

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR D'ALCOI

**Estudio, diseño, simulación y optimización de
una matriz de extrusión de plástico.**

Trabajo Final de Grado
Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: Giordano Moya Verdú

Tutor: Santiago Ferrándiz Bou

Curso académico: 2015-2016

Resumen

Con el objetivo de diseñar correctamente una matriz de extrusión para extruir perfiles de sección circular, se tienen en cuenta los factores de flujo y de forma, a fin de conseguir la forma final deseada en el perfil extruido. Para ello, es necesario partir de una idea inicial de matriz de extrusión e implementar mejoras a medida que se obtienen resultados en las simulaciones realizadas en Ansys PolyFlow. El método empleado se basa en una primera simulación a partir de una idea, la cual se mejora a partir de los resultados obtenidos de flujo de material, presión y expansión de material a la salida. Se consigue un diseño final de la matriz a partir de la primera simulación, realizando las mejoras adecuadas con el objetivo de obtener el perfil deseado sin errores. En la simulación de la matriz final y de diseño óptimo, se obtienen los datos concluyentes que proporcionan la información necesaria para inferir que se ha conseguido extruir el perfil deseado con un flujo uniforme. Finalmente se realiza un diseño 3D con Autodesk Inventor, el cual refleja las dimensiones óptimas halladas durante el proceso.

Amb l'objectiu de dissenyar correctament una matriu d'extrusió per extruir perfils de secció circular, es tenen en compte els factors de flux i de forma, per tal d'aconseguir la forma final desitjada en el perfil extruït. Per a això, cal partir d'una idea inicial de matriu d'extrusió i implementar millores a mesura que s'obtenen resultats en les simulacions realitzades en Ansys PolyFlow. El mètode emprat es basa en una primera simulació a partir d'una idea, la qual es millora a partir dels resultats obtinguts de flux de material, pressió i expansió de material a la sortida. S'aconsegueix un disseny final de la matriu a partir de la primera simulació, realitzant les millores adequades amb l'objectiu d'obtenir el perfil desitjat sense errors. En la simulació de la matriu final y de disseny òptim, s'obtenen les dades concloents que proporcionen la informació necessària per inferir que s'ha aconseguit extruir el perfil desitjat amb un flux uniforme. Finalment es realitza un disseny 3D amb Autodesk Inventor, el qual reflecteix les dimensions òptimes trobades durant el procés.

In order to properly design an extrusion die for extruding profiles of circular cross section, factors such as flux and form have been kept in mind in order to achieve the desired final form in the extrudate. Therefore necessary to start from an initial idea about extrusion die and implement the improvements whenever results are obtained in the simulations with Ansys PolyFlow. The method is based on a first simulation from an idea, which is improved from the results of material flow, pressure and expansion of material output. A final design of the matrix is obtained from the first simulation, the appropriate improvements have been done in order to obtain the desired profile without error. In the simulation of the final and optimal die design, the conclusive data provides the information necessary to infer that the desired uniform flow profile have been obtained successfully in the operation of extrude. Finally a 3D design with Autodesk Inventor has been done, which reflects the optimal dimensions found during the process is done.

Palabras clave: Diseño matriz, Extrusión, Ansys, Simulación.

Keywords: Die design, extrusion, Ansys, Simulation.

Índice

1. Objetivo.....	4
2. Introducción	5
3. Metodología del trabajo.....	6
3.1. Estudio de la materia.	6
3.2. Secuenciación de actividades.....	6
4. Desarrollo y resultados.	7
4.1. Proceso de extrusión.....	7
4.1.1. Componentes de la extrusora	9
4.1.1.1. Tornillo de extrusión.	9
4.1.1.2. Cilindro	10
4.1.1.3. Garganta de alimentación.....	11
4.1.1.4. Tolva	11
4.1.1.5. Placa rompedora	12
4.1.1.5. Cabezal y boquilla.....	13
4.1.2. Especificaciones de la máquina.....	15
4.2. Comportamiento del fundido.	16
4.2.1. Reología.....	16
4.2.2. Viscosidad.....	17
4.2.3. Comportamiento viscoelástico de los fluidos	17
4.2.4. Comportamiento de los fluidos no newtonianos.....	18
4.2.5. Densidad.....	19
4.3. Ecuaciones de balance	20
4.3.1 Ecuaciones de balance de masa	20
4.3.2. Ecuaciones de la cantidad de movimiento.....	20
4.3.3. Ecuaciones de balance de energía.	21
4.4. Análisis del flujo	21
4.4.1 Flujo de arrastre.	21
4.4.2 Flujo de presión.....	21
4.4.3 Velocidad de cizalla.	22
4.4.4. Deformación de corte.	22

4.4.5. Esfuerzo cortante	22
4.5. Modelos de flujo	23
4.5.1. Fluidos Newtonianos y no newtonianos.	23
4.5.2. Ley de potencia (Power Law)	23
4.6. Ecuaciones de flujo.....	25
4.6.1. Ecuaciones de velocidad.	25
4.6.2. Calculo del caudal.....	28
4.7. Diseño de la matriz y cálculo del punto de operación.	31
4.8. Simulación y resultados.....	33
4.8.1. Simulación del flujo.	33
4.8.1.1 Preparación.	33
4.8.1.2. Mallado.	35
4.8.1.3. Polydata.....	36
4.8.3. Resultados.	37
4.8.3.1. Calculo de la curva de la extrusora de la primera simulación.....	37
4.8.3.2. Calculo de la curva de la matriz primera simulación.....	38
4.8.3.3. Resultados obtenidos en la primera simulación.	39
4.8.3.4. Calculo curva de la extrusora para el diseño final.....	45
4.8.3.5. Calculo de la curva de la matriz para el diseño final.	46
4.8.3.6. Resultados obtenidos en la simulación del diseño final.	47
4.9. Diseño 3D de la matriz de extrusión.	52
5. Estudio económico.....	54
6. Conclusiones.....	55
7. Bibliografía.	56

1. Objetivo

El objetivo de este proyecto es el de diseñar una matriz de extrusión mediante la simulación, el estudio y el cálculo del flujo del plástico fundido al paso a través de la matriz a la salida del tornillo extrusor.

Calcular correctamente las condiciones del flujo al paso por la matriz e implementarlas en Ansys PolyFlow, a fin de obtener datos calificativos que nos permitan hallar mediante unas características determinadas de la extrusora, el diseño adecuado de la matriz para la extrusión sin errores del perfil deseado.

Diseñar en 3D mediante Autodesk Inventor Professional la matriz una vez obtenidas las dimensiones óptimas para el correcto funcionamiento y un flujo de material a través de ella en las condiciones calculadas.

2. Introducción

Para conseguir que el proceso de extrusión sea el correcto se han de tener en cuenta dos factores; un buen diseño de la sección transversal del perfil que se desea obtener y un diseño óptimo de la matriz de extrusión. El diseño de la matriz de extrusión se realiza mediante métodos de prueba y error. Un buen diseñador puede mecanizar la forma correcta de la matriz para el perfil deseado realizando pocas modificaciones sobre el modelo inicial, mientras que un diseñador sin experiencia es posible que deba mecanizar la matriz varias veces más para obtener el perfil deseado. Existen empresas especializadas CAE para el diseño de matrices de extrusión basándose en modelos computacionales. Con la sección transversal definida, los parámetros reológicos del polímero y la tasa de producción, modelos computacionales pueden diseñar la sección transversal de la matriz requerida prediciendo la presión de descarga, la temperatura de fusión y los perfiles de flujo dentro de la matriz.

Una matriz diseñada incorrectamente puede inducir problemas de deformaciones en el perfil. La matriz tiene que estar adecuadamente diseñada para mantener un flujo y caída de presión uniformes en todas las fases del perfil. Grandes diferencias en las tasas de flujo a lo largo de la sección de la matriz pueden traducirse en graves deformaciones en el perfil deseado debido a la diferente orientación molecular. Esto provoca diferentes contracciones características entre unas secciones y otras del perfil. Para prevenir grandes diferencias de temperatura a lo largo de la sección del perfil la temperatura de fusión en todos los canales ha de ser similar, de no ser así, pueden producirse diferentes enfriamientos fuera de la matriz traducidos en diferentes contracciones y deformaciones. Presiones diferentes en la boquilla producen la deformación en la parte final debido al diferente empaquetamiento molecular a lo largo de la sección de la matriz, ya que en zonas con mayor empaquetamiento molecular se producen menos contracciones en comparación con otras secciones. Diferentes contracciones en diferentes secciones también puede ser debido a tensiones internas no uniformes lo cual puede causar deformaciones en el perfil final.

3. Metodología del trabajo

El proyecto se ha realizado en base a una idea de matriz de extrusión la cual se ha modificado a medida que se han ido obteniendo resultados en las simulaciones del flujo de material a través de ella. Para ello, se han realizado una serie de pautas para poder realizar el proyecto con el máximo de acierto posible.

3.1. Estudio de la materia.

Con el fin de realizar un correcto estudio sobre una extrusora y todo lo que su funcionamiento conlleva, se ha procedido a estudiar a fondo las características de la maquina incluyendo, tipos de máquinas (variantes), tipos de componentes que las diferencian, condiciones de trabajo. Para ello, es necesario comprender y entender correctamente el funcionamiento y el papel que representan cada uno de sus componentes a la hora de realizar la extrusión.

Además se ha estudiado el comportamiento de los materiales poliméricos, sus características en diferentes condiciones y el comportamiento dependiente de la temperatura en los polímeros fundidos, condición muy importante a la hora de realizar el proyecto.

También se ha estudiado el proceso de extrusión y los acontecimientos que se presentan en la zona de dosificación de la extrusora, la cual junto con la zona de la matriz es la más importante en el estudio y diseño de una matriz de extrusión.

Es muy importante conocer como funciona el software de simulación Ansys Workbench y más en especial la herramienta PolyFlow, ya que ésta, es para el estudio del flujo de material. Para ello, se han realizado todos los tutoriales que sobre PolyFlow que contiene la guía para usuarios.

3.2. Secuenciación de actividades.

El proyecto se ha desarrollado siguiendo los siguientes pasos:

1. Calculo de las condiciones óptimas de caudal y presión para una matriz con diámetro de 5,5 mm en el canal y todo lo que ello conlleva (curvas Q – P, viscosidad dinámica del material, etc.).
2. Simulación de la extrusión directa para una matriz con diámetro de 5,5 mm en el canal.
3. Cálculo de la relación de expansión en la salida del canal.
4. Simulación de extrusión inversa para hallar la sección óptima del canal para extruir un perfil circular de 5,5 mm.
5. Calculo de condiciones óptimas de caudal y presión para una matriz de sección de 4,8 mm (diámetro óptimo del canal de la matriz).
6. Simulación de la extrusión directa para una matriz con diámetro de 4,8 mm en el canal.
7. Diseño 3D de la matriz de extrusión con las dimensiones óptimas halladas durante el estudio.

4. Desarrollo y resultados.

4.1. Proceso de extrusión.

Alrededor de un 60 % de los plásticos se procesan por extrusión. El procedimiento de extrusión es la acción de forzar, por medio de presión, a pasar de forma continua un plástico o material fundido a través de una “matriz” o “boquilla”. A su salida el material conformado es recogido por un sistema de arrastre, con velocidad regulable, que le proporciona las dimensiones finales mientras se enfría y adquiere la necesaria consistencia.

El procedimiento se ha utilizado durante muchos años para metales que fluyen plásticamente cuando se someten a una presión de deformación. En el procedimiento original para someter los polímeros a extrusión, se utilizaron máquinas similares impulsadas por un ariete o empujador mecánico. En el proceso moderno se usan tornillos para hacer fluir el polímero en el estado fundido a lo largo de la camisa de la máquina.

La extrusión es un proceso para la producción de forma continua de productos de sección transversal constante. Productos típicos son: Tubos (1 – 1500 mm de diámetro), film, láminas, planchas, fibras, cintas, barras, varillas, revestimiento de alambres, perfiles, etc.

Los componentes esenciales de una línea de extrusión (Figura 1.) son:

- Extrusor
- Matriz o boquilla
- Conjunto de equipos que maneja el material extruido para asegurar que enfría adecuadamente y con la forma deseada.

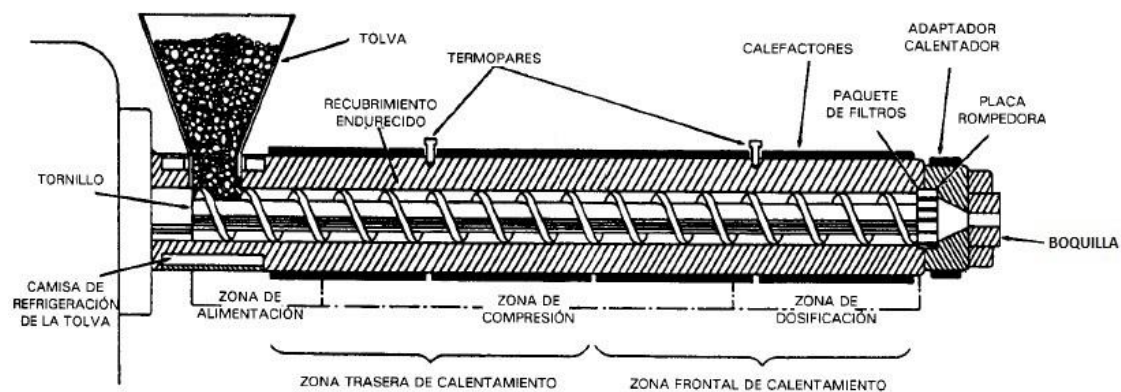


Figura 1. Extrusor de tornillo simple

Las máquinas de extrusión constan de un cilindro en cuyo interior se aloja un tornillo, que al girar recoge el material de la tolva de alimentación, lo hace avanzar a lo largo del cilindro, le somete a importantes esfuerzos de cizalla a la vez que lo comprime y lo dosifica a través de un

plato rompedor hasta la boquilla. Debido al movimiento relativo entre el tornillo y el cilindro, el material se mezcla íntimamente, se calienta por efecto, no sólo del calor aplicado al cilindro, sino, por la energía disipada por los esfuerzos cortantes.

Los gránulos se almacenan en la tolva de alimentación de donde pasan por gravedad al extrusor constituido por un tornillo de Arquímedes, que se ajusta con precisión dentro de una camisa cilíndrica, apenas con el espacio suficiente para rotar, y que lo transporta a lo largo de la máquina, donde el polímero se funde y homogeneiza. El material fundido fluye a través de la matriz y es recogido por el dispositivo de arrastre que lo saca ya perfilado.

El tipo de máquina que más se utiliza es la de tornillo simple. Existen otros tipos de máquinas como son las extrusoras multitornillo que, como su nombre indica, poseen más de un tornillo. Entre éstas las más importantes son las de dos tornillos, dentro de las cuales existe gran variedad dependiendo de si los tornillos tienen giro contrario (lo más corriente ya que generan mayor fuerza de cizalla) o paralelo, y del grado de interpenetración entre los mismos. En la (Figura 2.) se muestran algunas variantes posibles.

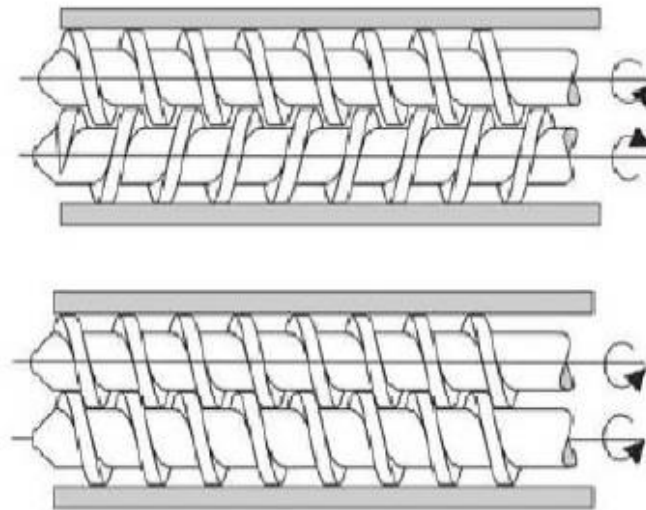


Figura 2. Tornillos gemelos

Las extrusoras de dos tornillos presentan posibilidades que a menudo superan en gran medida a las de un solo tornillo. Entre las ventajas que presentan se incluye una buena capacidad de mezclado y desgasificación, y un buen control del tiempo de residencia y de su distribución. Algunas desventajas de estas extrusoras son su precio, superior al de las de tornillo único y el hecho de que sus prestaciones son difíciles de predecir.

4.1.1. Componentes de la extrusora

4.1.1.1. Tornillo de extrusión.

La finalidad del extrusor es fundir o plastificar el polímero, asegurar una mezcla adecuada (homogeneización) y actuar como medio de transporte del polímero fundido hacia la matriz.

El tornillo de un extrusor tiene uno o dos “hilos” en espiral a lo largo de su eje que configuran un canal helicoidal de anchura constante. El diámetro medido hasta la parte externa del hilo es el mismo en toda la longitud para permitir un ajuste preciso en la camisa cilíndrica, con una distancia entre ellas apenas suficiente para dejarlo rotar.

El núcleo es de diámetro variable, de manera que el canal en espiral varía en profundidad. En general, la profundidad del canal disminuye desde el extremo de alimentación hasta el extremo de la matriz (Figura 3.) aunque existen modificaciones con fines especiales. Una consecuencia de que disminuya la profundidad del canal es el incremento de la presión a lo largo del extrusor (Figura 3.) y ésta es la que impulsa el material fundido a pasar a través de la matriz.

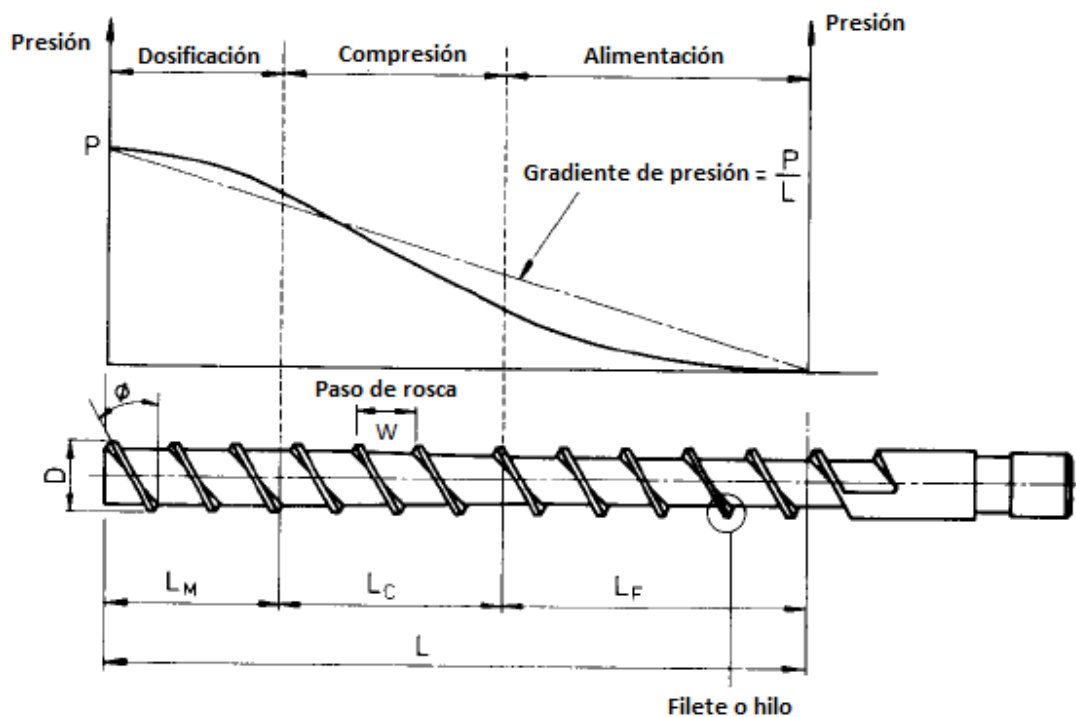


Figura 3. Tornillo de extrusión y zonas

En general, existen tres zonas claramente diferenciadas que cumplen tres misiones principales: alimentación, compresión y dosificación. A veces existen algunas zonas complementarias (por ejemplo, desgasificación). Las funciones de cada una de las zonas son como sigue:

Zona de alimentación:

En esta zona se precalienta y transporta (suministra) el polímero a las partes siguientes. La profundidad del tornillo es constante y la longitud de esta zona es tal que se produzca una alimentación correcta, ni deficiente ni excesiva, hacia las zonas de delante del tornillo. Esta alimentación varía un poco para los diferentes tipos de polímeros con el fin de obtener una eficiencia óptima.

Zona de compresión:

Esta zona tiene una profundidad de canal decreciente y tiene diferentes funciones. Primeramente, se expulsa el aire atrapado entre los gránulos originales (compactación), en segundo lugar, se mejora la transferencia de calor desde las paredes de la camisa calentada conforme disminuye el espesor de la capa de material y en tercer lugar, se da el cambio de densidad que ocurre durante la fusión. Esta se logra por fricción y por conducción de calor, a lo que ayuda la reducción del espesor del material.

Zona de dosificación:

Una vez más se encuentra una profundidad de tornillo constante. Su función es la de homogeneizar el material fundido (mezcla distributiva) y con ello suministrar a la región de la matriz un material de calidad homogénea a temperatura y presión constantes.

4.1.1.2. Cilindro

El cilindro de calefacción alberga en su interior al tornillo como se muestra en la figura 4. La superficie del cilindro debe ser muy rugosa para aumentar las fuerzas de cizalla que soportará el material y permitir así que éste fluya a lo largo de la extrusora. Para evitar la corrosión y el desgaste mecánico, el cilindro suele construirse de aceros muy resistentes y en algunos casos viene equipado con un revestimiento bimetálico que le confiere una elevada resistencia, en la mayoría de los casos superior a la del tornillo, ya que éste es mucho más fácil de reemplazar.

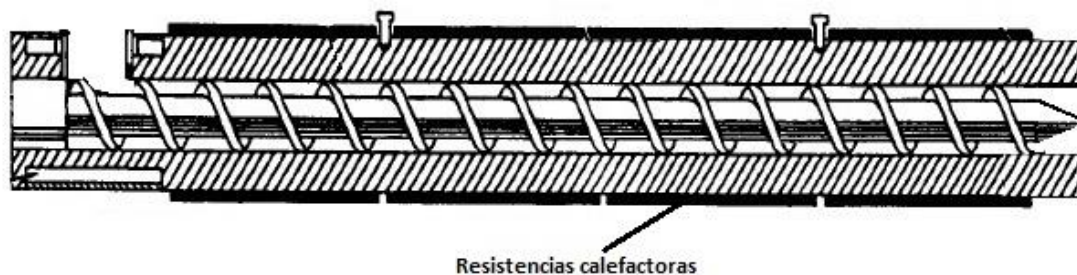


Figura 4. Cilindro

Por lo general el cilindro posee sistemas de transferencia de calor. El calentamiento se puede realizar mediante resistencias eléctricas circulares localizadas en toda su longitud como se muestra en la figura 4. El cilindro suele dividirse en varias zonas de calefacción, al menos tres,

con control independiente en cada una de ellas, lo que permite conseguir un gradiente de temperatura razonable desde la tolva hasta la boquilla.

El cilindro debe enfriarse como consecuencia de la generación interna de calor originada por la cizalla a la que se somete al plástico se rebasa la temperatura nominal del proceso (lo que ocurre normalmente). El enfriamiento en la menor parte de las ocasiones se hace con líquidos, ya que aunque tengan una mayor capacidad para eliminar calor que el aire, la temperatura es más difícil de controlar.

4.1.1.3. Garganta de alimentación

La garganta de alimentación suele estar provista de un sistema de una camisa de refrigeración para mantener la temperatura en la garganta lo suficientemente baja como para que las partículas de granza no se adhieran a las paredes internas de la extrusora. Está conectada a la tolva a través de la boquilla de entrada o alimentación cuyas dimensiones suelen ser $1,5D \times 0,7D$ donde (D) es el diámetro del cilindro. Como se observa en la figura 5. Suele estar desplazada del eje del tornillo.

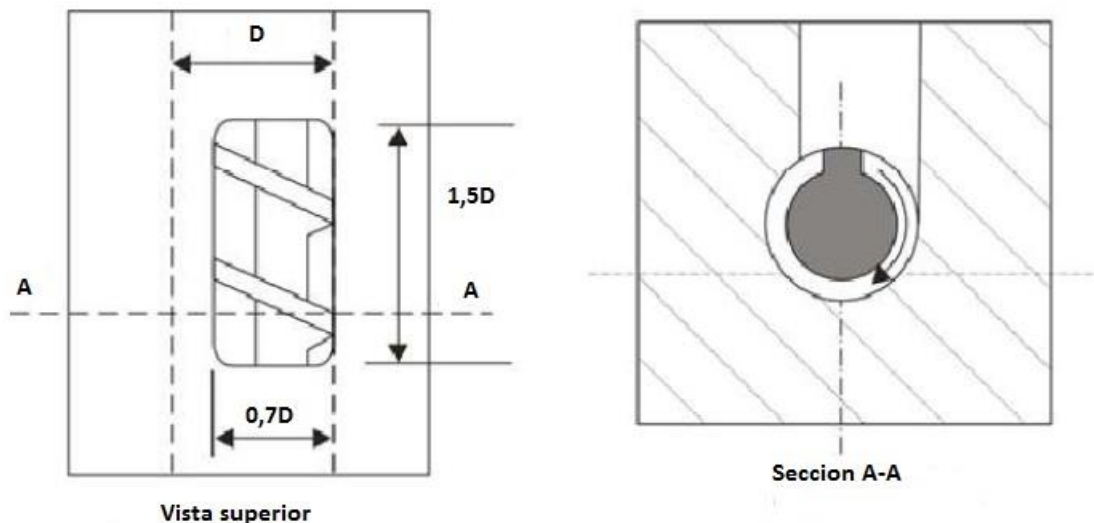


Figura 5. Garganta de alimentación.

4.1.1.4. Tolva

La tolva es el contenedor donde se almacena la granza durante un tiempo limitado y que se utiliza para introducir el material en la máquina. Tolva, garganta de alimentación y boquilla de entrada deben estar ensambladas perfectamente y diseñadas para proporcionar un flujo constante de material. Esto se consigue más fácilmente con tolvas de sección circular, aunque son más caras y difíciles de construir que las de sección rectangular (figura 6.). Se diseñan con un volumen que permita albergar material para 2 horas de trabajo.

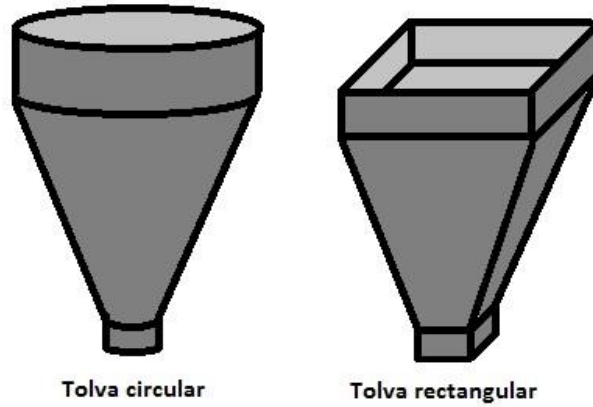


Figura 6. Tipos de tolva

Para asegurar un flujo constante del material por la garganta de alimentación, las tolvas utilizan dispositivos agitadores o tronillos sin fin con el objetivo de alimentar al husillo.

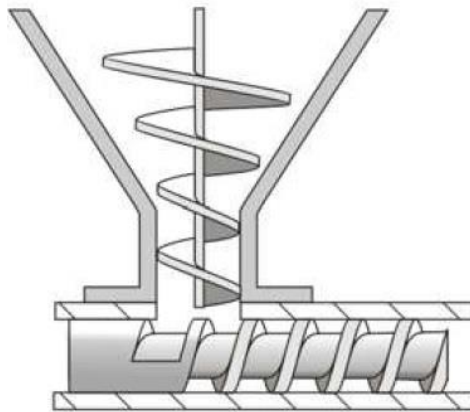


Figura 7. Tolva con tronillo de alimentación.

4.1.1.5. Placa rompedora

La zona final de un extrusor es la zona de la matriz, que termina en la propia matriz. Situado en esta región se encuentra el portamallas (figura 8.). Este consta, por lo común, de una placa de acero perforada conocida como placa rompedora y un juego de mallas de dos o tres capas de gasa de alambre situadas en el lado del tornillo.

El ensamble placa rompedora-juego de mallas tiene tres funciones:

- 1.- Evitar el paso de material extraño, por ejemplo, polímero no fundido, polvos, cuerpos extraños.
- 2.- Crear un frente de presión cuando se opone una resistencia al bombeo de la zona anterior, regularizando así el flujo del material.

3.- Eliminar la “memoria de giro” del material fundido, es decir transformar el flujo helicoidal del material en flujo paralelo más regular

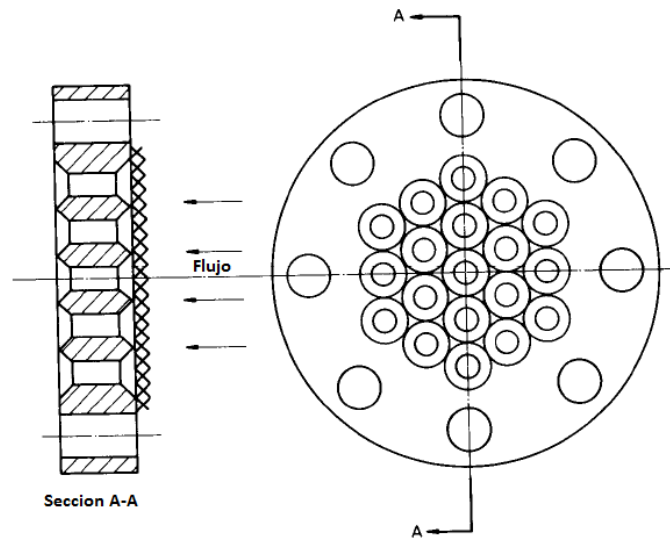


Figura 8. Placa rompedora y juego de mallas.

Una descripción más detallada de estas funciones es:

- 1.- El cribado ayuda a reducir los defectos del producto más adelante al eliminar partículas no deseadas. A menudo quedan atrapadas en la malla partículas de metal o, inclusive, tuercas o tornillos pequeños así como, por ejemplo, aglomerados de material de relleno que han escapado a la dispersión. Además de hacer que el producto salga defectuoso, las partículas metálicas dañan la matriz, lo cual es un grave problema, pues las matrices son caras y difíciles de reparar.
- 2.- La importancia de crear un frente de presión radica en que esta presión es la que proporciona la fuerza impulsora para vencer la resistencia de la matriz.
- 3.- En muchos casos, el polímero recuerda su trayecto en giros a lo largo de la espiral del tornillo, aun después de haber pasado por la matriz y esto puede dar como resultado una deformación por torsión del producto. Los polímeros, están formados por moléculas de cadena larga, enrolladas y enmarañadas incluso cuando están fundidos, ésta es la razón de su comportamiento viscoelástico. Los materiales fundidos, aunque la mayoría son viscosos, tienen también propiedades elásticas importantes.

4.1.1.5. Cabezal y boquilla

La matriz tiene como función el obtener la forma deseada del material extruido (aunque puede realizarse un conformado posterior). La matriz está calentada externamente y debe asegurarse que el flujo de material fundido cambie de forma suavemente desde la configuración proveniente del tornillo hasta la forma deseada del producto final. Por ejemplo, para la producción de barras se requiere un dado de forma troncocónica.

Una matriz típica para la producción de tubos se muestra en la figura 9. Dispone de un núcleo central (torpedo), soportado por una serie de aletas. El material fluye a su alrededor en forma de corona circular, hasta alcanzar la boquilla, que debe estar suficientemente alejada de las aletas para que el flujo vuelva a ser uniforme, eliminándose la distorsión del mismo originada por éstas. En la boquilla el material asoma al exterior, enfriándose uniformemente. Este extremo de la extrusora se denomina cabezal.

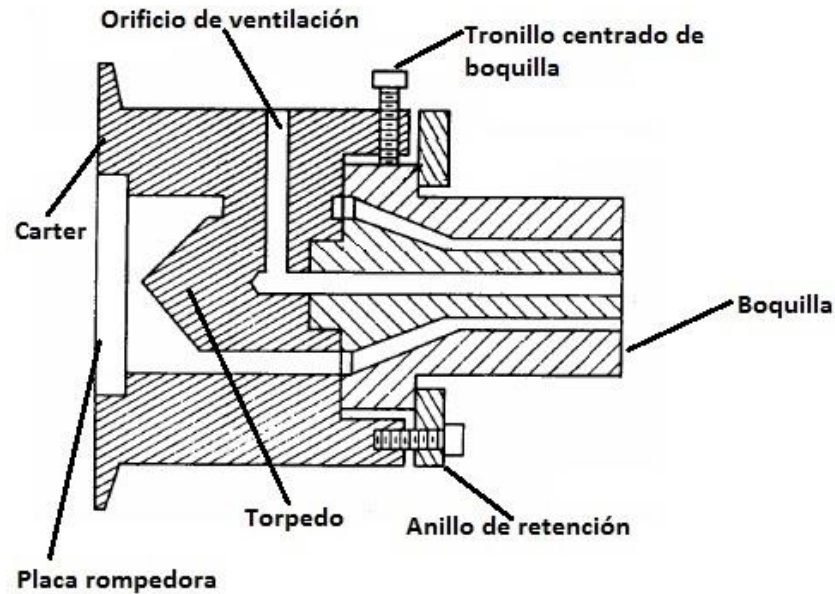


Figura 9. Boquilla anular y cabezal.

El principal problema que existe con la matriz es que el material hincha a la salida, lo cual ocurre debido a las propiedades elásticas del fundido. Conjuntamente con el arrastre del material, que es necesario para asegurar un producto recto, la determinación de las dimensiones finales del producto se realiza, usualmente, mediante ensayos causa - efecto. En algunos casos, es necesario un plato formador o plantilla para definir la forma.

La velocidad de salida de la matriz de una máquina extrusora depende de la caída de presión que tiene lugar a través de ella. Un aumento en la presión incrementa la salida, sin embargo, dicha presión puede actuar en sentido contrario reduciendo el transporte de material a través de la zona de dosificación del tornillo. Es necesario, por consiguiente, ajustar los diseños del tornillo y de la matriz para obtener una salida óptima para cada tipo de material.

El enfriamiento del material extruido debe ser rápido con el fin de mantener la forma. Para ello suele usarse un baño de agua. Con respecto a lo anterior sería más conveniente extruir a baja temperatura, sin embargo, esto puede traer consigo una disminución de la producción y la necesidad de trabajar con presiones altas.

La matriz sobre la que se va a estudiar en esta tesis será una matriz la cual extruye un perfil cilíndrico con forma sólida como el que se muestra en la figura 10

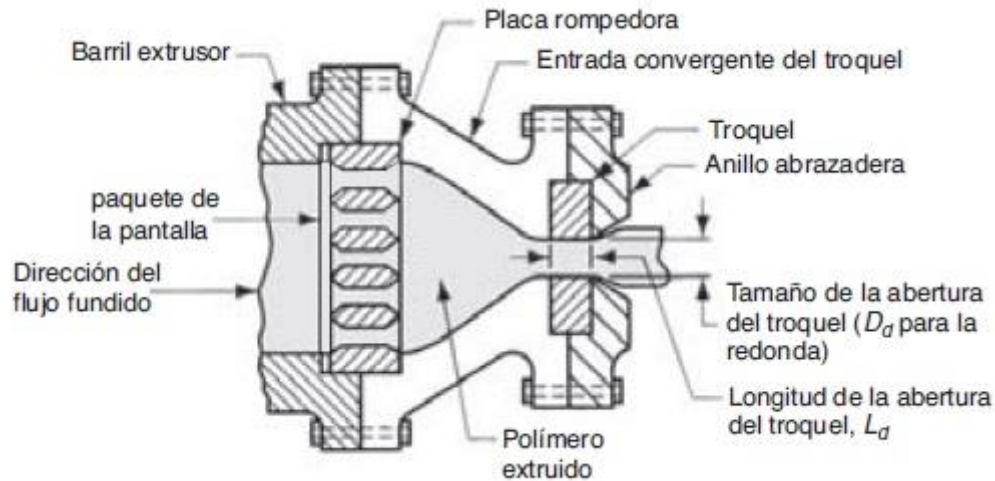


Figura 10. Boquilla circular perfil sólido y cabezal.

4.1.2. Especificaciones de la máquina.

Diámetro del cilindro (D): Es representativo del tamaño de la extrusora y afecta en gran medida a la velocidad de flujo. Como deduciremos más adelante, el caudal de material que proporciona la extrusora es proporcional al cuadrado del diámetro del tornillo. La mayoría de las extrusoras tiene diámetros comprendidos entre 2 y 90 cm.

Relación longitud/diámetro (L/D): Para un diámetro de tornillo dado, la capacidad para fundir, mezclar y homogeneizar a una velocidad de giro del tornillo determinada aumenta al aumentar la longitud del tornillo, y por tanto la relación L/D. Sin embargo tornillos excesivamente largos son difíciles de construir y alinear dentro del cilindro, de modo que no resultan operativos. La relación L/D típica para la extrusión de polímeros termoplásticos varía generalmente entre 20:1 y 30:1.

Relación de compresión: Una definición exacta de este parámetro es “la relación volumétrica de las vueltas del filete en las zonas de alimentación y de dosificado”. Se suele expresar, sin embargo, en términos de la relación de profundidades del canal en ambas zonas, una aproximación que es únicamente válida si el ángulo de los filetes y la anchura del canal se mantienen constantes. Las relaciones de compresión típicas oscilan entre 2.0 y 4.0. Una zona de dosificado de pequeña profundidad (alta relación de compresión) impone mayor velocidad de cizalla sobre el fundido (para una velocidad de tornillo dada), y se asocia también con un gradiente de presión mayor.

Configuración del tornillo: es un aspecto de gran importancia. La elección definitiva del número y del diseño geométrico de las zonas del tornillo es un proceso complejo. Esta decisión depende no solo del diseño de la boquilla y de las velocidades de flujo esperadas, sino también de las características de fusión del polímero, de su comportamiento reológico y de la velocidad del tornillo. Un tornillo simple, de tres zonas, se define usualmente según el número de vueltas de hélice en las zonas de alimentación, compresión y dosificado.

4.2. Comportamiento del fundido.

Es importante tener en cuenta para analizar el comportamiento del flujo del fundido, que la extrusora y la matriz operan como una unidad combinada. La interacción entre el tornillo y la matriz se representa generalmente por que muestra la dependencia de la salida de la presión de masa fundida entre el husillo y el cabezal. El tornillo requiere que la viscosidad del material termoplástico no cambie ya sea en la zona de dosificación o en la matriz. Esto significa que los cambios en la temperatura y la presión y otras influencias sobre la viscosidad tienen que ser evitados tanto como sea posible. La caída de presión a través de una matriz varía directamente con la longitud de ésta e inversamente con el cubo de la abertura del espacio.

El fundido también se ve afectado por la forma del orificio de salida. El efecto del orificio está relacionado con las condiciones del fundido y el diseño de la matriz extrusora, que con una tasa de enfriamiento lenta puede tener una influencia significativa, especialmente en los productos de espesor. La refrigeración es más rápida en las esquinas, de hecho, una sección central caliente podrían causar un producto para soplar hacia afuera y / o incluye burbujas de vacío visibles o invisibles.

4.2.1. Reología

Reología es la ciencia de la deformación y el flujo de materiales. En realidad, todos los materiales hacen flujo, con el tiempo suficiente. Lo que hace que los materiales poliméricos sean interesantes en este contexto es el hecho de que sus constantes de tiempo para el flujo son del mismo orden de magnitud que sus tiempos para la extrusión, moldeo por inyección y moldeo por soplado de procesamiento.

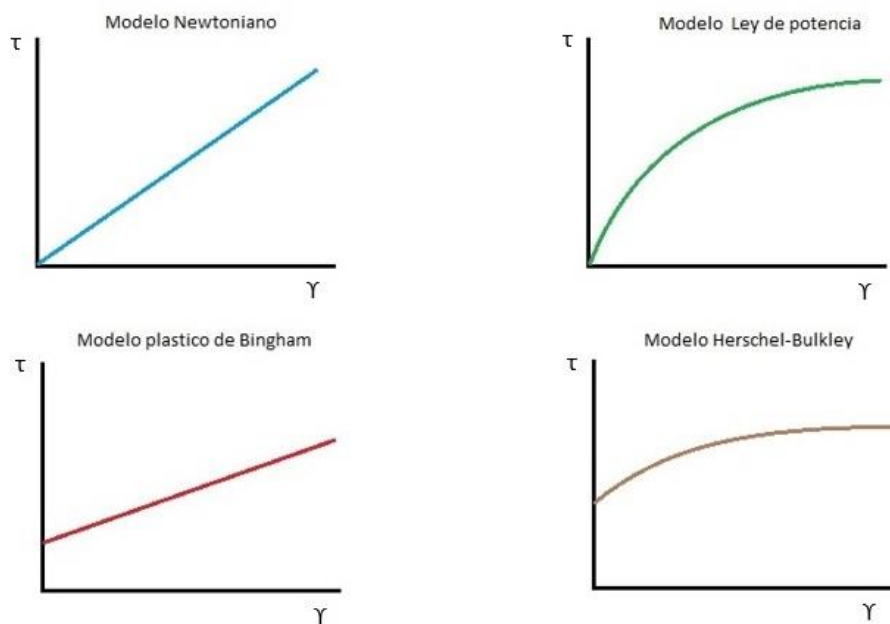


Figura 11. Modelos Reológicos.

En un muy corto tiempo de procesamiento, el polímero puede comportarse como un sólido, mientras que en largos tiempos de procesamiento el material puede comportarse como un fluido. Esta naturaleza dual (líquido-sólido) se conoce como comportamiento viscoelástico.

La mayoría de los procesos de polímero están dominados por la velocidad de deformación de cizallamiento. En consecuencia, la viscosidad utilizada para caracterizar el fluido se basa en dispositivos de medición de deformación por cizallamiento.

Los modelos reológicos que se utilizan para estos tipos de casos se denominan usualmente fluidos generalizados newtonianos. En un modelo de fluidos generalizados newtonianos, la tensión en el fluido es dependiente de la segunda invariante del tensor de deformación. La dependencia de la temperatura de FGN se incluye generalmente en los coeficientes del modelo de viscosidad. Varios modelos se están utilizando actualmente para representar la dependencia de la temperatura y la velocidad de deformación respecto a la viscosidad.

4.2.2. Viscosidad

La viscosidad es la propiedad que determina que un fluido fluya, se define como la razón del esfuerzo cortante y la velocidad de cizalla durante el flujo, donde el esfuerzo cortante es la fuerza por fricción que el fluido ejerce por unidad de área, y la velocidad de cizalla es el gradiente de velocidad perpendicular a la dirección del flujo.

El coeficiente de viscosidad puede expresarse como:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \text{ [Pa-s]} \quad (1)$$

4.2.3. Comportamiento viscoelástico de los fluidos

Una propiedad característica de los polímeros es la viscoelasticidad, como su nombre lo sugiere es la combinación de viscosidad y elasticidad. Es una propiedad que determina la deformación de una material cuando se le somete a una combinación de esfuerzo y temperatura a lo largo de un periodo de tiempo.

Los polímeros en estado líquido siguen teniendo esta propiedad, esto se puede observar en la expansión que sufre el polímero extruido a la salida de la matriz. Esta deformación está causada por la tensión de fluencia, al no ser superada esta antes de hacer fluir el polímero, el material se deforma elásticamente debido a que la tensión aplicada externamente es menor que la de fluencia.

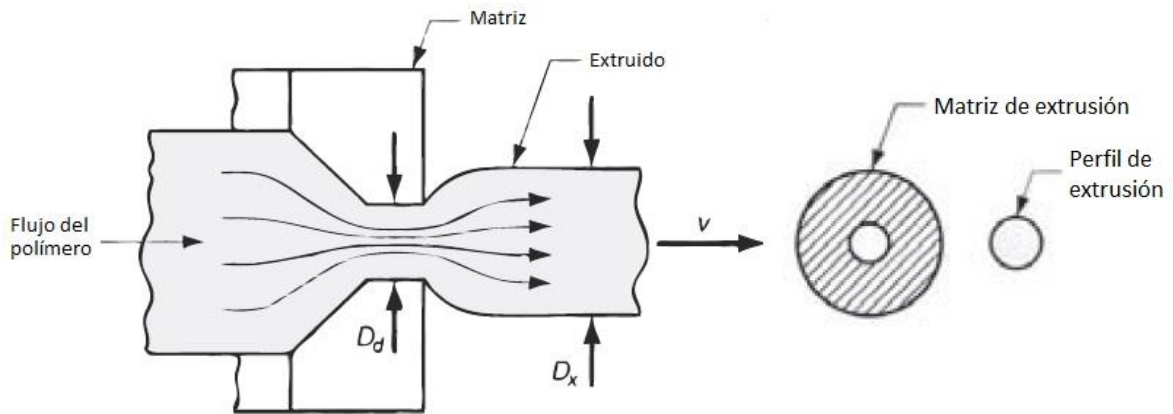


Figura 12. Expansión debido a la viscoelasticidad del polímero fundido.

Los esfuerzos de compresión aplicados en el material conforme ingresa en la apertura pequeña de la matriz no se relajan de inmediato, por lo tanto, cuando el material sale del orificio y desaparece la restricción los esfuerzos no liberados hacen que el material se expanda. Para una sección transversal circular esta expansión se puede medir por medio de la razón de expansión que se define como:

$$r_s = \frac{D_x}{D_d} \quad (2)$$

Donde:

r_s es la razón de expansión

D_x es el diámetro de la sección extruida

D_d es el diámetro del orificio de la matriz

La cantidad de expansión depende del tiempo que el polímero fundido permanezca en el interior de la matriz, incrementando la longitud de la matriz se reduce la expansión a la salida.

4.2.4. Comportamiento de los fluidos no newtonianos.

Un fluido no newtoniano es aquel cuya curva de flujo esfuerzo cortante (τ) frente a la tasa de corte ($\dot{\gamma}$) no es lineal o no pasa por el origen, es decir, cuando la viscosidad aparente, esfuerzo cortante dividido por la velocidad de cizalla, no es constante a una temperatura y presión dadas, sino que depende en condiciones de flujo, tales como la geometría de flujo, velocidad de cizallamiento, etc. y, a veces incluso en la historia cinemática del elemento de fluido bajo estudio. Tales materiales pueden estar convenientemente agrupados en tres clases generales:

- Fluidos para el que la velocidad de cizalla en cualquier momento se determina sólo por el valor del esfuerzo cortante en el punto en ese instante; estos fluidos son diversamente conocido como

"independientes del tiempo", "puramente viscosos", "inelásticos" o "fluidos newtonianos generalizados".

- Fluidos más complejos para los cuales la relación entre la velocidad de cizalla y el esfuerzo cortante depende, además, de la duración de cizallamiento, sino que son llamados "fluidos dependientes del tiempo" y, finalmente,
- Sustancias que presentan características de ambos fluidos ideales y sólidos elásticos y muestran una recuperación elástica parcial, después de la deformación, los cuales se clasifican como "fluidos viscoelásticos"

Este sistema de clasificación es arbitrario porque los materiales más reales a menudo exhiben una combinación de dos o incluso los tres tipos de funciones no newtonianos. En general, es, sin embargo, posible identificar el característico no newtoniano dominante y tomarlo como la base para los cálculos subsiguientes del proceso. También, es conveniente definir una viscosidad aparente de estos materiales como la relación del esfuerzo cortante y la velocidad de cizalla.

4.2.5. Densidad

Dependiendo del tipo de polímero que se desea emplear los gránulos de estos varían tanto en tamaño como en densidad como en su punto de fusión, teniendo también diferentes temperaturas de servicio, lo cual es importante a la hora de analizar su comportamiento durante su procesado.

Material	Abreviación	Densidad (g/cm ³)	Punto de fusión (°C)	Temperatura de servicio (°C)		
				Max (poco tiempo)	Max (continuo)	Min (continuo)
Polietileno de baja densidad	PE-LD	0,928	115	90	75	-50
Polietileno de alta densidad	PE-HD	0,96	137	120	80	-50
Polipropileno	PP	0,907	175	140	100	-30
Policarbonato	PC	1,2	265	160	135	-100
Poliamida	PA	1,14	265	200	120	-30

Tabla 1. Densidad, puntos de fusión y temperaturas de trabajo de algunos materiales comunes.

Cuando el plástico es extruido es muy importante entender cuando utilizar la densidad aparente y la densidad del fundido:

Densidad del fundido: La densidad de masa fundida de un polímero puro es una propiedad inherente del polímero y puede ser alterada por aditivos. La densidad en estado fundido se mide como función de la temperatura a presión ambiente. La velocidad de salida del polímero será proporcional a la densidad de la masa fundida del polímero. Varios polietilenos con diferentes densidades en estado sólido tienen la misma densidad de fundido y la misma compresibilidad. La densidad de fusión de un polietileno a presión ambiente y 220 ° C es 0,7432 g / cm³.

Densidad aparente: La densidad aparente de un polímero se define como el peso de la muestra, por ejemplo la forma de pellets, dividido por el volumen aparente de los gránulos o el contenedor. Según Chung la densidad aparente depende del tamaño, la geometría y la distribución de gránulos así como las propiedades del polímero. La densidad aparente es directamente proporcional a la velocidad de salida por las rpm del husillo y que cuanto mayor es la densidad aparente más alta es la tasa de salida a una velocidad de husillo definida.

4.3. Ecuaciones de balance

Las ecuaciones de balance son leyes físicas universales que se utilizan para describir la evolución de la masa, la cantidad de movimiento y la energía. Se aplican a todos los medios incluido el proceso de extrusión. La materia ha de considerarse como continua, por lo tanto, el volumen sobre el que la ecuación de balance se formula debe ser lo suficientemente grande como para evitar discontinuidades.

4.3.1 Ecuaciones de balance de masa

También conocida como la ecuación de continuidad, es simplemente la formulación de los principios de la conservación de la masa. El principio establece que la tasa de acumulación de la masa en un volumen de control es igual al flujo másico en el volumen de control menos el flujo másico hacia fuera del volumen de control.

4.3.2. Ecuaciones de la cantidad de movimiento.

El momento de un cuerpo es el producto de su masa y de la velocidad. Como la velocidad es un vector, el momento es también vector. La ecuación de balance de la cantidad de movimiento describe la conservación de impulso, sino que también se conoce como la ecuación de movimiento.

La cantidad de movimiento puede ser transportada por convección y conducción. Por convección es debido al flujo másico del fluido a través de la superficie; asociado a él es un momento de flujo. Por conducción es debido a las fuerzas intermoleculares en cada lado de la superficie. El momento del flujo asociado con el transporte de momento es el tensor de

tensiones. La ecuación general de balance de momento también se conoce como Ecuación de Cauchy. Las ecuaciones de Navier-Stokes son como caso especial de la ecuación general de la cantidad de movimiento para los que la densidad y la viscosidad son constantes. La ecuación de Euler es de nuevo un caso especial de la ecuación general de movimiento, se aplica en los sistemas de flujos en los que los efectos viscosos son insignificantes.

4.3.3. Ecuaciones de balance de energía.

El principio de conservación de la energía se describe por la primera ley de la termodinámica energía y formula que el incremento de la energía interna específica (térmica) en un volumen de control es igual al incremento de la energía por conducción más la energía que se disipa.

La ecuación de la energía tiene que ser utilizada para analizar los procesos no isotérmicos. En estas situaciones, en general, hay cuatro variables desconocidas: la velocidad, la tensión, la presión, y la temperatura. Con el fin de resolver tal problema no isotérmico, se necesita una ecuación más además de las tres ecuaciones de balance. La relación que falta es la ecuación constitutiva del fluido; esta relación básicamente describe la relación entre el estrés y la deformación.

En la extrusión del material polimérico se somete a grandes cambios de temperatura ya que se transporta a lo largo de la extrusora. Por consiguiente, se utiliza la ecuación de energía extensamente en el análisis del proceso de extrusión.

4.4. Análisis del flujo

4.4.1 Flujo de arrastre.

El flujo de arrastre es importante en la extrusión, es causado por el movimiento relativo de uno o más límites con respecto a los otros límites que contienen el fluido. Los dos límites principales que contienen el polímero en el extrusor son la superficie de la cámara y la superficie del husillo. Dado que el husillo está girando en una cámara estacionaria, un límite se está moviendo con respecto al otro; lo hace que ocurra el flujo de arrastre.

4.4.2 Flujo de presión.

Es el flujo causado por la presencia de gradientes de presión en el fluido; en otras palabras las diferencias locales en la presión. Uno de los ejemplos más comunes de flujo de presión es el flujo de agua que se produce al abrir un grifo de agua. Este flujo se produce debido a que la presión aguas arriba es mayor que la presión en el grifo. El flujo del fundido que se da en la matriz extrusora es provocado por hecho de que la presión en la entrada de la boquilla es

mayor que la presión en la salida. La velocidad de flujo se determina por la presión de entrada de la matriz.

4.4.3 Velocidad de cizalla.

La velocidad de cizalla es uno de los parámetros más importantes del procesamiento del polímero en estado fundido. Si el proceso se describirá cualitativamente, la velocidad de cizalla en el fluido en cualquier ubicación necesitará ser conocida. Es la diferencia en la velocidad por unidad de distancia normal (normal a la dirección del flujo).

Para el cálculo de perfiles solidos cilíndricos se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} [s^{-1}] \quad (3)$$

4.4.4. Deformación de corte.

Desplazamiento (en la dirección del flujo) por unidad de distancia normal durante un cierto período de tiempo. Las unidades de velocidad de cizalla son s^{-1} y la deformación por esfuerzo cortante es un número adimensional.

4.4.5. Esfuerzo cortante.

Suponiendo que un fluido fluye a través del espacio entre dos placas paralelas (Figura 13.), separadas por una distancia, donde una permanece estacionaria respecto a la otra. Al movimiento de la placa superior se opone la fuerza (F) que resulta de la acción de la viscosidad cortante del fluido. Esta fuerza se reduce a un esfuerzo cortante (τ) si se divide la fuerza entre la superficie de la placa (A).

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (4)$$

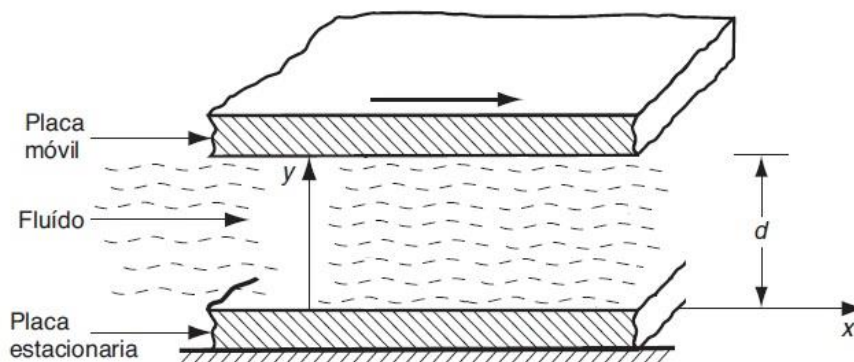


Figura 13. Fluido entre dos placas paralelas donde una permanece estacionaria respecto a la otra.

4.5. Modelos de flujo

4.5.1. Fluidos Newtonianos y no newtonianos.

Según observo Newton si la viscosidad es una propiedad constante en un fluido dado, este fluido se denomina fluido newtoniano. Por otro lado, si el fluido presenta una viscosidad decreciente con una velocidad de cizalla en aumento se le llama fluido no newtoniano. En la siguiente figura se muestra como se caracterizan los fluidos newtonianos y no newtonianos en relación con la velocidad de cizalla.

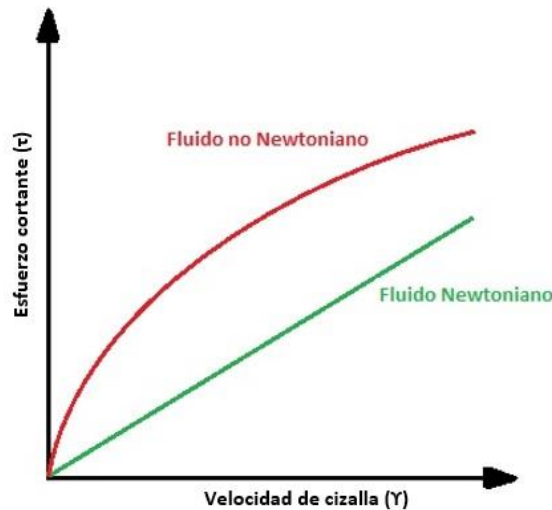


Figura 14. Fluidos en relación a la velocidad de cizalla.

4.5.2. Ley de potencia (Power Law)

La Ley de potencia es un modelo simple para la representación de una curva viscosidad - velocidad de cizalla para el comportamiento del plástico fundido. El hecho de que la viscosidad del polímero fundido se reduce con la velocidad de cizalla es de gran importancia en el proceso de extrusión. Por lo tanto, es importante conocer la magnitud del cambio que se producirá en un polímero particular. La forma general de la curva de viscosidad - velocidad de cizalla de un polímero pseudoplástico fundido se verá como se muestra en la figura 15.

La viscosidad a velocidades de cizalla muy bajas es independiente de las velocidades de cizalla. Por lo tanto, el fluido se comporta como como fluido newtoniano a velocidades de cizalla bajas. El valor de la curva a baja velocidad de cizalla " η_0 " hace referencia a una viscosidad newtoniana. El valor de la curva a alta velocidad de cizalla " η_∞ " hace referencia a un límite de viscosidad que tiende a infinito. Este valor es difícil de determinar experimentalmente debido

a que los efectos de la presión y la temperatura se vuelven muy pronunciados a estas altas velocidades de cizallamiento (más de 10^{-6} s^{-1}).

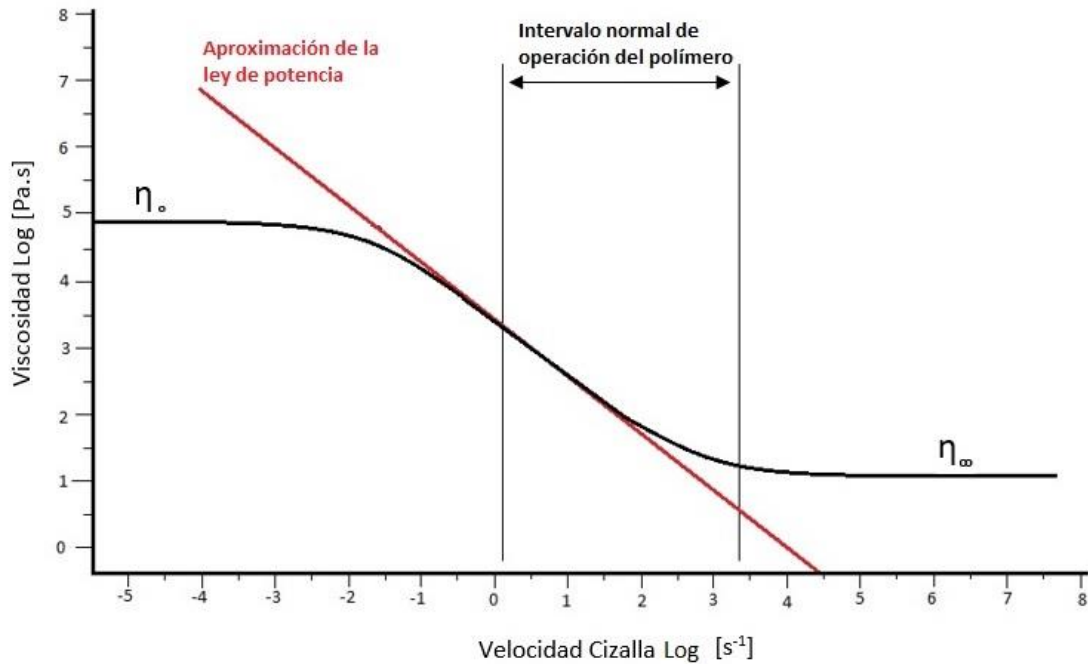


Figura 15. Comportamiento general de los pseudoplásticos.

La gama de velocidades de cizalla encontradas en la mayoría de las operaciones de procesamiento de polímeros es de aproximadamente de 1 a 10.000 s^{-1} . Se puede observar en la figura 15 que dentro de este rango de la curva viscosidad-velocidad de cizalla puede ser aproximada con una relación de línea recta. Esto es cierto para la mayoría de los polímeros. También hay que señalar que figura 15 utiliza una escala logarítmica doble. La escala log-log es conveniente por la diferencia en el orden de magnitud entre la viscosidad y la velocidad de cizalla. Una relación de línea recta en un gráfico log-log indica que las variables pueden estar relacionadas por la ecuación de ley de potencia. Esto generalmente se escribe como:

$$\eta = m(T^{\circ}C)\gamma^{n-1} \tag{5}$$

Dónde m es el índice de consistencia y n es el exponente de la ley de potencia

Polímero	m (Pa-s)	n	T (°C)
PE-LD	6×10^3	0,39	160
PE-HD	2×10^4	0,41	180
PP	$7,5 \times 10^3$	0,38	200
PC	6×10^2	0,98	300
PA	6×10^2	0,66	300

Tabla 2. Parámetros de la ley de potencia para algunos polímeros.

En la figura 16 se representan las curvas de aproximación de la ley de potencia para algunos de los plásticos más comunes utilizados en el procesamiento de polímeros, como se observa el rango de velocidad de cizalla está comprendido entre 10 y 1000 s^{-1} .

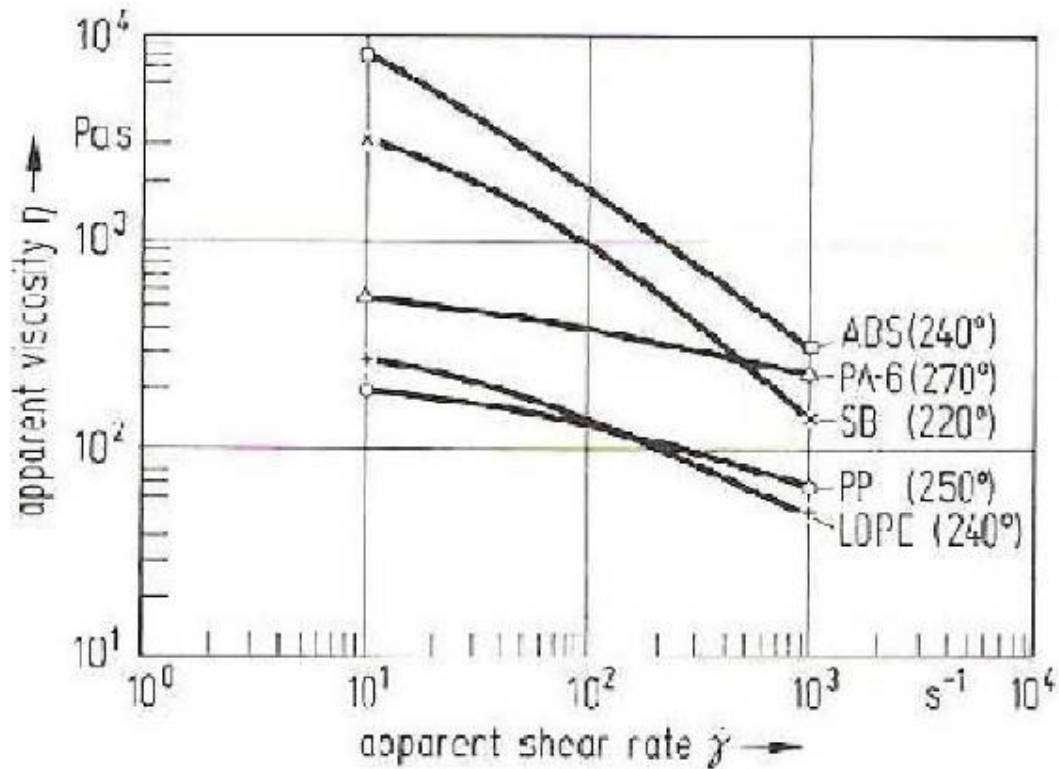


Figura 16. Curvas de Viscosidad – Velocidad de cizalla para algunos plásticos comunes.

4.6. Ecuaciones de flujo.

4.6.1. Ecuaciones de velocidad.

Desde un punto de vista teórico se analiza en mayor profundidad la zona de dosificado, en esta zona los cálculos se simplifican mucho respecto de las otras zonas debido a que todo el material se encuentra en estado fundido y se puede considerar que es homogéneo. Considerando algunas aproximaciones los resultados del análisis se pueden expresar en forma de ecuaciones simples que son útiles como primera aproximación a la operación de la extrusora en esta zona.

Para el cálculo y el estudio del movimiento del material a través del tornillo se supone o se considera que:

- El proceso es continuo y se ha alcanzado el régimen estacionario.
- El canal del tornillo es de sección rectangular.
- El sistema de coordenadas es el de la figura 17.

- El canal del tornillo se encuentra desenrollado.
- El cilindro es una superficie plana que se mueve sobre el canal del tornillo, arrastrando el material.
- El fundido tiene un comportamiento newtoniano.
- El fundido tiene un comportamiento incompresible.

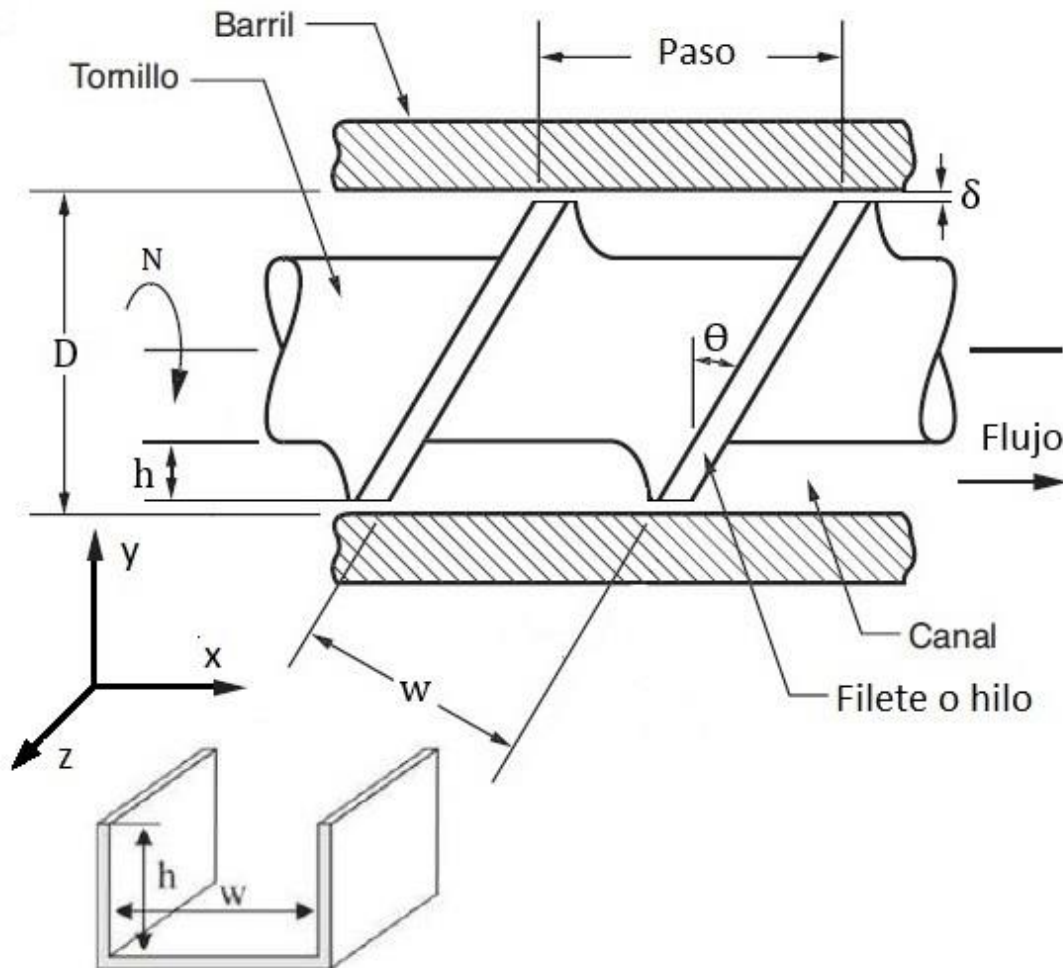


Figura 17. Nomenclatura y sistema de coordenadas

Donde:

D es el diámetro del tornillo

w es el ancho del canal

h es la profundidad del canal

N es el número de revoluciones al que gira el tornillo

θ es ángulo del filete del tornillo con la vertical

δ es la holgura entre el cilindro y el filete.

Como se ha comentado anteriormente existen dos tipos de flujo a lo largo del eje Z. El flujo de fricción o flujo de arrastre, es el culpable del movimiento del material y está provocado por el movimiento de la superficie del cilindro (siempre en +Z o hacia la boquilla). Cuando existe algún impedimento al flujo (por ejemplo alguna boquilla, válvula, etc.) se crea un gradiente de presión en dirección Z, lo cual causa un flujo en dirección -Z llamado flujo de presión o flujo de retroceso.

El análisis del caudal en esta sección se basa en considerar el flujo newtoniano e isoterma de un fluido incompresible en un canal rectangular de ancho w y altura h . Se desprecia δ (holgura entre el tornillo y el cilindro) porque $\delta \ll h$ y se supone que el flujo es uniforme. Realizando un balance de cantidad de movimiento sobre un sistema de este tipo se obtiene la siguiente expresión (ec. Navier-Stokes).

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) \quad (6)$$

Donde:

$\frac{dP}{dZ}$ = gradiente de presión a lo largo del canal.

v = velocidad del fluido en el canal

η = viscosidad del fluido

La ecuación anterior se puede simplificar si se considera que $w \gg h$, de modo que $\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \ll \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$

lo que supone despreciar el efecto que puedan tener las paredes del canal en el flujo. Con esto, las ecuaciones del flujo se simplifican a:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) \quad (7)$$

Usando esta última ecuación se obtienen unos resultados que discrepan menos del 10% de los obtenidos con la ecuación completa si la relación del ancho del canal (w) a la profundidad del mismo (h) es mayor de 10. Este es precisamente el caso de la mayoría de los tornillos usados en las máquinas de extrusión de plásticos.

Integrando la ecuación (7) se obtiene:

$$\frac{dv}{dy} = \frac{y}{\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) + C_1$$

Integrando nuevamente:

$$v = \frac{y^2}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) + C_1 y + C_2 \quad (8)$$

Teniendo en cuenta las condiciones límite: cuando $y = 0$, es decir, junto al tornillo $v = 0$. Sustituyendo esta condición en la ecuación (8), se obtiene $C_2 = 0$. Por otro lado, junto a la pared del cilindro donde $y = h$, la velocidad será $v = V$, velocidad lineal periférica del cilindro, con lo que resulta:

$$V = \frac{h^2}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) + C_1 h$$

$$C_1 = \frac{V}{h} - \frac{h}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right)$$

Sustituyendo el valor de C_1 y C_2 en la expresión (8)

$$v = \frac{Vy}{h} - \frac{hy}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) + \frac{y^2}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right)$$

$$v = \frac{Vy}{h} + \frac{y(y-h)}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) \quad (9)$$

En el segundo miembro de esta ecuación aparecen dos términos. El primero varía linealmente con y , y depende de la velocidad del tornillo; representa el **flujo de arrastre o fricción**; el segundo será negativo o cero (y varía entre 0 y h), luego se opone al movimiento del material hacia la boquilla, da un perfil de velocidades parabólico que depende de la caída de presión a lo largo del tornillo; por tanto representa el **flujo de retroceso o presión**. La suma de estos dos términos representa la velocidad resultante en cualquier punto del canal.

4.6.2. Calculo del caudal.

El caudal de material extruido podrá calcularse como el producto de la velocidad del material por la sección del tornillo. Se puede partir de la ecuación (9), integrando el producto de la velocidad por el ancho del canal entre los límites $y = 0$ e $y = h$.

$$Q = \int_0^h wv \, dy = \int_0^h \frac{wVy}{h} \, dy + \int_0^h \frac{wy(y-h)}{2\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) \, dy \quad (10)$$

Donde se obtiene:

$$Q = \frac{wVh}{2} - \frac{wh^3}{12\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right) \quad (11)$$

Igual que en el caso de la velocidad, el caudal también presenta dos términos. El primero representa al flujo de arrastre, y el segundo al flujo de presión:

$$\text{Flujo de arrastre: } Q_D = \frac{wVh}{2}$$

$$\text{Flujo de presión: } Q_P = \frac{wh^3}{12\eta} \left(\frac{dP}{dZ} \right)$$

Interesa ahora escribir la ecuación (11), que da el flujo de material a través del tornillo, en función de las dimensiones del tornillo, empleando la notación de la figura 17.

Si imaginamos el tornillo cortado a lo largo de una generatriz y desenrollado, despreciando el ancho del filete, tal como se representa en la figura 18 podemos escribir la siguiente ecuación:

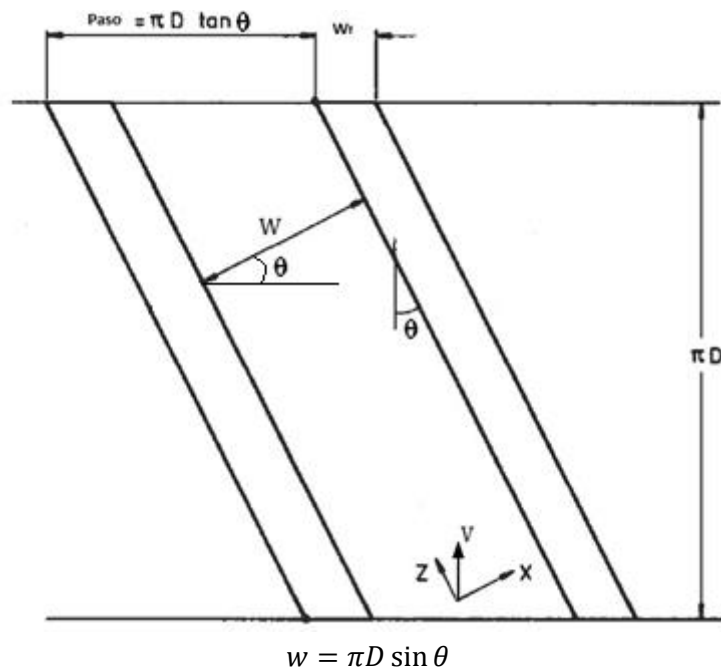


Figura 18. Tornillo desenrollado.

Si V es la velocidad con que se mueve el cilindro sobre el tornillo, en términos de velocidad angular $V = \pi D N$, y está dirigida formando un ángulo θ con el filete del tornillo y tiene dos componentes v_z y v_x paralelas al eje Z y al eje X, respectivamente:

$$v_z = V \cos \theta = \pi D N \cos \theta$$

$$v_x = V \sin \theta = \pi D N \sin \theta$$

Una partícula de fluido describe un movimiento muy complejo dentro del canal, pero sólo la componente v_z es responsable del avance del fluido a lo largo del canal. La componente X actúa en un plano normal al eje Z y causa un movimiento circulatorio importante para mejorar el mezclado y la transmisión de calor pero no para la capacidad de transporte del tornillo. Por tanto, para calcular el caudal de material basta con considerar v_z .

Sustituyendo los valores así hallados de w y V en el primer término de la ecuación (11) tenemos:

$$\frac{whV}{2} = \frac{\pi D \sin\theta h \pi D N \cos\theta}{2} = \frac{\pi^2 D^2 (\sin\theta \cos\theta) h N}{2}$$

El segundo término de la ecuación (11) puede expresarse en función de las dimensiones del tornillo, teniendo en cuenta que si se desenrolla completamente el tonillo se puede escribir:

$$\frac{L}{Z} = \sin\theta \rightarrow dZ = \frac{dL}{\sin\theta}$$

Donde L es la longitud del cilindro y Z la longitud total del canal del tornillo una vez desenrollado, a lo largo del cual existe un el gradiente de presión $\left(\frac{dP}{dZ}\right)$. De este modo se puede escribir el segundo término de la ecuación (11) como:

$$\frac{w h^3}{12\eta} \left(\frac{dP}{dZ}\right) = \frac{\pi D \sin\theta h^3}{12\eta} \frac{dP}{dL} \sin\theta = \frac{\pi D \sin^2\theta h^3 \Delta P}{12 \eta L}$$

Si se considera que la caída de presión a lo largo del tornillo es constante y tomando incrementos $\frac{dP}{dL} = cte = \frac{\Delta P}{L}$, la ecuación (11) puede escribirse como sigue:

$$Q = \frac{\pi^2 D^2 (\sin\theta \cos\theta) h N}{2} - \frac{\pi D \sin^2\theta h^3 \Delta P}{12 \eta L} \quad (12)$$

La ecuación (12) es una recta en una representación de Q frente a ΔP y es conocida como la recta operativa o ecuación característica del tornillo como se muestra en la figura 19. Esta curva tiene gran utilidad a la hora de predecir el caudal a la salida de la extrusora.

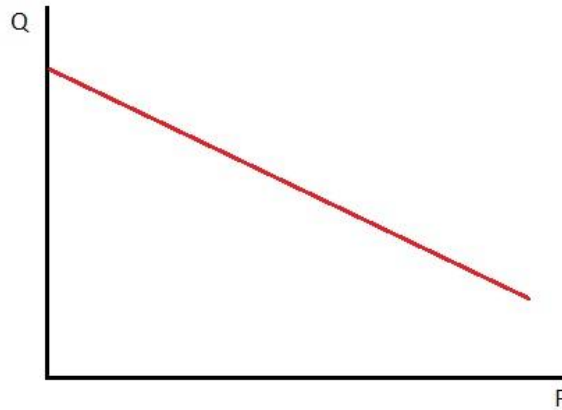


Figura 19. Curva característica Q-P de la extrusora.

Cuando no hay acumulación de presión en el extremo de la extrusora, cualquier flujo es debido al arrastre y se puede obtener el máximo caudal de flujo Q_{max} .

Reduciéndose la ecuación a un solo termino:

$$Q = Q_{max} = \frac{\pi^2 D^2 (\sin\theta \cos\theta) h N}{2}$$

Por otra parte cuando hay una gran caída de presión en el extremo de la extrusora $Q = 0$ se obtiene la presión máxima de la ecuación, de tal modo que la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\frac{\pi^2 D^2 (\sin\theta \cos\theta) h N}{2} = \frac{\pi D \sin^2\theta h^3}{12 \eta} \frac{P}{L}$$

Donde:

$$P = P_{max} = \frac{6 \pi D L N \eta}{h^2 \tan\theta}$$

4.7. Diseño de la matriz y cálculo del punto de operación.

Para obtener el caudal característico de una matriz diseñada para la extrusión de un perfil cilíndrico sólido se emplea la siguiente formula:

$$Q = KP \tag{13}$$

Dónde: $K = \frac{\pi R^4}{8\eta L_d}$ para una sección circular de radio R y longitud L_d .

Por lo tanto:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta L_d} P \quad (14)$$

La ecuación (14) permite representar las características de troquel en la figura 20 y la intersección de las dos curvas características, que será el punto de funcionamiento o punto de operación de la extrusora. Esta curva es útil porque muestra el efecto que los cambios en varios parámetros tendrán en la salida de la matriz. Por ejemplo, el aumento de velocidad del tornillo, N , se desplazaría la curva característica de la extrusora hacia arriba. Del mismo modo un aumento en el radio de la matriz, R , aumentaría la pendiente de la curva característica de la matriz y en ambos casos la salida del extrusor se incrementaría.

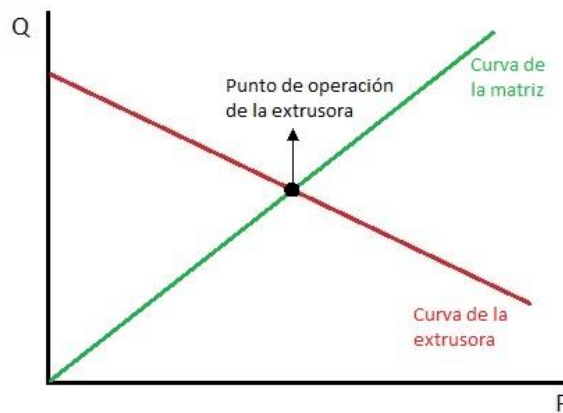


Figura 20. Punto de operación.

El punto de operación para una combinación de matriz y extrusora también puede determinarse a partir de las ecuaciones (12) y (14).

$$Q = \frac{\pi^2 D^2 (\sin\theta \cos\theta) h N}{2} - \frac{\pi D \sin^2\theta h^3 P}{12 \eta L} = \frac{\pi R^4}{8\eta L_d} P$$

Por lo tanto para una boquilla de sección circular, la presión en el punto de funcionamiento está determinada por:

$$P_{OP} = \left\{ \frac{2 \pi \eta D^2 N h \sin\theta \cos\theta}{\frac{R^4}{2 L_d} + \frac{D h^3 \sin^2\theta}{3 L}} \right\} \quad (15)$$

Una dimensión muy importante es la longitud de la región de la matriz. En general, debería ser tan largo como sea posible. Sin embargo, no se debe aumentar la resistencia total de la matriz hasta el punto donde se producen excesivo consumo de energía y un sobrecalentamiento del fundido.

La longitud de la matriz requerida no sólo depende del tipo y de la temperatura del material termoplástico fundido, sino también de la velocidad de flujo. La deformación de la masa fundida en la sección de entrada de la matriz invariablemente causa una tensión interior que disminuye de forma gradual con el tiempo (relajación). En general el objetivo es permitir que la masa fundida se relaje antes de llegar a la boquilla. De lo contrario las dimensiones del producto y las propiedades mecánicas pueden variar, particularmente con un enfriamiento rápido.

4.8. Simulación y resultados.

4.8.1. Simulación del flujo.

Para un buen planteamiento del problema en Ansys Polyflow la simulación debe basarse en el paso de un fluido newtoniano, en condiciones isotérmicas a través de una matriz tridimensional de forma circular de diámetro 18 mm y 45 mm de longitud a la entrada y 5,5 mm (diámetro final deseado) con 45 mm de longitud en la salida o parte de la boquilla. El polímero fundido entra en el troquel como se muestra en la figura 22 con las condiciones de caudal de operación y el producto extruido se obtiene a la salida. Al final del dominio computacional, se supone que el material extruido está totalmente deformado y que no se deformará más.

4.8.1.1 Preparación.

Las ecuaciones de incompresibilidad y momento se resuelven sobre el dominio computacional. El dominio para el problema se divide en dos subdominios como se muestra en la figura 21, de manera que el algoritmo de remallado se aplicara sólo a la parte de la malla que se deforma subdominio 1 (parte exterior o salida del fluido).

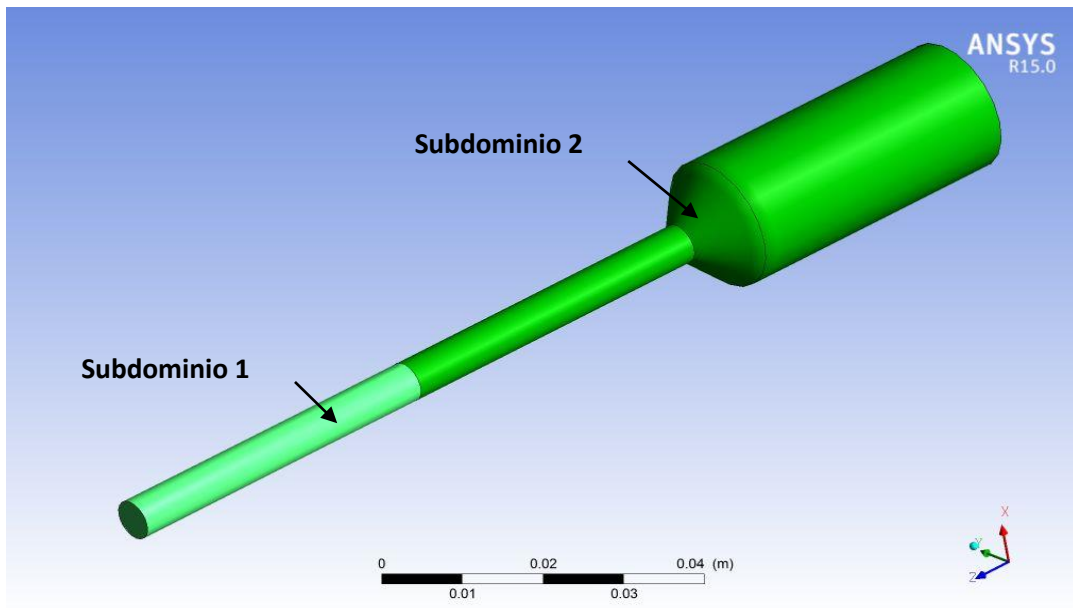
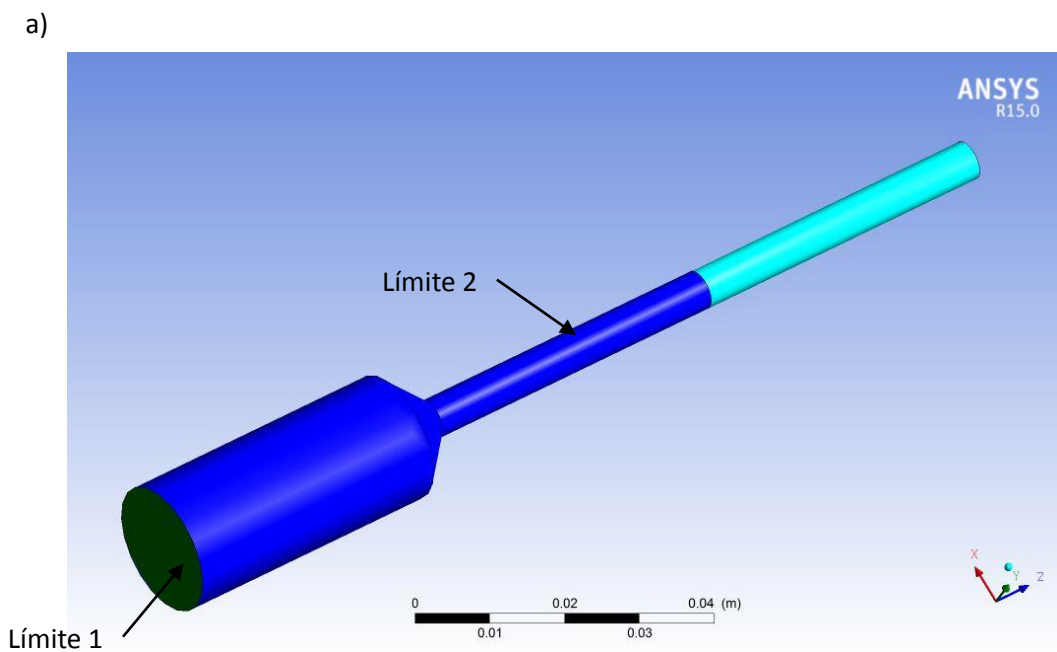


Figura 21. Subdominios asignados al fluido para la simulación.

El subdominio 2 representa la matriz donde se limita el fluido. El subdominio 1 corresponde al producto extruido que está en contacto con el aire y puede deformarse libremente. El principal objetivo del cálculo es para encontrar la ubicación de la superficie libre.

Para poder imponer las condiciones físicas a las que se va a someter a cada parte del fluido al paso por la matriz, se imponen unos límites o contornos para los dominios asignados y representados en la figura anterior.



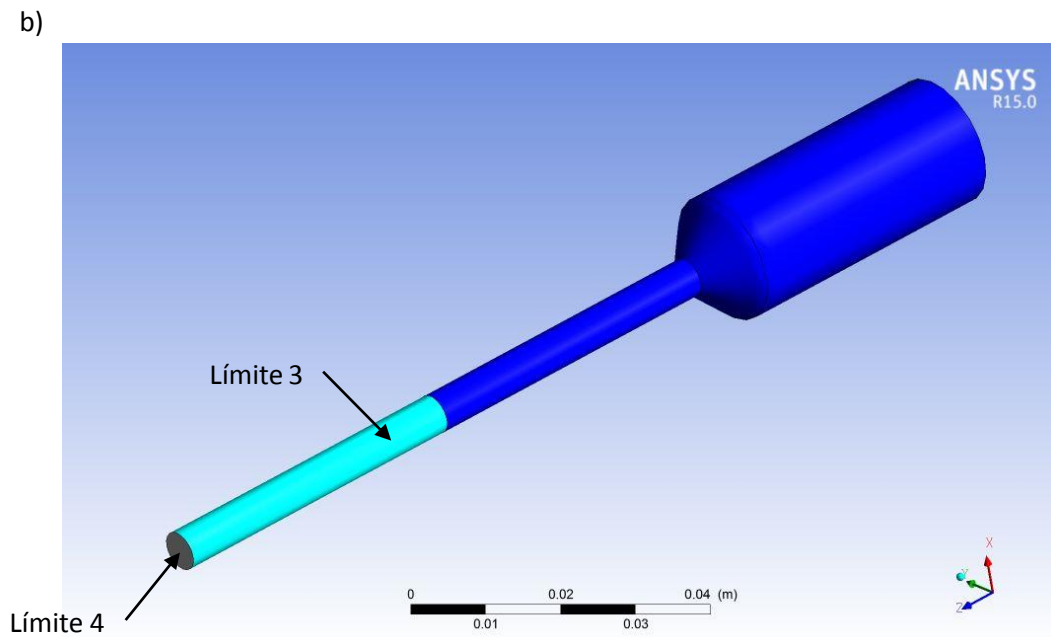


Figura 22 a) y b). Límites para las condiciones de frontera.

Donde:

- Límite 1: Entrada del flujo (InFlow)
- Límite 2: Velocidad cero (VelCero)
- Límite 3: Superficie libre (FreeSurf)
- Límite 4: Salida de flujo (OutFow)

4.8.1.2. Mallado.

Para poder realizar el mallado es necesario un sólido el cual, imite o se asemeje a la forma que el fluido adquiere al pasar por la matriz. Este sólido se puede crear directamente en la herramienta de diseño 3D que Ansys Worckbench lleva incorporada (DesignModeler) o se puede crear en Autodesk Inventor e importarlo como archivo .x_t.

Una vez se tiene el sólido de simulación se nombran los límites representados en la figura 22 a) y b), en los que posteriormente se impondrán las condiciones de frontera en el setup de Ansys (Polydata) para la simulación. Para nombrar los límites se utiliza el comando "Name Selection". Con este comando se selecciona la zona del límite y se le asigna un nombre.

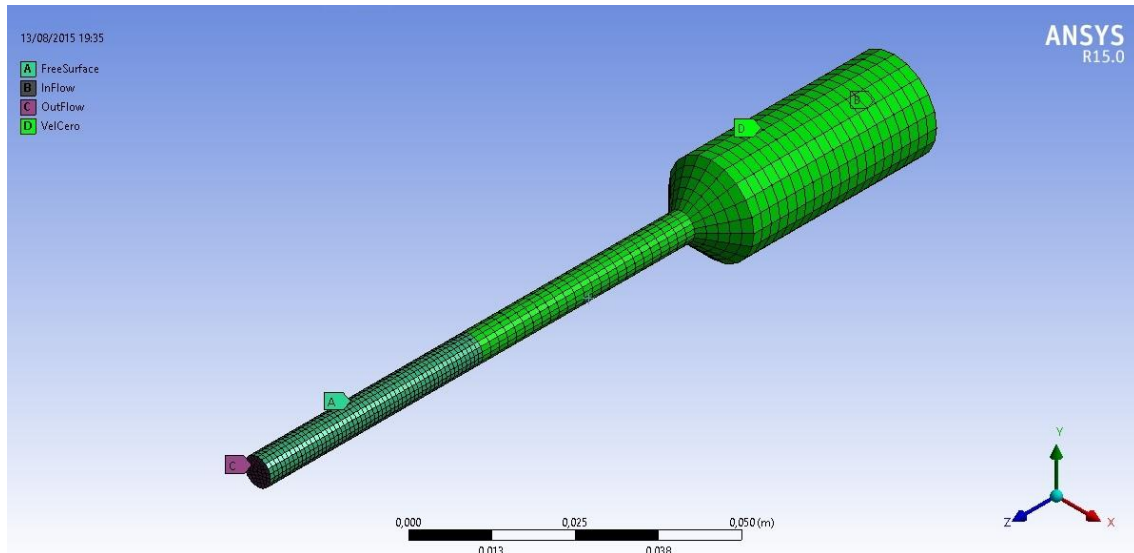


Figura 23. Mallado.

Cuando los límites están asignados se selecciona la herramienta de mallado y se genera la malla reduciendo el tamaño de esta hasta un punto óptimo donde los cálculos no sean excesivamente largos ni costosos para el software, pero que al mismo tiempo, los resultados obtenidos tengan la mayor precisión posible. Una vez determinados los parámetros de la malla pulsando “Generate mesh” se creará el mallado del sólido a simular.

4.8.1.3. Polydata.

Una vez se carga el mallado a la simulación se procede a editar los datos en Polydata. Esta es la herramienta que Ansys Workbench utiliza para definir las condiciones del problema para así poder resolver computacionalmente la simulación.

Lo primero que se debe hacer es crear una nueva tarea para un cálculo por el método de elementos finitos “F.E.M task”, en la que se debe indicar que se trata de un problema en evolución “evolution problem” al tratarse de un problema no lineal, esto se define debido a la complejidad que supone la transición geométrica en el canal e introduce términos no lineales en las condiciones cinemáticas usadas para definir la forma final del sólido extruido.

Una vez creada la tarea para el cálculo por el método de elementos finitos, se crea una sub-tarea donde se introducen las condiciones físicas de la simulación “Generalized Newtonian isothermal flow problem”, además de, las características del material de densidad y modelo matemático para definir la viscosidad, las condiciones de frontera, las condiciones de flujo y los parámetros numéricos para el desarrollo de la simulación tanto directa como inversa.

Es importante definir correctamente los parámetros numéricos para el cálculo teniendo en cuenta las unidades, ya que, pueden suponer errores de magnitud en la simulación los cuales no serán detectados por el programa.

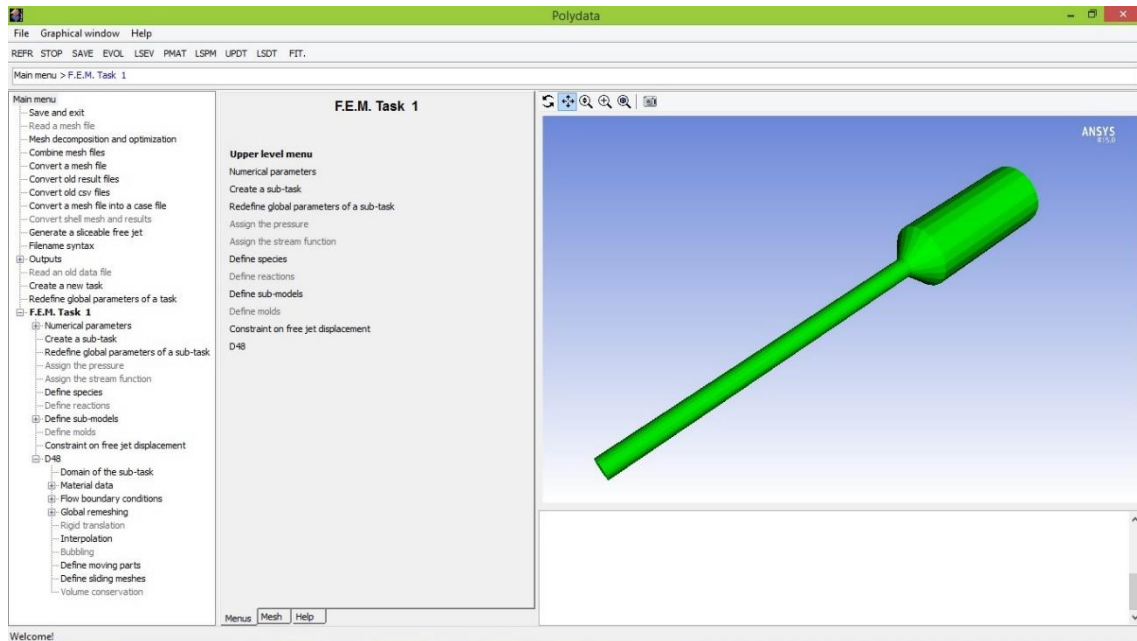


Figura 24. Polydata.

4.8.3. Resultados.

Para realizar los cálculos que determinaran las condiciones de extrusión es necesario conocer tanto las características de la extrusora como las dimensiones de la matriz, para poder hallar las condiciones óptimas para una correcta extrusión del perfil deseado.

4.8.3.1. Cálculo de la curva de la extrusora de la primera simulación.

A partir de las ecuaciones de caudal y presión máxima mostradas en los apartados anteriores se obtiene la curva caudal - presión de una extrusora cuyas características son:

$$D = 0.0175\text{m}, \theta = 14.5^\circ, N = 30 \text{ rpm}, L = 0.64 \text{ m y } h = 0.004 \text{ m}$$

Para el cálculo del caudal máximo se asume que la presión a la salida del tornillo es $P = 0$, ya que, se supone que no existe ningún elemento que se interponga al flujo de material en la salida del tornillo.

$$Q_{max} = \frac{\pi^2 0.0175^2 (\sin 14.5 \cos 14.5) 0.004 \frac{30}{60}}{2} = 7.33 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

Para determinar la P_{max} a la salida del tornillo se supone que $Q = 0$

$$P_{max} = \frac{6 \pi D L N \eta}{h^2 \tan\theta}$$

La viscosidad viene dada por la ley de la potencia: $\eta = m(T^{\circ}C)\gamma^{n-1}$

Donde:

$n = 0.39$ como se observa en la Tabla 2.

Y la velocidad de cizalla para una sección transversal circular viene dada por:

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{4 (7.33 \times 10^{-7})}{\pi \left(\frac{5.5 \times 10^{-3}}{2}\right)^3} = 44.87 \text{ s}^{-1}$$

Donde el R = radio del canal circular por el que fluye el polímero fundido, y donde Q_{max} es la velocidad de flujo experimental a través del canal, con el fin de hallar la velocidad de cizalla y la viscosidad.

En base a la curva de viscosidad – velocidad de cizalla donde la viscosidad máxima para un polietileno de baja densidad (PE-LD) donde la viscosidad máxima a 240° es de 300 Pa·s. El valor de viscosidad para una velocidad de cizalla de 44,87 s⁻¹ corresponde a 200 Pa·s.

Por lo tanto, P_{max} para un polímero de dicha densidad y con $Q = 0$ es:

$$P_{max} = \frac{6 \cdot \pi \cdot 0.0175 \cdot 0.64 \cdot \frac{30}{60} \cdot 200}{0.004^2 \cdot \tan 14.5} = 5\,102\,007 \text{ Pa} \approx 5,1 \text{ MPa}$$

4.8.3.2. Cálculo de la curva de la matriz primera simulación.

Para el cálculo del caudal de una matriz donde se desea obtener un perfil cilíndrico sólido de diámetro 5,5 mm se emplea la ecuación descrita en uno de los apartados anteriores y que se escribe:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8 \eta L_d} P = \frac{\pi \left(\frac{5.5 \times 10^{-3}}{2}\right)^4}{8 \cdot 200 \cdot 0.09} \cdot 5.1 \times 10^6 = 6.36 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

La presión de operación para dicha matriz y dicha extrusora es:

$$P_{OP} = \left\{ \frac{2 \pi \eta D^2 N h \sin\theta \cos\theta}{\frac{R^4}{2 L_d} + \frac{D h^3 \sin^2\theta}{3 L}} \right\} =$$

$$= \left\{ \frac{2 \pi \cdot 200 \cdot 0.0175^2 \cdot \frac{30}{60} \cdot 0.004 \cdot \sin 14.5 \cdot \cos 14.5}{\frac{\left(\frac{5.5 \times 10^{-3}}{2}\right)^4}{2 \cdot 0.09} + \frac{0.0175 \cdot 0.004^3 \sin^2 14.5}{3 \cdot 0.64}} \right\} =$$

$$= 0.526607 \text{ MPa}$$

Finalmente se calcula el caudal de operación utilizando la presión de operación:

$$Q_{OP} = \frac{\pi \left(\frac{5.5 \times 10^{-3}}{2}\right)^4}{8 \cdot 200 \cdot 0.09} \cdot 0.56607 \times 10^6 = 6.57 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

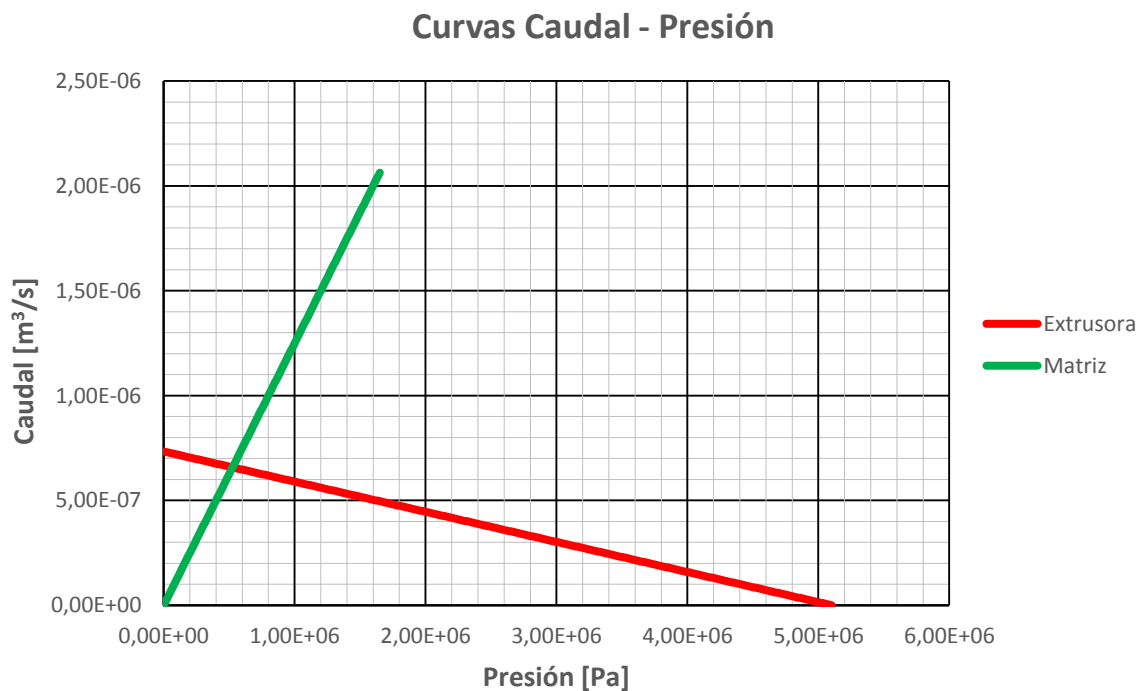


Figura 25. Punto de operación primera simulación.

4.8.3.3. Resultados obtenidos en la primera simulación.

Una vez calculados puntos de operación para una matriz con diámetro en la sección del canal 5,5mm e insertados en Polydata, los resultados de la simulación son los siguientes para una extrusión directa.

Flujo másico:

En la siguiente grafica obtenida en Ansys se analiza el flujo másico para el punto de operación obtenido para la matriz analizada.

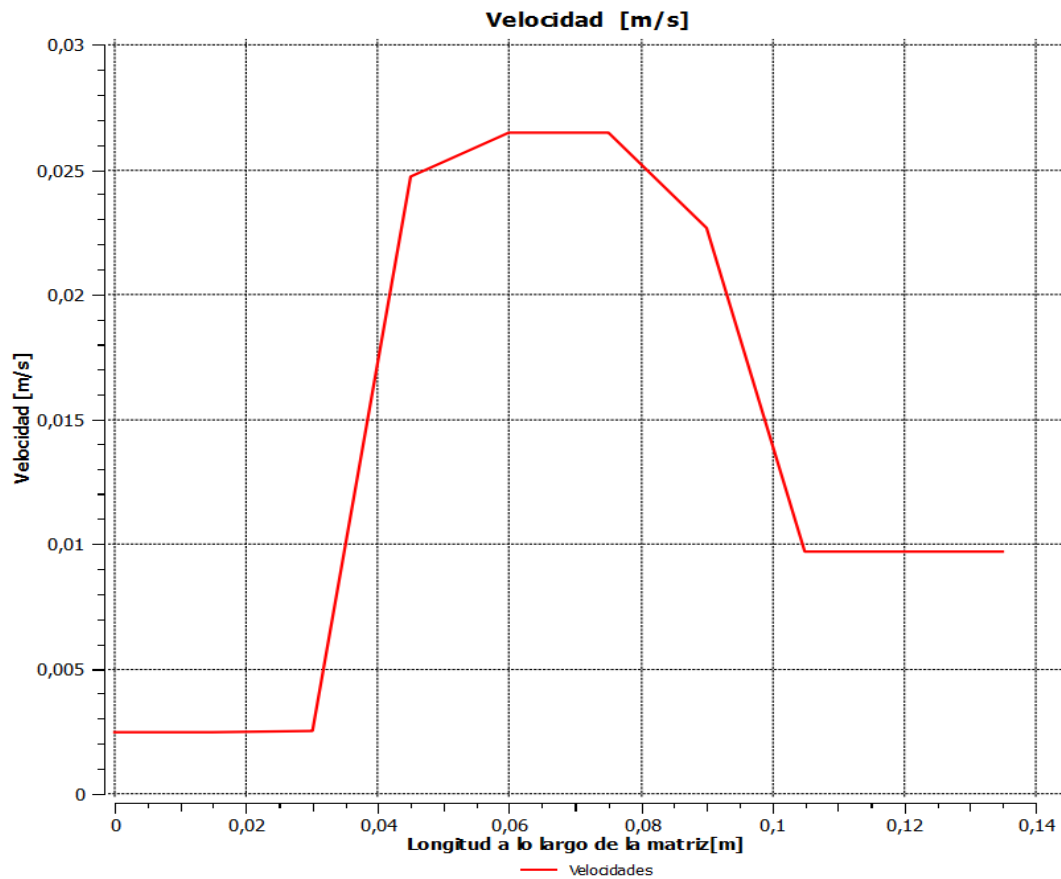


Figura 26. Curva de velocidad en 0.527Mpa primera simulación.

A partir de la gráfica se puede obtener la velocidad máxima y la velocidad media para una presión de 0,527 MPa:

$$V_{av} = \frac{V_{max}}{2} = \frac{0.027 \text{ m/s}}{2} = 0,0135 \text{ m/s}$$

Sabiendo la superficie de salida de $2,37 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ y la velocidad media, se puede calcular el flujo másico:

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A = 743 \cdot 0,013 \cdot 2,37 \times 10^{-5} = 2,377 \times 10^{-4} \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \cdot 3600 \text{ s} = 0,86 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

Para que el flujo de material sea uniforme, las proporciones de la velocidad de entrada y la velocidad de salida tienen que ser igual a la relación entre el área de salida y el área de entrada en la dirección del flujo.

Relación entre las velocidades (Entrada/Salida):

$$\frac{V_{ent}}{V_{sal}} = \frac{2,5 \times 10^{-3}}{2,2 \times 10^{-2}} = 0,1136$$

Relación entre las secciones (Salida/Entrada):

$$\frac{S_{sal}}{S_{ent}} = \frac{2,37 \times 10^{-5}}{2,54 \times 10^{-4}} = 0,0933$$

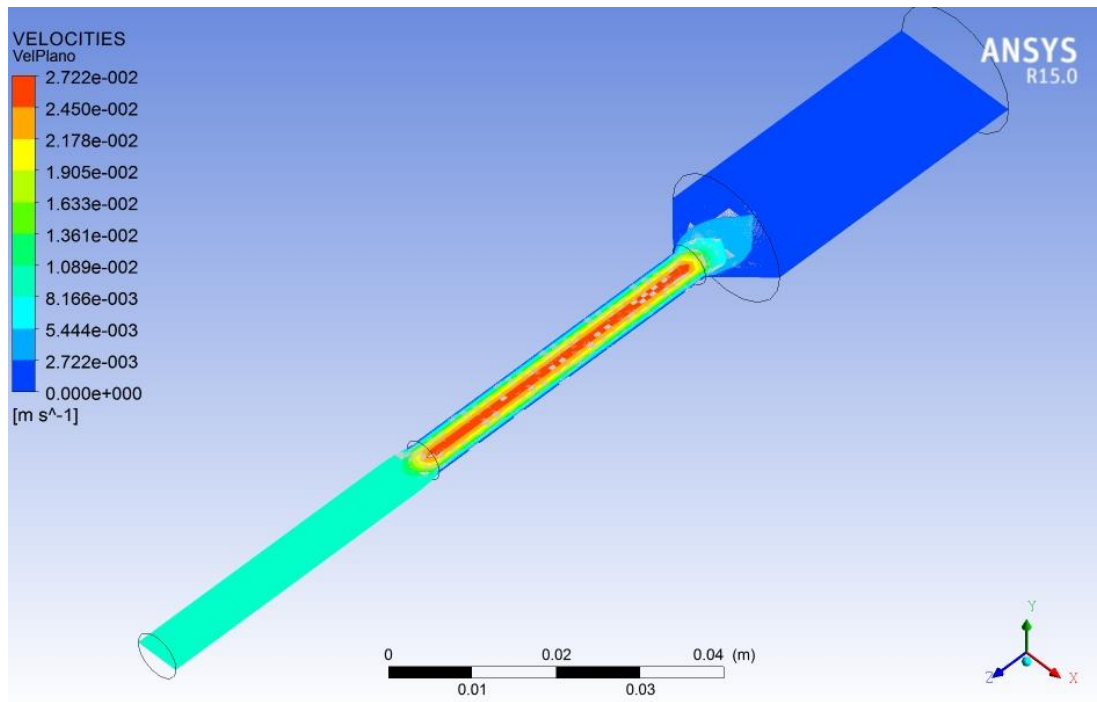


Figura 27. Distribución de las velocidades en la matriz primera simulación.

Se observa un flujo uniforme donde las velocidades máximas se alcanzan en el canal como se puede observar en la figura siguiente:

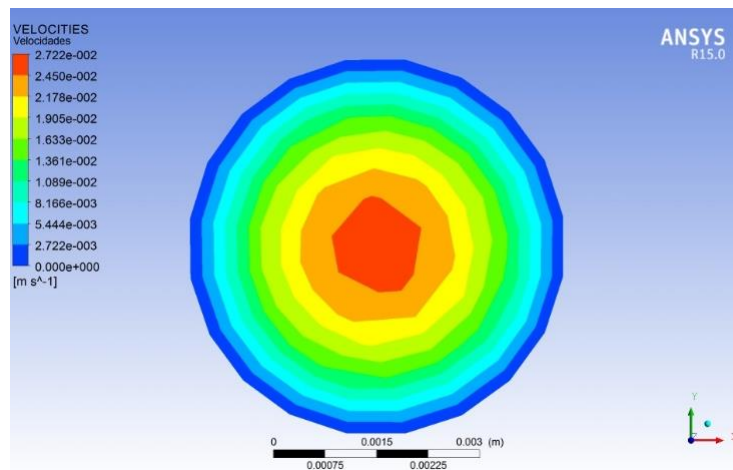


Figura 28. Distribución de las velocidades en el canal en la primera simulación.

Presiones:

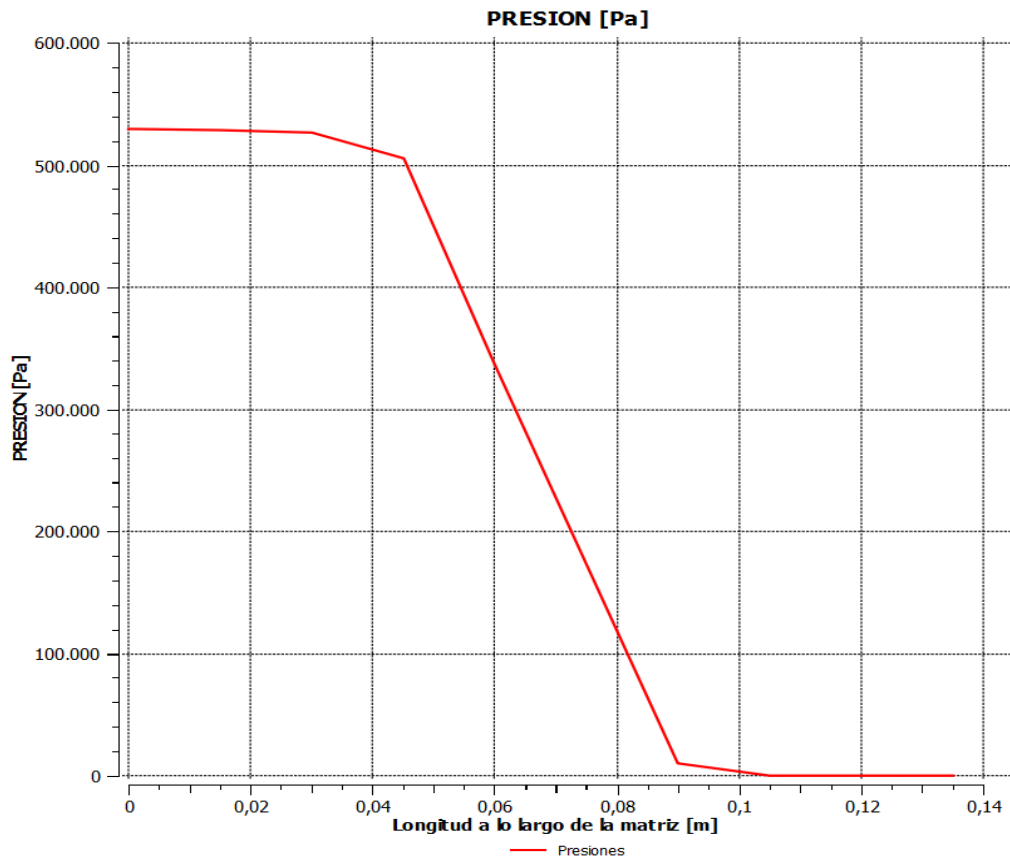


Figura 29. Evolución de la presión a lo largo de la matriz en la primera simulación.

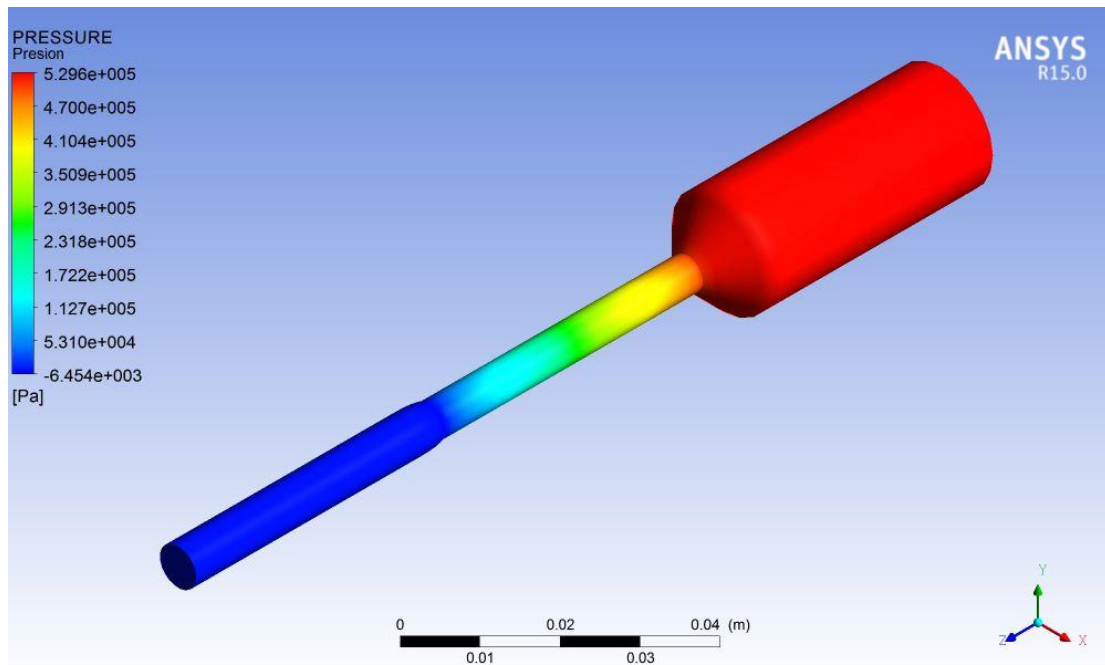


Figura 30. Distribución de las presiones en la matriz en la primera simulación.

Se puede observar que las presiones van decreciendo a medida que el fluido va llegando al orificio de salida, manteniéndose estables hasta alcanzar el cambio de sección (0,04 m), donde la bajada es hasta prácticamente 0 Pa cuando se alcanza el orificio de salida.

Expansión en la salida:

Utilizando la herramienta “Function Calculator” se calcula la sección final del sólido extruido y se compara con la sección de salida de la matriz para así, poder hallar la relación de expansión en la salida al paso por un canal con las características simuladas.

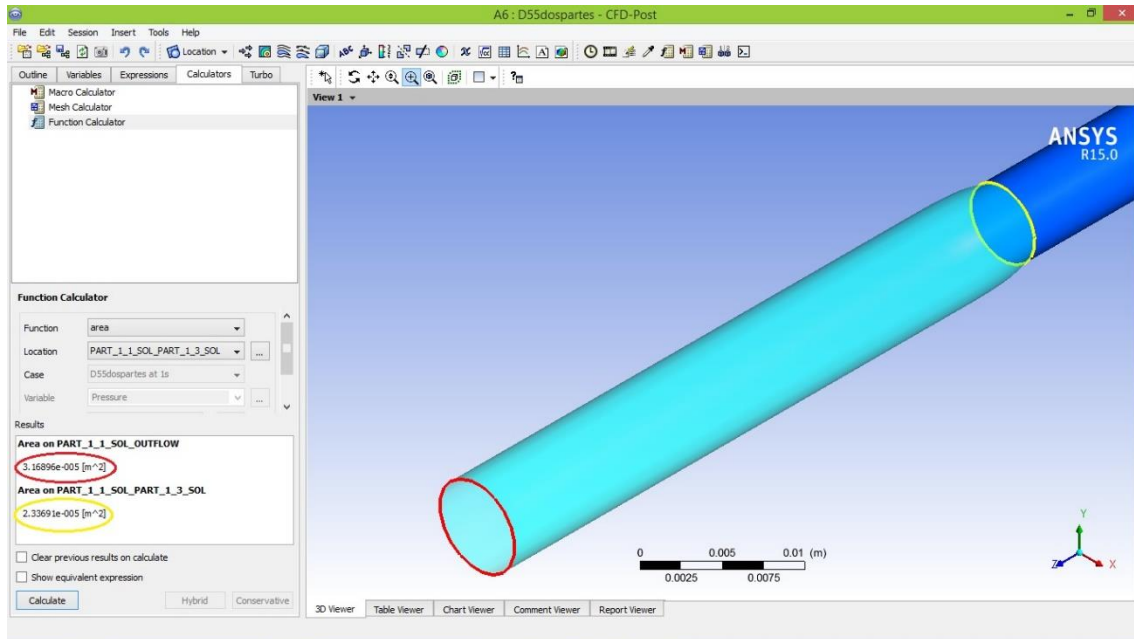


Figura 31. Sección final del perfil extruido primera simulación.

En la figura 31 se pueden observar las secciones en la salida de la matriz y en el sólido una vez extruido cuando ha adquirido su forma final. Con estos datos se calcula la razón de expansión que viene dada por la siguiente expresión:

$$r_s = \frac{D_x}{D_d}$$

Donde:

$$D_x = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,17 \times 10^{-5}}{\pi}} = 6,35 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$D_d = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,34 \times 10^{-5}}{\pi}} = 5,5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Por lo tanto la razón de expansión será:

$$r_s = \frac{6,35 \times 10^{-3}}{5.5 \times 10^{-3}} = 1,15$$

Simulación de extrusión inversa:

Se realiza la extrusión inversa con los mismos parámetros calculados para la extrusión directa, tanto de flujo, como de dimensiones de la matriz. El objetivo es calcular la geometría que debe tener el canal de salida para obtener la sección final deseada del perfil extruido (D = 5,5 mm).

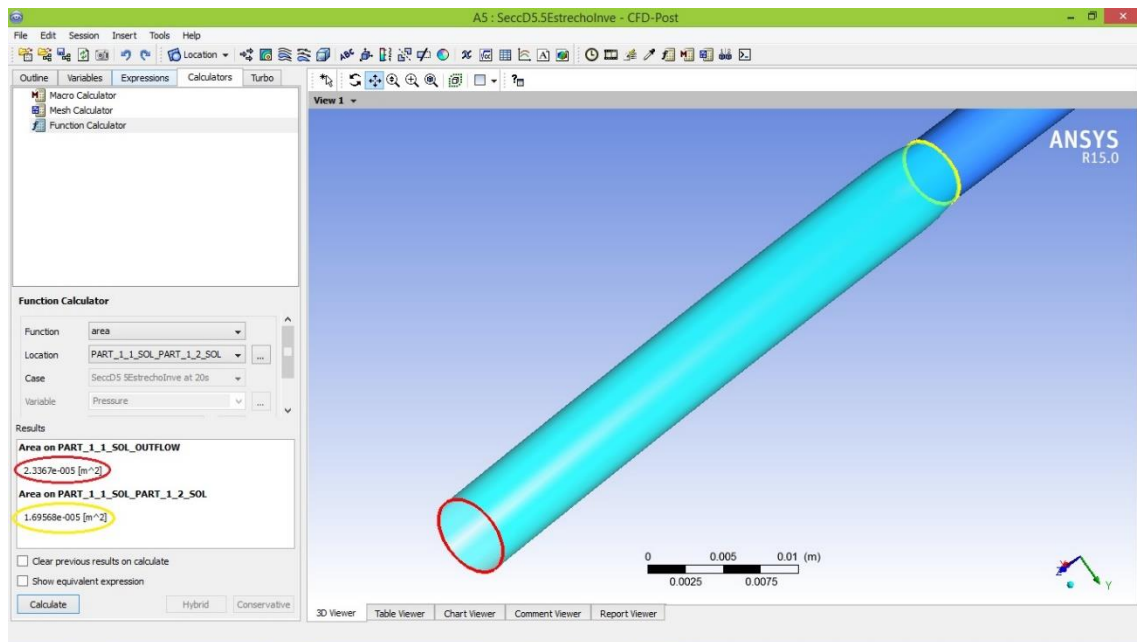


Figura 32. Secciones de la matriz y perfil final en la extrusión inversa.

Como se observa en la figura 32 la sección del perfil extruido es la sección deseada, la cual corresponderá a un diámetro de 5,5 mm. Por lo tanto, la sección del canal de salida necesaria para que el perfil extruido tenga la sección deseada será la calculada al realizar la extrusión inversa marcada en la figura 32 ($1,7 \times 10^{-5} m^2$).

Sección deseada en el perfil extruido: $2,34 \times 10^{-5} m^2$

$$D_x = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,34 \times 10^{-5}}{\pi}} = 5,5 \times 10^{-3} m$$

Sección calculada para la matriz en la extrusión inversa: $1,7 \times 10^{-5} m^2$

$$D_d = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,7 \times 10^{-5}}{\pi}} = 4,71 \times 10^{-3} m \approx 4,8 \times 10^{-3} m$$

A través de la razón de expansión calculada anteriormente se puede comprobar que la sección obtenida en la simulación para extrusión inversa es correcta:

$$r_s = \frac{D_x}{D_d} = \frac{5,5 \times 10^{-3} \text{ m}}{D_d} = 1,15$$

Por lo tanto:

$$D_d = \frac{5,5 \times 10^{-3} \text{ m}}{1,15} = 4,78 \times 10^{-3} \text{ m} \approx 4,8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Este será el diámetro que debe tener el canal de la matriz para extruir un perfil sólido de diámetro 5,5 mm.

A continuación se procede a recalcular todos los parámetros para realizar la simulación del flujo a través de una matriz de con las mismas características a diferencia del diámetro del canal el cual será de 4,8mm

4.8.3.4. *Calculo curva de la extrusora para el diseño final.*

Una vez calculada la sección óptima para la extrusión de la sección deseada se procede de nuevo al cálculo de la curva de la extrusora. El caudal máximo será el mismo que el anterior debido a que las características de la extrusora son las mismas y a que el cálculo de este no se ve afectado por la viscosidad dinámica.

Asumiendo que $P = 0$:

$$Q_{max} = \frac{\pi^2 0.0175^2 (\sin 14.5 \cos 14.5) 0.004 \frac{30}{60}}{2} = 7.33 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

Para determinar la P_{max} a la salida del tornillo se supone que $Q = 0$

$$P_{max} = \frac{6 \pi D L N \eta}{h^2 \tan \theta}$$

La viscosidad viene dada por la ley de la potencia: $\eta = m(T^\circ C) \gamma^{n-1}$

Donde:

$n = 0.39$ como se observa en la Tabla 2.

Y la velocidad de cizalla para una sección transversal circular viene dada por:

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{4 (7.33 \times 10^{-7})}{\pi \left(\frac{4.8 \times 10^{-3}}{2} \right)^3} = 67,51 \text{ s}^{-1}$$

Donde el R = radio del canal circular por el que fluye el polímero fundido, y donde Q_{max} es la velocidad de flujo experimental a través del canal, con el fin de hallar la velocidad de cizalla y la viscosidad.

En base a la curva de viscosidad – velocidad de cizalla donde la viscosidad máxima para un polietileno de baja densidad (PE-LD) donde la viscosidad máxima a 240° es de 300 Pa·s. El valor de viscosidad para una velocidad de cizalla de 67,51 s^{-1} corresponde a 180 Pa·s.

Por lo tanto, P_{max} para un polímero de dicha densidad y con $Q = 0$ es:

$$P_{max} = \frac{6 \cdot \pi \cdot 0.0175 \cdot 0.64 \cdot \frac{30}{60} \cdot 180}{0.004^2 \cdot \tan 14.5} = 4\,591\,807 \text{ Pa} \approx 4,6 \text{ MPa}$$

4.8.3.5. Cálculo de la curva de la matriz para el diseño final.

Para el cálculo del caudal de una matriz donde se desea obtener un perfil cilíndrico sólido de diámetro 5,5 mm y que tiene un canal de 4,8 mm se emplea la ecuación:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta L_d} P = \frac{\pi \left(\frac{4,8 \times 10^{-3}}{2} \right)^4}{8 \cdot 180 \cdot 0.09} \cdot 4,6 \times 10^6 = 3,7 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

La presión de operación para dicha matriz y dicha extrusora es:

$$P_{OP} = \left\{ \frac{2 \pi \eta D^2 N h \sin \theta \cos \theta}{\frac{R^4}{2 L_d} + \frac{D h^3 \sin^2 \theta}{3 L}} \right\} =$$

$$= \left\{ \frac{2 \pi \cdot 180 \cdot 0.0175^2 \cdot \frac{30}{60} \cdot 0.004 \cdot \sin 14.5 \cdot \cos 14.5}{\frac{\left(\frac{4.8 \times 10^{-3}}{2} \right)^4}{2 \cdot 0.09} + \frac{0.0175 \cdot 0.004^3 \sin^2 14.5}{3 \cdot 0.64}} \right\} =$$

$$= 0,760195 \text{ MPa}$$

Finalmente se calcula el caudal de operación utilizando la presión de operación:

$$Q_{OP} = \frac{\pi \left(\frac{4.8 \times 10^{-3}}{2} \right)^4}{8 \cdot 180 \cdot 0.09} \cdot 0,760195 \times 10^6 = 6.11 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

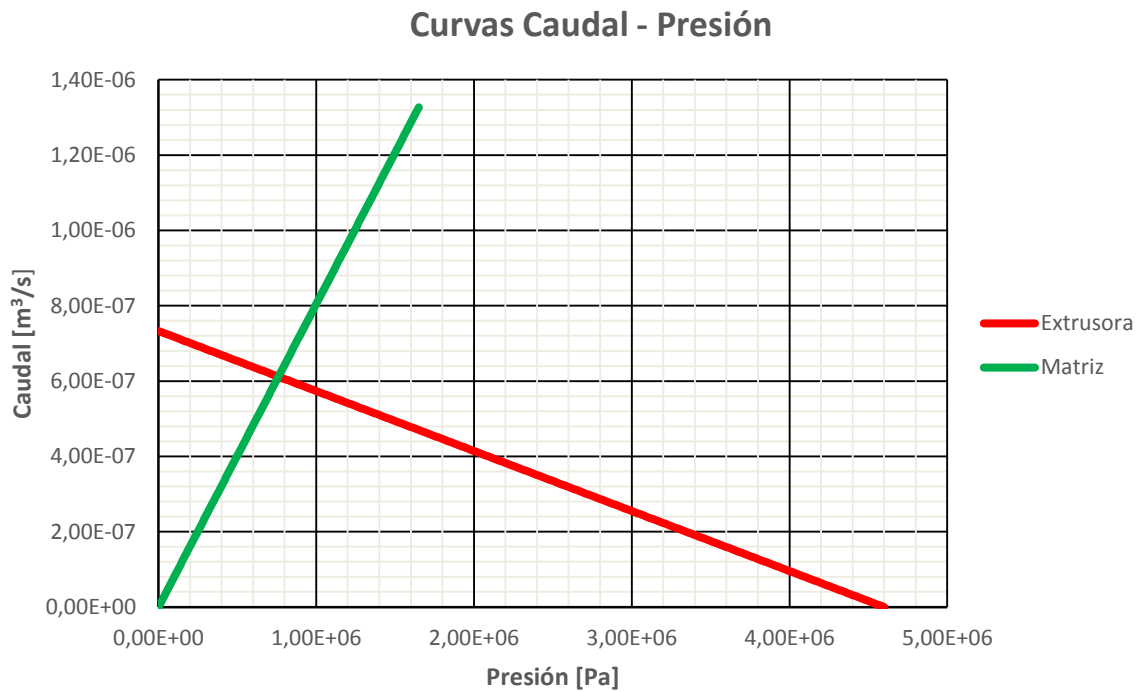


Figura 33. Punto de operación diseño final.

4.8.3.6. Resultados obtenidos en la simulación del diseño final.

Una vez calculados puntos de operación para una matriz con diámetro en la sección del canal 4,8 mm e insertados en Polydata, los resultados de la simulación son los siguientes para una extrusión directa.

Flujo másico:

En la siguiente grafica obtenida en Ansys se analiza el flujo másico para el punto de operación obtenido para la matriz final con un diámetro en el canal de 4,8mm.

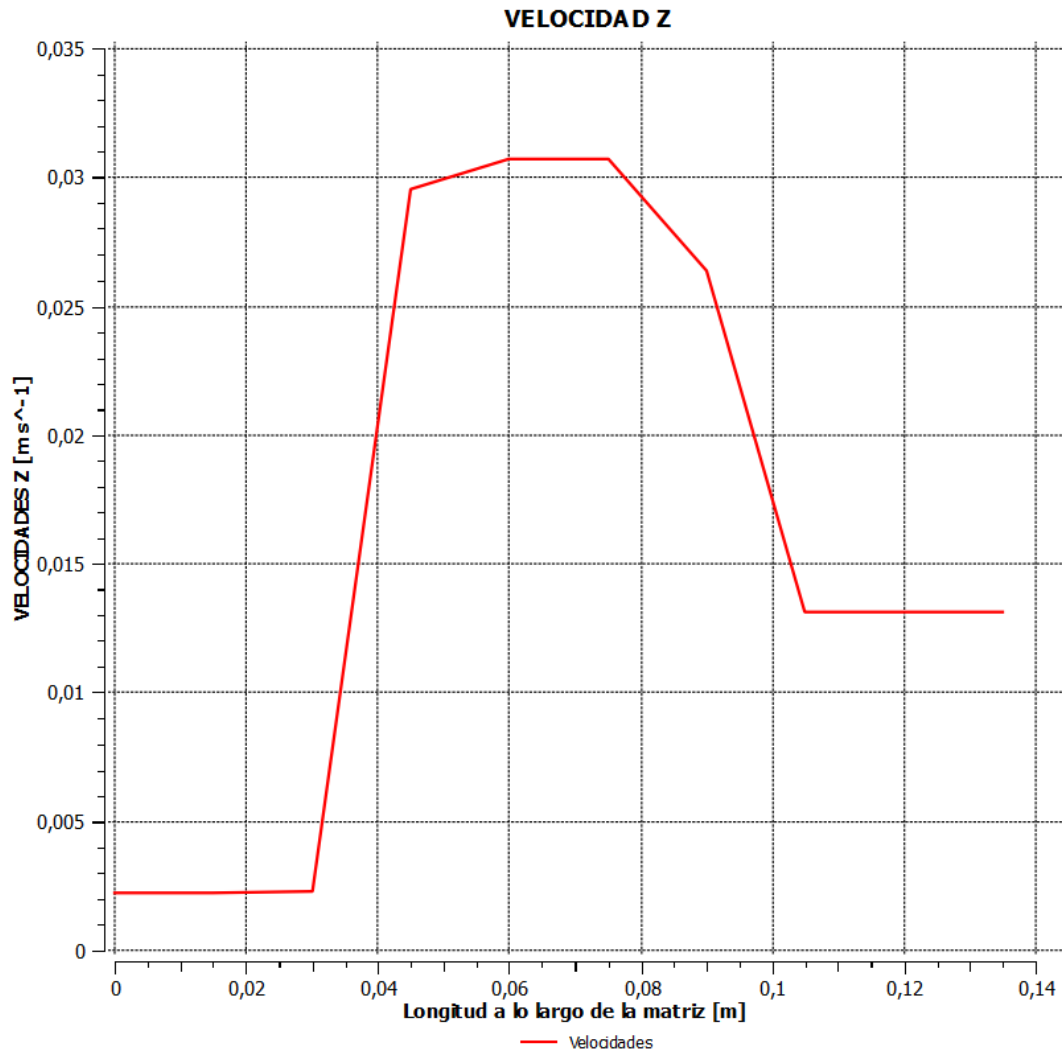


Figura 34. Curva de velocidad en 0,760195 MPa simulación diseño final.

A partir de la gráfica se puede obtener la velocidad máxima y la velocidad media para una presión de 0,760195 MPa:

$$V_{av} = \frac{V_{max}}{2} = \frac{0.031 \text{ m/s}}{2} = 0,0155 \text{ m/s}$$

Sabiendo la superficie de salida de $1.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ y la velocidad media, se puede calcular el flujo másico:

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A = 743 \cdot 0,0155 \cdot 1,8 \times 10^{-5} = 2,079 \times 10^{-4} \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \cdot 3600 \text{ s} = 0,74 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

Para que el flujo de material sea uniforme, las proporciones de la velocidad de entrada y la velocidad de salida tienen que ser igual a la relación entre el área de salida y el área de entrada en la dirección del flujo.

Relación entre las velocidades (Entrada/Salida):

$$\frac{V_{ent}}{V_{sal}} = \frac{2,1 \times 10^{-3}}{2,65 \times 10^{-2}} = 0,0792$$

Relación entre las secciones (Salida/Entrada):

$$\frac{S_{sal}}{S_{ent}} = \frac{1,8 \times 10^{-5}}{2,54 \times 10^{-4}} = 0,0711$$

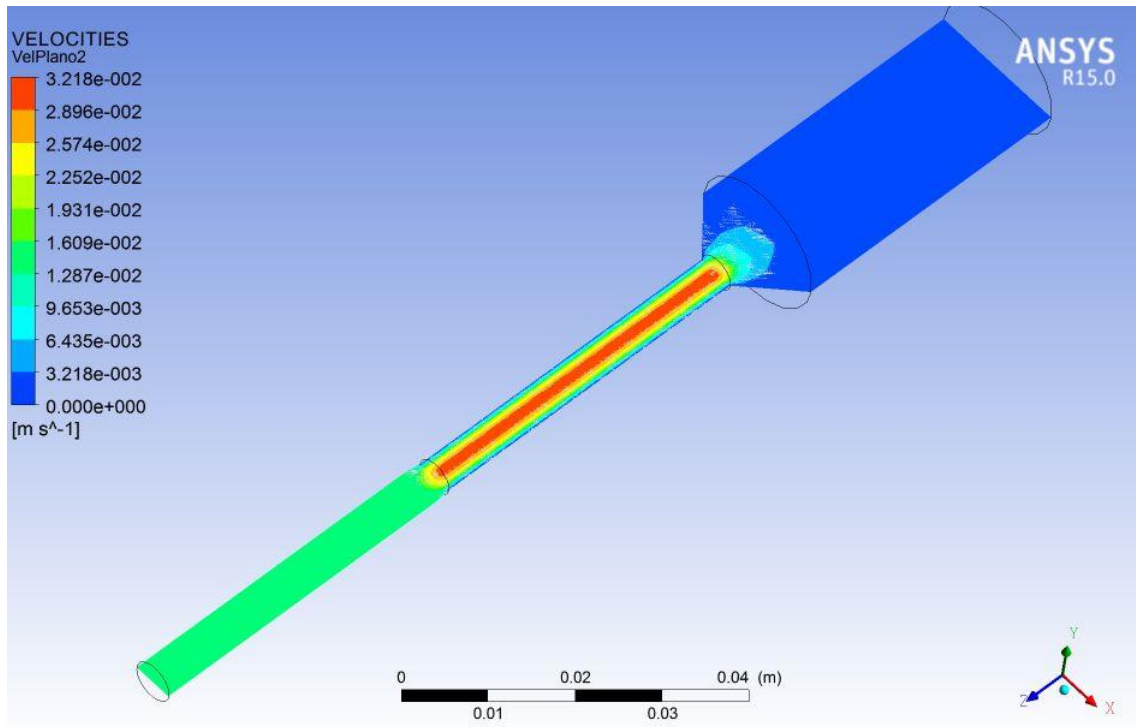


Figura 35. Distribución de las velocidades el diseño final de la matriz.

Se observa un flujo uniforme donde las velocidades máximas se alcanzan en el canal como se puede observar en la figura siguiente:

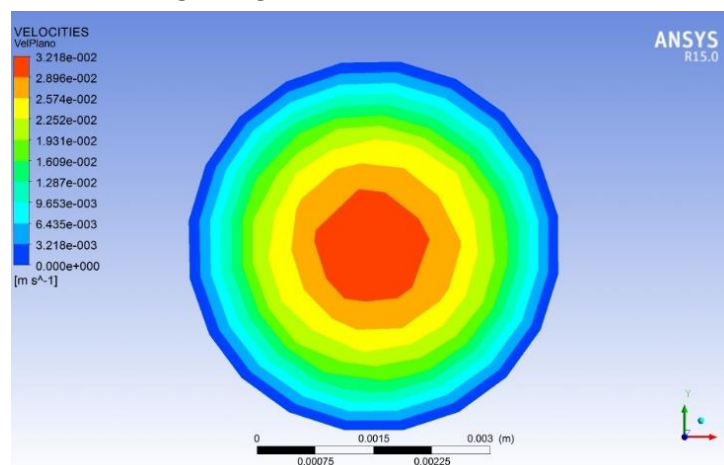


Figura 36. Distribución de las velocidades en el canal del diseño final de la matriz.

Presiones:

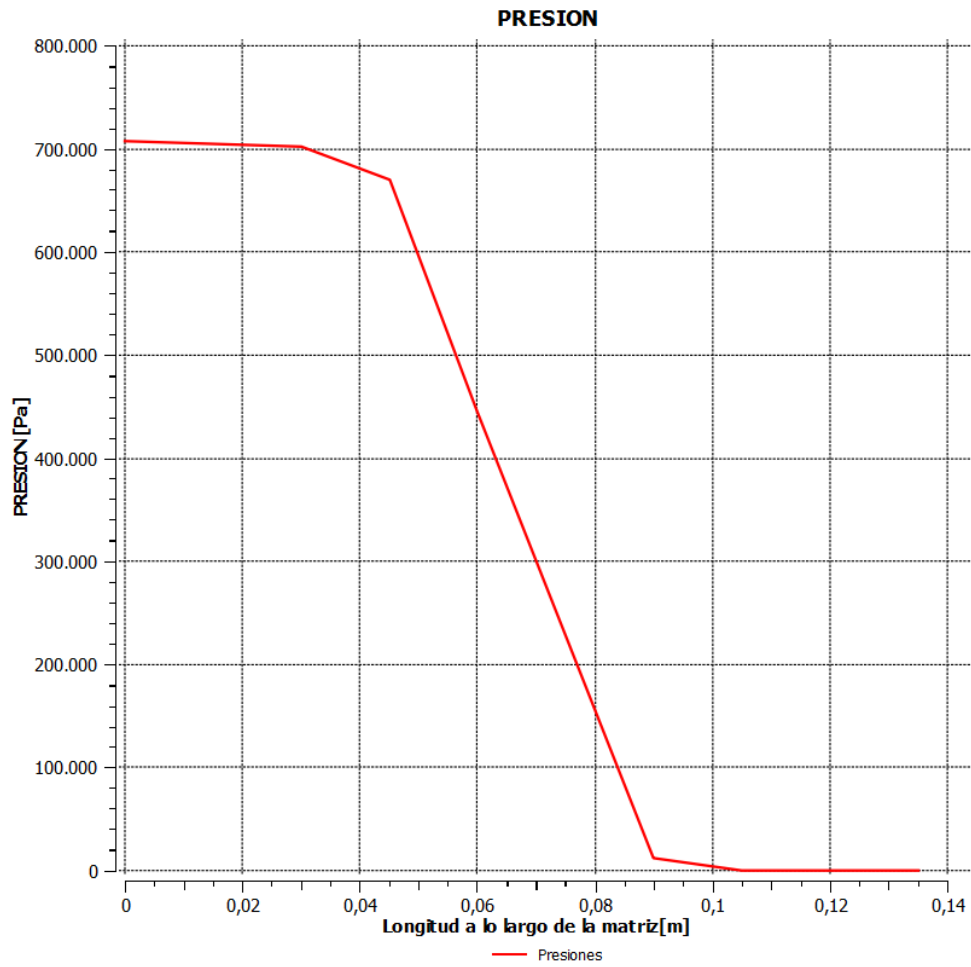


Figura 37. Evolución de la presión a lo largo de la matriz diseño final.

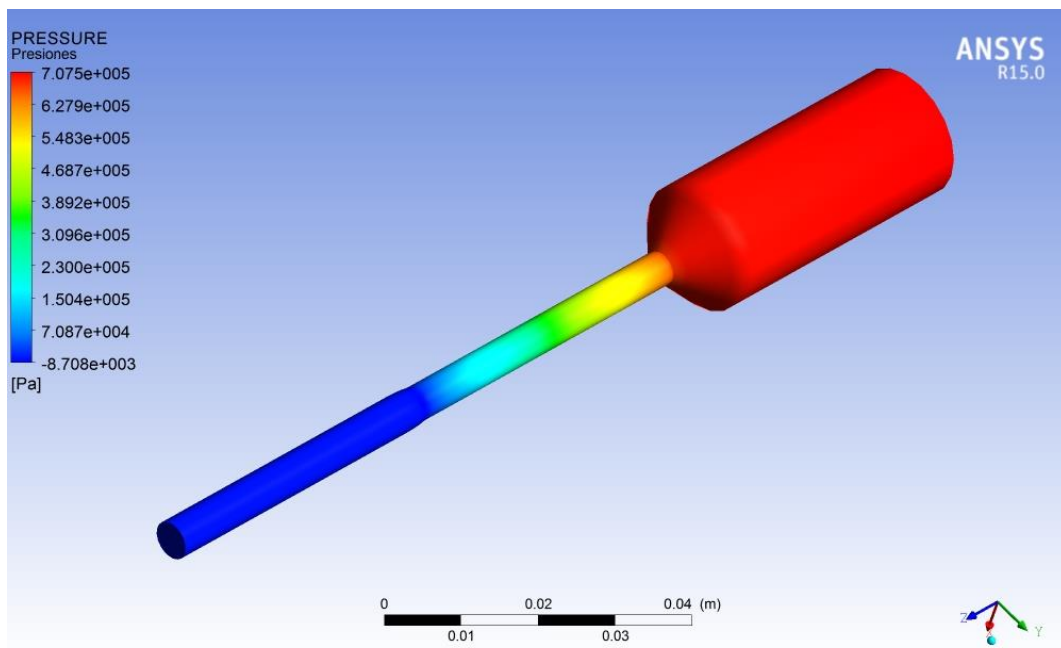


Figura 38. Distribución de las presiones en la matriz diseño final.

Se puede observar que las presiones van decreciendo a medida que el fluido va llegando al orificio de salida, manteniéndose estables hasta alcanzar el cambio de sección (longitud 0,04 m), donde la bajada es hasta prácticamente 0 Pa cuando se alcanza el orificio de salida.

Expansión en la salida:

Utilizando la herramienta "Function Calculator" se calcula la sección final del sólido extruido y se compara con la sección de salida de la matriz para así, poder hallar la relación de expansión en la salida al paso por un canal con las características simuladas.

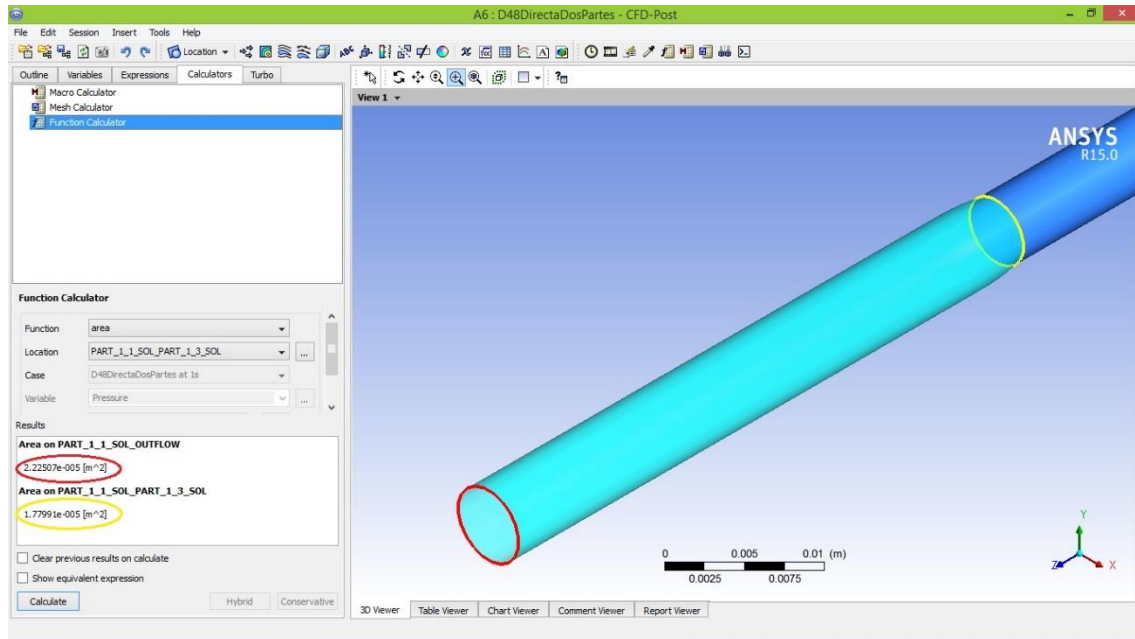


Figura 39. Sección final del perfil extruido del diseño final de la matriz.

En la figura 39 se pueden observar las secciones en la salida de la matriz y en el sólido una vez extruido cuando ha adquirido su forma final.

Donde:

$$D_{extruido} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,23 \times 10^{-5}}{\pi}} = 5,5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$D_{salida\ matriz} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,8 \times 10^{-5}}{\pi}} = 4,8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

4.9. Diseño 3D de la matriz de extrusión.

Con la base teórica estudiada se diseña una matriz de extrusión con el software de diseño 3D Autodesk Inventor Professional 2015 para extruir una sección sólida cilíndrica de diámetro 5,5 mm.

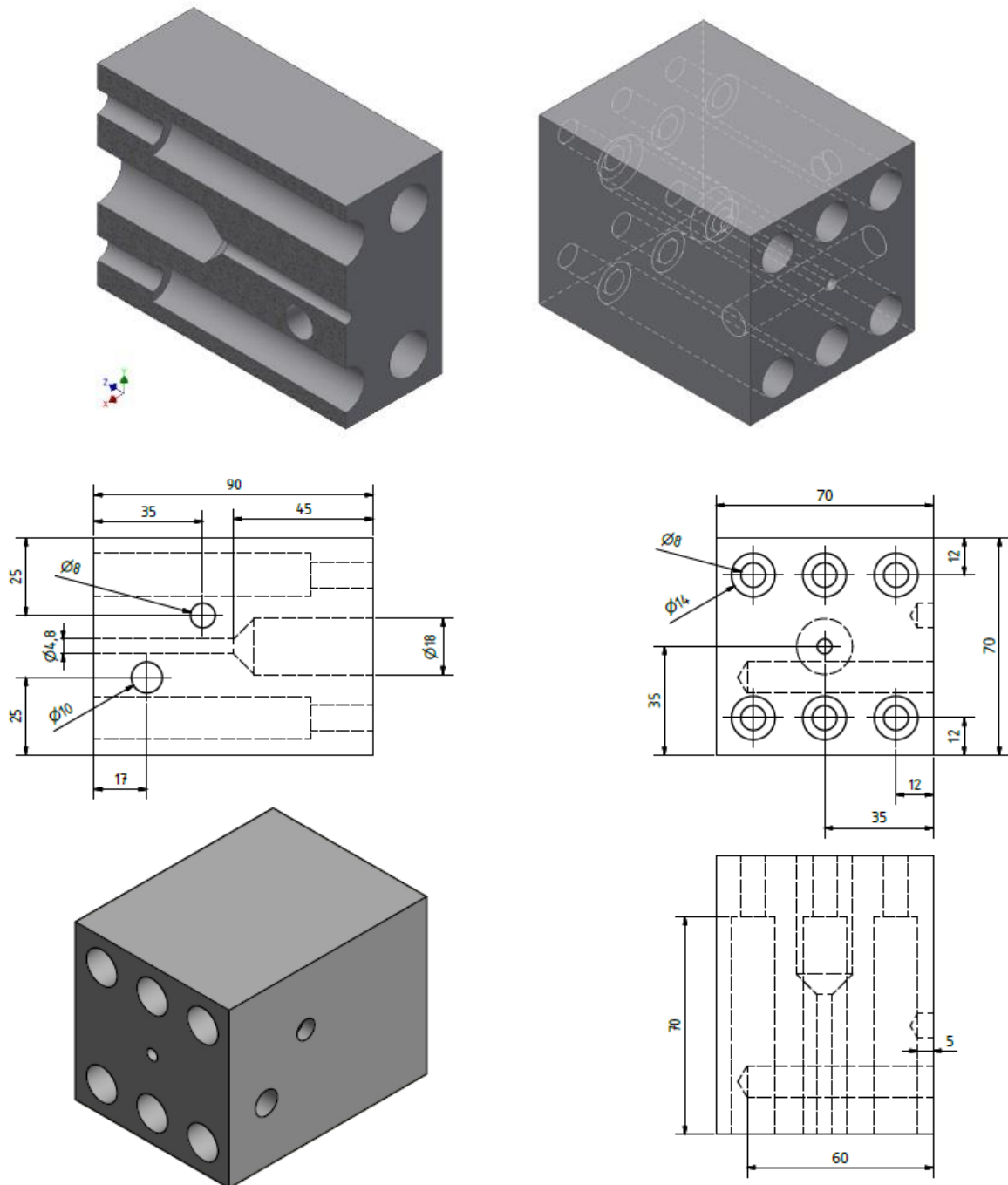


Figura 40. Modelado y dimensionado de la matriz con software de diseño 3D.

El diseño de la matriz está mecanizado en un taco de acero el cual tiene unas dimensiones de 90 x 70 x 70 mm. Desde la entrada hasta el principio de la boquilla la matriz tiene 45 mm con el fin de que las velocidades del fluido y las presiones se estabilicen, y lleguen a la boquilla con valores uniformes una vez pasada la placa rompedora. Con esto se conseguirá una mayor regularidad de flujo a lo largo de la matriz. El canal de la boquilla de la matriz tiene una longitud de 45 mm con el fin de minimizar el hinchamiento del polímero a la salida.

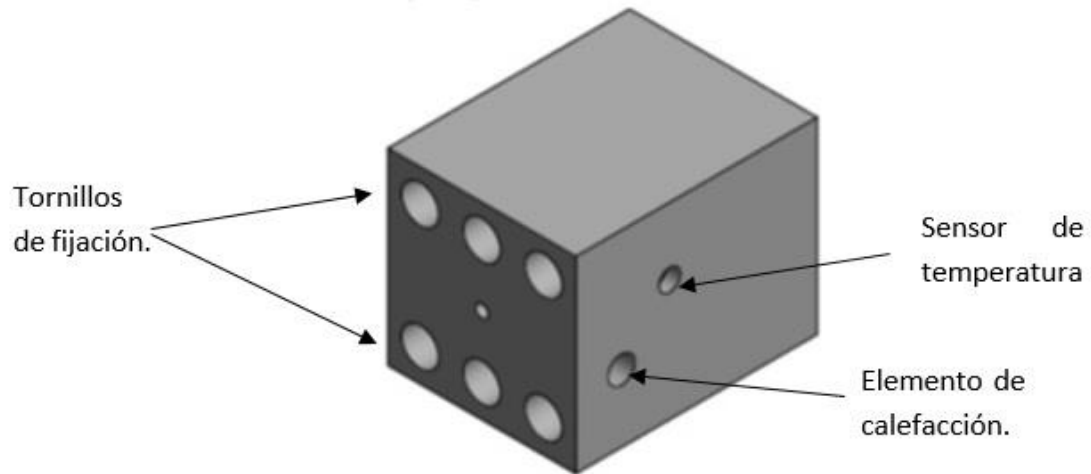


Figura 41. Detalle de taladros.

La matriz consta de un juego de agujeros para el alojamiento de tornillos con los cuales estará anclada a la extrusora. Además, tiene practicados unos taladros para poder alojar elementos de calefacción y sensores de temperatura con el fin de monitorizar la temperatura del fluido al paso por la boquilla.

5. Estudio económico.

Se construye en un acero con aplicaciones para herramientas, moldes, matrices, etc. Como puede ser un AISI H21, teniendo en cuenta que las dimensiones en bruto del material, su peso, el tiempo de mecanizado, componentes de sujeción y el precio tanto del material como del mecanizado como de los componentes auxiliares. Se ha realizado un estudio económico del gasto que puede suponer la construcción de una matriz de extrusión con las características dadas.

También se ha realizado el estudio del rendimiento económico que la matriz puede proporcionar una vez esta produciendo, esto teniendo en cuenta la tasa de producción y el precio del material una vez procesado.

Concepto	Peso(Kg)	Dimensiones (mm)	Cantidad	Coste	Precio(€)
Taco AISI H21	8	100x100x100	1	5,65 €/Kg	47,3
Tornillos M8X40			4	0,5 €/ud	2
Mecanizado			8 h	40€/h	320
				TOTAL	369,3

Producción bruto de la matriz.

Tasa de producción → 0,74 Kg/h

Precio del producto extruido → 3 €/Kg

Producción por hora → 2,2 €/h

Producción por día → 52,8 €/día

Producción neta de la matriz.7

Tasa de producción → 0,74 Kg/h

Precio del material sin procesar → 1,2 €/kg

Coste de material hora → 0,89€/h

Coste de material diario → 21,32 €/día

Rendimiento económico diario de la matriz (sin tener en cuenta el gasto de la máquina, personal, mantenimiento, etc.)

52,8 €/día – 21,32 €/día = 31,5 €/día

6. Conclusiones.

Para el modelado y la simulación en el programa informático de la matriz de extrusión con orificio de salida circular, se ha calculado la presión y el flujo másico de operación para un PE-LD a 220°C. Utilizando el modelo de la ley de potencia para analizar el flujo y el comportamiento del polímero a través de la matriz.

A fin de alcanzar las dimensiones deseadas en la extrusión final, se ha tenido que realizar el cálculo y la simulación dos veces, consiguiendo controlar la expansión del material extruido a la salida para una longitud determinada del canal. A partir de estas simulaciones se ha observado que la expansión del extruido final depende de la longitud del canal y de las características del polímero.

En el diseño final de la matriz se ha conseguido mantener un flujo másico uniforme y distribuciones de las tensiones de cizalla similares, a fin de evitar fallos que puedan afectar al perfil final en forma de deformaciones causadas por un mal diseño o un cálculo erróneo.

7. Bibliografía.

ANSYS POLYFLOW Tutorial Guide, Ansys Inc., 2013.

Crawford, R., 1998. Plastic Engineering, 3rd ed. Oxford: Butterworth – Heine-mann.

Harold F. Giles, Jr. Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook, William Andrew publishing, 3rd edition 2005.

Michaeli, W. Extrusion Dies for Plastics and Rubber, 3rd edition, Hanser Publishers, New York, 2003.

Mikell P. Groover, Fundamentos de manufactura moderna, 3ra edición, McGraw Hill, 2007.

Rauwendaal, C., 2001. Polymer Extrusion, 4th ed. Carl Hanser Verlag, Munich 2001.

Richardson J.F, 2008. Non-Newtonian Flow and Applied Rheology, 2nd ed. Pergamon Press in 1960.

Rosato D. V., 1998. Extruding Plastics, Chapman and Hall.

Tim A Osswald, Polymer Processing Fundamentals, Hanser Publishers, Munich, 1998

CES EDUCPACK 2013. Base de datos sobre materiales y procesos de fabricación.