selección de materiales

#### 2.3.1 Selección del polímero

El polietileno es una resina formada por una cadena de átomos de carbono, cada uno unido por un par de átomos de hidrógeno, y es representado mediante la fórmula química  $C_{2n}H_{4n+2}$  en donde  $n$  es el grado de polimerización, es decir el número de monómeros de etileno polimerizados

para formar la cadena. El grado típico de polimerización del polietileno excede 100 y puede llegar hasta 250,000. Existen variaciones del polietileno que dependen de ramificaciones que se forman en la cadena de carbono, modificando la naturaleza del material.



**Figura 2.2 Estructura química de polietileno puro. [20]**

El polietileno de alta densidad (HDPE) es aquel cuya estructura se asemeja más al polietileno puro, con un alto grado de cristalización que incrementa su densidad (comparada con otros tipos de polietileno). Posee la mayor rigidez y menor permeabilidad en su categoría, que lo hace adecuado para fabricación de contenedores de líquidos, tuberías transportadoras de agua, alcantarillado o gas natural. Su buena resistencia mecánica lo hacen propicio también para producción de fundas, contenedores de basura o juguetes.

El polietileno de baja densidad (LDPE) se caracteriza por tener significativas concentraciones de ramificaciones que impiden el proceso de cristalización, resultando en relativamente bajas densidades. Su flexibilidad y bajo punto de fusión lo hacen apropiado para fabricación utilizando la técnica de soplado de película, resultando en envolturas plásticas, sellos plásticos, cableado, aislamiento, mangueras, contenedores flexibles de líquidos o comida.

El polietileno de baja densidad lineal (LLDPE) consiste en moléculas de cadenas lineales de polietileno unidas a pequeños grupos alquilo en intervalos aleatorios. Abarca casi los mismos mercados que el LDPE, aunque se caracteriza por su mayor tenacidad. [20]

La extrusora en cuestión puede trabajar con los tres tipos de polietileno, pero para efectos prácticos se realizaron los ensayos tomando polietileno de baja densidad (LDPE) LD7000A producido por tecnología de alta presión como material base para las probetas. Tiene buenas propiedades mecánicas y de termo contracción, y generalmente se utiliza en aplicaciones de empaques de botella o mezclas con HDPE.

En la siguiente tabla se muestran las principales propiedades del LD7000A:

**Tabla 2.1 Propiedades de la resina utilizada [elaboración propia]**

Propiedad	LD7000A
Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	0.921
Densidad de fundido [g/cm <sup>3</sup> ]	0.791
Temperatura de fusión	[109 °C]
Índice de fluidez [g/10 min]	0.34 [2.16 kg, 190°C]
Esfuerzo de fluencia [MPa]	10
Esfuerzo de ruptura [MPa]	15
Conductividad térmica [W/m-K]	0.39
Capacidad calorífica [J/kg-K]	2530
Coeficiente de expansión lineal [1/K]	152E-6

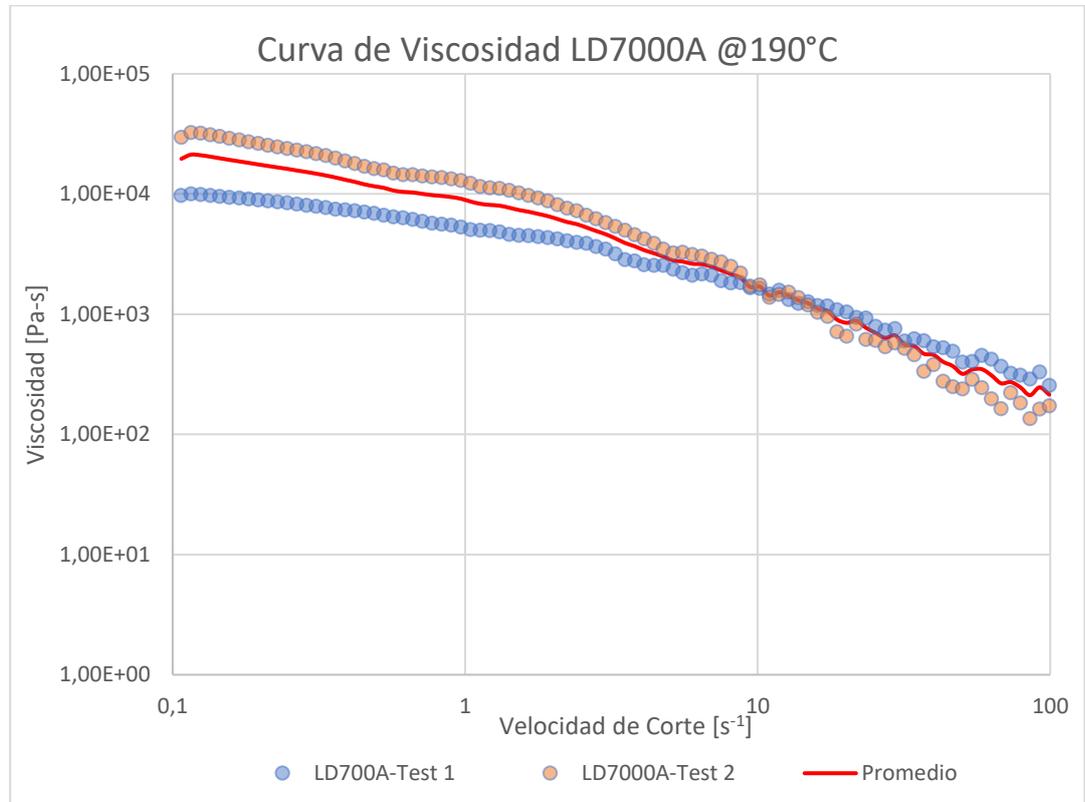
Se realizaron ensayos utilizando un reómetro rotacional de cojinete neumático para determinar los puntos experimentales de la curva de viscosidad característica del polímero, que representa la variación de la viscosidad en función de la velocidad de corte. Este ensayo consistió en colocar una muestra de la resina en estado fundido entre dos placas paralelas, una móvil y otra fija, en donde se ejerce un esfuerzo cortante sobre la muestra debido a la rotación de la parte móvil sobre la parte fija. Este tipo de reómetro generalmente alcanza velocidades de corte hasta 100 [s<sup>-1</sup>], siendo adecuado para modelar materiales en condiciones de extrusión, sin embargo, para procesos de inyección se requieren velocidades de corte mayores a 1000 [s<sup>-1</sup>], por lo que es necesario el uso de reómetros capilares.

**Tabla 2.2 Datos del reómetro utilizado [elaboración propia]**

<b>Tipo de Reómetro</b>	Rotacional
<b>Marca</b>	Malvern
<b>Modelo</b>	Kinexus Pro
<b>Código</b>	EM-097
<b>Serie</b>	MAL.1046091

Se realizaron dos ensayos reológicos y luego se calculó el promedio entre ambos para obtener una única curva por resina, reduciendo al mínimo la dispersión de datos. En la siguiente gráfica se pueden observar los puntos

experimentales de cada ensayo, y la curva promedio denotada por una línea roja.



**Figura 2.3 Curva de Viscosidad para el PEBD LD700A [elaboración propia]** Luego, a partir de la curva promedio de viscosidad, se pueden obtener los parámetros del modelo matemático a utilizar, mediante un ajuste automático en ANSYS Polyflow. Si el modelo es isotérmico se utiliza solo una curva, y si el modelo emplea ecuaciones de energía se deben ingresar varias curvas a distintas temperaturas.

### 2.3.2 Selección del material para el molde

A nivel industrial los moldes generalmente son fabricados de un acero herramental de alta calidad, endurecido de tal forma que las áreas que entran en contacto con el polímero no se erosionen y pulido de tal forma que el polímero fluya con facilidad [21]. Usualmente también se los recubre con una película de cromo (extrusión PVC), sin embargo, el polietileno no es un agente corroyente (no contiene cloro), por lo que no es necesario para este estudio.

Se realizó una matriz de decisión sencilla, en donde se seleccionaron materiales típicos para fabricación de moldes de extrusión y se le dio una ponderación individual a cada uno dependiendo de las características

necesarias para el correcto rendimiento del dado, que fueron listadas en la columna de la izquierda y de la misma manera se le asignó un peso a cada una:

**Tabla 2.3 Matriz de decisión del material para el dado [elaboración propia]**

Propiedad	Peso	SAE 304		SAE 705		AISI P20		PRODAX	
Resistencia a la abrasión	25%	0.9	0.225	0.7	0.175	0.8	0.2	0.5	0.125
Dureza	25%	0.6	0.15	0.8	0.2	0.6	0.15	0.4	0.1
Maquinabilidad	20%	0.7	0.14	0.6	0.096	0.8	0.16	0.9	0.18
Conductividad térmica	15%	0.4	0.075	0.8	0.12	0.8	0.12	0.7	0.105
Resistencia a la corrosión	15%	0.8	0.12	0.6	0.09	0.7	0.105	0.6	0.09
<b>Total</b>			<b>0.71</b>		<b>0.681</b>		<b>0.735</b>		<b>0.6</b>

Se puede notar que tanto SAE 304 como AISI P20 son las opciones más óptimas, por lo que se realizará una investigación de mercado para determinar cuál de las dos opciones es la más económica y/o asequible. El SAE 705 también es una elección aceptable, en caso de que las opciones anteriores no se encuentren disponibles. Y por último el aluminio es una alternativa aceptable para producción a baja escala, ya que se abaratan los costos de fabricación.

## 2.4 Selección del modelo matemático

La viscosidad de un fluido pseudo plástico es inversamente proporcional a la velocidad de corte y a la temperatura, por lo que existen varios modelos para representar el campo del fluido en estas condiciones.

### 2.4.1 Viscosidad dependiente de la velocidad de corte

Existen varios modelos matemáticos semi empíricos para caracterizar la viscosidad del flujo si es dependiente de la velocidad de corte. Se analizó el alcance de cada uno y se escogió un modelo adecuado para describir el paso del fluido a través del molde:

**Tabla 2.4 Matriz de decisión del modelo matemático de viscosidad para dependencia de velocidad de corte [elaboración propia]**

<b>Modelo</b>	<b>Rango [<math>\dot{\gamma}_{yx}</math>]</b>	<b>Descripción</b>	<b>Materiales Típicos</b>
Ley de Potencia (Ostwald de Waele)	Alto	No captura $\eta_{\infty} / \eta_0$	Polímeros (PE)
Cross	Bajo	Captura transición en $\dot{\gamma}_{yx}$ crítico	Termoplásticos
Bird-Carreau- Yasuda	Todo	Exponente $a$ controla la transición en $\dot{\gamma}_{yx}$ crítico	Termoplásticos
Bingham	Bajo	Se asume $\eta_{\infty}$ constante luego de un $\dot{\gamma}_{yx}$ crítico	Concreto, lodo, pastas
Herschel- Bulkley	Todo	Exhibe un comportamiento pseudo plástico	Concreto, lodo, pastas

Tanto el modelo de Cross como el de Bird-Carreau-Yasuda capturan de forma bastante precisa la transición entre la asíntota newtoniana de la viscosidad y la región pseudo plástica, por lo que se realizó el ajuste utilizando ambos modelos para determinar cuál se ajusta mejor a la curva experimental y/o a la simulación. Adicionalmente, se realizó un ajuste utilizando la Ley de Potencia debido a que también es un modelo comúnmente utilizado.

#### **2.4.2 Viscosidad dependiente de la temperatura**

La temperatura por sí sola no tiene efecto directo en la viscosidad del flujo, sino que influye en las curvas de viscosidad vs. velocidad de corte, provocando un desfase vertical, por lo que, en conjunto con los modelos mencionados anteriormente, se introducen leyes de temperatura para la viscosidad:

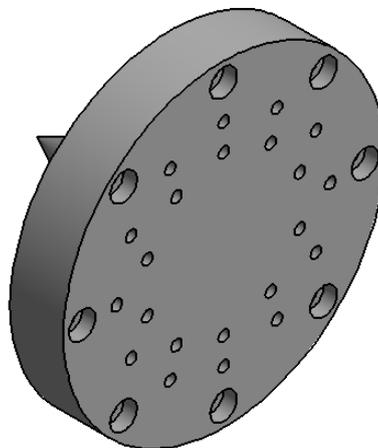
**Tabla 2.5 Matriz de decisión del modelo matemático de viscosidad para dependencia de temperatura [elaboración propia]**

Modelo	Parámetros	Descripción	Materiales Típicos
Arrhenius	Energía de activación $E_0$ , Temperatura de referencia $T_0$	En polímeros amorfos solo es válida para temperaturas por encima de la recristalización	Polímeros semi cristalinos
WLF	Temperatura de referencia $T_s$ , Constantes del material	Válida para una amplia variedad de polímeros en cualquier rango de temperatura	Polímeros amorfos

Debido a que el polietileno es un polímero semi cristalino, la ley de Arrhenius es suficiente para describir el desfase en la curva de viscosidad provocado por la temperatura. Este ajuste debido a la temperatura sólo se emplea si la temperatura de la curva de viscosidad obtenida mediante las mediciones reológicas no es la misma que la temperatura de trabajo, o si existen condiciones de borde de energía que requieran el uso de un modelo de temperatura.

## 2.5 Alternativas de diseño

El método de producción de probetas actual consiste en pasar el polímero derretido a través de un dado con pequeños orificios, de manera que el extruido va formando varios filamentos que luego estos son compactados en una prensa.

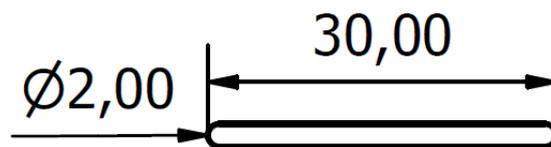


**Figura 2.4 Dado extrusor de filamentos [elaboración propia]**

El nuevo diseño del molde debe ser capaz de extruir la forma de las probetas directamente, y debe contar con las siguientes características de diseño: una superficie lisa que facilite el paso del flujo sin espacios muertos o áreas de estancamiento en donde el polímero se puede desacelerar produciendo un incremento indeseable en su viscosidad, y acumulación, causante de degradación. Se deben anticipar las presiones generadas por el flujo del material, la expansión térmica, debe existir flujo de calor uniforme en todas las áreas del molde y sobre todo debe ser práctico y fácil de montar.

La FIMCP adquirió un dado para este propósito, sin embargo, cuenta con fallas de diseño que hacen que la presión ejercida por el material a la entrada exceda los límites permitidos por la brida de sujeción. Se realizó un modelo 3D de este dado y se simuló para verificar los efectos de presión a la entrada. El material proviene del tornillo extrusor y es distribuido a través de otra cavidad conocida como “araña” que conduce el polímero hasta la entrada del dado y frena la rotación generada por el tornillo. Este requerimiento se traduce como condición de entrada en una superficie circular de 80 mm de diámetro, con un flujo másico determinado a partir de ensayos experimentales.

El requerimiento de forma de las probetas indica que su sección transversal debe ser la siguiente (unidades en milímetros):



**Figura 2.5 Sección transversal de la probeta [elaboración propia]**

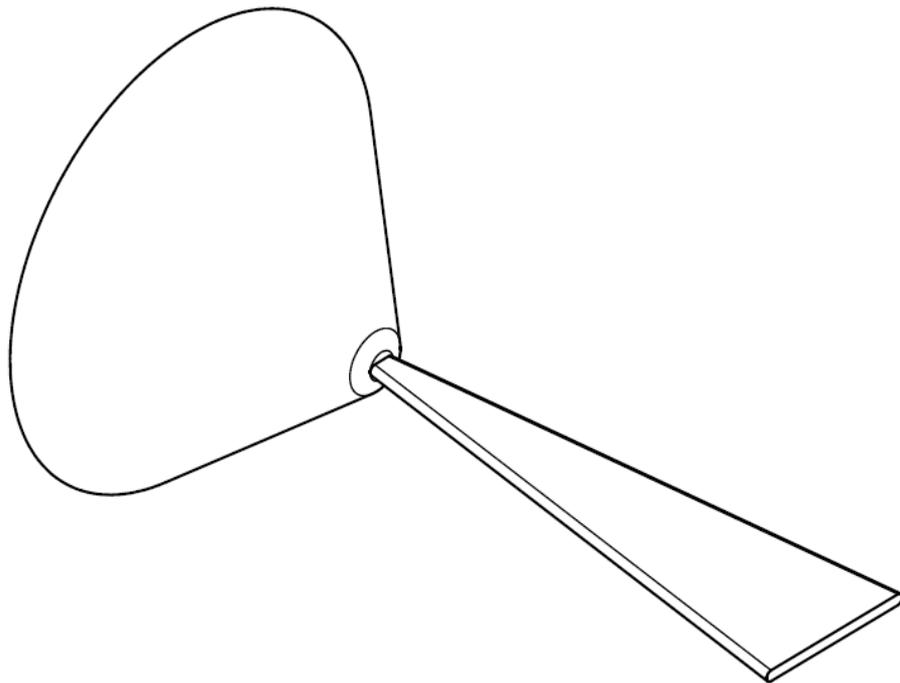
## **2.6 Estado de la cavidad original**

Al verificar el estado de la cavidad interna del dado, se puede notar claramente que el ingreso a la cavidad interna es una ranura de  $5 \times 2$  mm y carece de ensanchamientos y redondeos internos diseñados para aliviar sobre presiones. La trayectoria del polímero es totalmente plana y el ingreso es demasiado angosto, lo que hace que la caída de presión sea muy alta.



**Figura 2.6 Cavity a la entrada del molde original [elaboración propia]**

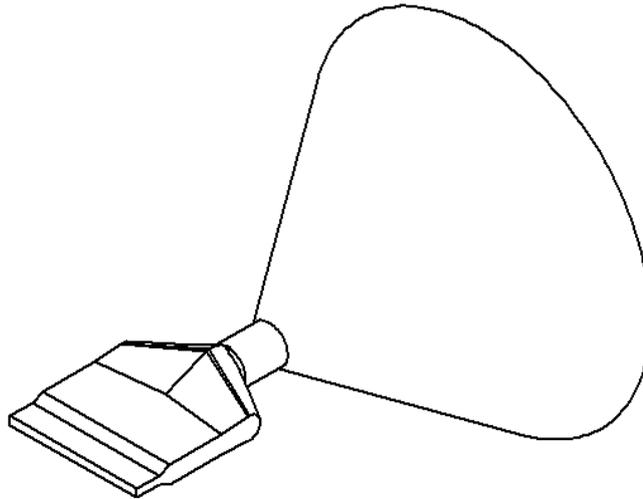
Se realizó una manipulación geométrica de las secciones transversales de la cavidad interior del molde actual, incrementándolas o suavizando la transición entre la entrada y la salida, para disminuir la presión a la entrada y estimular el flujo del polímero a través del dado.



**Figura 2.7 Cavity interna del molde original [elaboración propia]**

## **2.7 Creación de una nueva forma**

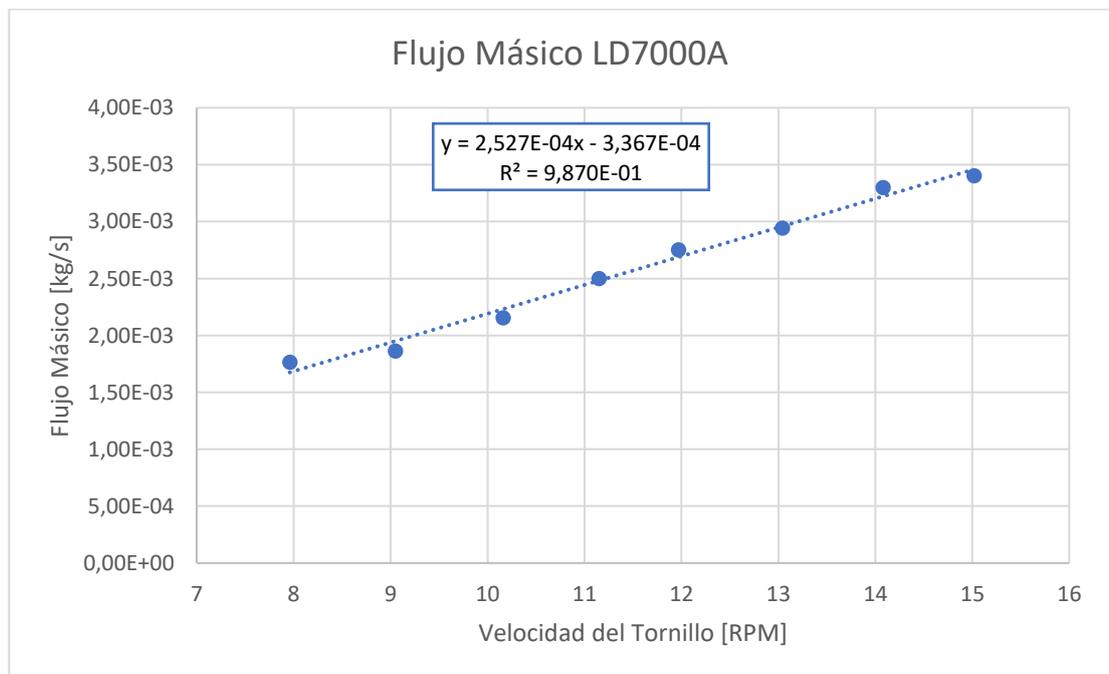
Mediante un estudio sobre la tasa de conductividad, se puede optimizar el diseño suavizando la forma de la trayectoria del fluido, de tal forma que la cavidad interna del molde se asemeje a una percha, ya que estudios han demostrado la eficiencia de este tipo de diseños.



**Figura 2.8 Diseño de forma del dado mejorado [elaboración propia]**

## 2.8 Parámetros de la simulación

Para determinar el flujo másico a la entrada se realizó un ensayo de extrusión sin el molde, pesando la masa de polímero extruido obtenida en 1 minuto, configurando la extrusora desde 8 a 15 rpm con intervalos de 1 rpm. Se pudo obtener la siguiente gráfica, donde se extrapola la curva lineal para obtener el flujo másico para el caso más crítico (40 rpm). Este dato se utilizará como condición de entrada para las simulaciones. Como condición de salida se utilizó presión atmosférica local (o manométrica igual a cero).



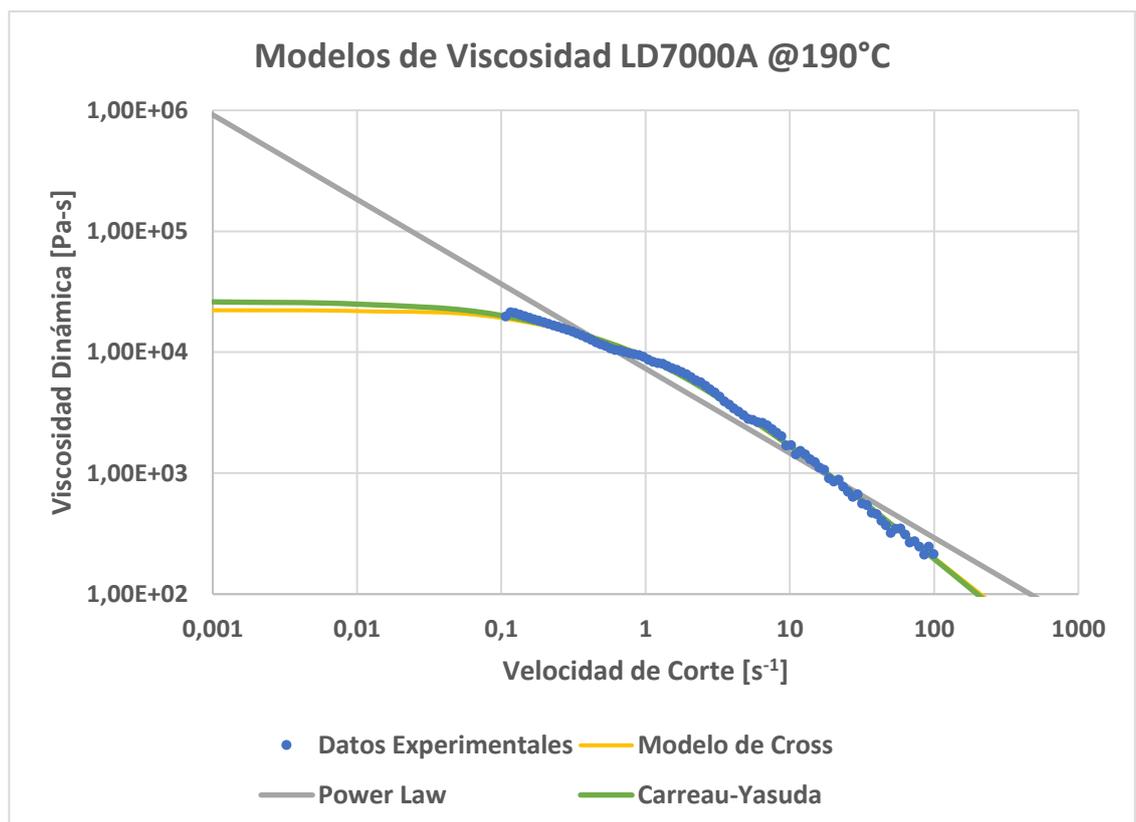
**Figura 2.9 Flujo másico en función de los RPM del tornillo [elaboración propia]**

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Selección del Modelo Matemático

En la siguiente figura se muestran los ajustes de las curvas de viscosidad aparente para distintos modelos matemáticos, para el polietileno de baja densidad LD7000A, en donde claramente se puede observar que los modelos de Carreau-Yasuda (verde) y Cross (amarillo) se ajustan con bastante precisión a los datos experimentales. Se seleccionará la segunda opción debido a que es la que se encuentra disponible en ambos solucionadores de ANSYS (CFX y FLUENT). El modelo de Ley de Potencia (gris) no es una alternativa aceptable ya que no se adapta al plató newtoniano al que tiende la curva cuando las velocidades de corte son bajas.



**Figura 3.1 Curvas de Viscosidad para distintos modelos matemáticos:**

**Potencia (gris), Cross (amarillo), Carreau-Yasuda (verde) [elaboración propia]**

A través del ajuste realizado en el software, se determinó que los cinco parámetros del modelo de Carreau-Yasuda (ecuación 1.5), para el polietileno de baja densidad (LD7000A) fueron los siguientes:

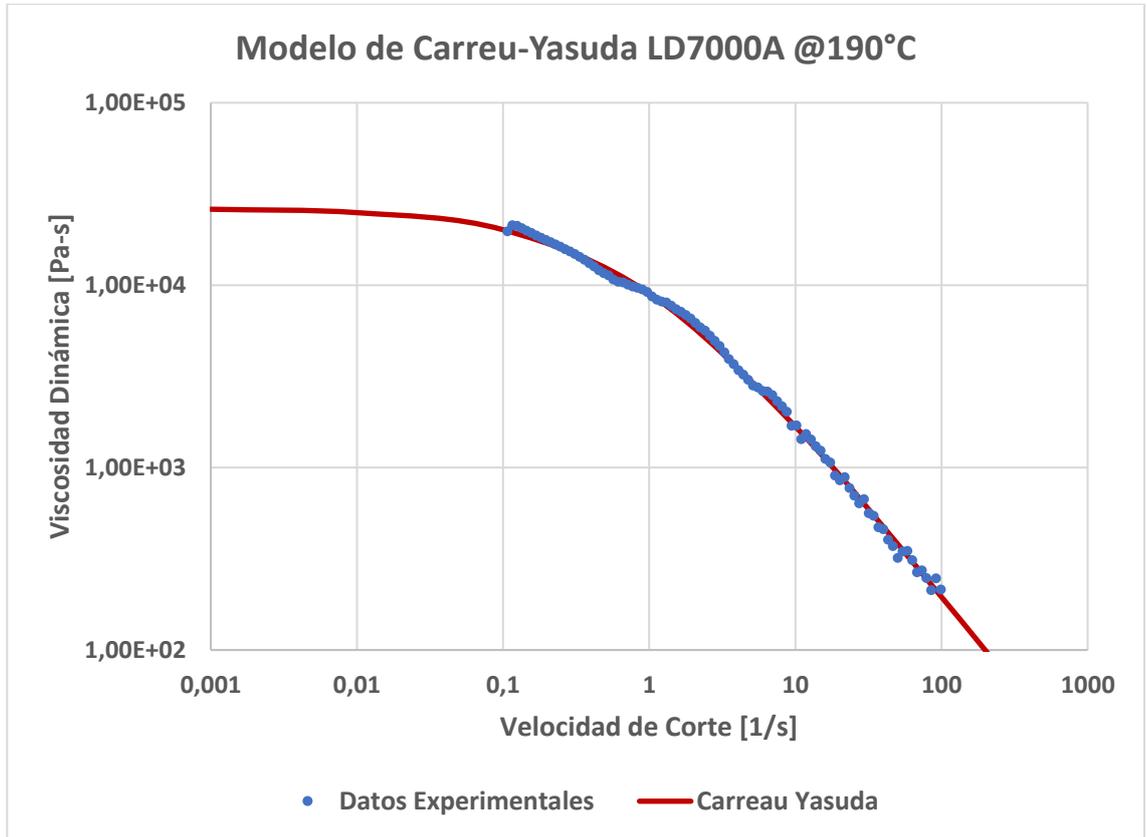
$$\eta_0 = 26334.78 [Pa \cdot s]$$

$$\eta_\infty = 3.604802 \times 10^{-3} [Pa \cdot s]$$

$$\lambda = 1.300535 [s]$$

$$n = 1.270456 \times 10^{-6}$$

$$a = 0.7412825$$



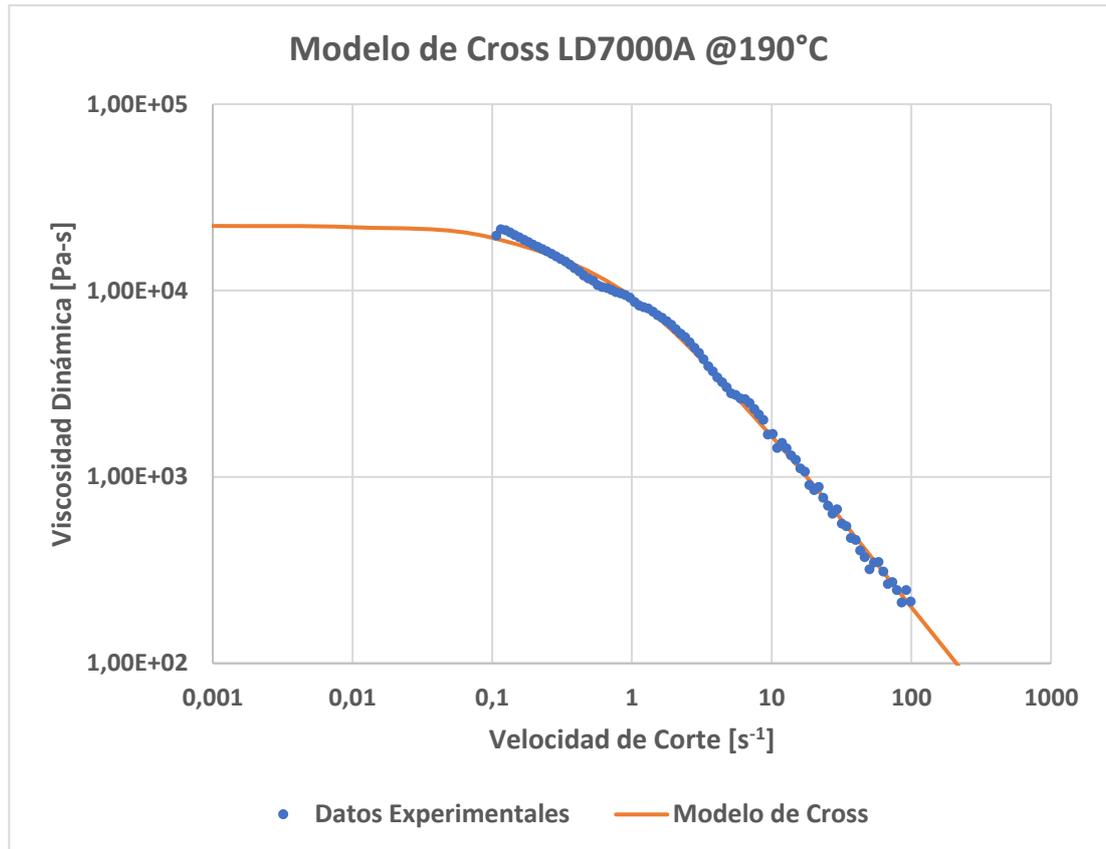
**Figura 3.2 Curva de Viscosidad para el modelo de Carreau-Yasuda  
[elaboración propia]**

A través del mismo ajuste, se encontró que los parámetros del modelo de Cross (ecuación 1.9) fueron los siguientes (despreciando la viscosidad de corte infinita):

$$\eta_0 = 22277.41 [Pa \cdot s]$$

$$\lambda = 1.442919 [s]$$

$$n = 0.0541135$$



**Figura 3.3 Curva de Viscosidad para el modelo de Cross [elaboración propia]**

Debido a que el molde se encuentra cubierto con una resistencia eléctrica que lo mantiene a 190°C antes de que el polímero ingrese, se asume flujo isotérmico a lo largo de la cavidad interna, por lo que no se emplearon modelos matemáticos para el ajuste por temperatura.

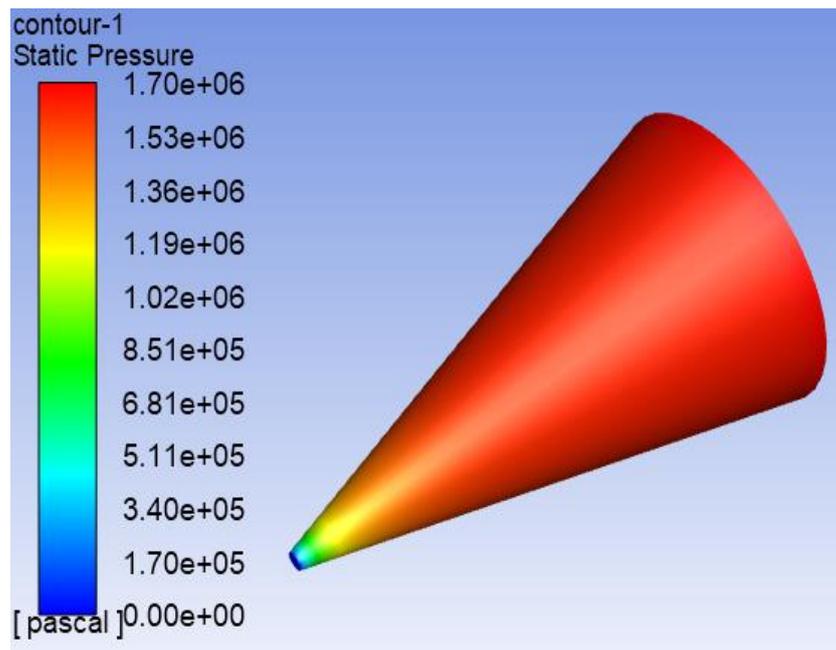
### 3.2 Validación del Modelo Matemático

Vlachopoulos y Scott [22] realizaron una investigación acerca de la caída de presión de un polímero fundido a través de matrices cónicas, y aprovechando la simplicidad de la geometría se validaron los datos experimentales comparando con los resultados obtenidos por ellos. Vlachopoulos y Scott obtuvieron resultados mediante cálculos manuales y mediante el método de elementos finitos en FORTRAN. El polímero utilizado sigue la ley de potencias, pero mediante un ajuste se puede convertir los parámetros al modelo de Cross.

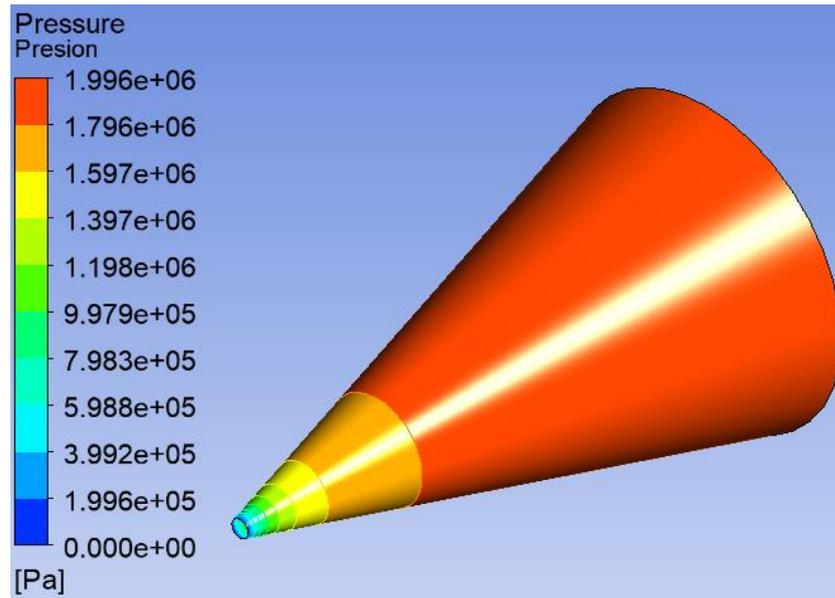
**Tabla 3.1 Datos geométricos y reológicos del modelo empleado por Vlachopoulos y Scott [22]**

Radio de entrada	0.01 [m]
Radio de salida	0.00059 [m]
Longitud	0.03429 [m]
Caudal	$1.938 \times 10^{-7}$ [m <sup>3</sup> /s]
Índice de potencia (n)	$10^4$ [Pa-s]
Índice de consistencia (m)	0.45
Caída de presión calculada	1.449 MPa
Caída de presión por elementos finitos	1.6095 MPa

En las siguientes figuras se muestra la caída de presión utilizando el modelo de Cross tanto en FLUENT como CFX, en donde se muestra que FLUENT es el solucionador que más se acerca a los datos obtenidos por Vlachopoulos y Scott.



**Figura 3.4 Caída de presión en FLUENT [elaboración propia]**



**Figura 3.5 Caída de presión en CFX [elaboración propia]**

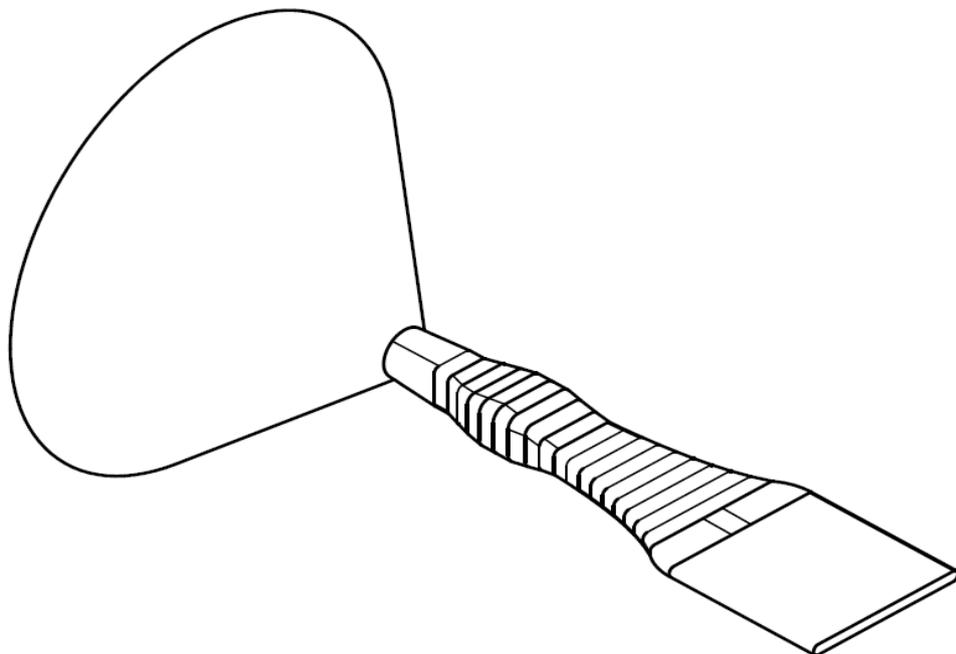
Parámetros de Cross:

$$\eta_0 = 3.66401 \times 10^8 [Pa \cdot s]$$

$$\lambda = 1.97642 \times 10^8 [s]$$

$$n = 0.449887$$

### 3.3 Diseño detallado



**Figura 3.6 Diseño de la cavidad del modelo de dado mejorado [elaboración propia]**

La figura 3.6 muestra el área transversal de las secciones de la cavidad del dado a lo largo de la dirección de flujo. La mayor reducción de área se da al inicio, donde esta transición toma lugar en la parte cónica del dado. Posteriormente el área del conducto disminuye a una menor razón, excepto por la zona de ensanchamiento. Este aumento de sección es incluido para disminuir la velocidad de flujo y así incrementar la presión estática local en esta sección con la finalidad de fomentar un gradiente de presión uniforme a lo largo de la dirección de flujo.

### 3.4 Simulación del diseño original

Como se indicó en la sección 2.6, la condición de borde extrapolada para la entrada a velocidad de giro del tornillo de 40 rpm fue de  $9.77E-3$  [kg/s], y la condición de salida de presión manométrica de 0 [MPa] (salida libre). El mallado se realizó con un tamaño de elemento de 1 mm, y se puede notar que la caída de presión es de aproximadamente 2.85 MPa y la máxima velocidad se encuentra en la ranura de entrada tomando un valor de 1.82 m/s; sin embargo, luego el flujo pierde velocidad y uniformidad.

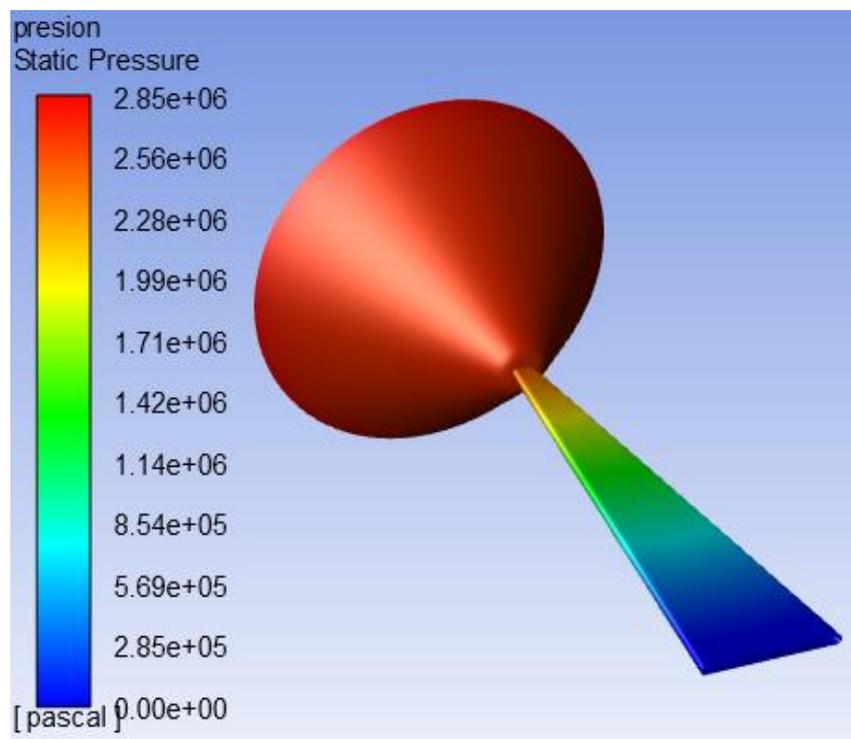
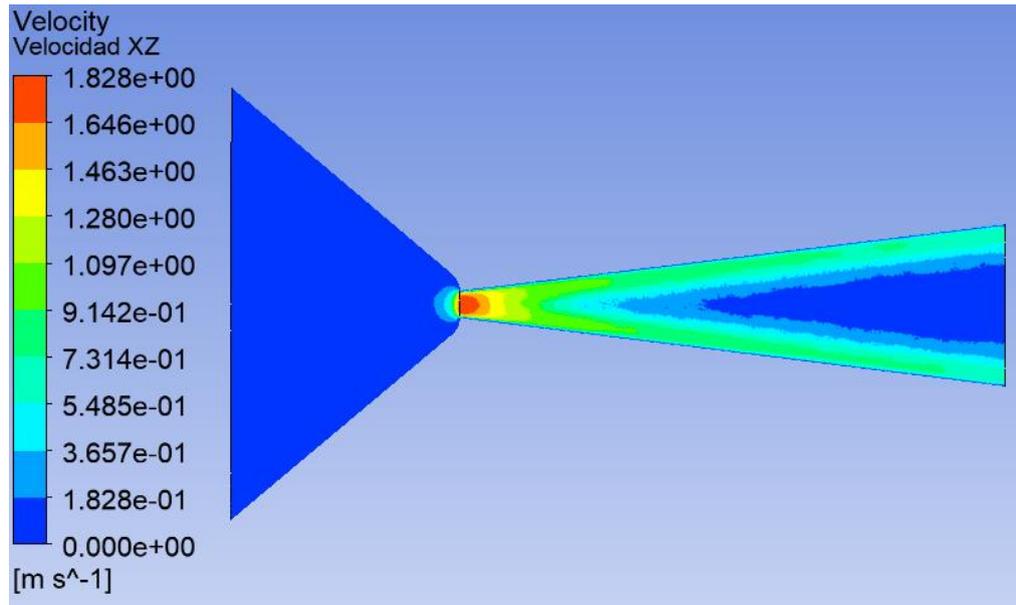


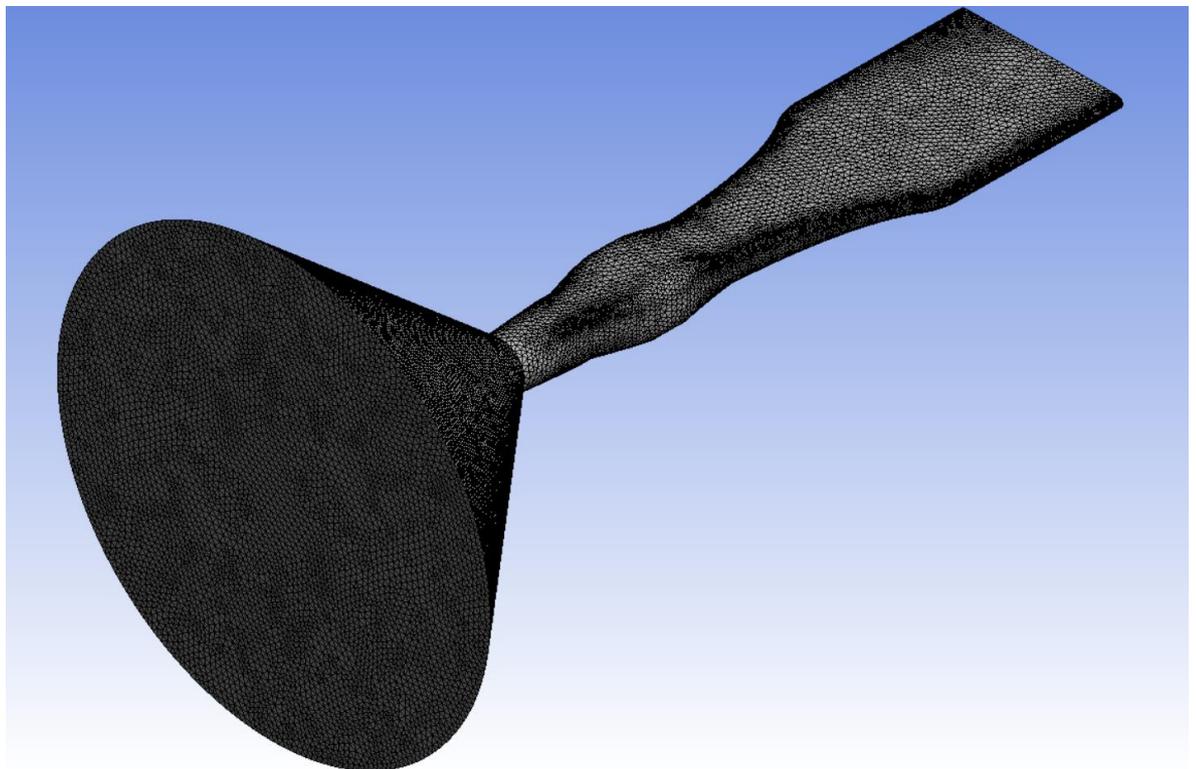
Figura 3.7 Caída de presión en la cavidad interna del dado original  
[elaboración propia]



**Figura 3.8 Distribución de la velocidad en el plano medio de la cavidad del dado original [elaboración propia]**

### 3.5 Simulación del diseño dado mejorado

El mallado se realizó con un tamaño de elemento de 1 mm, resultando en 492,380 elementos y 97,659 nodos.

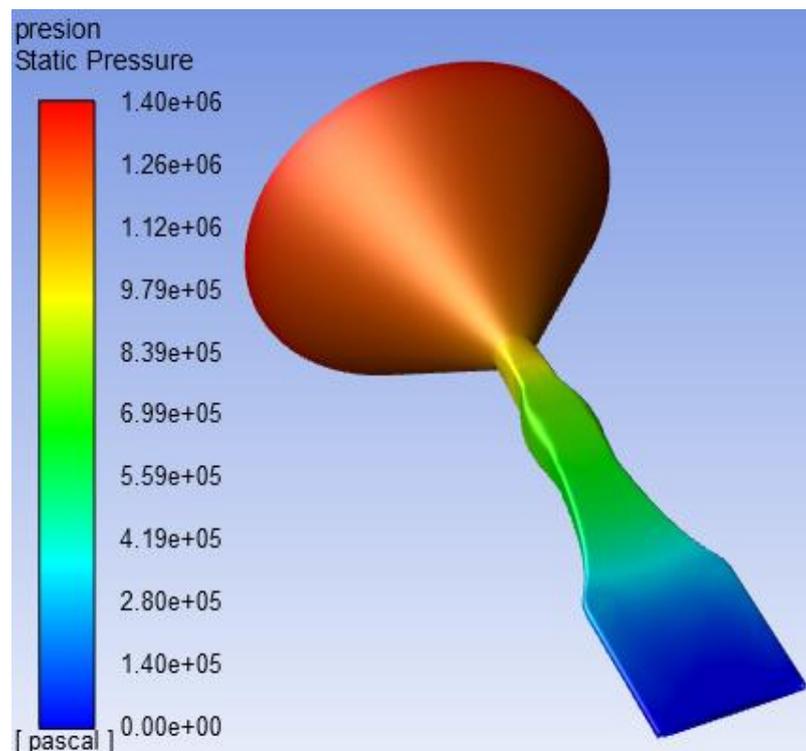


**Figura 3.9 Mallado del dominio del fluido [elaboración propia]**

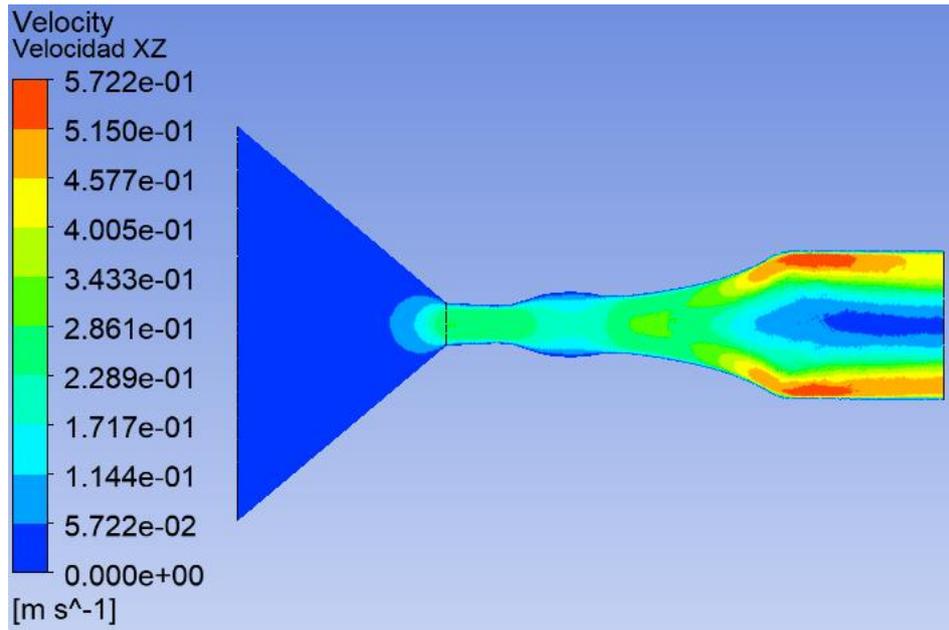
La presión máxima se presenta a la entrada del molde, tomando un valor de 1.40 MPa (14 bar), es decir, la mitad del valor resultante en la cavidad original (modelo que presenta problemas), y adicionalmente se encuentra muy por debajo de los límites permisibles por la extrusora (340 bar), asegurando que no exista atascamiento en el tornillo.

Las velocidades más altas se ubican cerca de los extremos de la sección de salida, lo que indica flujo no uniforme. Sin embargo, esto no afecta drásticamente a la distribución de flujo como para provocar algún tipo de atascamiento, simplemente el primer tramo de la lámina va a salir con forma cóncava, que luego será cortado según los requerimientos dimensionales de la probeta.

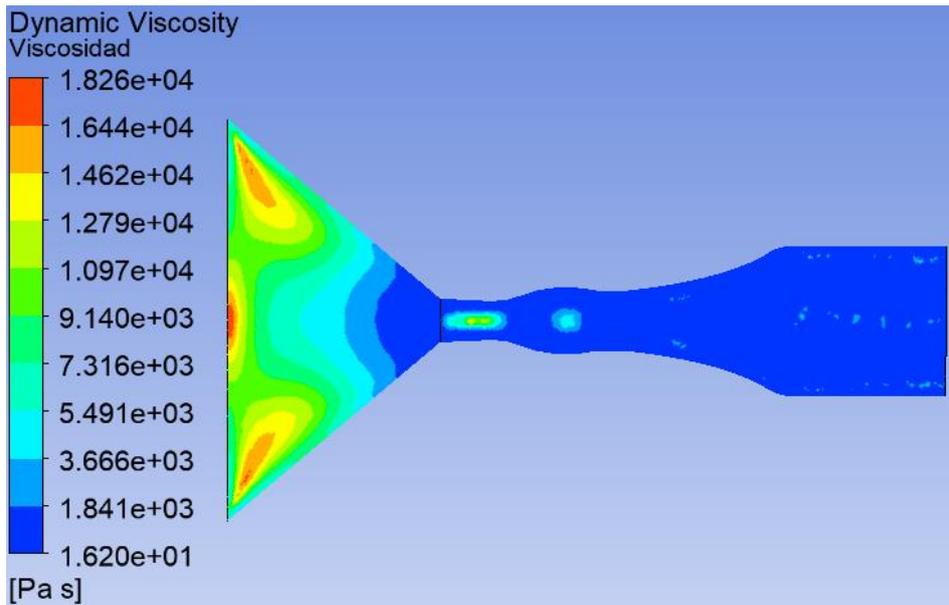
La figura 3.12 muestra la distribución de la viscosidad aparente en la sección media de la cavidad, donde se muestra que en la sección cónica (entrada) se localizan los valores más altos, y a medida que el fluido va ganando velocidad se vuelve menos viscoso.



**Figura 3.10 Caída de presión del flujo dentro de la cavidad del dado mejorado [elaboración propia]**



**Figura 3.11 Distribución de la velocidad del flujo en la sección media dentro de la cavidad del dado mejorado [elaboración propia]**



**Figura 3.12 Distribución de la viscosidad aparente en la sección media dentro de la cavidad del dado mejorado [elaboración propia]**

### 3.6 Selección del material del molde

Para mecanizar, se cotizó un cilindro macizo de 5" de diámetro por 150 mm de largo en el mercado local, y se concluyó que SAE 304 es la opción más eficiente en términos de costo y desempeño. Sin embargo, para el alcance de este proyecto se escogió una fundición de aluminio debido a facilidad de mecanización y bajo costo.

**Tabla 3.2 Análisis de costos del material [elaboración propia]**

<b>Material</b>	<b>Costo</b>
AISI P20	\$241
SAE 304	\$125
PRODAX/Duraluminio	\$140
Fundición de Aluminio	\$40

### **3.7 Ciclo de fabricación**

Debido a la dificultad para manufacturar una cavidad interna a partir de una geometría maciza, que cuente con la geometría deseada y la precisión dimensional adecuada, se decidió fabricar el dado a partir de dos partes iguales que luego fueron ensambladas utilizando elementos de fijación. Primero se torneó la parte exterior del dado dejando una sobremedida de 5 mm de diámetro y luego se dividió por la mitad empleando corte por hilo. Utilizando un centro de mecanizado CNC se generó la forma de la cavidad interna del molde en cada cara y luego se unieron mediante 4 pernos tipo Allen. Este proceso fue simulado previamente utilizando Autodesk Fusion 360, donde se importó el CAD y se generaron las trayectorias de la herramienta, ajustando los parámetros de corte de acuerdo con el material a mecanizar y las herramientas adquiridas. Finalmente se realizaron 6 perforaciones axiales en la brida de tal forma que coincida directamente con la que se encuentra en la extrusora. El ciclo de fabricación detallado se encuentra en la sección de anexos.

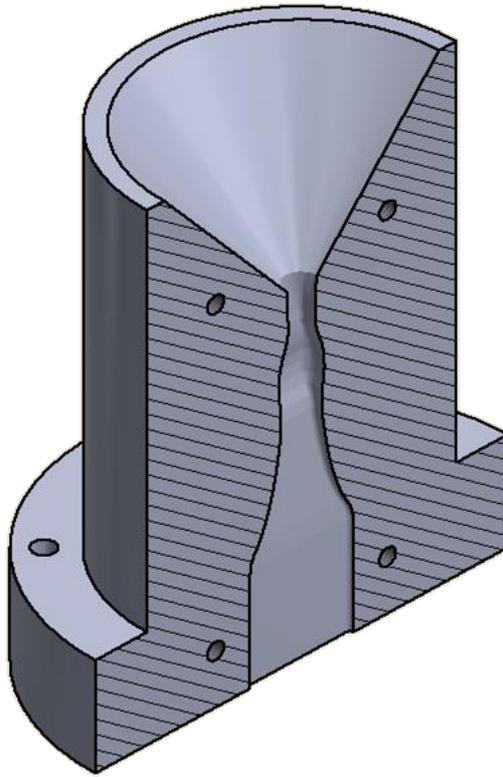


Figura 3.13 Sección transversal del dado de extrusión [elaboración propia]

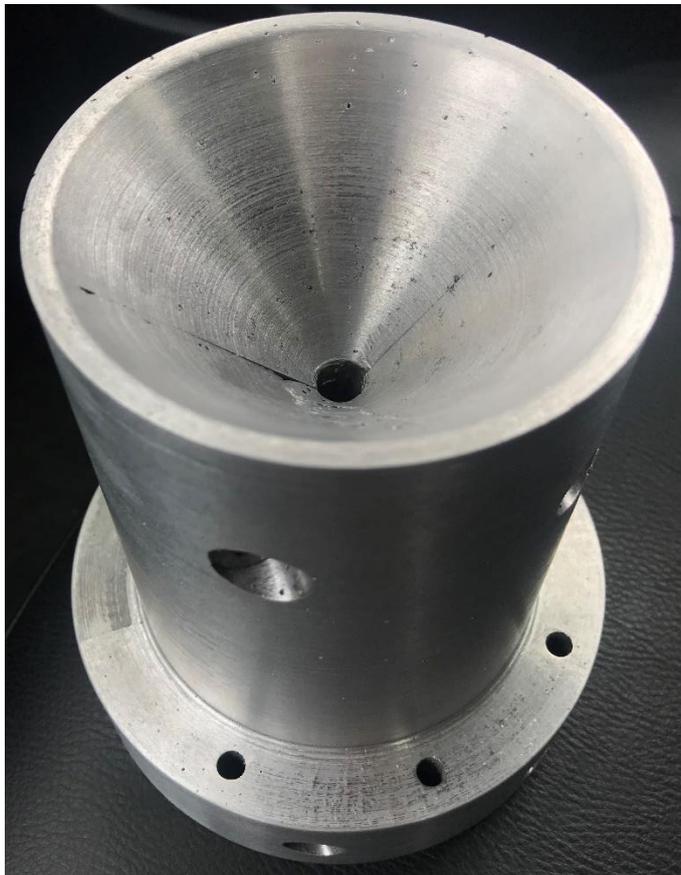


Figura 3.14 Fotografía del dado mejorado [elaboración propia]

### 3.8 Dilatación térmica

Para calcular la dilatación térmica se utiliza la conocida formula de dilatación superficial, tomando como referencia el área del cilindro que ingresa dentro de la camisa de la extrusora:

$$A_0 = \pi R_0^2 \quad (3.1)$$

$$A_f = A_0 [1 + \alpha(T_f - T_0)] \quad (3.2)$$

$$R_f = R_0 \sqrt{1 + \alpha(T_f - T_0)} \quad (3.3)$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de dilatación superficial, que en el caso del aluminio PRODAX es  $23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  y  $R_0$  es el radio inicial de la sección externa del dado:

$$R_f = \sqrt{(45.1 \text{ mm}) [1 + (23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})(190 - 25 \text{ } ^\circ\text{C})]} = 45.185 \text{ mm}$$

La cavidad interna de la camisa de la extrusora tiene un radio aproximado de 45.225 mm, dejando una holgura suficiente de 0.04 mm para evitar fugas de material. Se escogió una tolerancia geométrica de tipo asiento giratorio estrecho, recomendada para émbolos (para evitar fugas de material por los costados del dado), que indica valores entre -0.012 y -0.034 mm.

### 3.9 Análisis de Costos

**Tabla 3.3 Costo de las herramientas utilizadas [elaboración propia]**

<b>Especificación</b>	<b>Costo</b>
Fundición de aluminio	\$40
Fresa HSS punta redonda de 1/2"	\$19.59
Fresa HSS plana de 1/2"	\$15.50
Fresa HSS punta redonda de 1/4"	\$8.31
Fresa HSS plana de 1/4"	\$6.41
Pastilla Titanio TNMG160404	\$5.94
4 pernos M8 tipo Allen	\$1
1 juego de Machuelos M8	\$7.5
<b>Total</b>	<b>\$104.25</b>

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- El dado original se encontraba mal fabricado, ya que la abertura de entrada por la que debe pasar el polímero era una ranura demasiado pequeña para la cantidad de flujo másico que ingresa, haciendo que la caída de presión a través del dado se incremente y esfuerce demasiado al sistema de sujeción axial del dado. El ensanchamiento de área y la transición suave del nuevo dado mejorado hacen que la presión a la entrada se reduzca considerablemente (aproximadamente la mitad del valor original), permitiendo un correcto paso del fluido y reduciendo el esfuerzo en el sistema de sujeción.
- Es importante que exista una transición suave en cada sección de la cavidad interna del dado, debido a que esto influye positivamente en el flujo de velocidad y evita zonas de estancamiento, en donde el polímero se puede acumular y degradar, haciendo que el extruido pierda las propiedades mecánicas para las cuales fue diseñado.
- El análisis realizado no toma en cuenta condiciones de borde de energía, ya que se asume flujo isotérmico debido a que la mayor parte del dado ingresa y hace contacto con la parte interna de la araña final de la extrusora, sin embargo, pueden existir pequeños espacios de aire, en donde la transferencia de calor no es la más óptima, por lo que se recalca la importancia de que todas las resistencias de la línea de extrusión alcancen la temperatura de trabajo. En el caso de que existan pérdidas de calor, el material se vuelve más viscoso para una misma velocidad de corte, debido a que la curva de viscosidad sufre un desfase. Este problema puede ser corregido agregando una resistencia adicional al circuito de la extrusora para incrementar el flujo de calor sobre el dado, o realizando un análisis sobre las condiciones de borde de temperatura que existen en el sistema actual, y realizar las correcciones respectivas al modelo matemático.
- Cuando se realizan correcciones al modelo matemático que impliquen dependencia de temperatura, es necesario obtener mínimo 2 nuevas curvas

de viscosidad del polímero a aproximadamente 20 y 40 °C por encima y por debajo de la curva de viscosidad actual, de tal forma que, cuando se realice el ajuste de las curvas en ANSYS Polyflow, el solucionador pueda detectar el desfase y arrojar los parámetros de la ecuación de Cross-WLF: la razón ( $\alpha$ ) entre la energía de activación ( $E_0$ ) y la constante ideal de los gases (R); y la temperatura de referencia del polímero ( $T_\alpha$ ), que sirven para definir condiciones de energía para un fluido no newtoniano. Es importante recalcar que ANSYS FLUENT es el único solucionador en donde se pueden ingresar condiciones de flujo y energía al mismo tiempo para fluidos no newtonianos.

- El material seleccionado para la fabricación no fue el más óptimo debido a que la fundición de aluminio presentó pequeñas porosidades, sin embargo, esto no impide su funcionamiento siempre y cuando se trate de producción a corta escala y mediano plazo.
- No se pudieron realizar ensayos de operación debido a que el tornillo de la extrusora no se encontraba en condiciones óptimas y por factores de tiempo, sin embargo, la etapa de validación del modelo matemático es un factor clave para predecir los resultados experimentales, comprobar la eficacia de la simulación y su replicabilidad a otros diseños o condiciones de operación.
- Si el tornillo no llega a la velocidad de operación (40 rpm) es posible que el material no fluya correctamente, tanto en niveles de flujo másico como en temperatura, ya que en los procesos de extrusión los polímeros también se calientan por fricción; sin embargo, si el proceso es demasiado rápido, el polímero no tendrá suficiente tiempo de residencia para que su estructura se adapte a la cavidad del molde, por lo que también es importante que la tasa de extrusión no sea excesiva.
- Este estudio no abarca consideraciones de viscoelasticidad debido a que generalmente se requieren cuando se trata de extrusión de perfiles o formas complejas que requieren precisión dimensional, por lo que la expansión del extruido a la salida del dado es un factor que se toma en cuenta en estos procesos.
- En el transcurso del ciclo de fabricación de la pieza se presentaron situaciones, como rotura de herramientas o fallas de alineación, que afectaron el proceso de elaboración. Por este motivo y la calidad del material,

la precisión dimensional no se encuentra por debajo de las 50 micras, como generalmente es requerido para moldes de extrusión, por lo que se recalca la importancia de equipos y parámetros de corte adecuados para mecanización de alta precisión.

- A pesar de que no se realizó un análisis de temperatura, se pudo notar que existieron altas fluctuaciones en el controlador de temperatura correspondiente a la termocupla ubicada en el dado. Esto se debe a la naturaleza del aluminio y sus propiedades de conducción de calor que permiten que se caliente o enfríe más rápido que el acero, por lo que esta resistencia tardó más en estabilizar su temperatura comparada con las otras, por lo que se considera esto como una ventaja del acero sobre el aluminio.

#### **4.2 Recomendaciones**

- Si se cuenta con las herramientas necesarias para mecanizar acero inoxidable como el AISI P20 o SAE 304, se recomienda la selección de este material debido a que sus propiedades los convierten en candidatos óptimos para la fabricación de moldes de extrusión, especialmente a gran escala y a largo plazo. En el caso de que se requiera abaratar costos de fabricación y reducir tiempos de mecanización, se recomienda Duraluminio PRODAX ya que se puede mecanizar utilizando insertos de acero rápido, los cuales son notoriamente más económicos comparados con los necesarios para mecanizar acero inoxidable, los tiempos de fabricación son menores y el acabado superficial es de alta calidad.
- Para mejorar la tolerancia dimensional y la simplificación del proceso de fabricación es preferible mecanizar dos piezas rectangulares individualmente, alinearlas y luego realizar el cilindrado del dado, dejando la brida de forma rectangular para evitar conflictos en el sistema de sujeción. Además, es importante siempre realizar las perforaciones para los pernos después de que las dos mitades se encuentren apropiadamente alineadas.
- Es recomendable colocar pasta con base metálica alrededor de la sección del dado que ingresa en la extrusora, para mejorar la transferencia de calor entre las paredes de la araña y el dado.
- Se plantea realizar pruebas reológicas a otros polímeros, como polietileno de alta densidad o de baja densidad lineal, y realizar el mismo modelamiento,

analizando como varía el gradiente de presión y el flujo de velocidad a medida que se cambia el índice de fluidez del material de trabajo, confirmando la generalización del diseño para otros polímeros.

- Para procesos de extrusión, generalmente se alcanzan tasas de máximo  $100 \text{ s}^{-1}$  de velocidad, por lo que el ajuste de la curva fue apropiado para describir este rango. Para rangos mayores (apropiados para procesos de inyección), para rangos mayores se recomienda el uso de un reómetro capilar, que puede alcanzar mayores tasas de corte que el reómetro rotacional.
- Se sugiere el uso de un software especializado en extrusión, o por lo menos en procesamiento de plásticos, ya la transición entre software CAD y simulador abarca una gran cantidad de recursos de tiempo, por lo que sería ideal un software que incluya algoritmos de optimización para geometría, basados en los requerimientos de la simulación.
- Se recomienda diseñar el dado de acuerdo a las condiciones de control de temperatura de la extrusora debido a que es importante que el polímero siempre se encuentre a la temperatura óptima de fluidez.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, procesos y sistemas.* .
- [2] J. Ferret, «Rehabilitación, Operación y Mantenimiento de una Extrusora de Compuestos de Polímeros», ESPOL, Guayaquil, 2008.
- [3] J. F. T. Pittman, «Computer-aided design and optimization of profile extrusion dies for thermoplastics and rubber: a review».
- [4] P. Klein, «Cutting Extrusion Die Design Costs», p. 2.
- [5] O. S. Carneiro, J. M. NoÂbrega, F. T. Pinho, y P. J. Oliveira, «Computer aided rheological design of extrusion dies for pro@les», *J. Mater. Process. Technol.*, p. 12, 2001.
- [6] G. N. Kouzilos, G. V. Seretis, C. G. Provatidis, y D. E. Manolakos, «Design of Polymer Extrusion Dies Using Finite Element Analysis», en *Extrusion of Metals, Polymers and Food Products*, S. Z. Qamar, Ed. InTech, 2018.
- [7] M. K. Choudhary y J. A. Kulkarni, «Modeling of three-dimensional flow and heat transfer in polystyrene foam extrusion dies», *Polym. Eng. Sci.*, vol. 48, n.º 6, pp. 1177-1182, jun. 2008.
- [8] A. S. E. Pradeep, «DESIGN FEATURES AND OPTIMIZATION OF PROFILE EXTRUSION DIES».
- [9] N. Lebaal, F. Schmidt, y S. Puissant, «Design and optimization of three-dimensional extrusion dies, using constraint optimization algorithm», *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 45, n.º 5, pp. 333-340, abr. 2009.
- [10] A. P. Deshpande, K. J. Murali, y K. P. B. Sunil, Eds., *Rheology of complex fluids*. New York: Springer, 2010.
- [11] R. B. Bird, Ed., *Dynamics of polymeric liquids*, 2nd ed. New York: Wiley, 1987.
- [12] T. Osswald y N. Rudolph, *Polymer rheology: fundamentals and applications*. Munich Cincinnati: Hanser, 2014.
- [13] A. J. Malkin, *Rheology fundamentals*. Toronto, Ontario: ChemTec Publ, 1994.
- [14] W. Ostwald, «Ueber die Geschwindigkeitsfunktion der Viskosität disperser Systeme. I», *Kolloid-Z.*, vol. 36, n.º 2, pp. 99-117, feb. 1925.
- [15] M. M. Cross, «Rheology of non-Newtonian fluids: A new flow equation for pseudoplastic systems», *J. Colloid Sci.*, vol. 20, n.º 5, pp. 417-437, jun. 1965.

- [16] M. L. Williams, R. F. Landel, y J. D. Ferry, «The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids», *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 77, n.º 14, pp. 3701-3707, jul. 1955.
- [17] R. Byron Bird y P. J. Carreau, «A nonlinear viscoelastic model for polymer solutions and melts—I», *Chem. Eng. Sci.*, vol. 23, n.º 5, pp. 427-434, 1968.
- [18] K. Yasuda, R. C. Armstrong, y R. E. Cohen, «Shear flow properties of concentrated solutions of linear and star branched polystyrenes», *Rheol. Acta*, vol. 20, n.º 2, pp. 163-178, mar. 1981.
- [19] D. H. Kaelble, «Deformation, strain, and flow: An elementary introduction to rheology, 2nd ed. M. REINER, Interscience, New York–London, 1960. xvi + 347 pp. \$9.75», *J. Polym. Sci.*, vol. 46, n.º 148, pp. 556-556, oct. 1960.
- [20] A. J. Peacock, *Handbook of polyethylene: structures, properties, and applications*. New York: Marcel Dekker, 2000.
- [21] M. Chanda y S. K. Roy, *Plastics technology handbook*, 4th ed. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2007.
- [22] J. Vlachopoulos y P. S. Scott, «Pressure drop for molten polymer flow through tapered dies», *Adv. Polym. Technol.*, vol. 5, n.º 2, pp. 81-86, 1985.

# **APÉNDICES**

# APÉNDICE A

## Hoja técnica del polietileno de baja densidad LD7000A.



Datasheet  
06/12/2018

### Low Density Polyethylene LD7000A

#### Description:

LD7000A is a Low Density Polyethylene produced by High Pressure technology. LD7000A is intended for the manufacturing of extruded films. It has high mechanical and impact strength, good processability, and good shrinkage.

#### Applications:

Blends with HDPE, Squeeze packaging

#### Processes:

Blow Molding

#### Control Properties:

Feature	Method	Units	Values
Melt Flow Rate (190°C/2.16kg)	D 1238	g/10 min	0.34
Density	D 792	g/cm <sup>3</sup>	0.921

#### Typical Properties - Plaque<sup>1</sup>:

##### Plaque Properties

Feature	Method	Units	Values
Tensile Strength at Yield (a)	D 638	MPa	10
Tensile Strength at Break (a)	D 638	MPa	15
Deflection Temperature under Load at 0.455 MPa (b)	D 648	°C	45

<sup>1</sup> Test specimens from compression molded plaque according to ASTM D4703. Plaque Thickness: a) 2mm. b) 3mm c) 6mm. NB = No break.

#### Typical Properties - Films:

##### Blow Film Reference Properties (a)

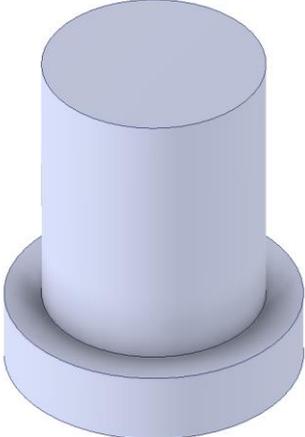
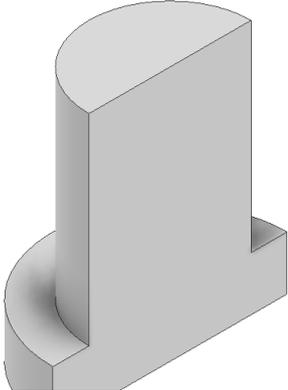
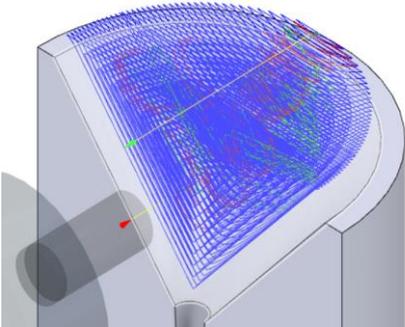
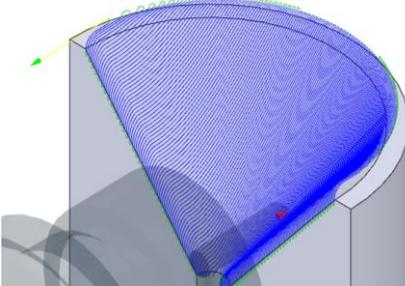
Feature	Method	Units	Values
Tensile Strength at Break (MD/TD)	D 882	MPa	25/25
Elongation at Break (MD/TD)	D 882	%	320/880
Dart Drop Impact	D 1709	g/F50	350
Elmendorf Tear Strength (MD/TD)	D 1922	gF	ND(b)/250
Haze	D 1003	%	12
Gloss - Angle 60°	D 2457	%	60

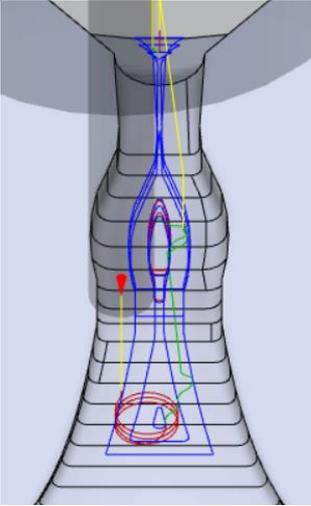
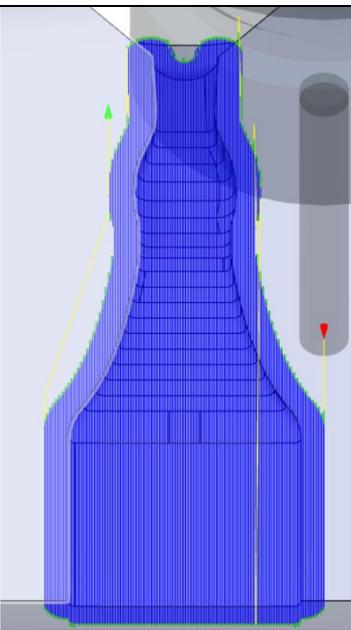
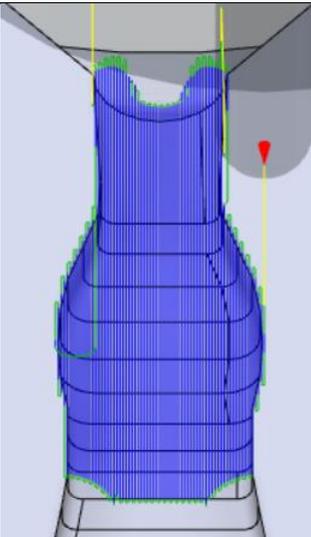
(a) Film of 70 µm thickness, obtained in a 40 mm extruder, with a blow ratio of 2.2: 1, a die opening of 1.0 mm. (DM = Direction of Extrusion and DT = Direction Transversal to Extrusion). (b) Not Determined.

Recuperado de: <https://www.braskem.com.br/porta/Principal/arquivos/docs/es-MX/Propiedades.pdf>

## APÉNDICE B

### Ciclo de Fabricación [elaboración propia]

#	Operación	Figura	Herramienta	Avance [mm/min]	N [rpm]
1	Cilindrado		Pastilla Titanio TNMG160404	150	1200
2	Corte		Hilo de corte 0.1 mm	0.25	N/A
3	Desbaste		Fresa Plana 1/2"	240	1500
4	Acabado		Fresa de punta redonda 1/4"	200	2000

5	Desbaste		Fresa plana 1/4"	240	1500
6	Acabado		Fresa plana 1/4"	200	2000
7	Acabado		Fresa de punta redonda 1/4"	200	2000

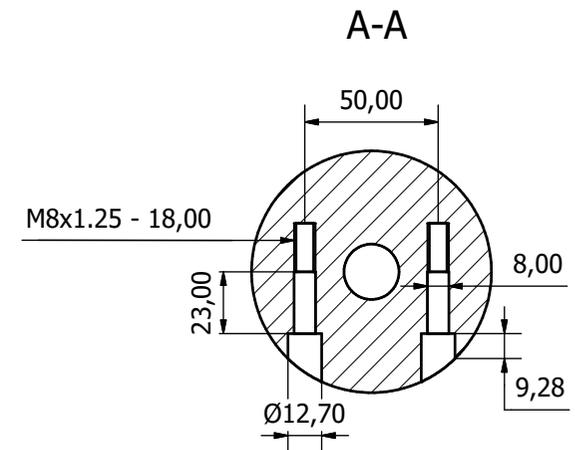
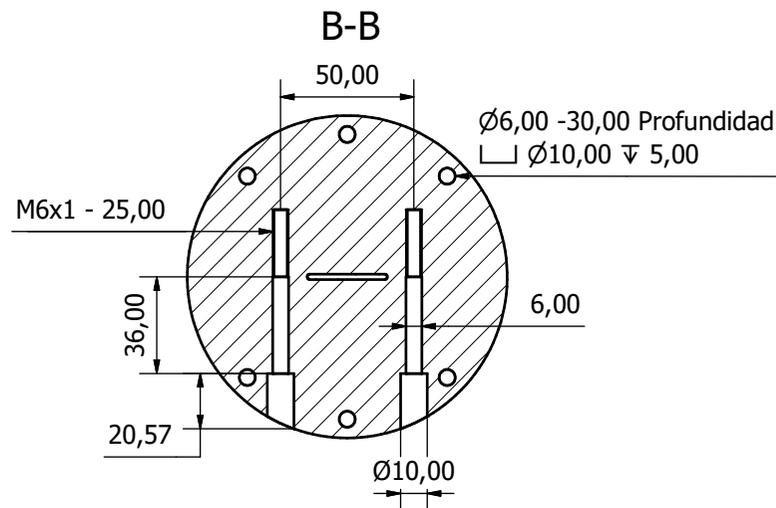
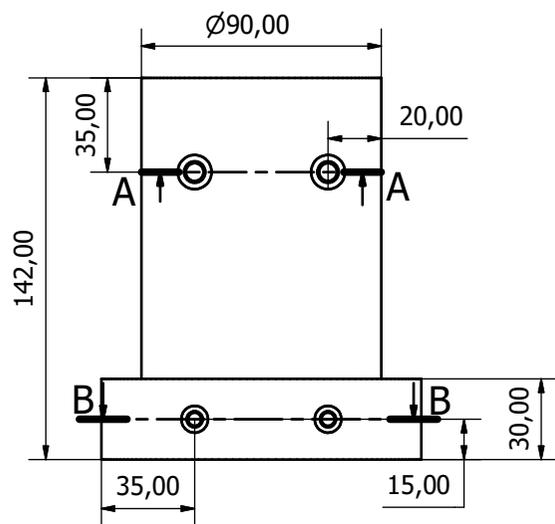
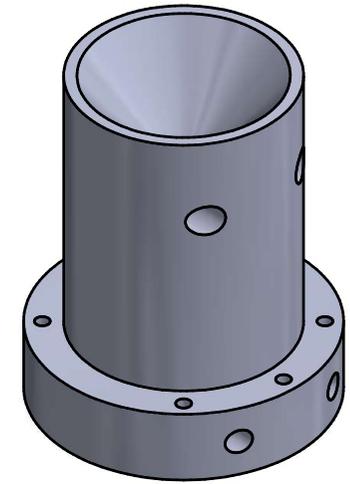
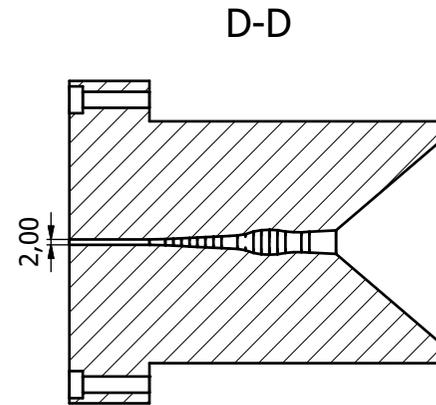
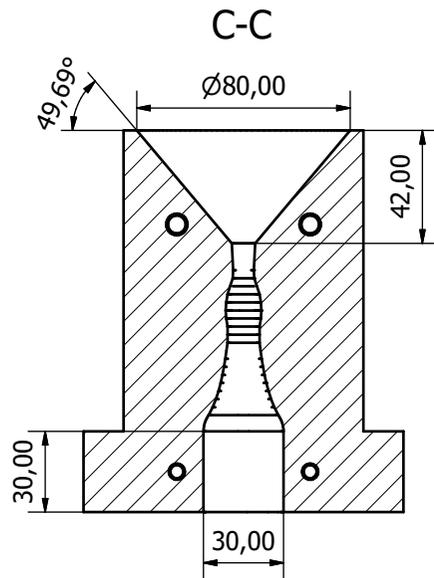
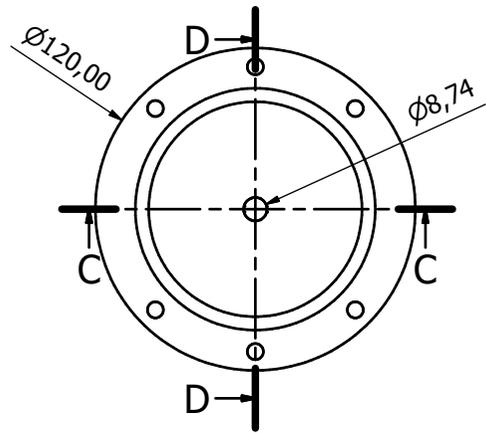
8	Fresado		Fresa plana 10 mm	150	1200
9	Taladrado		Broca 5 mm	N/A	150
10	Machueado		Machuelos M6x1	N/A	N/A
11	Cilindrado		Pastilla Titanio TNMG160404	150	1200

# APÉNDICE C

## Tabla de Tolerancias ISO 286-2 para ejes

DIAMETROS NOMINALES		TOLERANCIAS ISA - EJE UNICO																									
		AJUSTE DE PRECISION											AJUSTE FINO											AJUSTE CORRIENTE			
		AGUJERO											AGUJERO											AGUJERO			
		EJE	ASIENTO MUY FUERTE	ASIENTO MUY FUERTE	ASIENTO FUERTE	ASIENTO FUERTE	ASIENTO FORZADO DURO	ASIENTO FORZADO PRIETO	ASIENTO FORZADO MEDIO	ASIENTO FORZADO LIGERO	ASIENTO DESLIZANTE	ASIENTO GIRATORIO ESTRECHO	EJE	ASIENTO MUY FUERTE	ASIENTO MUY FUERTE	ASIENTO FUERTE	ASIENTO FUERTE	ASIENTO FORZADO DURO	ASIENTO FORZADO PRIETO	ASIENTO FORZADO MEDIO	ASIENTO FORZADO LIGERO	ASIENTO DESLIZANTE	ASIENTO GIRATORIO ESTRECHO	ASIENTO GIRATORIO ESTRECHO	EJE	ASIENTO MUY FUERTE	ASIENTO DESLIZANTE
h5	S6	R6	P6	N6	M6	K6	J6	H6	G6	h6	S7	R7	P7	N7	M7	K7	J7	H7	G7	F7	h8	S8	H8	F8	E8	D8	
mas de 1,6 hasta 3	0 -5	-13 -20	-10 -17	-7 -14	-4 -11	0 -7	-	+3 -4	+7 0	+10 +3	0 -7	-13 -22	-10 -19	-7 -16	-4 -13	0 -9	-	+3 -6	+9 0	+12 +7	+16 +7	0 -14	-15 -29	+14 0	+21 +7	+28 +14	+45 +20
mas de 3 hasta 6	0 -5	-16 -24	-12 -20	-9 -17	-5 -13	-1 -9	-	+4 -4	+8 0	+12 +4	0 -8	-15 -27	-11 -23	-8 -20	-4 -16	0 -12	-	+5 -7	+12 0	+16 +4	+22 +10	0 -18	-19 -37	+18 0	+28 10	+36 +20	+60 +30
mas de 6 hasta 10	0 -6	-20 -29	-16 -25	-12 -21	-7 -18	-3 -12	+2 -7	+5 -4	+9 0	+14 +5	0 -9	-17 -32	-13 -28	-9 -24	-4 -19	0 -15	+5 -10	+6 -7	+15 0	+20 +3	+28 +13	0 -22	-23 -45	+22 0	+35 +13	+47 +25	+76 +40
mas de 10 hasta 14	0	-25	-20	-15	-9	-4	+2	+6	+11	+17	0	-21	-16	-11	-5	0	+6	+10	+18	+24	+34	0	-28	+27	+43	+59	+93
mas de 14 hasta 18	-8	-36	-31	-26	-20	-15	-9	-5	0	+6	-11	-39	-34	-28	-23	-18	-12	-8	0	-6	+16	-27	-55	0	+16	+32	+50
mas de 18 hasta 24	0	-31	-24	-18	-11	-4	+2	+8	+13	+20	0	-27	-20	-14	-7	0	+6	+12	+21	+28	+41	0	-35	+33	+53	+73	+117
mas de 24 hasta 30	-9	-44	-37	-31	-24	-17	-11	-5	0	+7	-13	-48	-41	-36	-28	-21	-15	-9	0	+7	+20	-33	-68	0	+20	+40	+65
mas de 30 hasta 40	0	-38	-29	-21	-12	-4	+3	+10	+16	+25	0	-34	-25	-17	-8	0	+7	+14	+25	+34	+50	0	-43	+39	+64	+89	+142
mas de 40 hasta 50	-11	-54	-45	-37	-28	-20	-13	-8	0	+8	-16	-59	-50	-42	-33	-25	-18	-11	0	+9	+25	-39	-62	0	+25	+50	+80
mas de 50 hasta 65	0	-47	-35	-26	-14	-5	+4	+13	+19	+29	0	-42	-30	-21	-9	0	+9	+18	+30	+40	+60	0	-53	+46	+76	+108	+174
mas de 65 hasta 80	-13	-53	-37	-45	-33	-24	-15	-6	0	+10	-19	-48	-32	-51	-39	-30	-21	-12	0	+10	+30	-46	-59	0	+30	+60	+100
mas de 80 hasta 100	0	-64	-44	-30	-16	-6	+4	+16	+22	+34	0	-58	-38	-24	-10	0	+10	+22	+35	+47	+71	0	-71	+54	+90	+126	+207
mas de 100 hasta 120	-15	-86	-66	-52	-38	-28	-18	-8	0	+12	-22	-66	-41	-59	-45	-35	-25	-13	0	+12	+38	-54	-79	+0	+36	+72	+120
mas de 120 hasta 140	0	-	-56	-41	-24	-8	+5	+18	+25	+39	0	-77	-48	-26	-12	0	+12	+28	+40	+54	+83	0	-92	+63	+106	+148	+245
mas de 140 hasta 160	-18	-	-81	-61	-45	-33	-21	-7	0	+14	-25	-85	-50	-63	-52	-40	-28	-14	0	+14	+43	-63	-105	0	+43	+85	+145
mas de 160 hasta 180	0	-	-58	-41	-28	-11	+6	+20	+28	+42	0	-78	-53	-39	-18	0	+13	+30	+46	+61	+96	0	-122	+72	+122	+172	+285
mas de 180 hasta 200	0	-	-81	-61	-45	-33	-21	-7	0	+14	-25	-93	-53	-41	-30	-21	-14	0	+15	+46	+72	-72	-130	0	+50	+100	+170
mas de 200 hasta 225	-20	-	-68	-47	-30	-18	+4	+16	+22	+34	0	-105	-60	-46	-14	0	+13	+30	+46	+61	+96	0	-194	+72	+122	+172	+285
mas de 225 hasta 250	-20	-	-97	-70	-51	-37	-24	-7	0	+15	-29	-113	-63	-79	-60	-46	-33	-16	0	+15	+50	-72	-202	0	+50	+100	+170
												-123	-67	-113									-140				
												-169	-113										-212				

## **APÉNDICE D: PLANOS**



Diseño de Sebastián Acosta	Aprobado por PhD Eduardo Castillo	Fecha 28/12/2019	
Materia Integradora		Aluminio	
		Hoja 1 / 1	
Molde de Extrusión para probetas de polietileno			