

Diseño, Selección, Construcción y Armado de Sistema de Extrusión, Ensayos Preliminares, Modificaciones y Obtención de Termoplásticos Expandidos

Proyecto Final
Ingeniería en Materiales



Lucas Sanchez Fellay
Lisandro Escalada

Director José Carella

Marzo 2010



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

1 INDICE

1	Indice.....	2
2	Introducción.....	4
2.1	Métodos de procesamiento para Obtención de Espumas de Poliestireno.....	5
3	Objetivos.....	15
4	Reología y extrusión.....	16
4.1	Tipos de fluidos.....	16
4.1.1	Fluidos Newtonianos.....	18
4.1.2	Fluidos no Newtonianos.....	20
4.2	Modelos para cálculo de viscosidad.....	21
4.2.1	Ley de la Potencia.....	22
4.2.2	Cross WLF:.....	22
4.3	Reómetros y principios de operación.....	24
4.4	Propiedades reológicas del Poliestireno y Polipropileno.....	25
4.5	Efecto del agregado de CO ₂ supercrítico.....	27
4.6	Aproximación de las curvas mediante Cross WLF.....	29
5	Descripción de una extrusora de termoplásticos.....	33
5.1	Generalidades.....	33
5.2	Partes de una extrusora.....	34
5.2.1	Tornillo.....	35
6	Descripción de la extrusora utilizada para la obtención de espumas termoplásticas.....	38
6.1	Esquema de la extrusora diseñada.....	38
6.2	Selección de la bomba de engranajes.....	38
6.3	Descripción de la extrusora diseñada.....	40
6.3.1	Motor de accionamiento y reductor de velocidad (1).....	40
6.3.2	Tolva (2).....	41
6.3.3	Camisa calefactora (3).....	42
6.3.4	Tornillos (4).....	43
6.3.5	Tornillo con mezcladores (4).....	44
6.3.6	Ingreso de gas al sistema (5).....	46
6.3.6.1	Recipiente de alta presión y tubo de CO ₂ (6).....	47
6.3.6.2	Panel de control de caudal de gas (7).....	47
6.3.6.3	Bomba de soluciones líquidas (8).....	48
6.3.6.4	Amortiguador de ondas de presión.....	50
6.3.6.5	Válvula de ingreso de gas a la extrusora.....	51
6.3.7	Cabezal (9).....	52
6.3.7.1	Soporte para la bomba de engranajes.....	53
6.3.7.2	Bomba de engranajes.....	55
6.3.7.3	Mezclador.....	55
6.3.7.3.1	Camisa.....	55
6.3.7.3.2	Discos.....	57
6.3.7.4	Cabezal de espumado.....	59
6.3.7.4.1	Pieza número 1.....	60
6.3.7.4.2	Pieza número 2.....	61
6.3.7.4.3	Pieza número 3.....	62
7	Control del sistema.....	63
8	Modificaciones hechas a la extrusora.....	67
8.1	Sujeción de la camisa.....	67
8.2	Cambio del reductor de velocidad de la bomba de engranajes.....	67
8.3	Componentes electrónicos.....	68
8.4	Cabezal del espumado.....	68

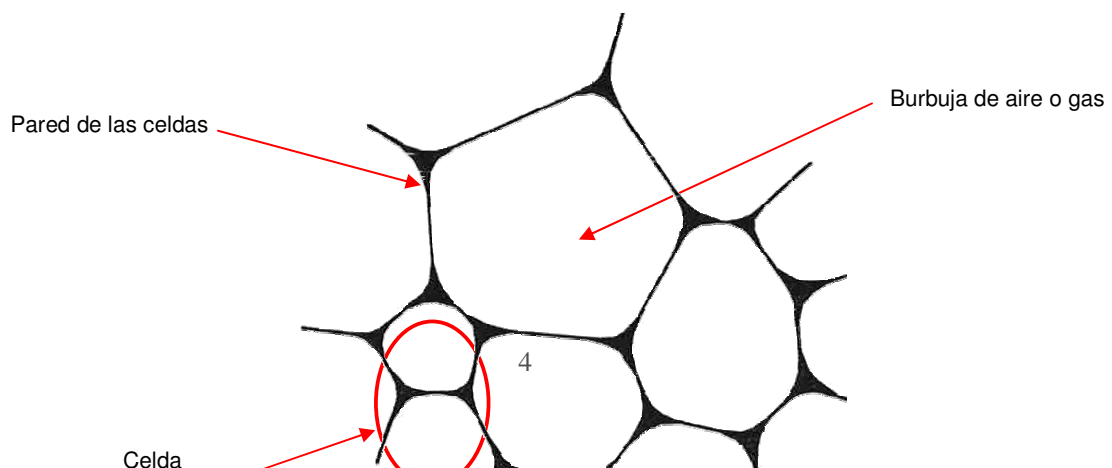
8.5	Refrigeración de la camisa en la sección cercana a la tolva	71
8.6	Resistencias para la bomba de engranajes	72
8.7	Modificaciones en el mezclador estático	72
9	Desarrollo de un mezclador dinámico	75
9.1	Geometría	75
9.2	Software de simulación.....	81
9.2.1	Ingreso de datos.....	83
9.2.2	Resultados de la simulación	84
9.3	Simulaciones.....	87
10	Resultados	98
11	Trabajos a Futuro.....	102
12	Bibliografía.....	104
13	Anexo A: Hojas técnicas de los Polímeros utilizados	106
13.1	Poliestireno de Alto Impacto	106
13.2	Polipropileno 1100N.....	108
13.3	Polipropileno 1102H.....	109
13.4	Polipropileno 2500E.....	110
14	Anexo B: Variadores de frecuencia y Sensores de Presión	111
14.1	Hojas técnicas del variador de frecuencia micromaster 420.....	111
14.2	Hoja técnica del variador de frecuencia sinamic g110	112
14.3	Hoja técnica de los sensores de presión dynisco.	113
14.4	Hoja técnica del variador de frecuencia WEG.....	113
15	Anexo C: Planos.....	115
15.1	Tornillo de extrusora sin mezcladores	115
15.2	Camisa extrusora.....	115
15.3	Cabezal de espumado.....	116
15.4	Bomba de líquido.....	117
15.5	Mezclador	118
15.6	Enfriador	119
15.7	Mezclador dinámico	121
15.8	Bomba de engranajes	121

2 INTRODUCCIÓN

Se puede definir como espuma termoplástica a un polímero termoplástico expandido para formar una estructura celular de menor densidad mediante la formación de burbujas de aire o gas. El proceso común para su formación en continuo consiste en la disolución de un agente de espumado, líquido o gas a temperatura ambiente, en el fundido del termoplástico. Este agente, también llamado de expansión, es seleccionado de manera tal que su punto de ebullición sea menor que la temperatura de transición vítrea; de esta manera se puede asegurar que las burbujas se crearan cuando el polímero se encuentre fundido. Este proceso es activado por pérdida de solubilidad del agente de espumado, normalmente debido a una caída en la presión. Ésta es una de las variables principales del proceso de espumado, ya que dependiendo del momento en que se dé esta caída de presión se logrará obtener la espuma o no.

Estas espumas son usadas ampliamente en la actualidad, debido a su bajo peso, al bajo costo de las materias primas, a un aumento en su capacidad como aislante y a aumento en momentos de segundo orden de las piezas formadas (dándole mayor rigidez), o una combinación de estas propiedades. De acuerdo a la densidad de la espuma obtenida puede ser clasificada en alta o baja densidad. El primer caso corresponde a espumas entre 100 y 300 kg./m³ y son comúnmente usadas en partes de interiores de automóviles, debido a su rigidez y su bajo peso. Y las de baja densidad tienen valores de 30 a 70 kg./m³, y son frecuentemente usadas como envases para alimentos (recipientes para helados, bandejas para alimentos, etc.), embalaje de artículos frágiles, edificaciones y en la industria automotriz.

La estructura típica de una espuma consiste en un continuo mecánico de polímero, que encierra un número elevado de celdas (o microceldas), que contienen aire o gas. (Imagen 1.1).



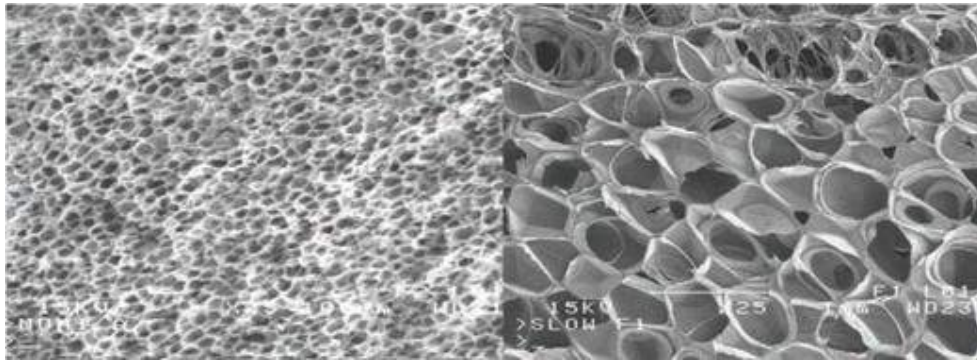


Imagen 1.2: Microestructura de espumas de PS de baja densidad.

Los procesos más conocidos para la producción de este tipo de espumas, son llevados a cabo de dos maneras distintas:

- 1) El agente de espumado se produce en una reacción química que genera gas en el seno del polímero fundido,
- 2) El agente de espumado se encuentra disuelto en un solvente que pasa a fase vapor a temperaturas en las cuales el polímero está en estado líquido.

A continuación la espuma debe ser enfriada para recuperar el estado sólido y así obtener el polímero termoplástico sólido con celdas de gas ocupando la mayor parte del volumen.

2.1 Métodos de procesamiento para Obtención de Espumas de Poliestireno

Para el caso del poliestireno, existen dos formas de procesamiento para producir espuma. Uno (discontinuo) es moldeo por vapor mientras que el otro (continuo) es por extrusión. Al primero se lo conoce como Poliestireno Expansible (EPS) y al segundo como Poliestireno Expansible Extruído (XEPS).

Se llama EPS a la espuma producida a través de moldeo por vapor, proceso introducido por primera vez en 1945 por la empresa Koppers Corporation de Estados Unidos. Consiste básicamente en una cama de perlas sólidas con un diámetro de 0.2 a 3 mm y un peso molecular promedio de 160000 a 260000, conteniendo ellas entre un 4 y un 7% de agente de expansión, usualmente pentano o butano.

Las perlas de poliestireno expandible se presentan en forma esférica con un diámetro que oscila en el intervalo 0,2-3,0 mm y se tratan con diferentes aditivos para influir en las propiedades del material expandido. Para la creación de las mismas se llevan a cabo dos etapas de procesamiento:

- Polimerización
- Secado y acabado

La polimerización consiste en la obtención de macromoléculas basadas en largas cadenas de la unidad básica o monómero. En el caso del poliestireno expandible el monómero es el estireno. La polimerización se realiza mediante suspensión en agua del estireno en unos reactores equipados con mecanismos agitadores que producen la división del estireno en pequeñas gotas suspendidas en el agua. Los reactores están recubiertos por una camisa de refrigeración/calefacción que permite regular la temperatura interna del reactor. Durante este proceso se utilizan además aditivos para las siguientes características:

- Estabilización de la suspensión y regulación del diámetro de las perlas
- Catalizadores para iniciar la reacción de polimerización
- Adición de agentes ignífugantes (para las materias primas que requieren esta característica).

La reacción de polimerización es exotérmica y se desarrolla siguiendo un programa de temperaturas definido y cuando se alcanza una cierta tasa de conversión, variable según los diferentes procesos, el agente de expansión se introduce a presión. Al finalizar esta etapa se obtiene una mezcla de perlas de poliestireno expandible y agua que es enviada a unos tanques de homogeneización.

En la etapa de secado y acabado la mezcla anterior es secada por aire y por centrifugación y se traslada a una cierta altura para su posterior cribado a diferentes granulometrías ya que siempre existe una cierta dispersión en el diámetro de las perlas obtenidas.

Los diferentes tamizados se aditivan, generalmente con estearatos, para mejorar su posterior transformación.

Después de un almacenamiento intermedio en silos la materia prima producida se envasa principalmente en contenedores de cartón recubiertos en su interior por un film plástico aunque también pueden emplearse contenedores metálicos.

El producto debe conservarse a una temperatura moderada (inferior a 20°C) para evitar la volatilización del agente expansor.

Las perlas se pueden caracterizar por

- Granulometría: los productos más finos, con diámetros comprendidos entre 0,2 y 1,0 mm se destinan principalmente a la fabricación de embalajes. Los productos más gruesos (1,0 a 3,0 mm.) se utilizan para la producción de placas de aislamiento térmico.
- Potencial de expansión: la naturaleza del polímero, el contenido en agente de expansión y la presencia de ciertos aditivos permiten obtener productos con una densidad final más ajustada.
- Ajuste para moldeo: los aditivos y tratamientos superficiales permiten la obtención de productos cuyo ciclo de moldeo/desmoldeo puede acortarse.
- Agentes ignífugantes: cuando la aplicación lo requiera (por ejemplo para construcción) esta materia prima puede tratarse con aditivos ignífugantes que mejoran notablemente sus propiedades de reacción al fuego.
- Bajo contenido en pentano: el contenido habitual de pentano en el poliestireno expandible se sitúa alrededor del 6-7 %. En los últimos años se han desarrollado materias primas con bajo contenido en pentano (4%) que son muy adecuados para la fabricación de piezas y bloques de densidad media-alta y con los que se consiguen reducciones en los tiempos de estabilización y en los ciclos de moldeo/desmoldeo.

La industria productora está continuamente investigando nuevos desarrollos y de esta forma se han producido en los últimos años productos con mejores prestaciones aislantes o con un mejor comportamiento frente a la absorción de agua.

Una vez obtenidas las perlas de PS, el procesamiento de espumado se lleva a cabo conforme a los siguientes pasos:

1. *Pre expansión:* Las perlas se alimentan a un tanque vertical con agitación y vapor controlado, en donde se expanden hasta 40 veces más de su volumen original. Este proceso puede ocurrir de manera continua o por lotes. La densidad de las perlas se controla con el tiempo de residencia en el expansor o a través de la presión. En el proceso por lotes se pueden obtener densidades muy bajas, debido a la facilidad de operar con presiones y temperaturas altas.
2. *Estabilización:* Las perlas expandidas se almacenan durante varias horas a presión atmosférica para que el vacío de las esferas se equilibre con la presión exterior. Esta etapa puede durar 4 horas o 3 días, dependiendo de la densidad, el flujo de aire, la temperatura y otras variables.
3. *Moldeo:* Una vez que la presión se ha estabilizado, las esferas se alimentan a un molde cerrado y nuevamente se aplica calor por medio de inyección de vapor al interior del molde. Debido a que no hay espacio para continuar con la expansión, las perlas se fusionan entre sí, adquiriendo la forma del molde.
4. *Forma:* Después de un período corto de enfriamiento, se remueven los bloques y se cortan para dar la forma requerida, con cuchillas u otras técnicas.
5. *Post producción:* El producto final se puede laminar con aluminio, plástico, fieltro, fibra de madera, cemento y otros revestimientos.

Las espumas obtenidas mediante este procesamiento se caracterizan por su baja densidad, buen aislamiento térmico, resistencia a la compresión y al impacto y por su facilidad para ser recicladas. Se pueden moldear de distintas formas, dependiendo de las perlas.

Las de mayor tamaño son usadas para fabricar paneles aislantes en edificios, elementos de flotación y cajas para distintos usos, como hieleras, empaque de frutas. Las perlas más pequeñas, en cambio, se utilizan principalmente para la fabricación de vasos térmicos.

En el mercado de la construcción se les puede conseguir con propiedades especiales debido al agregado de aditivos (retardantes de flama, etc)

Valores típicos de las propiedades físicas de EPS son:

Densidad [kg/m^3]	16	32	48
Resistencia a la tensión [kg/cm^2]	138	414	615
Resistencia al corte [kg/cm^2]	138	276	410
Resistencia a la flexión [kg/cm^2]	207	640	1034
Resistencia a la compresión [kg/cm^2]	70	152	295
Resistencia térmica [$\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$]	0.0375	0.0346	0.0349

Tabla 1.1: Propiedades típicas del EPS

Las desventajas que posee este proceso en batch, son los largos tiempos requeridos para su procesamiento, los tiempos asociados con la discontinuidad del proceso. Otro punto desfavorable es la pobre unión mecánica entre las perlas expandidas, que da bajos valores de resistencia mecánica.

Para mejorar las limitaciones que posee este proceso, (el tiempo que se tarda, tener que calentar y enfriar, baja producción), fue desarrollado un proceso de extrusión para polímeros termoplásticos espumados, en el cual se requiere de mucho menos tiempo para la saturación del polímero con gas, debido principalmente al mezclado intensivo del agente de expansión con el polímero fundido. Además, el proceso continuo produce una espuma mecánicamente continua, con propiedades mucho mejores.

Los principios de operación de una extrusora forman la base para varios importantes procesos de fabricación de artículos poliméricos.

Una extrusora convencional funde, comprime, mezcla y bombea el material plástico a la sección de formado. Típicamente se utiliza un transportador de tornillo helicoidal, que mediante un motor, ya sea de velocidad variable o fija, lo hace dar

vueltas dentro de un cilindro calentado eléctricamente por medio de resistencias. La materia prima (polímero termoplástico, aditivos) es alimentada por gravedad en una tolva a través de una abertura en el cilindro. Luego el polímero es transportado por el tornillo, aumentando su temperatura debido a la absorción de calor generada por la calefacción del cilindro y por el esfuerzo cortante producido por la fricción. Conforme el polímero pasa a estado fundido, el canal del tornillo se va estrechando, lo que incrementa la presión interna forzando al material a salir por la boquilla. Como la abertura de la boca de la matriz tiene la forma del producto que se desea obtener, el proceso es continuo. Posteriormente se corta en la medida adecuada.

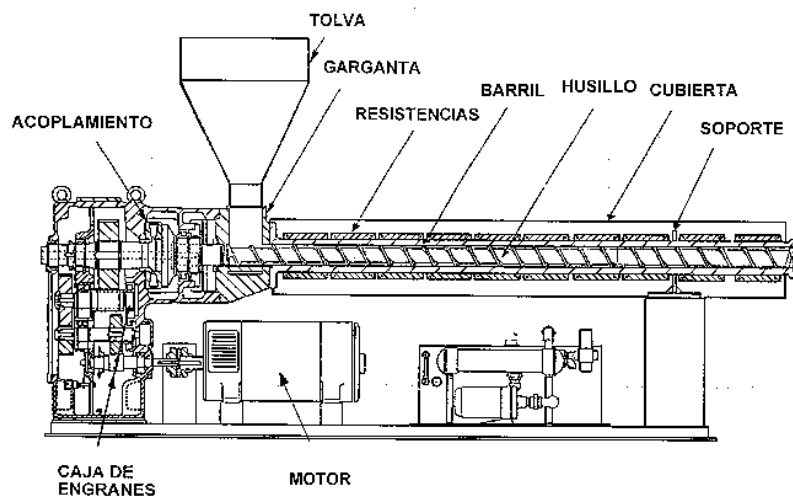


Imagen 1.3: Corte de Extrusora Típica

En cuanto al proceso de espumado es necesario el agregado de un agente espumante y, por el agregado del mismo, se requiere asegurar un mezclado vigoroso, logrando así una mejor dispersión de este agente en el fundido polimérico. La finalidad de esto es que los sitios de nucleación de burbujas se encuentren dispersos en la matriz polimérica mejorando las propiedades del producto final, y la disminución en el tiempo necesario para lograr una disolución homogénea del agente de espumado. La expansión del polímero se producirá cuando la caída de presión produzca la desorción del agente de expansión, generando así las burbujas. La presión debe estar controlada, para que esto ocurra en el momento que el polímero sale del cabezal, y no antes.

El proceso de extrusión para espumas requiere que una cantidad medida de agente de espumado sea inyectada al polímero fundido. El agente difunde dentro de la matriz polimérica a mucha mayor velocidad que en el procesamiento en batch, debido a que la difusión es ayudada por el mezclado producido en este proceso y la alta temperatura generada en la camisa.

En este último tiempo, se ha intentado cambiar el uso de agentes de espumado como el pentano, CFCs, y otros, por agentes de espumado gaseosos, como es el caso del CO₂, o el N₂, que resultan ser menos perjudiciales para el medio ambiente. Es común hablar de solventes supercríticos, debido a que el gas (comúnmente CO₂) es disuelto en un solvente en estado supercrítico a presiones y temperaturas adecuadas para que al inyectar en el fundido pueda disolverse la cantidad de gas necesaria.

Como se dijo antes un descenso de la presión causa la separación y expansión de una fase gaseosa, que forma un gran número de celdas de pequeño tamaño (de unos pocos micrones) en una estructura continua. Para termoplásticos amorfos, la disolución de solvente supercrítico produce un descenso en la temperatura de transición vítrea (T_g), y un posterior aumento de la misma, al disminuir la cantidad del solvente disuelto, esto permite estabilizar la espuma sin recurrir a entrecruzamiento del polímero. Para el caso de termoplásticos semicristalinos, esto no se produce, pero sí se debe tener en cuenta la eliminación de calor de cristalización durante el proceso de solidificación de la espuma.

Hay cuatro pasos principales en el proceso continuo de extrusión [1],[2],[3],[4]:

1. Formación de la solución polímero/gas a partir de la disolución de un gas inerte como el CO₂ en el fundido. Se deben mantener presiones altas para permitir la disolución completa del mismo, obteniéndose concentraciones de gas de 5 a 12% en peso, y utilizándose presiones de más de 100 bar. Para acelerar el proceso de solución se requiere un mezclado enérgico acorde a los tiempos de producción. Paso realizado en las primeras instancias de una extrusora.

2. Producir un mezclado intensivo del termoplástico con el agente de expansión, para obtener una solución homogénea en composición y en temperatura. Debe mantenerse la presión por encima de la presión de equilibrio de la solución. La extrusora a usar debe tener una sección diseñada

expresamente para efectuar el mezclado bajo presión, y el sistema debe tener también algún sistema mezclador intensivo. La disolución de agente espumante en el polímero líquido disminuye la temperatura de transición vítrea de éste, disminuyendo también por este motivo la viscosidad final de la solución, y este efecto debe ser tenido también en cuenta en el diseño. El proceso de desorción del agente espumante produce el efecto inverso

3. Se provoca una inestabilidad termodinámica por descenso de presión, que promueve la nucleación de las microceldas, mediante la desolubilización del gas, (variando presión y temperatura). Cuando la presión cae por debajo del valor de equilibrio el agente espumante se separa (desorbe) de la solución, y mediante la utilización de aditivos esta separación ocurre en sitios preferenciales distribuidos uniformemente en el seno de la masa de solución, formándose burbujas ó celdas de pequeño tamaño que son expandidas por evolución posterior del agente espumante en estado gaseoso, que continúa transfiriéndose del material que forma las paredes de las celdas hacia el interior de las mismas, aumentando el tamaño de las éstas.

4. Las celdas continúan creciendo en la medida que las moléculas de gas difunden del material que forma las paredes al interior de las celdas, debiendo vencer la tensión viscoelástica de la solución polímero gas. Las celdas aumentan así su tamaño. A medida que ocurre esto, comienza el proceso de enfriamiento que conducirá a la formación de celdas expandidas con paredes sólidas que constituyen el material expandido final. La viscosidad del fundido cambia en esta etapa debido a un descenso en la temperatura y a que el agente espumante se resorbe.

Gran cantidad de los sistemas actuales consisten de una extrusora para fundir el polímero y comprimirlo, y una segunda (alimentada por la primera) que se encarga de mezclar, enfriar y dosificar. Estos diseños de dos extrusoras, presentan las desventajas que se requiere una alta inversión en equipamiento (podría usarse sólo una), mayor gasto de energía, mayor cantidad de mantenimiento (especialmente en la segunda extrusora, debido a que recibe líquido a alta temperatura y presión, y el sello encargado de mantener estas características se desgasta rápidamente).

Mediante el diseño adecuado del procesamiento, es posible ahorrar en equipamiento, y energía al desarrollar un sistema que contenga solamente una extrusora. Para ello es necesario poder controlar adecuadamente cada una de las etapas de este proceso, para poder así cumplir con ellas, en el rango de operación deseado y obtener un producto final con propiedades adecuadas para su uso.

En general los procesos de fabricación de expansión de espumas son diseñados para promover y controlar el desarrollo secuencial de los cuatro pasos mencionados. Mientras que la expansión de volumen de la espuma polimérica tiene lugar durante la etapa de crecimiento de celda, una estrategia de control de este crecimiento es deseable para poder controlar la velocidad de expansión en las celdas poliméricas.

Es por esto que este proceso posee diferentes variables críticas a controlar, que determinarán la diferencia entre una espuma con buenas propiedades, y una con pobres.

En el primer paso, es sumamente importante controlar la cantidad de gas inyectado en el fundido. Esto resultaría difícil de realizar si se inyectara el gas directamente; el mismo es altamente compresible, por lo que la dosificación del mismo no sería constante a lo largo del tiempo, debido a fluctuaciones en la presión interna de la camisa de la inyectora. Una forma de solucionar esto, es disolver el gas en un solvente en condiciones supercríticas (por ej.: CO₂ disuelto en isopropanol), y de esta manera inyectar esta solución a volumen constante con bomba de desplazamiento positivo, como por ejemplo de pistón recíprocante.

El mezclado intensivo es de vital importancia, ya que la formación de soluciones no uniformes puede dar lugar a cúmulos de gas no disueltos, que generaran huecos grandes. Gradientes en la temperatura pueden producir la temprana desorción de solvente, dando como resultado un crecimiento no uniforme en las burbujas.

La nucleación de celdas puede ocurrir dentro del cabezal y la velocidad de nucleación está determinada (típicamente) por el perfil de caída de presión y la velocidad de flujo. Mientras que la nucleación de celdas ocurre cuando la presión de la solución polímero gas cae debajo de la presión de solubilidad, una cantidad del crecimiento de celdas ocurrirá dentro del cabezal desde ese momento hasta que la solución salga del cabezal. [3], [4], [5] Este comportamiento es indeseable y es

denominado “crecimiento de celda prematuro”, ya que las celdas comienzan a crecer antes de que el polímero comience a enfriarse. Este crecimiento prematuro afecta la expansión final, y el tamaño de las celdas, y consecuentemente las propiedades finales de la espuma.

Al ocurrir la nucleación de celdas, las que se encuentran estabilizadas tienden a crecer utilizando las moléculas de gas que se encuentran en el fundido. La cantidad de crecimiento de cada celda está correlacionado con la cantidad de gas que difundió desde el polímero a la celda, hasta que la rigidez es tan grande que se ve limitado el crecimiento de la misma. Esta cantidad de gas en cada celda puede aproximarse con la cantidad de gas disuelto en el total del polímero.

Una alta concentración de gas, una alta difusividad y un alto tiempo de crecimiento prematuro de celda promueven que el crecimiento de las celdas ocurra dentro del cabezal; hecho que no es deseable en este tipo de procesos, ya que conduce a espumas con propiedades pobres debido a celdas de mayor tamaño, y una estructura no homogénea. Una de las formas de mejorar esto es la modificación de la geometría del cabezal. La concentración de gas y la difusividad no se ven afectadas por la geometría del cabezal, mientras que la presión sea suficiente para disolver todo el gas inyectado en el polímero fundido. Sin embargo el tiempo de crecimiento prematuro de celda depende fuertemente de la geometría del cabezal.

3 OBJETIVOS

a) Búsqueda y análisis de información bibliográfica sobre sistemas de dos tipos de sistemas de extrusión: a) sistemas con mezcladores estáticos y b) sistemas con mezcladores dinámicos.

b) Diseño, armado y puesta a punto de una extrusora diseñada para generar el fundido del material termoplástico (poliestireno) y la posterior inyección del agente de espumado. Se incluirán dos tipos de tornillos, uno con combinación de mezcladores dinámico y estático y uno con mezclador dinámico.

c) Realizar ensayos en extrusora.

d) Medición de las curvas de viscosidad al corte vs. temperatura para las mezclas a usar, y selección de los sistemas con las mejores propiedades para el procesamiento de poliestirenos expandidos.

e) Ensayos en el sistema de extrusión armado para la producción de espumas, para verificar las ubicaciones de ventanas de procesamiento adecuadas para distintos tipos de espumas.

4 REOLOGÍA Y EXTRUSIÓN

La reología es la ciencia de la deformación y el flujo de los materiales. Su conocimiento es sumamente importante a la hora de determinar las variables de procesamiento, para poder controlar adecuadamente los mismos, y obtener así productos con mejores propiedades. Los diferentes procesos de procesamiento de termoplásticos como extrusión, inyección, moldeo, etc, se caracterizan por la fusión del material y, en general, la aplicación de presión para así forzarlo a fluir, hasta alcanzar la forma deseada. Conocer previamente cuál será su comportamiento, ante la aplicación de presiones, al variar su temperatura, o al agregar aditivos, o diferentes materias primas, optimizará el diseño del proceso, y mejorará las características del producto obtenido. Así mismo es importante conocer las leyes que gobiernan el flujo de los materiales termoplásticos, para poder así determinar parámetros característicos de los mismos, que servirán para aproximar su comportamiento, y conocer a priori las consecuencias de modificar las diferentes variables. Luego, conociendo esto, es posible modelar el comportamiento de estos materiales, y conocer su respuesta de manera aproximada, antes de procesarlos.

En general los diferentes fluidos se caracterizan por ser newtonianos, o no-newtonianos. El comportamiento de los materiales termoplásticos es diferente del que ofrecen los fluidos newtonianos, debido a que los primeros poseen un grado de elasticidad, y fluyen con una viscosidad que depende no sólo de la temperatura, sino que también de la velocidad de deformación a la que se encuentran sometidos. Los líquidos newtonianos en cambio, poseen una viscosidad que es característica del fluido, y no varía más que con la temperatura.

Los materiales termoplásticos se caracterizan por poseer un comportamiento de naturaleza doble; fluido-sólido. Es por ello, que reciben el nombre de viscoelásticos; a bajas temperaturas presentan un carácter elástico, poseen mayor consistencia, mayor carácter sólido, y, en cambio, a mayores temperaturas, predomina su característica viscosa, más fluido.

4.1 Tipos de fluidos

Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo cortante. En ausencia de éste, no existe deformación. Los fluidos se pueden

clasificar en forma general, según la relación que existe entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de deformación resultante. Aquellos fluidos donde el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la velocidad de deformación se denominan fluidos newtonianos. La mayor parte de los fluidos comunes como el agua, el aire, y la gasolina son prácticamente newtonianos bajo condiciones normales. El término no newtoniano se utiliza para clasificar todos los fluidos donde el esfuerzo cortante no es directamente proporcional a la velocidad de deformación.

La viscosidad es una propiedad de un fluido que tiende a oponerse a su flujo cuando se le aplica una fuerza.

Supongamos un bloque sólido al cual sometemos a una fuerza tangencial. El material sólido opone una resistencia a la fuerza aplicada, sin embargo se deforma. Si consideramos a este cuerpo sólido formado por delgadas capas, unas sobre otras, el resultado de la deformación es el desplazamiento relativo de cada una de las capas respecto de las adyacentes. En los fluidos, este rozamiento que existe entre las capas se denomina viscosidad. Las moléculas de los fluidos se encuentran unidas por fuerzas de cohesión. Al movilizarse moléculas o láminas adyacentes entre sí, se produce rozamiento interno. Si el fluido se encuentra en contacto con un sólido, las fuerzas que actúan son de adherencia. Nuevamente el coeficiente de rozamiento interno del fluido es denominado viscosidad y está designado con la letra griega η .

La viscosidad sólo se manifiesta cuando los fluidos se están deformando. Cuando el mismo se encuentra en reposo, no hay fuerzas tangenciales que resistir. Es por ello, que al llenar un recipiente con un líquido, la superficie del mismo es plana, perpendicular a la única fuerza que actúa en ese momento (la gravedad), sin existir componente tangencial alguna.

Si la viscosidad fuera muy grande, el rozamiento entre capas adyacentes también lo sería, lo que implicaría que el flujo sería muy limitado o nulo (en el caso de un sólido). Cuanto más baja resulta la viscosidad, por el contrario, tendrá mayor fluidez, hasta el límite en que la viscosidad sea cero, y nos encontremos con un superfluido (la mayoría de los gases se comportan de esta manera).

4.1.1 Fluidos Newtonianos.

Entre los distintos tipos de fluidos tenemos los newtonianos. Estos se caracterizan por poseer una viscosidad que puede considerarse constante a lo largo del tiempo.

Newton enunció una ley experimental que establece que la Fuerza F aplicada es proporcional a la superficie A de la placa en movimiento, al gradiente de velocidad dv/dr generado, y a un coeficiente denominado viscosidad absoluta o dinámica

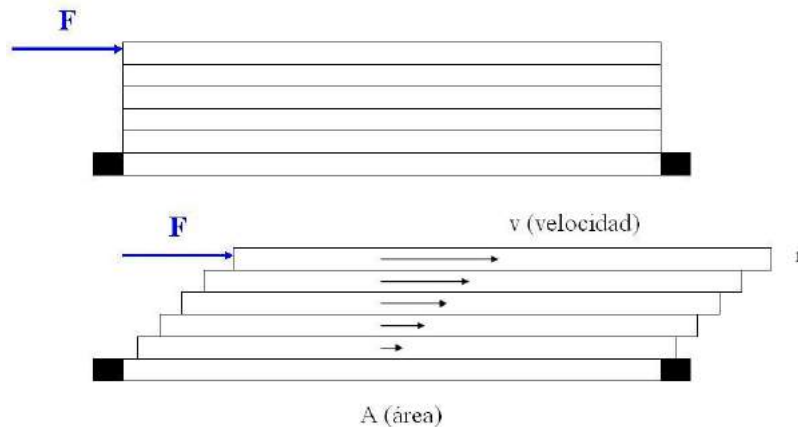


Imagen 3.1 Esquema del efecto de aplicación de fuerzas en las placas de polímero

$$F = \eta \cdot A \cdot \frac{dv}{dr}$$

O lo que es lo mismo:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

τ es la tensión tangencial ejercida en un punto del fluido o sobre una superficie sólida en contacto con el mismo; F/A , tiene unidades de tensión o presión (Pa).

η es la viscosidad del fluido, y para un fluido newtoniano depende sólo de la temperatura, puede medirse en [Pa·s] o [kp·s/cm²].

$\dot{\gamma}$ es el gradiente de velocidad perpendicular a la dirección al plano en el que estamos calculando la tensión tangencial, [s⁻¹].

La curva que muestra la relación entre el esfuerzo o cizalla contra su tasa de deformación es lineal y pasa por el origen, es decir, el punto [0,0]. La siguiente figura muestra el diagrama de tensión de corte (τ) vs. la velocidad de deformación por cizalladura ($\dot{\gamma}$). La pendiente resulta ser la viscosidad.

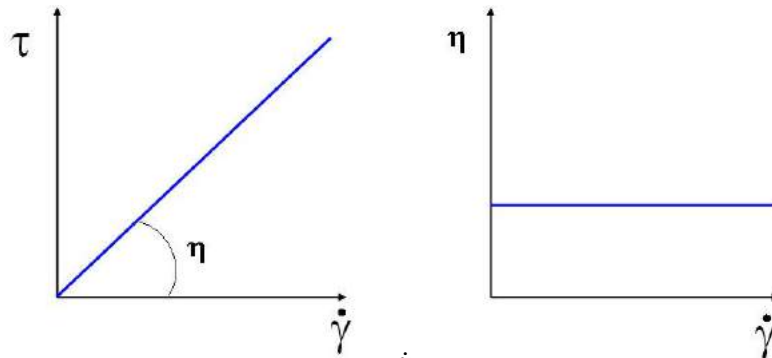


Imagen 3.2 Diagrama $\tau - \dot{\gamma}$ para un fluido newtoniano.

La temperatura es una variable que puede modificar la viscosidad. A medida que se aumenta la temperatura de un fluido líquido, disminuye su viscosidad. Esto quiere decir que la viscosidad es inversamente proporcional al aumento de la temperatura. La ecuación de Arrhenius predice de manera aproximada la viscosidad mediante la ecuación:

$$\eta(T) = \eta_0 \cdot e^{\frac{Q}{R \cdot T}}$$

Donde η_0 es una constante del fluido, R es la constante universal de los gases, Q es la energía de activación y T es la temperatura absoluta. En la siguiente imagen se muestra el efecto de la temperatura en algunos polímeros.

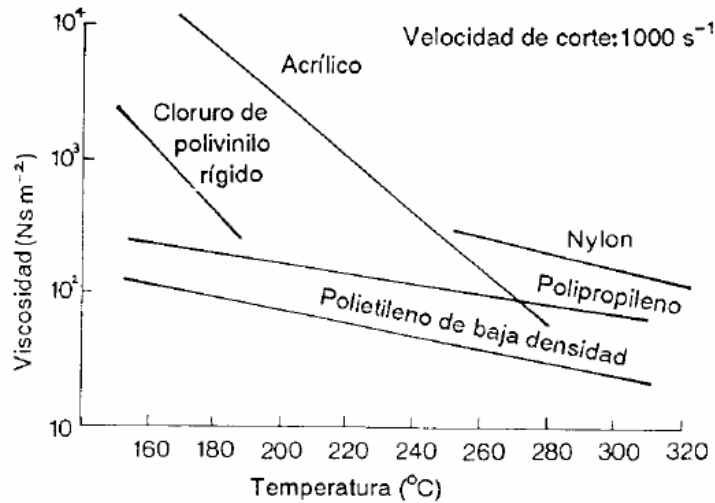


Imagen 3.3 Efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los polímeros.

4.1.2 Fluidos no Newtonianos

En la práctica no todos los fluidos poseen un comportamiento newtoniano. Se da en suspensiones concentradas, soluciones de polímeros, entre otros, que la viscosidad no es constante con la velocidad de deformación; sino que es función del esfuerzo de corte, de la velocidad de deformación y del tiempo.

Se define por esto, una viscosidad aparente que representa la pendiente de una recta secante que para por el origen, y por un punto en la curva a determinada tensión de corte y velocidad de deformación.

Los diferentes comportamientos son:

- Plástico de Bingham: La curva es lineal, pero no pasa por el origen. Esto se debe a que los materiales plásticos no fluyen hasta alcanzar una fuerza de corte que supere un valor límite de fluencia. A bajas fuerzas de corte el material se comporta como un sólido (elástico). Se encuentra en dispersiones con estructuras intermoleculares con elevadas fuerzas de unión. (Por ejemplo en suspensiones floculadas)
- Pseudoplásticos (Shear thinning): La viscosidad disminuye con el aumento de la fuerza de corte. No existe valor de cedencia. Para esfuerzo

cortantes muy pequeños la viscosidad es máxima y se denomina viscosidad inicial.

- Dilatantes (Shear thickening): La viscosidad aumenta con el aumento de la fuerza de corte. Situación inversa a un sistema de flujo pseudoplástico y menos frecuente.

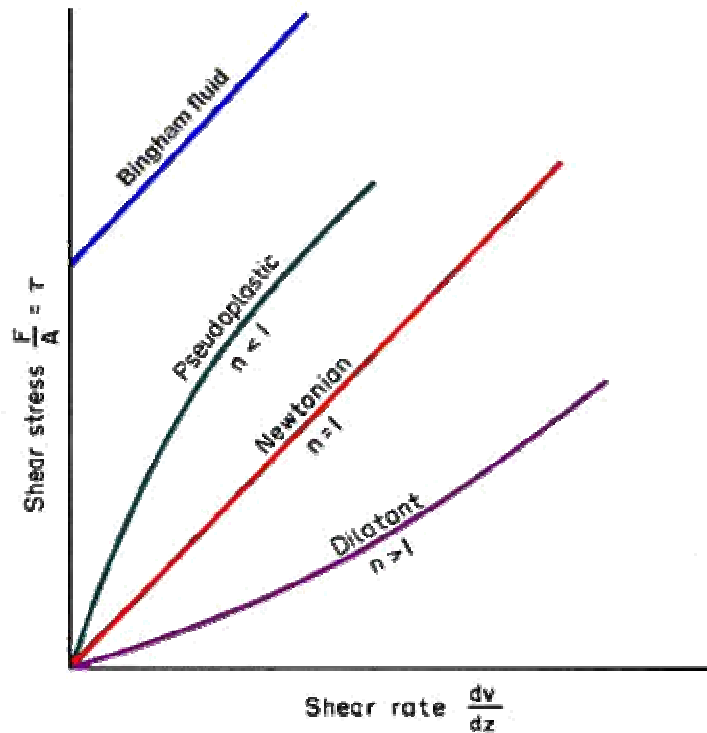


Imagen 3.4 Diagrama con los diferentes tipos de fluidos.

4.2 Modelos para cálculo de viscosidad

Para poder estimar las viscosidades, se han desarrollado diferentes modelos empíricos, que ajustan las curvas de τ vs. $\dot{\gamma}$, y mediante los cuales se puede encontrar una dependencia de la viscosidad con la velocidad de deformación.

El caso más simple corresponde a un fluido newtoniano, en que la viscosidad es constante al variar la velocidad de deformación, y resulta de la pendiente de la curva τ vs $\dot{\gamma}$. Cuando el fluido comienza a perder su característica newtoniana, aparece una dependencia de la viscosidad con la velocidad de deformación.

Los fundidos poliméricos poseen en general, comportamiento pseudoplásticos. La mayoría exhiben un comportamiento newtoniano a bajas velocidades de deformación, una región de transición y luego una región de ley de la potencia. Este comportamiento está bien modelado por la Cross WLF.

Mientras que el modelo de Cross WLF es preferible para simulaciones numéricas, el modelo de la ley de la potencia resulta mejor, para cálculos rápidos sobre el comportamiento del material, condiciones de procesamiento y geometría.

4.2.1 Ley de la Potencia

El comportamiento de la mayoría de los polímeros puede ser modelado dentro de un intervalo útil, mediante la ley de la potencia, o de Ostwal. La misma es:

$$\tau = C \cdot (\dot{\gamma})^n$$

Donde:

n: Exponente de la ley de la potencia. Representa la desviación del comportamiento de un fluido respecto al newtoniano. Su valor es empírico.

C: Constante de proporcionalidad que da un valor de la consistencia del polímero. Si n vale 1, el comportamiento del polímero es newtoniano, y $C = \eta$. Si $n < 1$ entonces el comportamiento será pseudoplástico, y si es mayor que 1, será dilatante.

Este modelo es uno de los más populares, y más utilizados, debido a que es de fácil implementación. Comúnmente se representan los datos de viscosidad aparente en función de la velocidad de deformación, despejando de la ecuación anterior.

$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = C \cdot (\dot{\gamma})^{n-1}$$

4.2.2 Cross WLF:

El modelo de la Cross-WLF, responde a la ecuación empírica:

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

En la cual la viscosidad se representa como función de la velocidad de corte, la temperatura y la presión de trabajo. Donde: η_0 : es la viscosidad constante para valores pequeños de velocidad de corte a la temperatura de referencia, τ^* es el valor de tau de corte, que representa el lugar en que el comportamiento pasa de ser newtoniano a de la potencia, y n es el valor del factor de la potencia.

Para el cálculo de η_0 tenemos que $\log(a_T) = \frac{-c_1^0 \cdot (T - T_0)}{(c_2^0 + T - T_0)}$; donde T_0 es la temperatura de referencia, son constantes del material a la temperatura de referencia y a_T representa un cociente entre η_0 y la viscosidad a la temperatura T.

Luego se obtiene:

$$\eta_0 = D1 \cdot e^{\frac{-c_1^0 \cdot (T - T_0)}{(c_2^0 + T - T_0)}}$$

A su vez una forma experimental de determinar los valores de c_1 y c_2 , es graficando $\frac{T - T_0}{\log(a_T)}$ vs. $T - T_0$ y de la pendiente (s), y la ordenada al origen (i), se

puede obtener que $c_1^0 = \frac{-1}{s}$ y $c_2^0 = \frac{i}{s}$.

Luego al conocer las curvas de viscosidad vs. velocidad de corte para diferentes temperaturas es posible de esta forma estimar el valor de las constantes c_1 y c_2 .

En caso de conocer los valores de c_1 y c_2 para un material, y a una temperatura de referencia (T_0), es posible corregir los mismos, para otra temperatura (T_1).

Las ecuaciones a utilizar son:

$$c_1^0 = \frac{c_1^1 \cdot c_2^1}{(c_2^1 + T_0 - T_1)} \text{ y } c_2^0 = c_2^1 + T_0 - T_1$$

Los superíndices de las constantes c determinan la temperatura de en cada caso.

4.3 Reómetros y principios de operación

En la actualidad, la forma de evaluar la reología de los polímeros está en la utilización de reómetros. Los mismos correlacionan la velocidad de deformación, con los esfuerzos de corte aplicados, pudiendo en la mayoría de los casos obtener curvas de viscosidad vs. velocidad de corte directamente [6], [7], [8].

El reómetro utilizado para determinar las propiedades reológicas de los polímeros que iban a ser utilizados en este trabajo corresponde un reómetro de flujo de arrastre, y particularmente con la geometría de platos paralelos. Anton-Para Phisica MCR-II

En este tipo de equipos se supone, flujo estacionario, laminar e isotérmico, sólo existe velocidad angular (la velocidad radial, y en el eje z, de rotación, es cero) y eje cilíndrico.

El dispositivo consta de dos discos paralelos enfrentados entre sí.

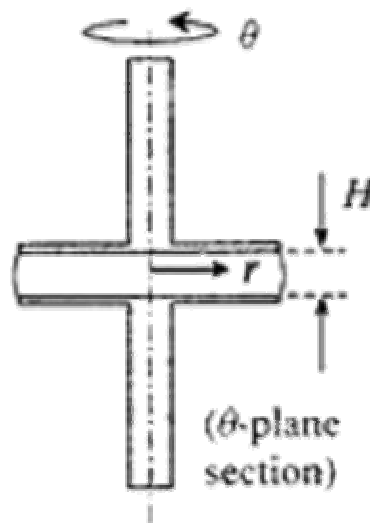


Imagen 3.5 Esquema de platos paralelos

La placa inferior se mantiene estática mientras que la superior gira, imponiendo una velocidad de deformación. El polímero a analizar se coloca entre ambas placas. Se lleva todo a la temperatura deseada, y a continuación se hace variar la velocidad de deformación, mediante la rotación de la placa superior. El equipo registra entonces variaciones tensión para las diferentes velocidades de rotación. Mediante la utilización

de diferentes ecuaciones constitutivas, para la geometría del equipo, se obtienen valores de viscosidad y módulo de pérdida a cada velocidad de deformación.

4.4 Propiedades reológicas del Poliestireno y Polipropileno

Según experiencias anteriores (*Extrusión de espumas termoplásticas. Modelado y verificación Experimental Francisco Sacchetti*), sabemos que el PS posee propiedades reológicas que lo hacen apto para ser procesado por extrusión.

Se determinaron las propiedades reológicas del poliestireno innova 4500 (Anexo A), y del Polipropileno Cuyolen 1100N, 1102H, 2500E (Anexo A) a diferentes temperaturas utilizando un reómetro rotacional y oscilatorio de platos paralelos. Los valores obtenidos sirvieron también para determinar los parámetros en la aproximación de cross WLF, para su posterior utilización en un software de simulación.

El software del reómetro utilizado permite extraer valores de velocidad de giro, y de viscosidad. Sin embargo para poder determinar la velocidad de deformación real hay que afectar el valor de frecuencia angular dado por el programa (ω) por variables geométricas como el diámetro de los platos (D), y la distancia entre ellos (H). Entonces la velocidad de deformación fue calculada como:

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega \cdot D}{2 \cdot H}$$

Las viscosidades están expresadas en Pa·s y las velocidades de deformación en 1/s.

Para los distintos PP las temperaturas a las cuales se midieron sus curvas de viscosidad vs. velocidad de corte fueron 180°C y 220°C

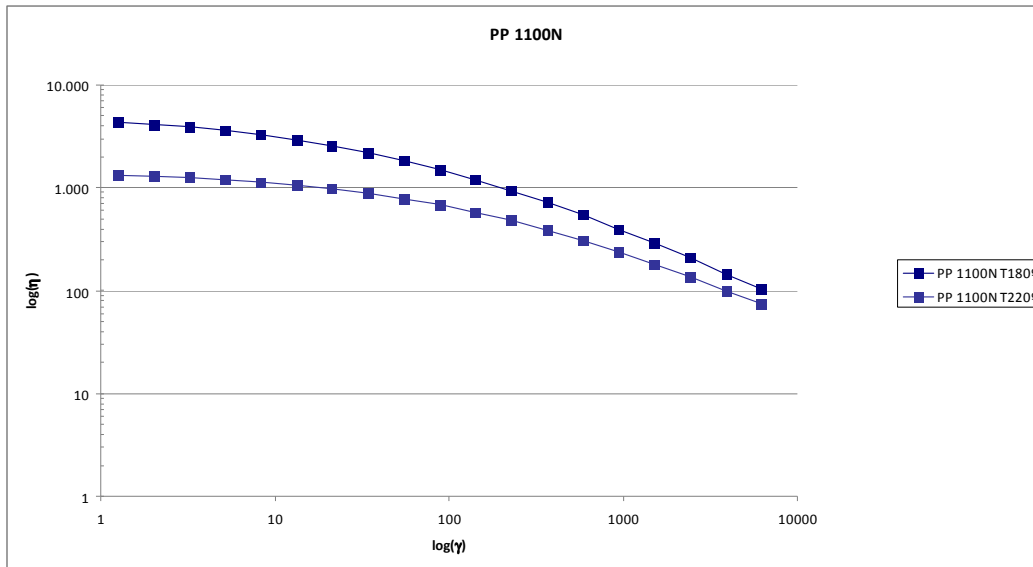


Imagen 3.6 Curvas de viscosidad vs velocidad de corte para el PP 1100N a 180°C y 220°C. η en Pa·s y $\dot{\gamma}$ en 1/s

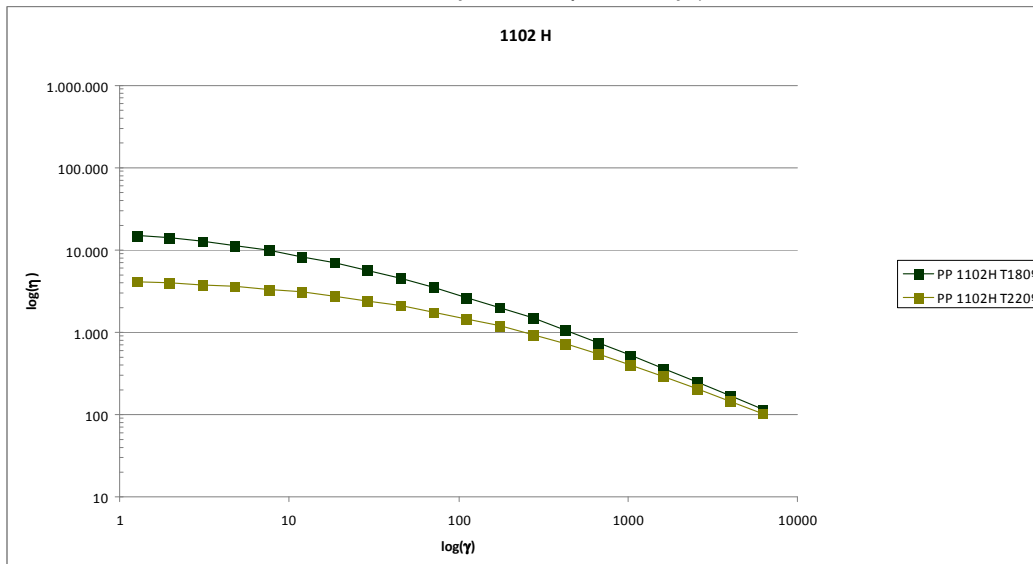


Imagen 3.7 Curvas de viscosidad vs velocidad de corte para el PP 1102H a 180°C y 220°C. η en Pa·s y $\dot{\gamma}$ en 1/s

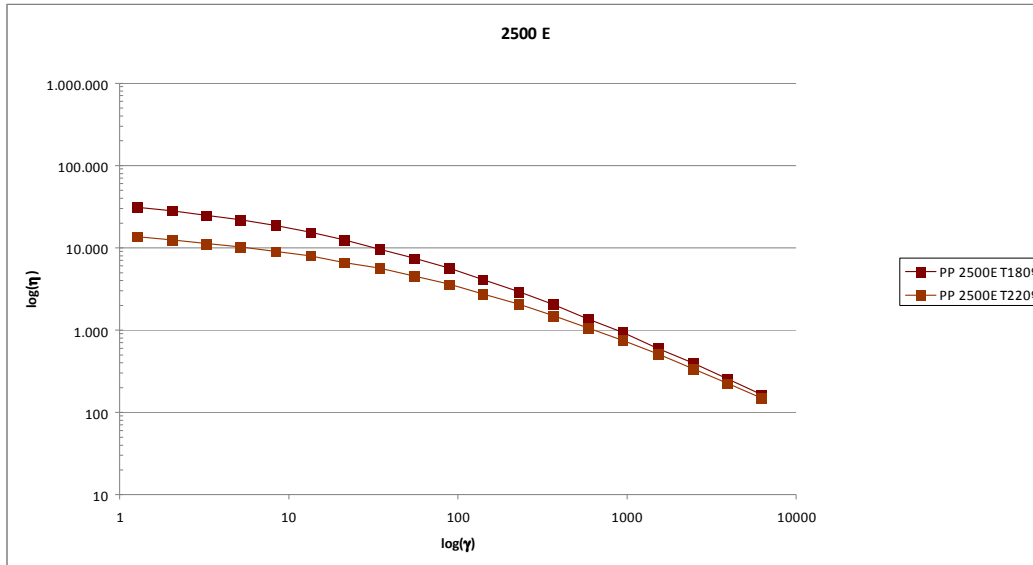


Imagen 3.8 Curvas de viscosidad vs velocidad de corte para el PP 2500E a 180°C y 220°C. η en Pa·s y $\dot{\gamma}$ en 1/s

Y para el PS las propiedades reológicas se determinaron para 150°C, 170°C, 190°C y 210°C.

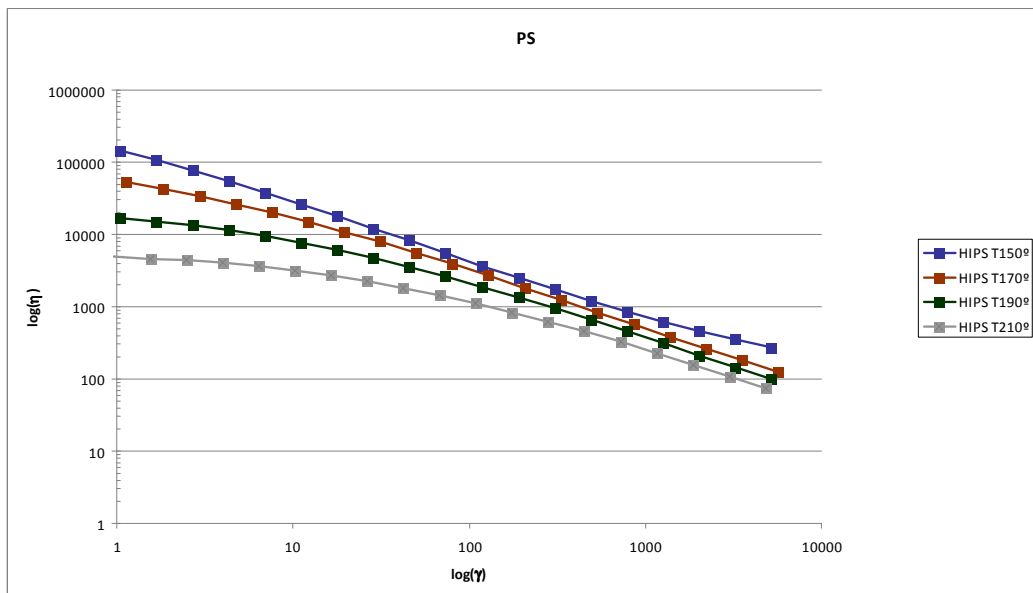


Imagen 3.9 Curvas de viscosidad vs velocidad de corte para el PS a 150°C, 170°C, 190°C y 210°C. η en Pa·s y $\dot{\gamma}$ en 1/s

4.5 Efecto del agregado de CO₂ supercrítico.

Las curvas anteriores corresponden a los polímeros sin agregado de aditivos. Para el proceso de espumado se agregará una pequeña proporción (menor al 2%), de un agente de nucleación (para la mejorar la distribución de formación de burbujas) y en la zona de la camisa donde el polímero ya se encuentre fundido se inyectará isopropanol, saturado con CO₂. El efecto del agente de nucleación es despreciable, sin embargo la presencia del agente de espumado posee un efecto plastificante en el polímero (las moléculas del agente de espumado son más pequeñas que la del polímero, entonces son atrapadas en el mismo, y reducen así sus interacciones). Esto tiene como efecto directo, el descenso en la temperatura de transición vítrea (T_g) del polímero, experimentos realizados por Chow determinaron que el descenso en la T_g tiene una relación lineal con la solubilidad de gas alcanzada. Esto está asociado de directamente con el descenso en la viscosidad del polímero fundido.

Resulta extremadamente complicado obtener curvas de viscosidad vs. velocidad de corte, para la solución de polímero y CO₂ supercrítico, debido a que se requeriría llevar a cabo la medición a presión muy altas.

De acuerdo al cambio observado en la T_g en experiencias previas, pudimos estimar un descenso del 50% en las viscosidades de los polímeros sin CO₂. Así los nuevos gráficos de viscosidad versus velocidad de corte son:

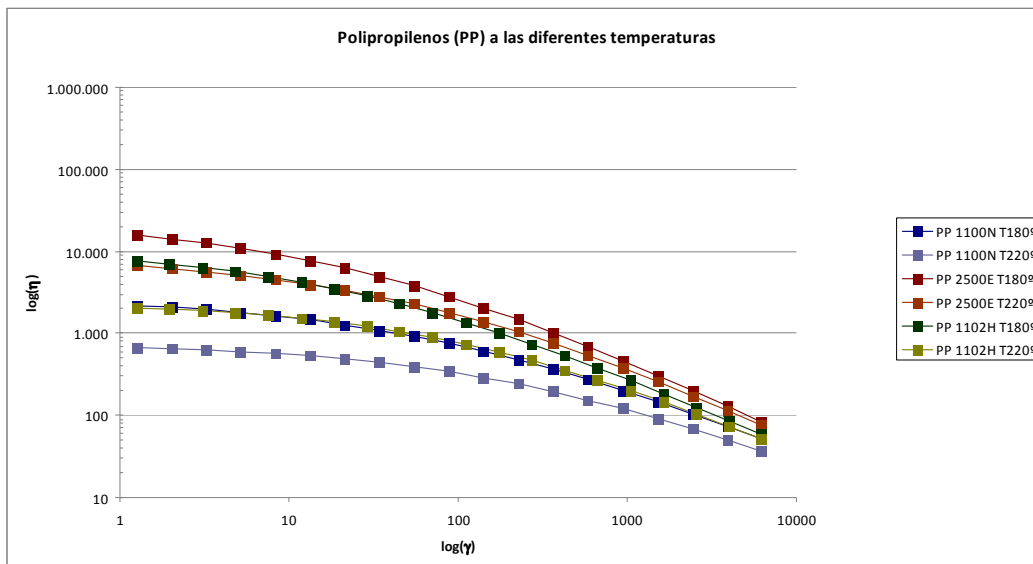


Imagen 3.10 Curvas de viscosidad vs velocidad de corte para el PP 1100N, PP 1102H y PP 2500E a 180°C y 220°C con CO₂ disuelto. η en Pa·s y $\dot{\gamma}$ en 1/s

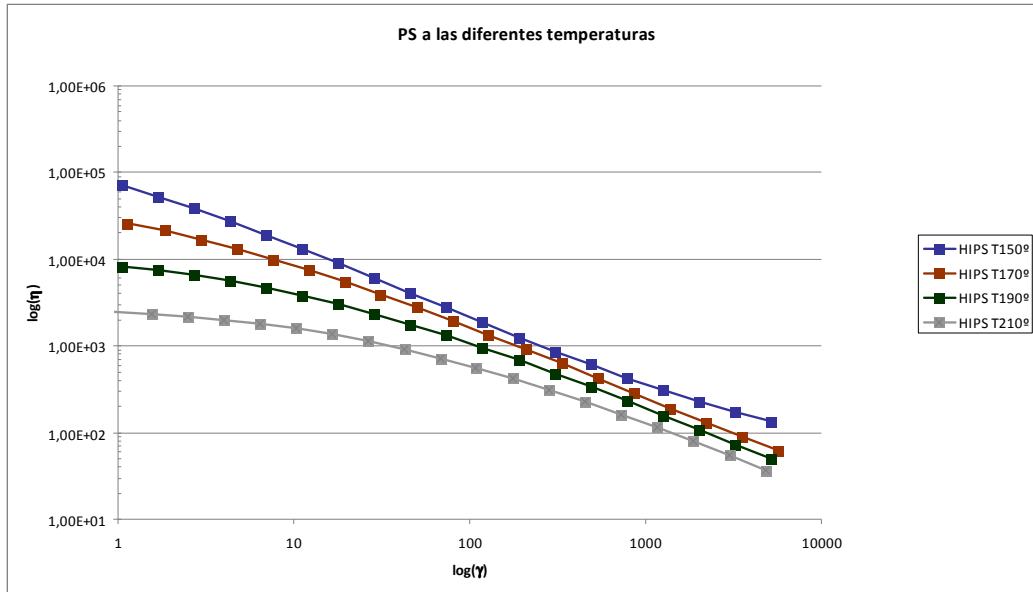


Imagen 3.11 Curvas de viscosidad vs velocidad de corte para el PS a 150°C, 170°C, 190°C y 210°C con CO₂ disuelto. η en Pa·s y $\dot{\gamma}$ en 1/s

4.6 Aproximación de las curvas mediante Cross WLF

Una vez obtenidas las curvas de viscosidad vs. velocidad de corte que aproximan el sistema real, vamos a obtener los parámetros de la Cross WLF, para poder aproximar el valor de la viscosidad para cada temperatura.

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

$$\log(a_T) = \frac{-c_1^0 \cdot (T - T_0)}{(c_2^0 + T - T_0)}$$

$$\eta_0 = D1 \cdot e^{\frac{-c_1^0 \cdot (T - T_0)}{(c_2^0 + T - T_0)}}$$

Estas son las tres ecuaciones que utilizaremos para la aproximación y obtención de los parámetros $D1$, c_1^0 , c_2^0 , T_0 , τ^* y n , que corresponden a la Cross WLF.

El poder centralizar las diferentes curvas de reología de un polímero en solamente una ecuación empírica resulta sumamente práctico para la implementación de un

software de simulación como el que utilizaremos para determinar la geometría de una de las piezas de la extrusora.

Las temperaturas de referencia (T_0) son elegidas cercanas a la T_g de la solución polímero - CO₂, por ello no se variaron, para el PS se tomo la temperatura de referencia de 77°C, y para los PP, de -70°C.

Así mismo, los valores de las constantes c_1 , y c_2 , fueron calculadas mediante la ecuación de corrección para diferentes temperaturas, utilizando valores de bibliografía [7], [8], [13], [14], [17]. Sin embargo, a los valores obtenidos es posible modificarlos levemente para lograr un mejor ajuste.

El objetivo con esto es poder obtener los parámetros de la Cross WLF para así poder simular una etapa de mezclado en la extrusora. El rango de operación será de una velocidad de deformación en el intervalo de 15 a 45 1/s, que es la región donde se espera la aproximación tenga el menor error posible (menor al 10%).

Luego de varias iteraciones obtuvimos los siguientes parámetros.

Termoplástico	T_0 [°C]	c_1^0	c_2^0 [K]	D1	τ^*	n
PS	77	29.9	31.1	$1 \cdot 10^{15}$	70000	0.21
PP 1100N	-75	40	100	$6.75 \cdot 10^{15}$	70000	0.3
PP 1102H	-75	32	65	$1.8 \cdot 10^{15}$	200000	0.2
PP 2500E	-75	34	84	$7.5 \cdot 10^{14}$	110000	0.26

Tabla 3.1 Parámetros de la Cross WLF para PP 1100N, PP 1102H, PP 2500E y el PS utilizados

A continuación se muestran los gráficos de las diferentes curvas con la aproximación de la Cross WLF superpuesta:

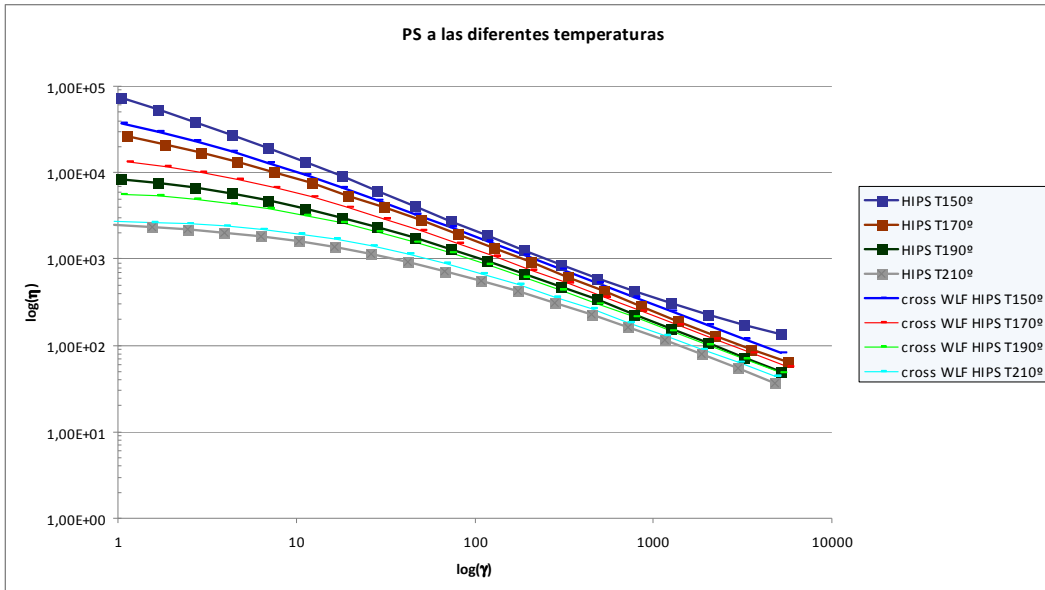


Imagen 3.12 Curvas de viscosidad vs velocidad de corte para el PS a 150°C, 170°C, 190°C y 210°C, con la superposición de la aproximación de la Cross WLF a cada temperatura. η en Pa·s y $\dot{\gamma}$ en 1/s

Para el PS la aproximación fue la más pobre, sin embargo estos valores de parámetros fueron los que menor error produjeron para las cuatro temperaturas y para una velocidad de deformación de 15 a 45 · 1/s, que se encuentra en la ventana operacional para extrusión.

Para los diferentes PP, las aproximaciones resultaron mucho más precisas:

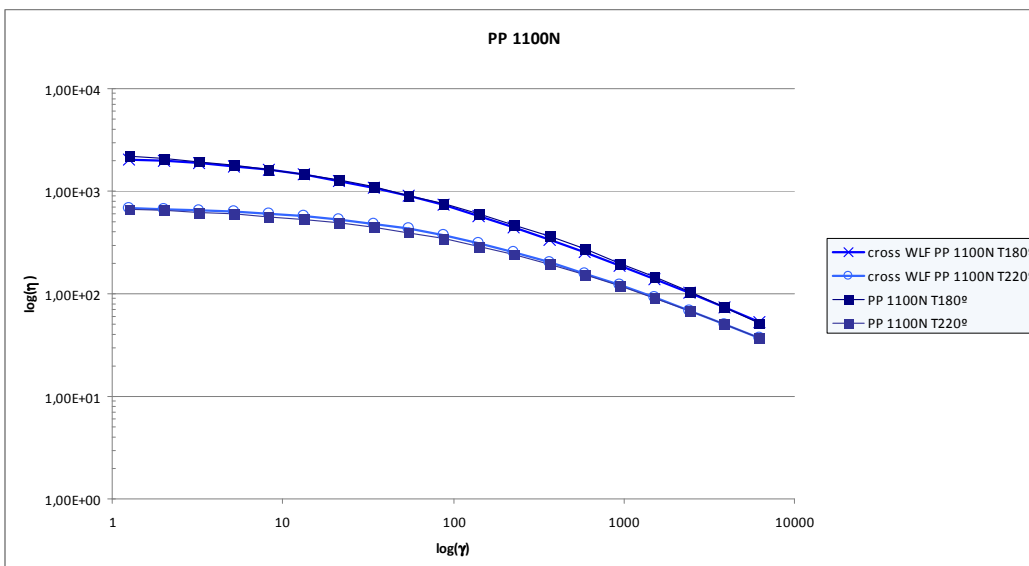


Imagen 3.13 Curvas de viscosidad vs velocidad de corte para el PP 1100N a 180°C y 220°C con la superposición de la Cross WLF η en Pa·s y $\dot{\gamma}$ en 1/s

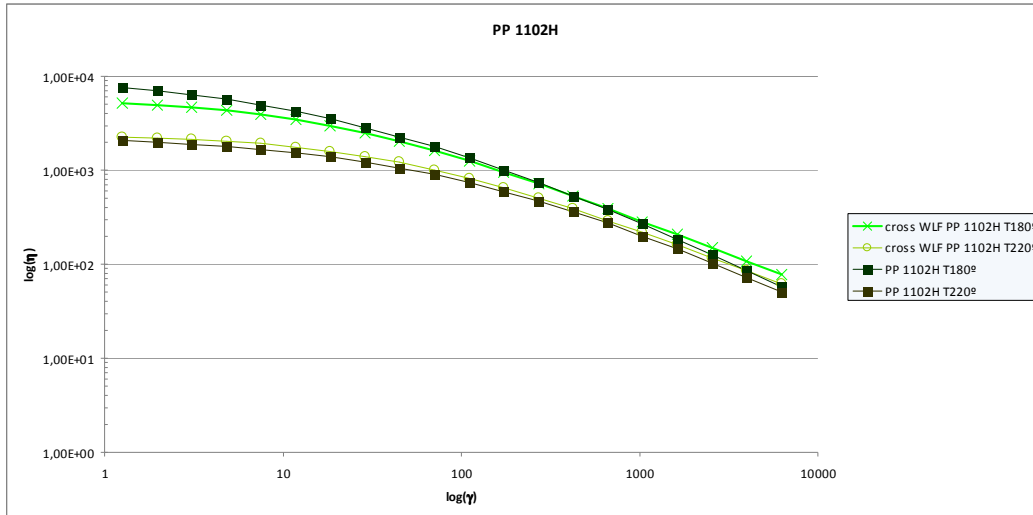


Imagen 3.14 Curvas de viscosidad vs velocidad de corte para el PP 1102H a 180°C y 220°C con la superposición de la Cross WLF. η en Pa·s y $\dot{\gamma}$ en 1/s

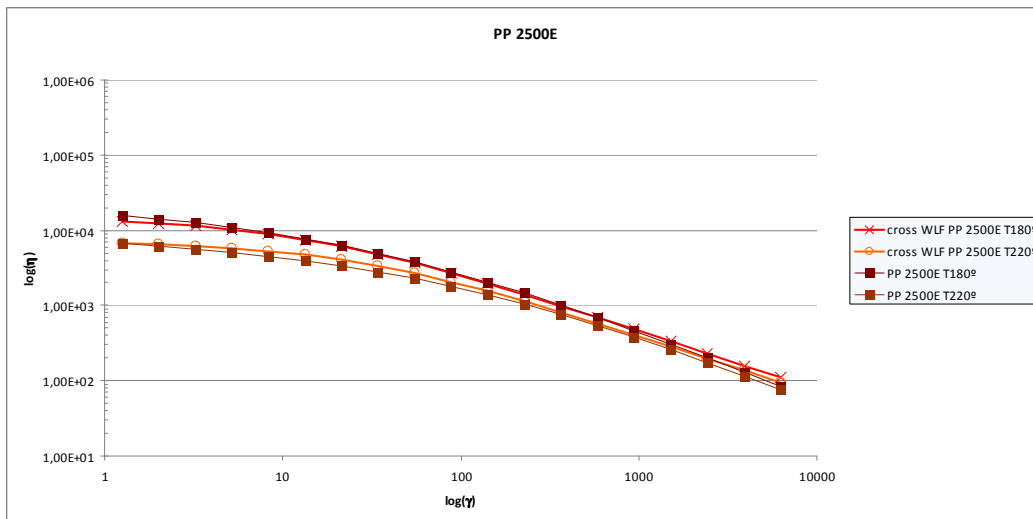


Imagen 3.15 Curvas de viscosidad vs velocidad de corte para el PP 2500E a 180°C y 220°C con la superposición de la Cross WLF. η en Pa·s y $\dot{\gamma}$ en 1/s

Una vez obtenidos estos parámetros fue posible realizar la simulación para una zona de enfriamiento en la extrusora, mediante el uso de un programa de simulación específico.

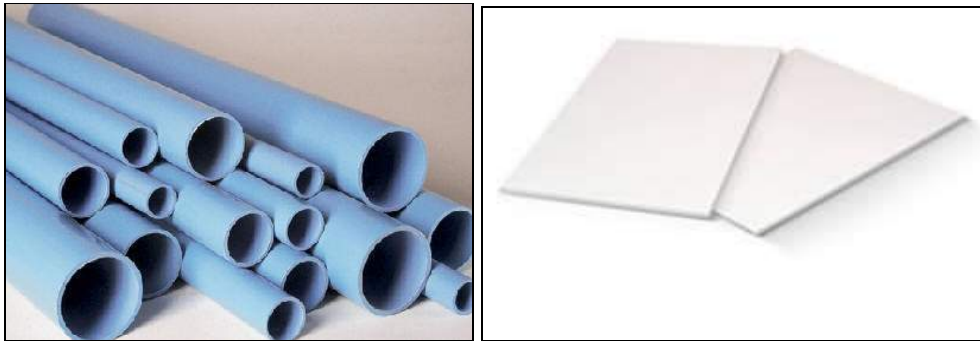
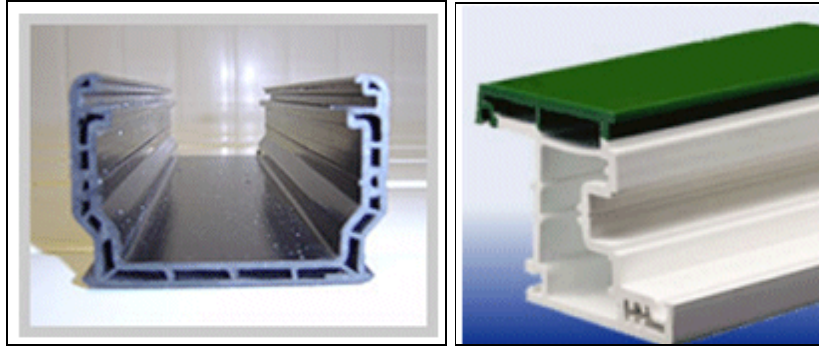
5 DESCRIPCIÓN DE UNA EXTRUSORA DE TERMOPLÁSTICOS

5.1 Generalidades

La máquina de extrusión es ampliamente utilizada en la actualidad, debido a su alta productividad y relativa facilidad de implementación, ya que una vez puesta en funcionamiento opera normalmente por siempre salvo que ocurra un disturbio mayor. Este tipo de maquinaria es utilizada para la fabricación de piezas con áreas transversales constantes e idénticas, debido a su principio de funcionamiento. Actualmente se utilizan extrusoras para fabricar una amplia gama de productos de uso intensivo, como por ejemplo:

- Película tubular:
 - Bolsa (comercial, supermercado)
 - Película plástica para uso diverso
 - Película para arropado de cultivos
 - Bolsa para envase de alimentos y productos de alto consumo
- Tubería:
 - Tubería para condición de agua y drenaje
 - Manguera para jardín
 - Manguera para uso médico
- Recubrimiento:
 - Alambre para uso eléctrico y telefónico
- Perfil:
 - Hojas para persiana
- Ventanería:
 - Canales de flujo de Agua
- Lámina y Película Plana:
 - Raffia
 - Manteles para mesa e individuales
 - Cinta Adhesiva
 - Flejes para embalaje
- Monofilamento:
 - Filamentos
 - Alfombra (Filamento de las alfombras)

Algunas piezas fabricadas por extrusión:



5.2 Partes de una extrusora

Una extrusora consta de seis partes principales: el motor de accionamiento, su reductor de velocidad, la camisa calefaccionada, el tornillo, la tolva y el cabezal de extrusión [6], [9], [10], [11], [12].

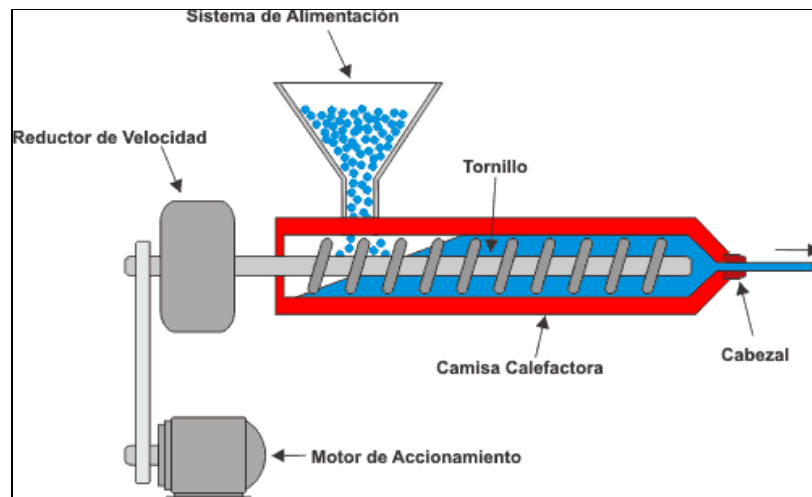


Imagen 4.1 Esquema de una extrusora

El motor de accionamiento es el encargado de proveer el torque necesario para mover el tornillo mientras que el reductor de velocidad nos brinda las revoluciones necesarias para el proceso. En la tolva se coloca el material a extruir, en general se utilizan pellets, aunque se puede ingresar material reciclado previo acondicionamiento de sus dimensiones para que pueda ingresar a la camisa calefactora. En la tolva se puede verter un solo tipo de material o se pueden hacer mezclas de polímeros. Luego de la tolva, los pellets caen en la camisa calefactora, la cual es calentada con resistencias que son conectadas por grupos, para tener un control fino de las temperaturas dentro de la camisa aunque muchas veces la temperatura sube más de lo deseado, ya que los polímeros al ser sometidos a altas velocidades de corte se calientan por fricción.

5.2.1 Tornillo

Una vez dentro de la camisa calefactora, el tornillo empuja el material hacia el cabezal de extrusión. El tornillo es el elemento con mayor tecnología de la extrusora, con el paso de los años se han modificado enormemente, pasando de un simple sinfín a la inmensa variedad de tornillo que hay hoy día.

En general los tornillos de extrusión termoplástica se dividen en 4 zonas

- Zona de alimentación
- Zona de compresión
- Zona de distribución
- Zona de mezclado intensivo (opcional)

Antes de continuar, se muestran las dimensiones principales de un tornillo de extrusión, para facilitar la explicación:

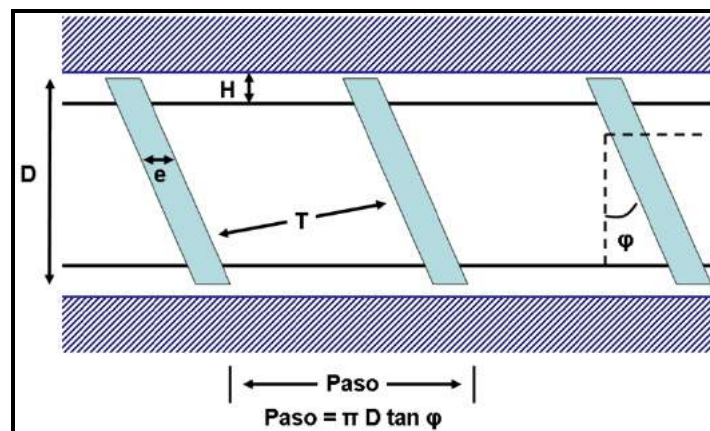


Imagen 4.2

H= profundidad del canal
D= diámetro del tornillo
e= Ancho del filete
T= separación entre filetes

La zona de alimentación esta debajo de la tolva, es el primer sector del tornillo que tiene contacto con el polímero. La profundidad del canal es mayor en esta zona que en el resto del tornillo para obtener un mayor volumen de transporte. Como regla general para el cálculo de la sección de esta zona se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$\text{Diámetro}_{\text{zona alimentación}} = 0.2 * D$$

Si con este diámetro el tornillo no soporta el esfuerzo mecánico se debe recalcular el diámetro teniendo en cuenta el torque a soportar.

Es muy importante que la superficie del tornillo sea bien lisa, para disminuir el roce ya que el polímero debe adherirse a la camisa y resbalar en el tornillo para que el flujo sea de avance.

En la zona de compresión se lleva a cabo la mayor parte de la fusión del material. La característica más importante de esta zona es la progresiva disminución de la profundidad del canal. Esta pendiente debe ser ajustada con la tasa de fusión del polímero para maximizar el flujo a la salida de la extrusora y disminuir la fricción con la camisa.

En la zona de distribución se finaliza la fusión del material, se homogeneiza y la presión es llevada hasta el valor necesario para vencer la restricción que le impone el cabezal de extrusión.

Por último tenemos una zona de mezclado intensivo, la cual puede existir o no dependiendo de las necesidades del caso particular. En esta zona el tornillo puede tener diversas geometrías para aumentar el mezclado del material. En muchos casos es crítico el paso de mezclado, especialmente cuando la extrusora se utiliza para mezclar más de un componente para alcanzar la pieza final. En el caso de la extrusión de espumas termoplásticas logradas con un agente espumante físico es un paso crítico, ya que si no hay una buena mezcla entre el polímero y el gas utilizado la espuma tendrá una mala performance.

Geometrías más comúnmente utilizadas en los tornillos de extrusión para aumentar la intensidad del mezclado:

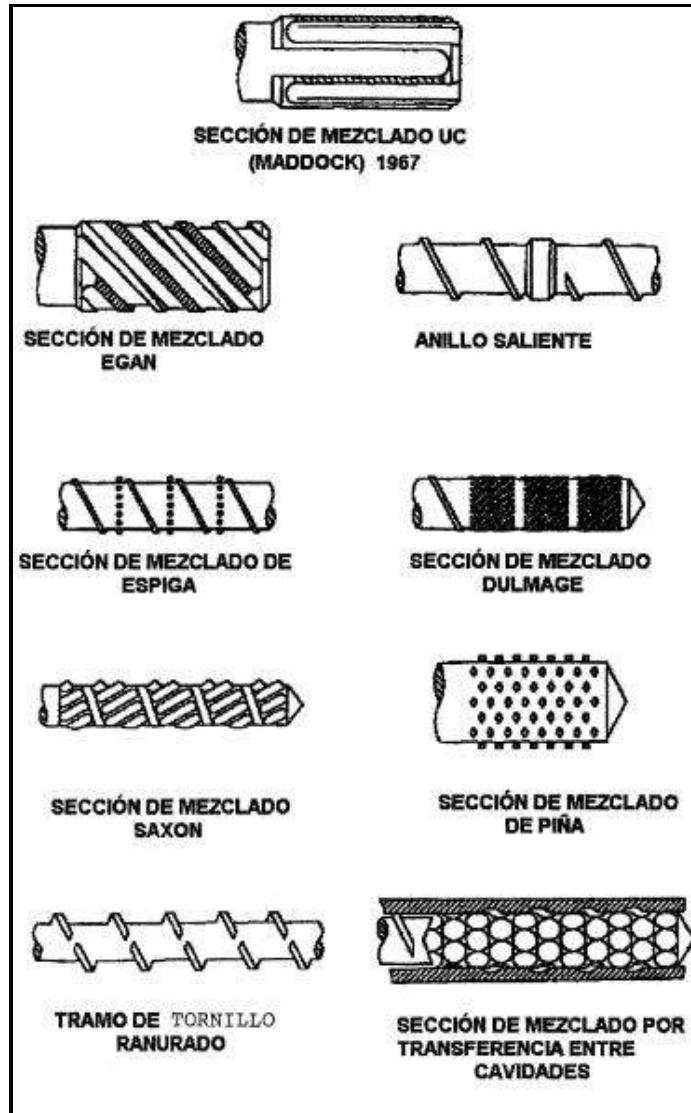


Imagen 4.3

Por último esta el cabezal de extrusión, el cual le da la forma final a la pieza extrudada. En el cabezal cae la mayoría de la presión lograda en la extrusora, ya que a la salida del mismo la presión es igual a la atmosférica. La forma con la que salga la pieza dependerá de la geometría que tenga esta pieza en su parte final.

6 DESCRIPCIÓN DE LA EXTRUSORA UTILIZADA PARA LA OBTENCIÓN DE ESPUMAS TERMOPLÁSTICAS

La extrusora utilizada para obtener las espumas termoplásticas no difiere en su funcionamiento básico de la descrita anteriormente.

6.1 Esquema de la extrusora diseñada

En el siguiente esquema se pueden ver las partes que la componen.

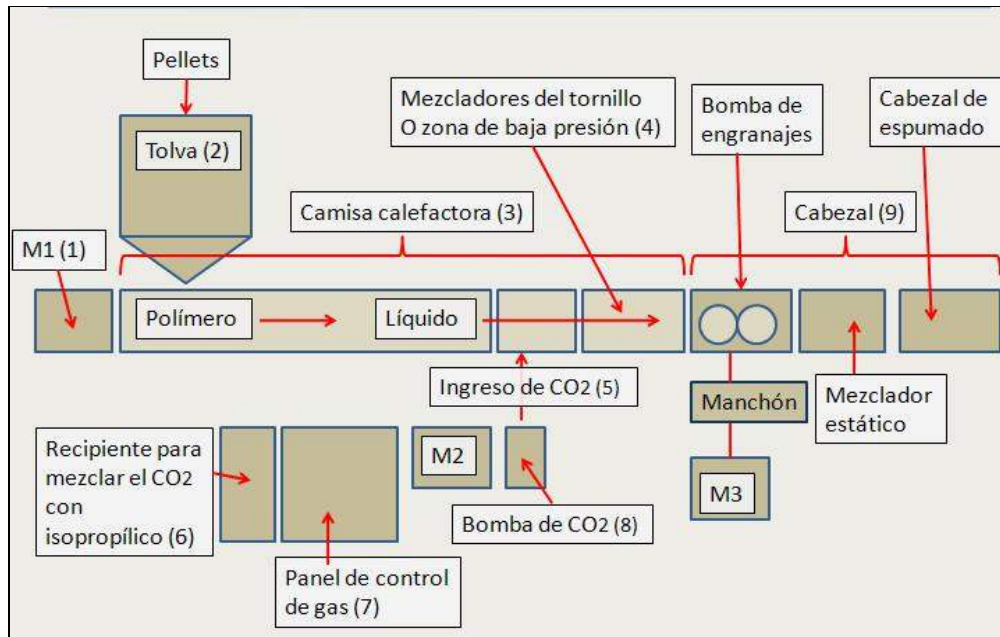


Imagen 5.1

6.2 Selección de la bomba de engranajes

A continuación se muestra un gráfico típico de funcionamiento de una extrusora, donde se muestran curvas típicas características de presión versus caudal de trabajo. Se ve en el gráfico que a medida que la presión a vencer es mayor, el caudal lógicamente disminuye. La curva está representada para distintas temperaturas, datos necesarios para explicar la razón de colocar una bomba de engranajes en el cabezal.

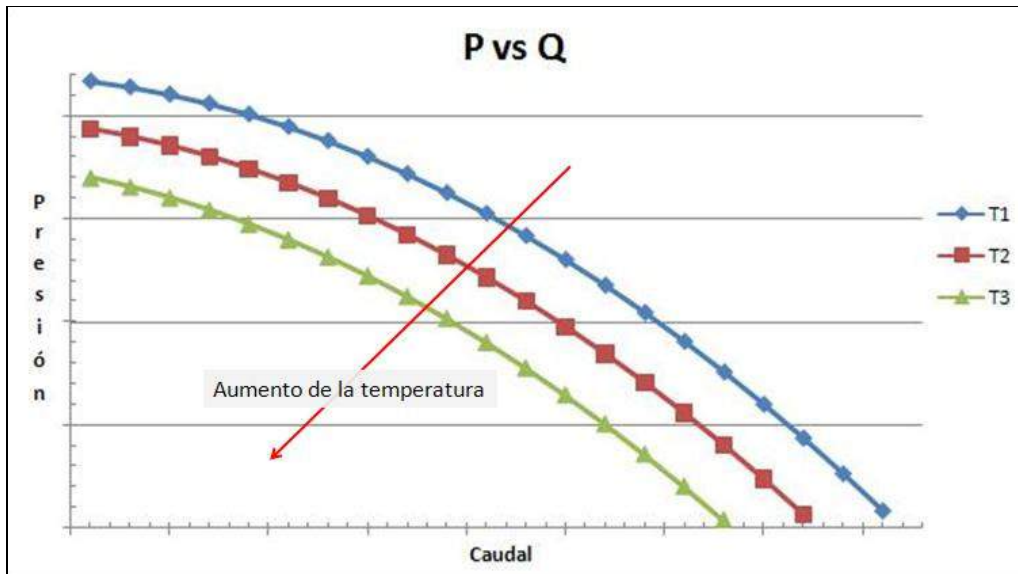


Imagen 5.2

En las etapas finales de espumado es conveniente enfriar el líquido antes del proceso de expansión. Si se produce enfriamiento en el cabezal, o en el cabezal y el mezclador, puede ocurrir que la viscosidad del líquido en esta zona aumente demasiado, y el efecto será disminuir el caudal para una presión constante en el extremo de la extrusora.

Para funcionamiento de la extrusora a velocidad de rotación constante, la disminución del caudal causará un aumento del caudal de retroceso de líquido dentro de la máquina, que causará elevación de la temperatura del líquido, pasando la máquina a funcionar en otra curva de operación correspondiente a temperaturas de líquido más altas (menor viscosidad y menor presión de salida). Esto constituye un círculo vicioso de funcionamiento inestable del sistema, y finaliza en la detención total de circulación de polímero en el sistema, con la extrusora funcionando a velocidad de rotación constante, alta temperatura, viscosidad de líquido muy baja y caudal cero. La inclusión de una bomba de engranajes en serie con la extrusora es un intento de evitar este tipo de accidentes que producen funcionamiento inestable.

En el siguiente esquema se muestra como el polímero se va solidificando en la pared de la extrusora por el flujo de calor por la camisa. La capa en rojo claro solidificó hace mas tiempo, y la capa en rojo intenso esta solidificando. El resto es polímero líquido aún, pero dependiendo de los factores arriba explicados puede solidificarse completo y tapar el conducto cayendo el caudal a cero.

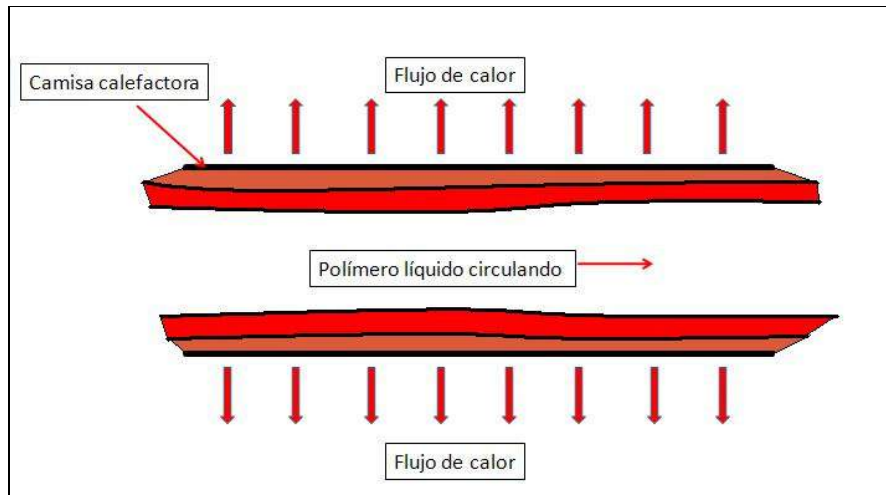


Imagen 5.3

Para tornillos de 30 mm como el nuestro se suele utilizar motores de 3 HP, nosotros decidimos utilizar unos de 5 HP por cualquier eventualidad.

6.3 Descripción de la extrusora diseñada

Comenzaremos la descripción desde el motor de accionamiento M1 (1). A continuación está la camisa calefactora (3), a la cual ingresan los pellets desde la tolva (2). En la camisa calefactora se lleva a cabo el fundido del polímero y la inyección de solución CO₂ e isopropílico (5). Como se utilizaron dos tornillos, luego de la zona de inyección hay una zona de mezclado o un valle de baja presión (4) dependiendo de a que tornillo nos estemos refiriendo. Por último esta el cabezal (9), conformado por tres partes, la bomba de engranajes, el mezclador estático y el cabezal de espumado.

6.3.1 Motor de accionamiento y reductor de velocidad (1)

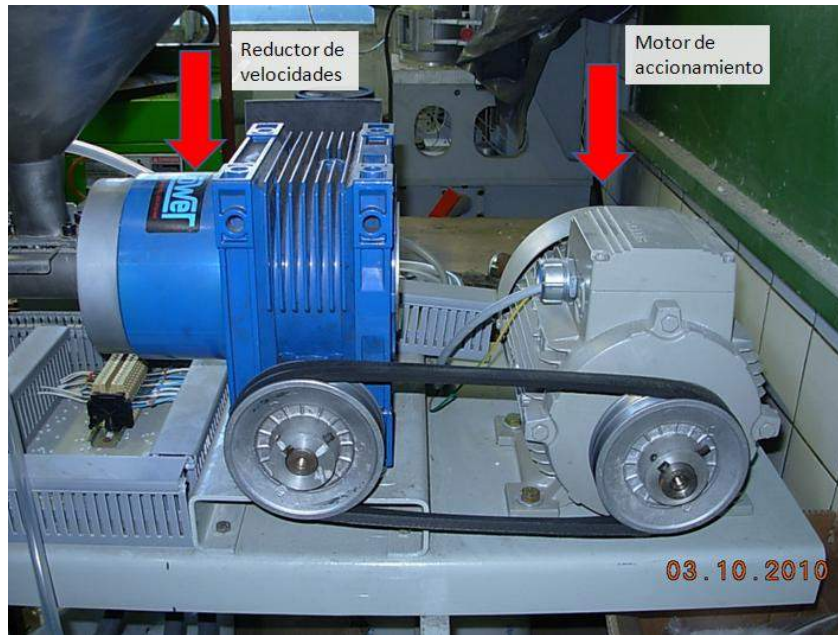


Imagen 5.4

El motor de accionamiento utilizado es de 5 KW y 1450 rpm, el reductor de velocidades tiene una relación de 1/20, para acondicionar los giros por unidad de tiempo que se necesitan. Ambos están unidos por dos correas con poleas idénticas de aluminio.

6.3.2 Tolva (2)



Imagen 5.5

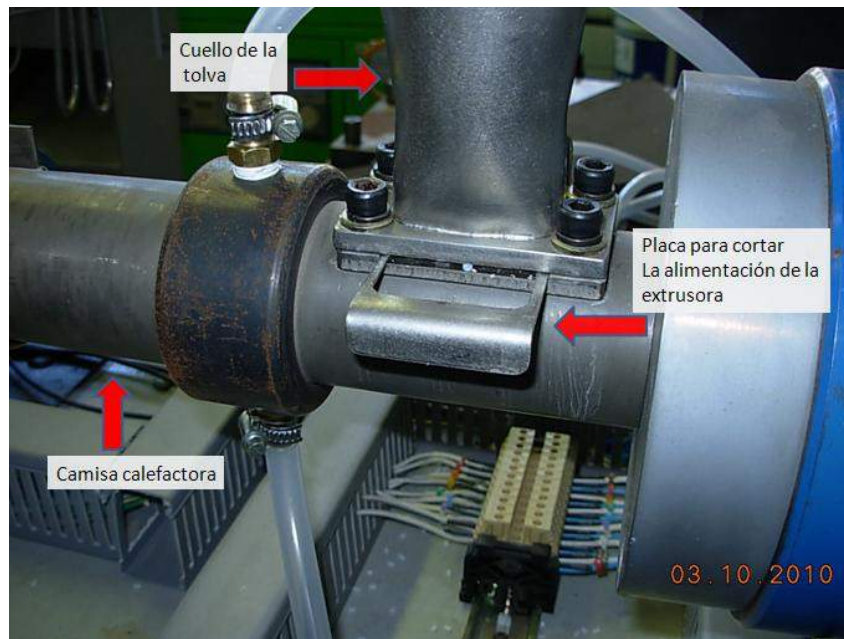


Imagen 5.6

La tolva esta fabricada en acero inoxidable, su diámetro es de 400 mm, su altura también es de 400 mm y posee una placa para detener la alimentación de la extrusora en la base de su cuello, donde esta abulonada a la camisa calefactora.

6.3.3 Camisa calefactora (3)

La camisa calefactora tiene 60 mm de diámetro exterior y 30 mm de diámetro interior. Su largo es de 985 mm en total, de los cuales 170 mm son utilizados para colocar la tolva. La camisa esta calefaccionada con 10 resistencias de 484 W cada una, conectadas en tres grupos, cada uno controlada independientemente del otro. El primer grupo tiene 4 resistencias, mientras que los otros dos contienen solo tres cada uno. Cada zona esta equipada con una termocupla para medir la temperatura.

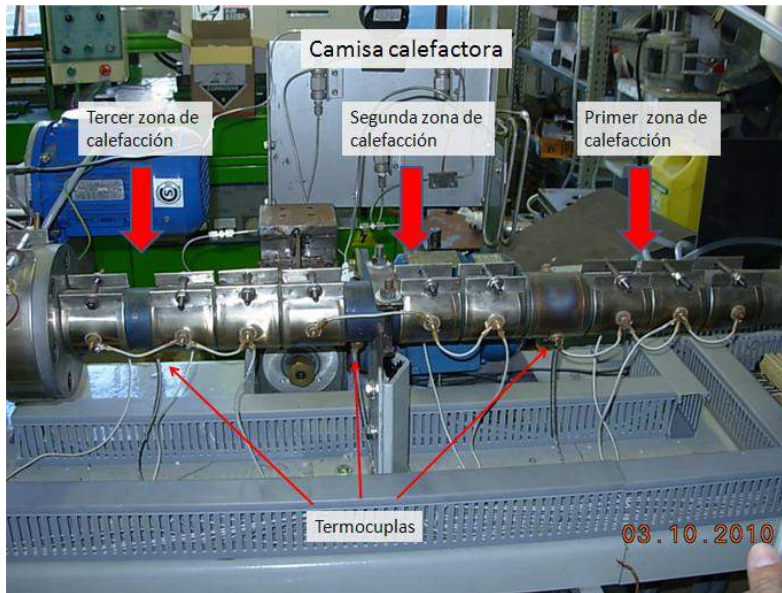


Imagen 5.7

6.3.4 Tornillos (4)

Se utilizaron dos tipos de tornillos para la producción de espumas termoplásticas, uno con una zona de mezclado y otro son esta zona. Ambos tornillos fueron simulados por Francisco Sachetti para determinar la zona en la que había que inyectar la solución de CO₂ e isopropílico.

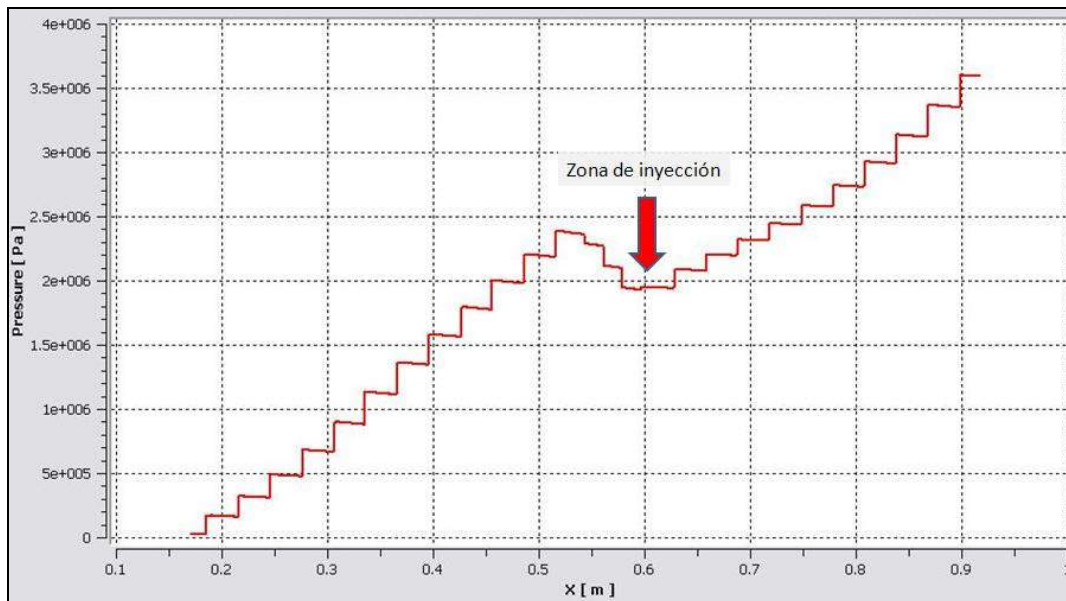


Imagen 5.8

El gráfico expuesto arriba es el resultado de la simulación para el tornillo sin mezcladores. Para seleccionar la zona de inyección, hay que tener en cuenta que si la

presión disminuye hacia el lado del motor de accionamiento, el gas va a ir hacia ese lado, lo cual no es deseado. Para evitar este inconveniente, luego de la zona de fusión, en el 60 % de la longitud total del tornillo, la profundidad del canal es aumentada, de esta manera se logra disminuir la presión, y el gas no retrocede de ese punto. Luego, la profundidad del canal disminuye progresivamente hasta el final del tornillo.

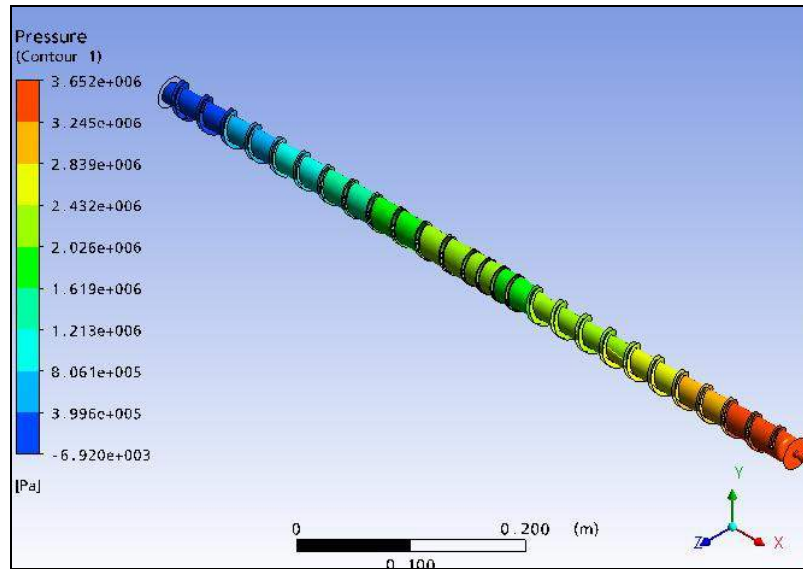


Imagen 5.9

Tornillo sin mezcladores con las presiones resultantes

6.3.5 Tornillo con mezcladores (4)

También fue simulado el tornillo con mezcladores. El siguiente gráfico muestra los resultados.

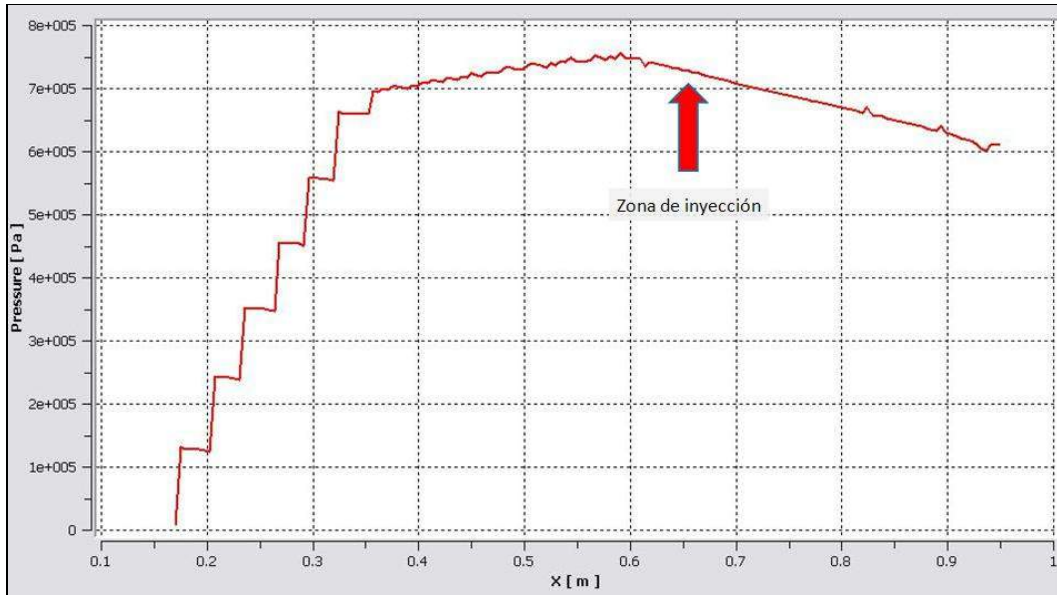


Imagen 5.10

En este gráfico se ve que hay un máximo de presión en el 60 % del largo del tornillo, el punto de inyección deberá ubicarse luego de ese punto. Se decidió inyectar en el 65 % del largo total para utilizar la misma camisa para ambos tornillos.

A continuación se muestra el dibujo del tornillo con mezcladores y su distribución de presiones a lo largo del mismo.

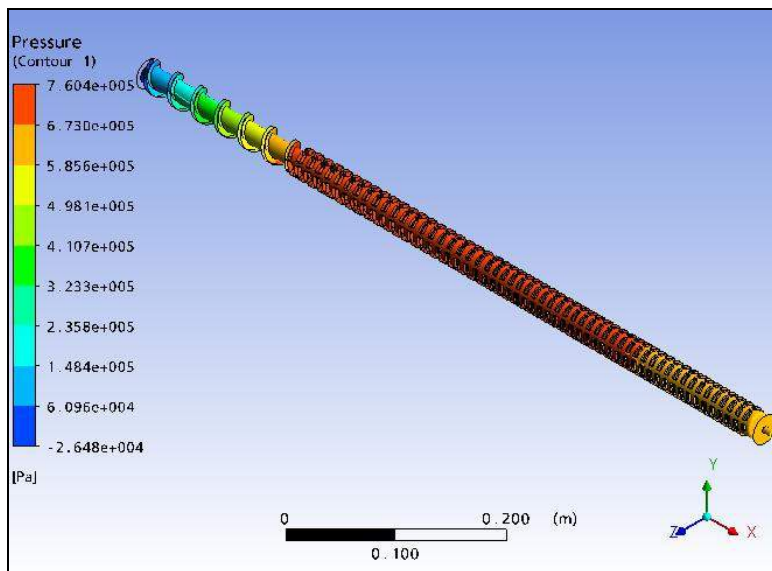


Imagen 5.11

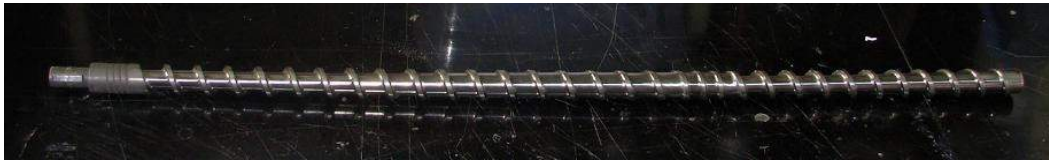


Imagen 5.12 - Foto del tornillo

Los planos del tornillo sin mezcladores y de la camisa se adjuntan en el anexo

6.3.6 Ingreso de gas al sistema (5)

En la producción de espumas termoplásticas, se utiliza un agente de espumado, ya sea químico o físico para formar una burbuja de gas y producir una espuma. En este caso se utiliza un agente de espumado físico. La mayoría de los agentes de espumado de este tipo son muy nocivos para el medio ambiente, por esta razón se decidió utilizar CO₂ como agente de espumado, por no contaminar.

A continuación se muestra un esquema de los elementos que fueron necesarios para poder inyectar solución de CO₂ en isopropílico y toda la cañería y válvulas utilizadas (Imagen 5.3.6.1).

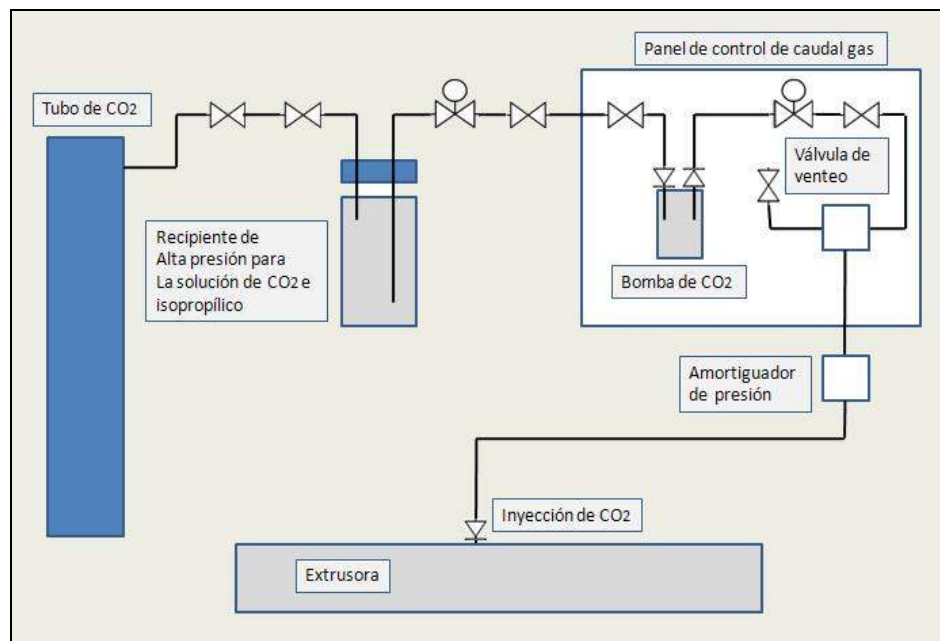


Imagen 5.13

En el esquema vemos que el primer elemento utilizado es el tubo de CO₂. Es un tubo de 50 Kg/cm³ con pescador. Debido a la dificultad de inyectar un gas a altas presiones, por su elevada compresibilidad, se decidió utilizar una solución de CO₂ en alcohol isopropílico, la cual es líquida a las temperaturas y presiones de trabajo.

6.3.6.1 Recipiente de alta presión y tubo de CO₂ (6)

Para obtener esta solución, se conectó el tubo al recipiente de alta presión, en el recipiente se colocó alcohol isopropílico, y se abrió el tubo unas 8 horas antes de prender la extrusora, cerrando la válvula ubicada luego el manómetro del recipiente. En este tiempo la solución de isopropílico y dióxido de carbono líquido que provee el tubo con pescador llegan al equilibrio termodinámico.



Imagen 5.14

6.3.6.2 Panel de control de caudal de gas (7)

Del recipiente de alta presión, el líquido va hacia el tablero de control de caudal de gas y la bomba de presión. En el tablero hay tres válvulas, una para venteo, otra para habilitar la solución a la bomba y otra para el ingreso de la solución líquida a la extrusora a través de la válvula de entrada.

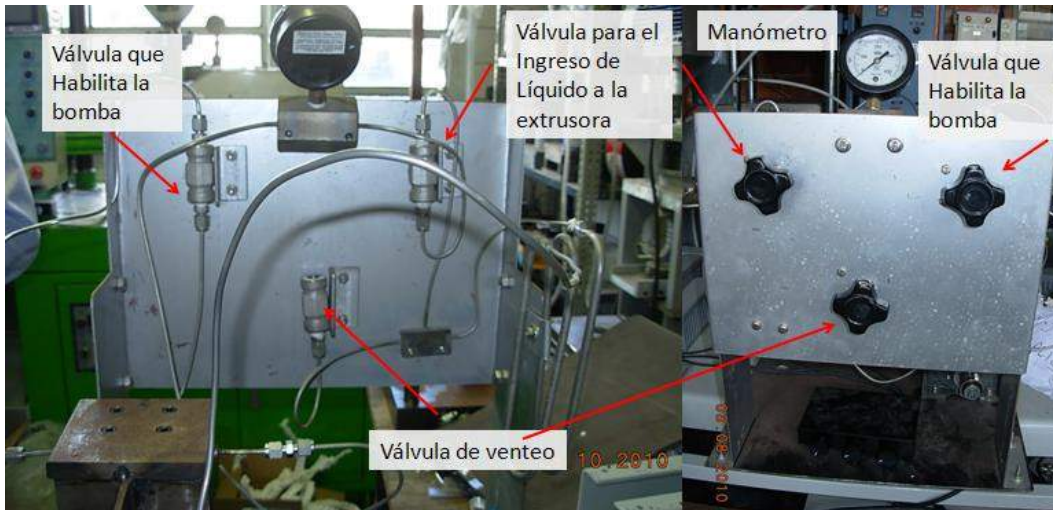


Imagen 5.15 Panel de control de caudal de gas

6.3.6.3 Bomba de soluciones líquidas (8)

Para aumentar la presión de la solución de CO₂ e isopropílico hasta alrededor de 200Kg/cm² y poder inyectar dentro de la camisa calefactora, se diseñó y construyó una bomba de desplazamiento positivo con pistón cerámico.

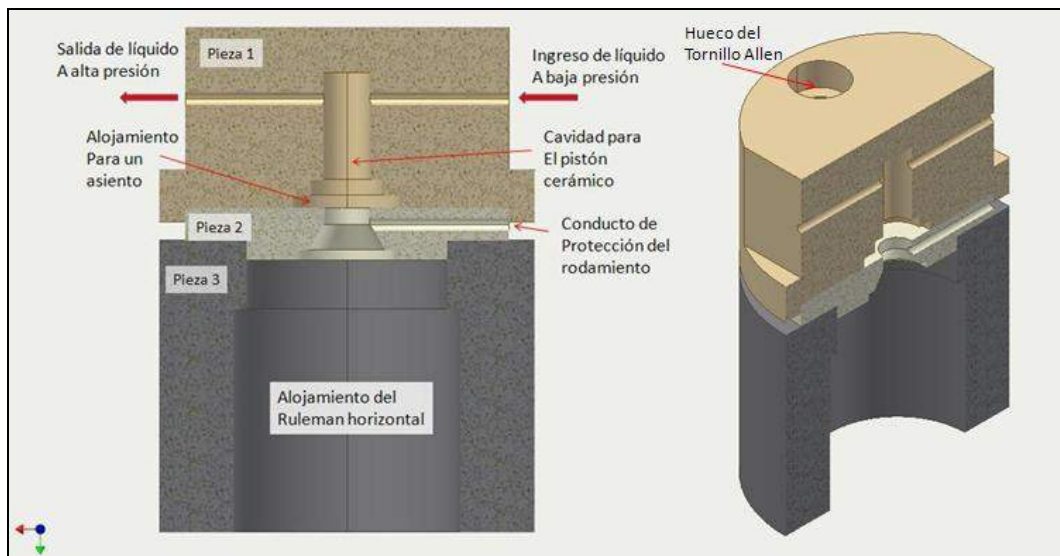


Imagen 5.16 Esquema de la bomba de soluciones líquidas

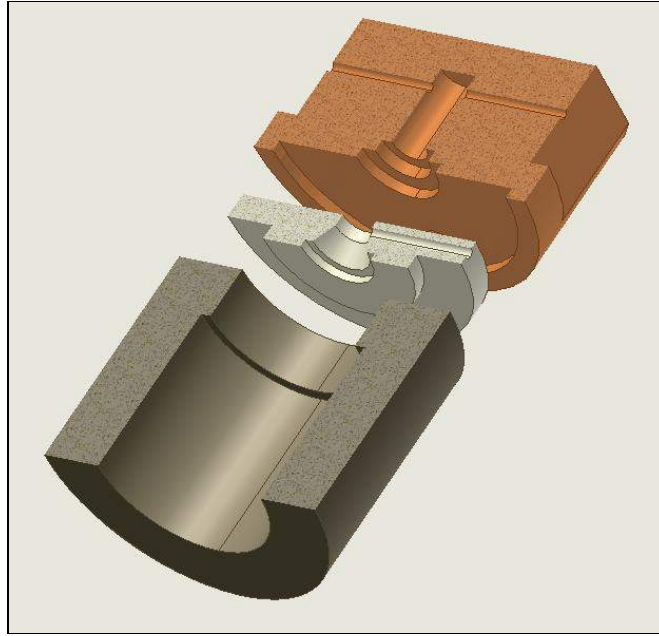


Imagen 5.17 Corte de la bomba de líquido explotada

La bomba esta conformada por tres piezas estáticas, un rodamiento lineal, dos válvulas para alta presión y paso hacia un solo lado y un pistón. La pieza 1, es la que aloja al pistón cerámico en su interior y por ella entra la solución a la presión de vapor del CO₂ a la temperatura ambiente, y es elevada hasta la presión medida en el manómetro del panel de control de caudal de gas. Esta pieza tiene 58 mm de diámetro, en su parte superior tiene dos agujeros frezados para colocar dos tornillos allen de 6.25 mm de diámetro y mantener las tres piezas unidas. En el centro tiene un hueco de 7,4 mm y 23 mm de profundidad, donde se aloja el pistón cerámico. En su parte inferior, (opuestas a los tornillos allen) posee un alojamiento de 11.4 mm y 2 mm de espesor para colocar un sello. Luego tiene otra cavidad del diámetro de la pieza 2 para alojar la misma.

La pieza 2 es más pequeña, tiene 50 mm de diámetro, posee dos agujeros para que la traspasen los tornillos allen. Tiene en el centro otro hueco de 7,2 mm donde el cilindro cerámico cabe justo, con una entrada cónica de 45° para facilitar la colocación del mismo. Justo al final de la perforación donde se ubica el pistón, se realizó una perforación hasta el final de la pieza, para evacuar cualquier filtración de líquido que pueda dañar el rodamiento horizontal. Esta pieza tiene 8 mm de espesor, pero los 50 mm de diámetro inicial son reducidos a 31 mm en la parte donde el hueco central es cónico para encastrar en la pieza número 3.

La pieza 3 tiene 58 mm de diámetro exterior al igual que la pieza 1, y un hueco interior de 31 mm donde se aloja la pieza 2. También tiene los dos agujeros para los tornillos allen, en esta pieza es donde se practicaron las roscas con un macho de acero. Luego de 10,6 mm, el diámetro interno es aumentado a 35 mm, medida del rodamiento horizontal colocado para que el eje donde se ubica el pistón quede centrado.

A la entrada de líquido se le colocó una válvula de bolilla, con bola y asiento de zafiro que solo permite el ingreso del líquido y a la salida otra similar que solo deja salir al líquido, de esta manera se logró aumentar satisfactoriamente la presión del líquido hasta más de 400 Kg/cm².

El pistón de la bomba es accionado por un motor de 0.37 KW y un reductor de velocidad con relación de 1/20, los cuales mediante una leva transforman el movimiento circular del motor en uno lineal, necesario para una bomba de este tipo.

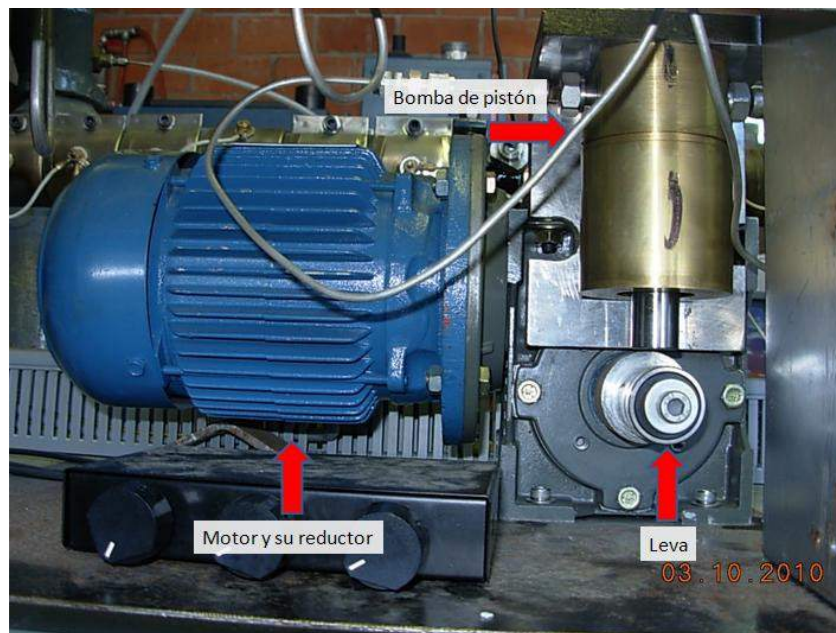


Imagen 5.18 Foto de la bomba de líquido y el mecanismo de accionamiento

6.3.6.4 Amortiguador de ondas de presión

Por su principio de funcionamiento (movimientos lineales alternados), la bomba de líquido genera ondas de presión en el sistema. Para disminuirlas y que no dañen el equipo se fabricó un amortiguador de ondas. A un tubo de 6,35 mm de diámetro y 1,75 mm de pared, y se lo aplastó hasta ovalar marcadamente el caño. Luego se lo dobló 5 veces con una dobladora de caños para poder tener una distancia mayor. La atenuación

de las ondas de presión se logra cuando el caño que esta aplanado es obligado a volver hacia su forma original circular por los cambios de presión, esto almacena energía y la onda de presión es disminuida.



Imagen 5.19

6.3.6.5 Válvula de ingreso de gas a la extrusora

Para el ingreso de la solución de isopropílico y dióxido de carbono al sistema se diseño una válvula con una bolilla y un asiento cónico para impedir el ingreso del fundido a la válvula. La válvula se ubica al final de la zona de compresión del tornillo, donde el polímero esta prácticamente fundido en su totalidad, a la misma distancia de la tolva que la termocupla de la zona dos, entre la segunda y tercer resistencia de dicha zona.



Imagen 5.20 Foto de la válvula

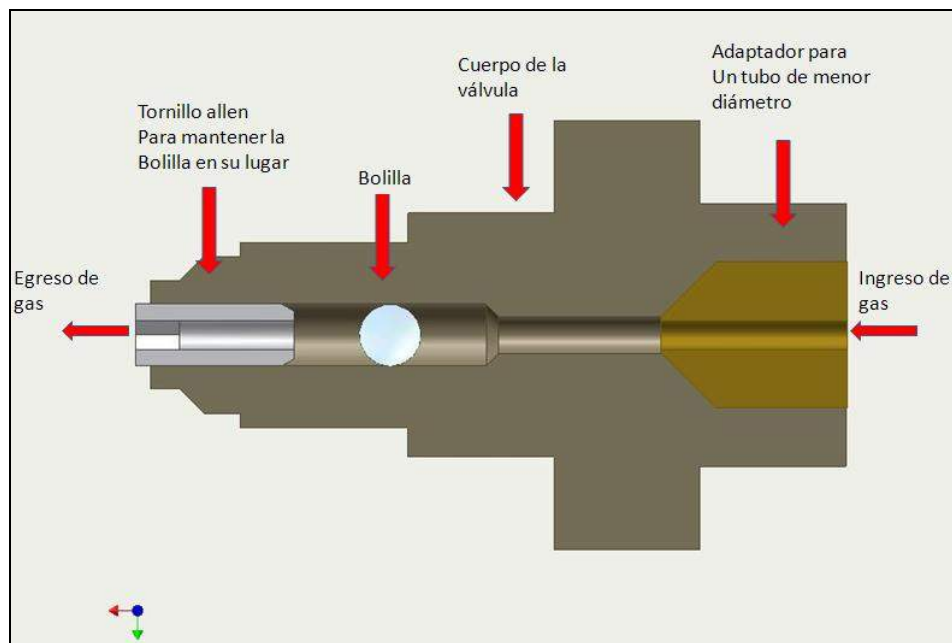


Imagen 5.21 Esquema de la válvula

6.3.7 Cabezal (9)

Finalmente, el cabezal de la extrusora, compuesto por tres partes principales: la bomba de engranajes, el mezclador estático y el cabezal de espumado. Inicialmente, se controló con dos zonas de calefacción independientes, luego se hicieron una serie de modificaciones que serán detalladas más adelante. En esta parte de la extrusora están situados los dos sensores de presión, uno antes de la bomba de engranajes y otro luego.

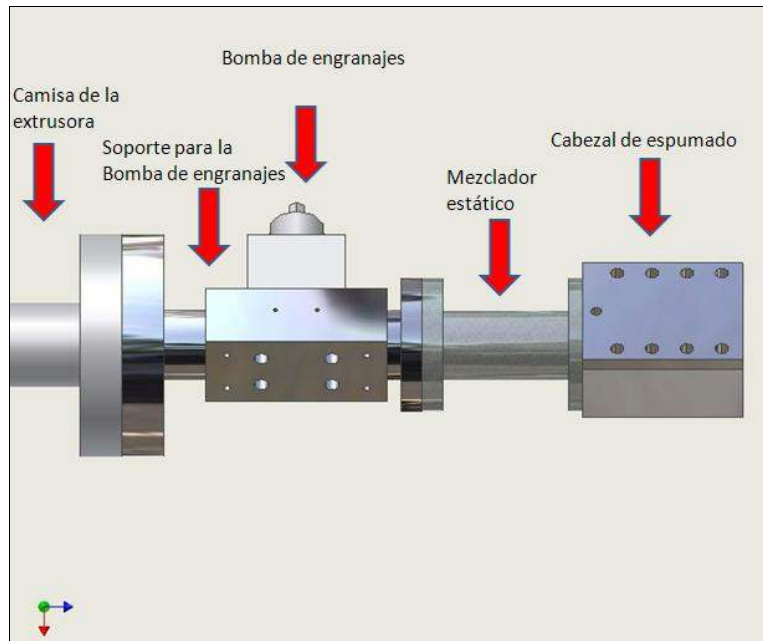


Imagen 5.22

6.3.7.1 Soporte para la bomba de engranajes

Se construyó esta pieza para soportar la bomba de engranajes. Por medio de dos bridas se conecta por un lado a la camisa de la extrusora y por el otro al mezclador. Se mecanizaron canales en forma de L, para rotar 90 grados la dirección de flujo ingresando el fundido a la bomba de engranajes y saliendo por el otro canal. El canal por donde el polímero líquido ingresa es de 10 mm, mientras que el de salida es de 8 mm. El canal de salida tiene en su parte final un cono de 60 grados para pasar de los 8 mm de diámetro a los 36 mm que tiene el mezclador. Se practicaron 4 agujeros pasantes de 11 mm roscados, para abulonar la bomba de engranajes a su soporte (Imagen 5.3.7.1.1). El canal de entrada también tiene un cono, en 55 mm se pasa de los 30 mm que tiene de diámetro interno la camisa de la extrusora a los 10 mm necesarios para el ingreso a la bomba de engranajes.

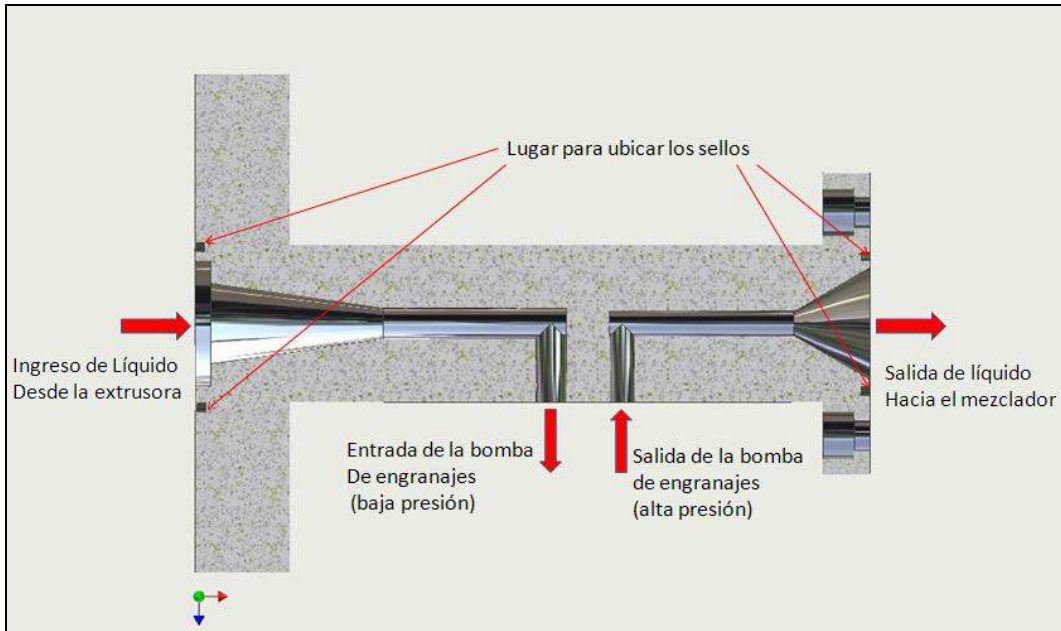


Imagen 5.23 Canales del soporte para la bomba de presión

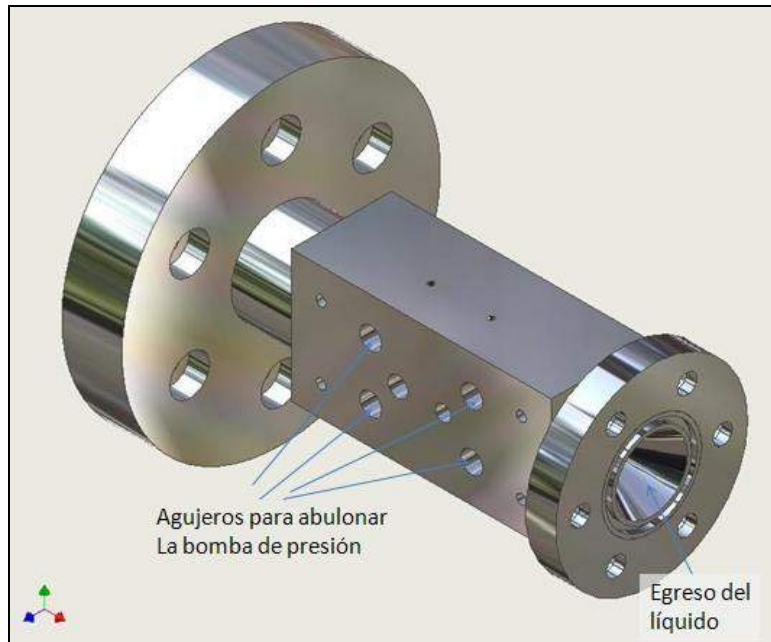


Imagen 5.24 Soporte de la bomba de presión

La bomba de engranajes para alta presión es accionada por un motor de 0,37 KW y una reductora de 1/49. Para conectar la bomba a la reductora, se utilizó un manchón, con una adaptación hexagonal de lado de la bomba. Al manchón se le practicaron dos agujeros para ponerle tornillos de 4 mm, ya que el torque de la bomba separaba la extrusora de la bomba y se rompía la pieza elástica de de caucho del manchón

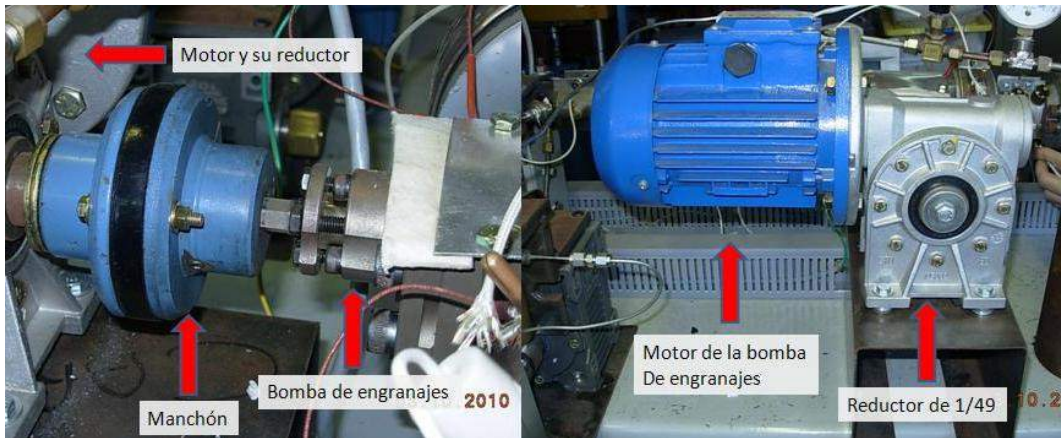


Imagen 5.25

6.3.7.2 Bomba de engranajes

Se adjunta el plano de la bomba en el anexo de planos. La bomba es de 6 cm³/rev.

6.3.7.3 Mezclador

Se utilizó un mezclador de tipo estático para esta etapa. Se diseñó una camisa para contener los discos encargados del mezclado y para soportar la presión del fundido circulando dentro.

6.3.7.3.1 Camisa



Imagen 5.26 Corte de la camisa del mezclador estático

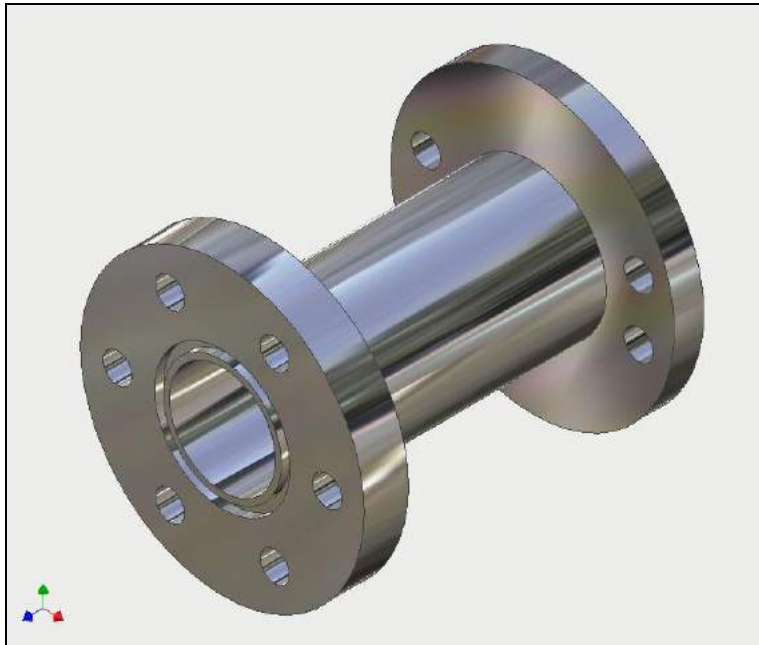


Imagen 5.27 Camisa del mezclador estático

Es una pieza con dos bridas, una en cada extremo. El tubo del encamisado tiene 90 mm de largo, su diámetro interior es de 36 mm y el exterior 50 mm. Una de las bridas tiene 6 agujeros equidistribuidos de 10 mm de diámetro, la cual conecta el mezclador con la pieza que sostiene a la bomba de presión. En el otro extremo, la otra brida tiene solo cuatro agujeros, ubicados como se ve en el dibujo. Esta distribución no simétrica se debe a las dimensiones del cabezal, que es la pieza contigua al mezclador. Estos huecos también son de 10 mm. Esta brida es postiza, para facilitar la colocación de los discos encargados de subdividir el flujo del fundido y mezclarlo. Como se ve en el dibujo del corte de la camisa, la brida de cuatro agujeros no tiene el mismo diámetro interior que la camisa, esto es porque el canal de entrada de polímero del cabezal y el de salida de los discos es de 15 mm.

La brida de seis huecos tiene además una depresión circular de 3 mm de profundo y 3 mm de espesor, donde se aloja la junta de aluminio. Para el otro extremo se utiliza una junta de Klingerite.

Esta pieza fue modificada, luego se especificará al respecto.

6.3.7.3.2 Discos

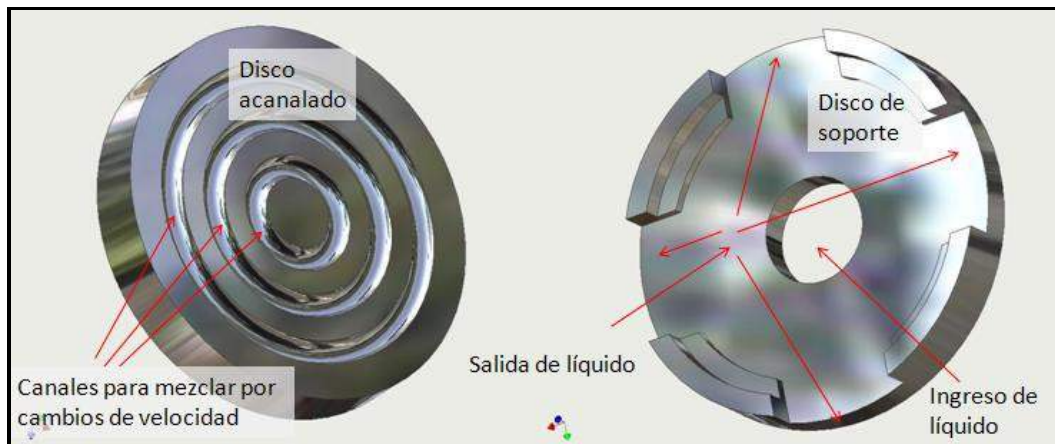


Imagen 5.28 Discos mezcladores



Imagen 5.29 Disposición del conjunto de discos

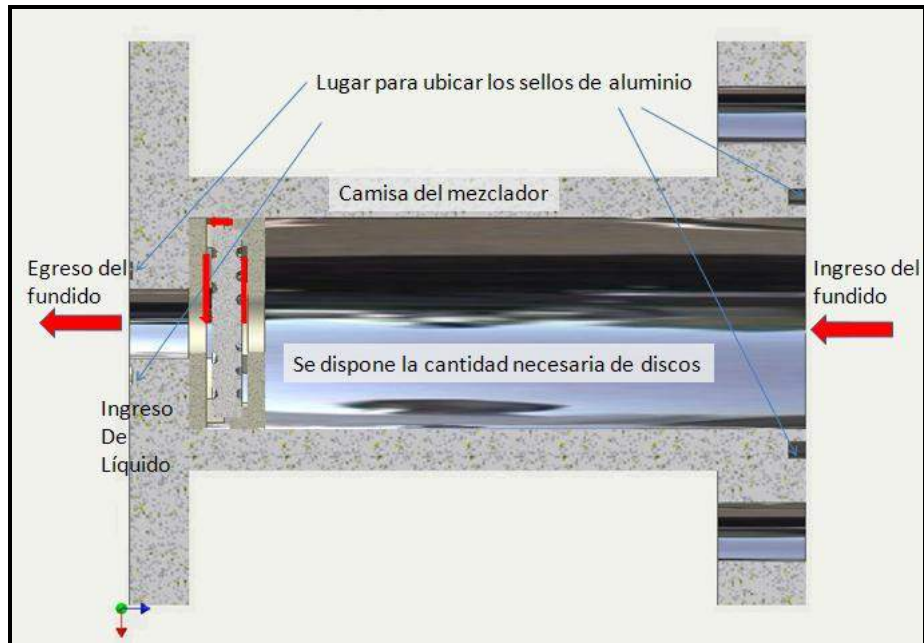


Imagen 5.30 Conjunto de discos y camisa

Los conjuntos de discos son los encargados de mezclar la solución fundida. El líquido ingresa por un extremo, indicado en la Imagen 5.29, y al chocar con el disco central acanalado, (acanalado para mezclar el fundido por cambios de velocidades) el flujo pasa a ser radial. Luego, la única manera de pasar el obstáculo es por el espacio que hay entre ambas partes que sostienen al disco acanalado. Este par de piezas son colocadas a 45 grados, como se muestra en la Imagen 5.30, para de esta manera dividir nuevamente el flujo y aumentar el mezclado.

El disco acanalado tiene 32 mm de diámetro y un espesor de 5 mm. Los canales son de 1 mm de radio.

Los discos de soporte tienen 36 mm de diámetro exterior, aunque luego se los rebajó 0,1 mm en el diámetro para que quepan más holgados en la camisa. Tiene una zona de apoyo donde se aloja el disco acanalado, y otra parte más alta para dividir el flujo, como se muestra en la Imagen 5.31, donde también se señala la dirección radial del flujo.

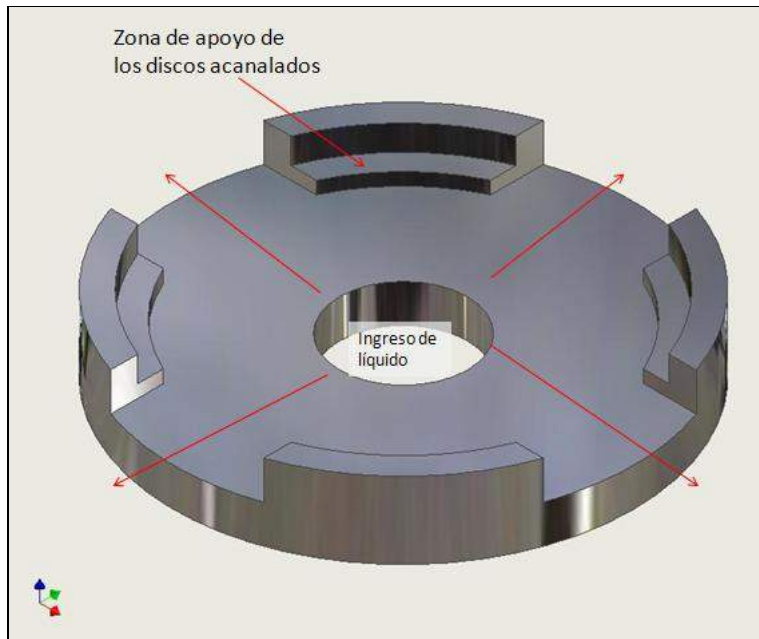


Imagen 5.31 Disco de soporte

6.3.7.4 Cabezal de espumado

El cabezal de espumado de la extrusora es donde a la solución polímero-espumante se le baja la presión hasta la atmosférica, y donde la mezcla abandona la extrusora.

Al cabezal lo conforman tres partes, dos permanecen en contacto con el fundido mientras la maquina está en funcionamiento normal. La tercer pieza mantiene a las otras dos unidas y soporta la presión ejercida por la solución que fluye.

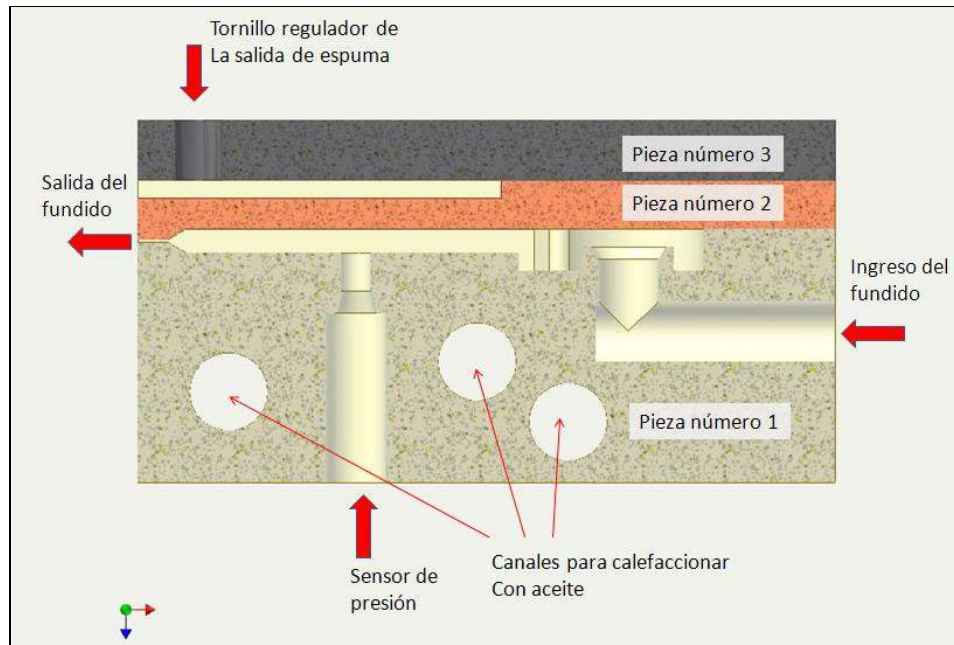


Imagen 5.32 Cabezal de extrusión

6.3.7.4.1 Pieza número 1

Construida en acero, tiene 50 mm de alto y, su largo y ancho son 96 mm x 115 mm.

Es una de las piezas más importantes del conjunto, tiene en su parte posterior un hueco de 10 mm de diámetro, a 25 mm de la base y centrado respecto al frente, por el cual ingresa el polímero líquido con el agente espumante ya disuelto y correctamente mezclado. Luego el polímero ingresa a la zona de homogeneización, donde la presión y el flujo de líquido se normalizan; es una pileta, con un escalón con forma triangular por donde el fundido ingresa a la zona final de la pieza. Luego viene el canal de salida, el cual tiene 30 mm de ancho y aproximadamente 54 mm de largo, luego se eleva con una inclinación de 30° 1,75 mm, y por último se encuentra una zona plana de 5 mm de largo, donde el polímero abandona el cabezal y el agente espumante se desorbe del líquido formando una espuma polimérica.

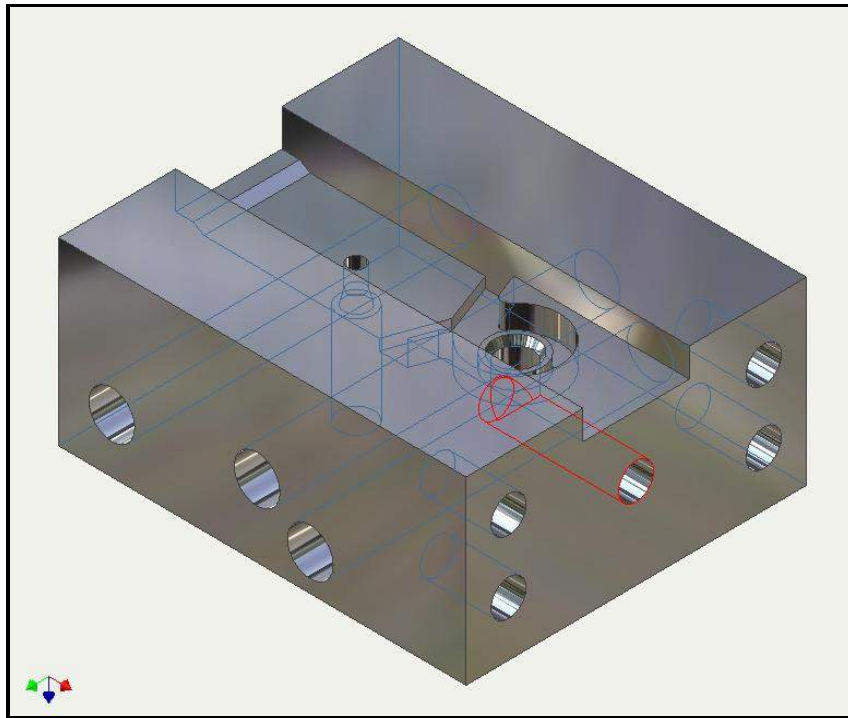


Imagen 5.33 Vista posterior de la pieza número 1. En líneas rojas se ve el canal de entrada del fundido

6.3.7.4.2 Pieza número 2

Esta pieza va colocada entre la pieza numero 1 y la 3. Con el tornillo regulador que está en la parte delantera de la pieza 3, se la flexiona para modificar la dimensión del canal de salida del cabezal. Al igual que el canal de salida de la pieza 1 tiene 30 mm de ancho. La parte superior son dos planos, el primero tiene la altura exacta para que la pieza numero 3 apoye sobre esta y 55 mm de largo, luego hay un escalón de 3 mm para permitir la flexión de la parte 2 y modificar el gap de salida. Este último plano tiene 60 mm de largo. La cara inferior de la pieza 2 es un espejo de la pieza 1 en la parte final, donde el polímero deja el cabezal, tiene 5 mm planos, y luego con un ángulo de 30° elevándose de la horizontal, sube 1,75 mm. Luego la pieza es plana hasta el final.

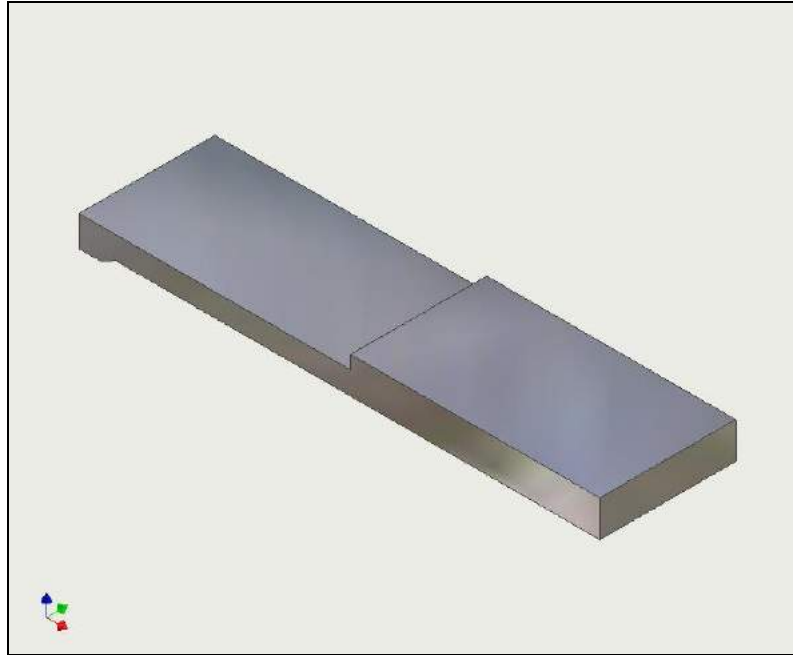


Imagen 5.34 Pieza número 2

6.3.7.4.3 Pieza número 3

Es una simple plancha de acero de de 10 mm de espesor, de 115 mm x 96 mm con 4 pares de agujeros de 8 mm a cada lado para soportar la presión del liquido que fluye entre las piezas número 1 y 2; y uno en la parte delantera, donde se ubica el tornillo regulador.

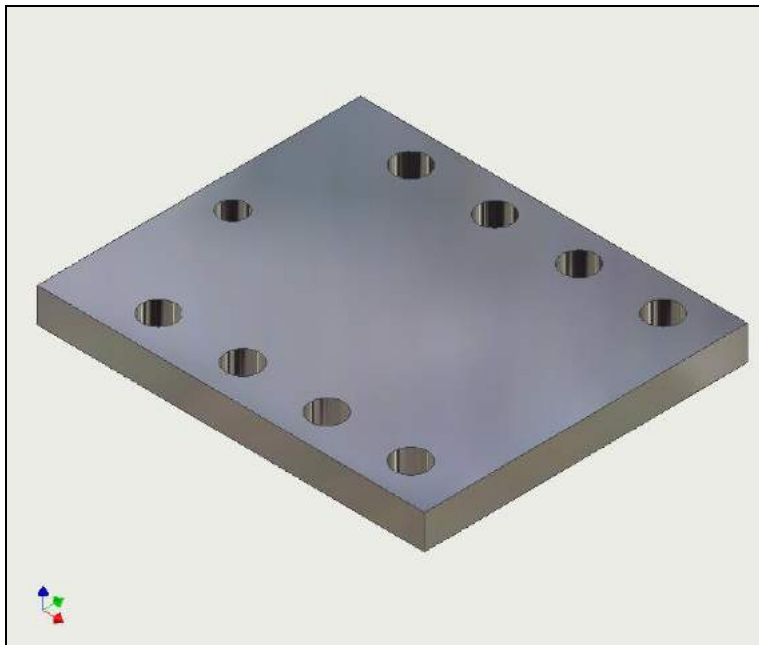


Imagen 5.35 Tapa del cabezal

7 CONTROL DEL SISTEMA

El sistema de control de la extrusora fue colocado en la parte inferior de la mesa, dentro de un gabinete, en el que se colocaron los seis contactores mecánicos para comandar las zonas de calentamiento, aunque se utilizaron solo cinco de estos. También se ubicaron dentro del gabinete los tres variadores de frecuencia para controlar la velocidad de los tres motores: el motor de accionamiento para la extrusora, el de la bomba de presión y el de la bomba de engranajes.

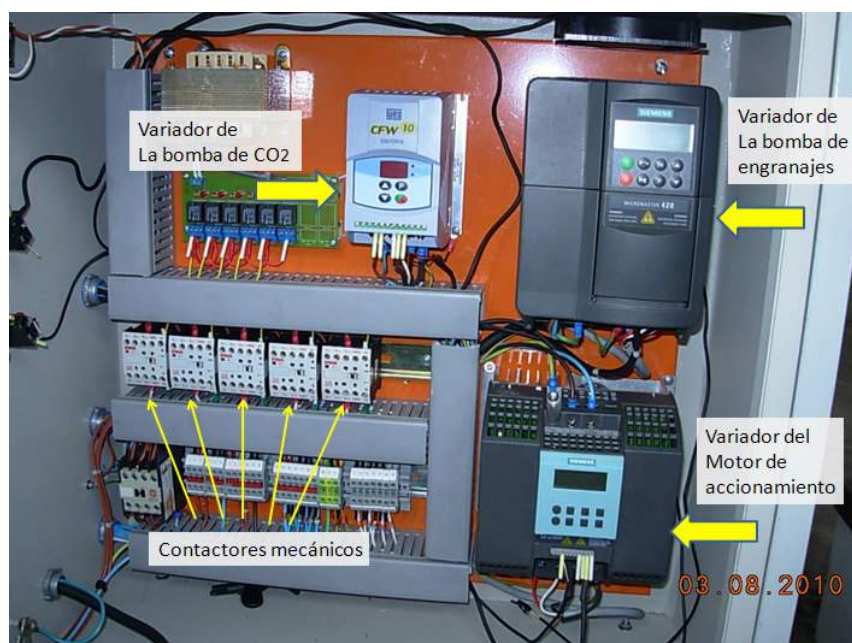


Imagen 6.1 Gabinete de control por dentro

Las termocuplas, los sensores de presión y la conexión con la PC se encuentran detrás del gabinete.

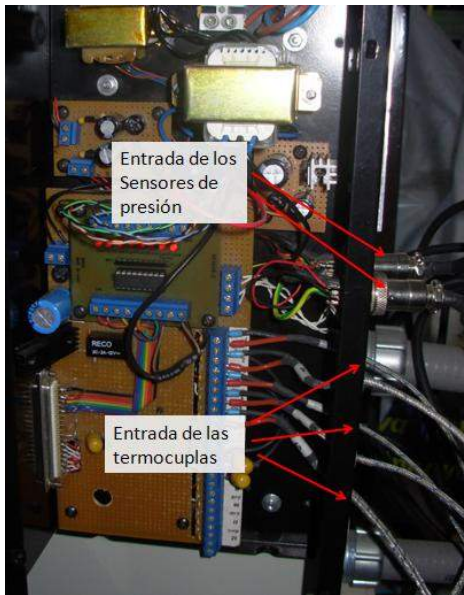


Imagen 6.2

El calentamiento de la extrusora se controla con 5 zonas independientes, a las cuales se les asigna una temperatura, y el programa de control acciona los contactores. Se utilizó un control de tipo PID para alcanzar la temperatura deseada.

La termocupla T1, lee la temperatura de la zona 1 y envía la señal a la PC, el CPU verifica el valor medido con el valor deseado y de ser necesario envía la señal de potencia W1 a las resistencias calefactoras de la zona 1. El mismo proceso de control se utilizó para todas la zonas de calefacción desde la zona uno hasta la zona cinco.

Los motores M1 y M2, el de accionamiento y el de la bomba de engranajes respectivamente, son controlados por los sensores de presión SP1 y SP2. Los sensores de presión toman la medida de presión antes de la bomba de engranajes (SP1) y luego de la bomba (SP2). Esta lectura va hacia el CPU, el cual compara con los valores seteados en el software. Si el valor de SP1 es menor al impuesto, el CPU manda una señal al variador de frecuencia V1 para que aumente la velocidad del motor de accionamiento M1, si el valor es mayor, ordena a V1 que disminuya la velocidad de M1. Similar es el comportamiento con SP2, el sensor envía la lectura de presión al CPU, el cual compara con el valor ingresado por el usuario del software y en caso de que la presión de SP2 sea mayor, el CPU envía una señal al variador V2 para que reduzca la velocidad del motor de la bomba de engranajes M2, si la presión medida es mayor a la deseada, se le ordena mediante el CPU a V2 que reduzca la velocidad de M2.

Los valores de presión medidos por SP2 influyen indirectamente sobre la velocidad de rotación del tornillo de la extrusora, a través de la influencia de la velocidad de rotación de la bomba de engranajes sobre la presión medida por SP1.

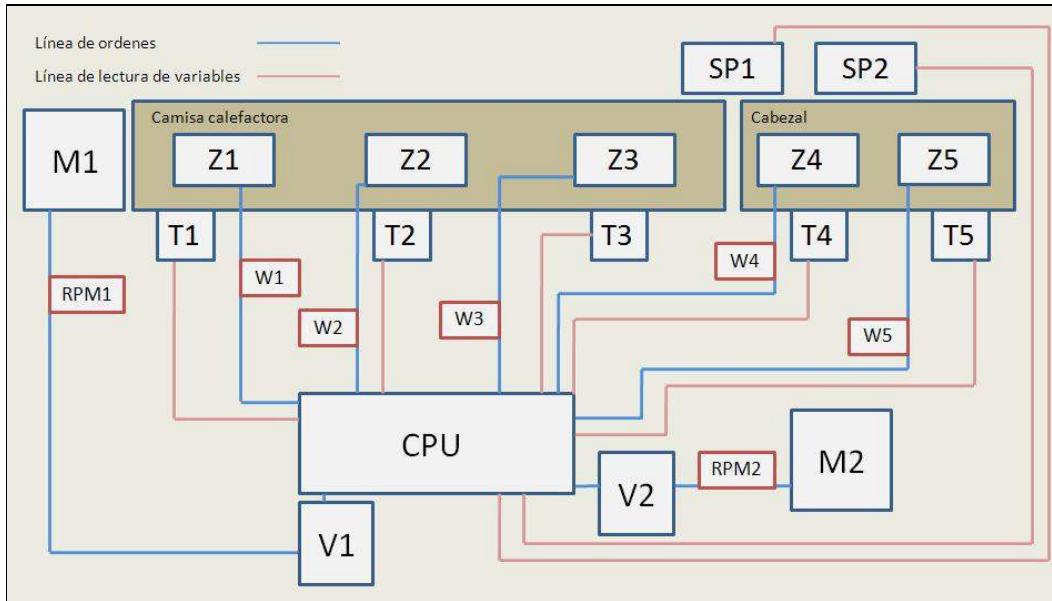


Imagen 6.3 - Esquema de control

NOMECLATURA:

- RPM1 y RPM2: Velocidad de giro de los motores.
- W1, W2, W3, W4 y W5: Potencia entregada a las resistencias.
- M1 y M2: motores 1 y 2.
- V1 y V2: variadores de frecuencia.
- Z1, Z2, Z3, Z4 y Z5: zonas de calefacción.
- CPU: Ordenador personal.
- T1, T2, T3, T4 y T5: Termocuplas.
- SP1 y SP2: sensores de presión.

A continuación se muestra una captura de la pantalla del software utilizado para controlar el funcionamiento de la extrusora, diseñado por Fernando Trabadelo y Gustavo Fazio. En él se ven las seis zonas de calentamiento, con sus set points y las lecturas de las termocuplas, y las mediciones de presión de los sensores con sus propios set point.



Imagen 6.4 Captura de pantalla del programa de control de la extrusora

8 MODIFICACIONES HECHAS A LA EXTRUSORA

Al iniciar las pruebas con la extrusora, hubo que realizar una serie de cambios, algunos por resultados no satisfactorios, otros por problemas eléctricos o de control y otros por comodidad operativa.

8.1 Sujeción de la camisa

La primera modificación realizada fue la sujeción de la camisa de la extrusora con dos tornillos, soldados al soporte de la camisa. Para aprisionar la camisa se colocó una planchuela de acero de 6 mm, con dos huecos en los extremos por donde pasan los tornillos. Luego con dos tuercas se ajusta hasta lograr que no gire la camisa. Esto se realizó para evitar que la camisa gire por el torque a la que es sometida cuando el tornillo gira dentro, lo cual provocaba que la tolva quede girada respecto a la posición horizontal.



Imagen 7.1

8.2 Cambio del reductor de velocidad de la bomba de engranajes

Otra modificación fue el cambio de la caja reductora del motor de la bomba de engranajes. La bomba pedida fue de $3 \text{ cm}^3/\text{rev}$, pero la que nos enviaron fue de $6 \text{ cm}^3/\text{rev}$, por lo que la bomba debía funcionar a menores revoluciones, por lo tanto se

cambio la reductora de una de 1/25 a una de 1/49. Esto hizo que haya que modificar el soporte del motor de la bomba de engranajes y el manchón de conexión, ya que las dimensiones de la nueva caja reductora son diferentes y el diámetro de su eje mayor.

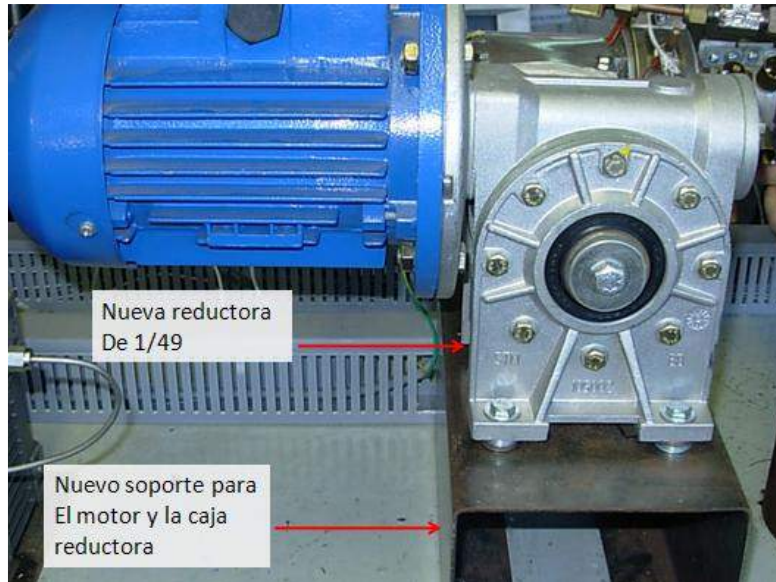


Imagen 7.2

8.3 Componentes electrónicos

Hubo una serie de problemas en la parte de control con los componentes como relés de estado sólido y un variador de frecuencia. Los relés de estado sólido no soportaban en funcionamiento, en especial el de la zona 3. No se llegó a una conclusión final sobre el motivo de esto, pero posiblemente el ruido de alta frecuencia que los variadores de frecuencia reenvían a la línea haya quemado estos componentes electrónicos. La solución fue colocar contactores mecánicos, que para el rango de frecuencias de accionamiento utilizado normalmente en una extrusora funcionan perfectamente.

Se cambió el variador de frecuencia que controla le bomba de LÍQUIDO porque se quemó.

En el software de control se le modificó el algoritmo de control de temperaturas, ya que inicialmente no lograba alcanzar la temperatura impuesta en la casilla SP.

8.4 Cabezal del espumado

En el cabezal de espumado se hicieron tres modificaciones. La primera de ellas fue cambiar el cabezal íntegro. Al diseñar las partes del cabezal de la extrusora, se mandaron a hacer dos cabezales de espumado diferentes. La diferencia entre ambos era la dimensión del canal de salida, mientras que el primero que se utilizó era de 50 mm de ancho, la utilizada finalmente tiene 30 mm de ancho. Este cambio se realizó para aumentar la presión en el cabezal de espumado, ya que si la presión no es suficientemente alta, (alrededor de 1000 psi) ocurre un espumado prematuro dentro del cabezal. Este espumado prematuro ocurre a temperaturas superiores a las que tendría afuera del cabezal de espumado, por lo cual las burbujas no son estables y cohalecen formando grandes acumulaciones de gas, resultando una mala calidad de espuma.

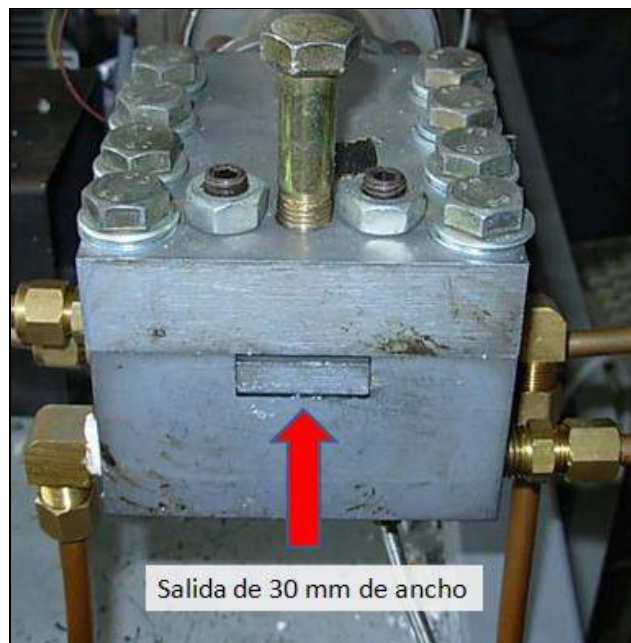


Imagen 7.3 Nuevo cabezal con la salida de 30 mm de ancho

Una vez colocado el cabezal de espumado con la salida menos ancha, se le hizo una modificación. Notamos que era dificultoso cerrar el canal con el tornillo que tenía puesto, dado que era allen y muy delgado. La llave no soportaba el torque al que lo sometíamos. Por esto se agrando el agujero hasta 11 mm y se colocó un tornillo con cabeza hexagonal.



Imagen 7.4 Nuevo tornillo del cabezal

La ultima modificación hecha en el cabezal fue el sistema de calefacción, el cual fue modificado para que pueda ser usado como calefacción o refrigeración, mecanizándole tres conductos, roscándolos y colocándoles conectores de bronce y caños de bronce para circular aceite por ellos. La temperatura del cabezal siguió midiéndose con la termocupla con la que previamente se vino haciendo, pero para controlar esa temperatura se coloco un controlador externo para mantener la temperatura del aceite constante y poder modificar la del cabezal.

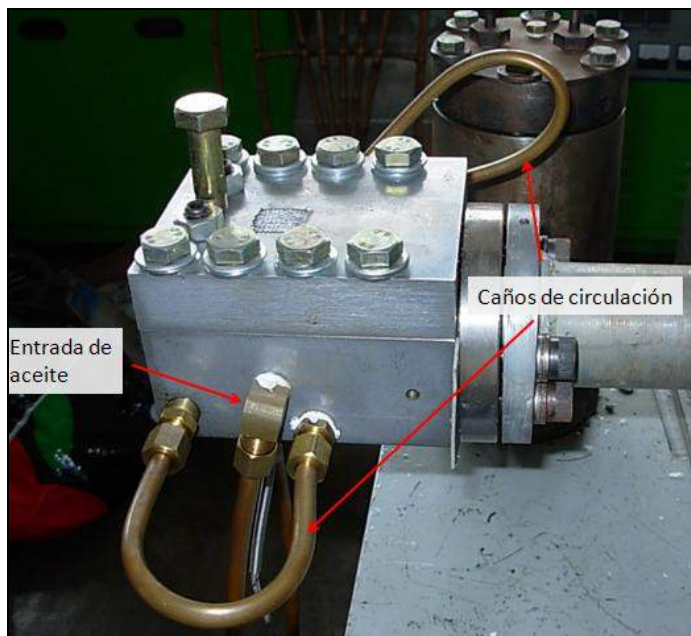


Imagen 6.4.3 - Cabezal con los caños de bronce

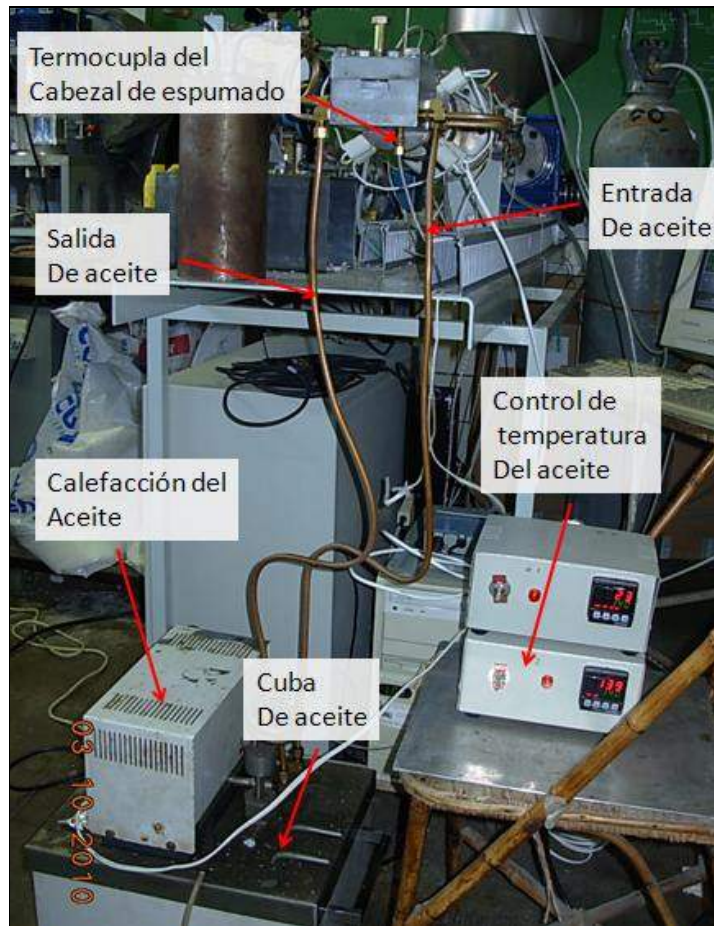


Imagen 7.5 Foto del control de aceite y el cabezal de espumado

8.5 Refrigeración de la camisa en la sección cercana a la tolva

Se agregó una tubería plástica para refrigerar la parte de la camisa calefactora cercana a la tolva. Esta decisión se tomó para evitar que se caliente la boca de la tolva y los pellets se peguen a la misma e impidan la libre caída hacia el tornillo.

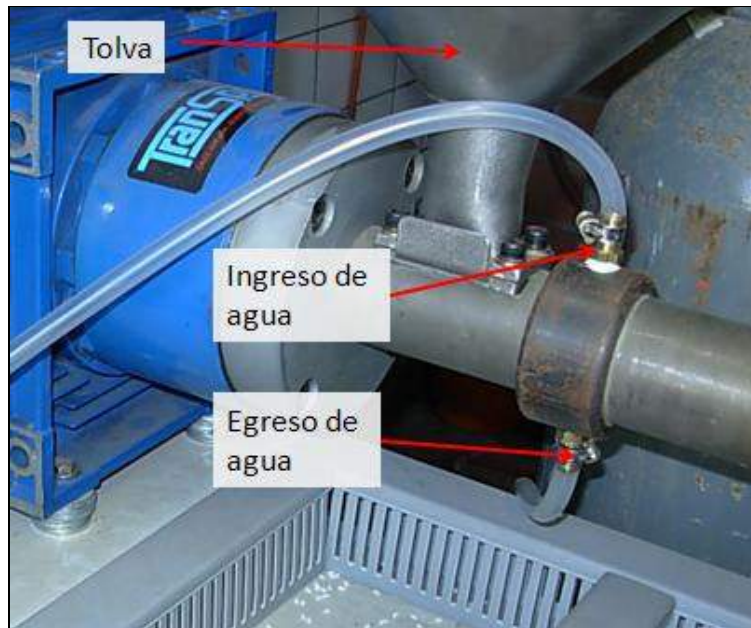


Imagen 7.6 Refrigeración de la tolva

8.6 Resistencias para la bomba de engranajes

Se cambiaron las resistencias de la bomba de presión. Inicialmente, por no conseguir en la ciudad se utilizaron resistencias de plancha, las cuales tardaban mucho en llegar a la temperatura estipulada y se quemaban rápidamente.

8.7 Modificaciones en el mezclador estático

En el mezclador estático se realizaron una serie de cambios. Inicialmente, arrancamos la extrusora con dos juegos de discos, pero el mezclado fue pobre, por lo que se decidió agregar más conjuntos. Quitar los discos no fue nada fácil, hubo que calentar todo el conjunto en una prensa y presionar fuertemente. Lo que ocurrió fue que los discos entraban demasiado justos y se habían trabado. Por esto se pasaron por la piedra a mano todos los discos para que quepan un milímetro más holgado.

Luego se colocaron todos los conjuntos de discos de los que disponíamos, que eran seis conjuntos. En este caso la caída de presión fue muy elevada, por lo que se fresaron las salidas de los discos para que el polímero pueda pasar con más facilidad y la caída de presión no sea tan alta.

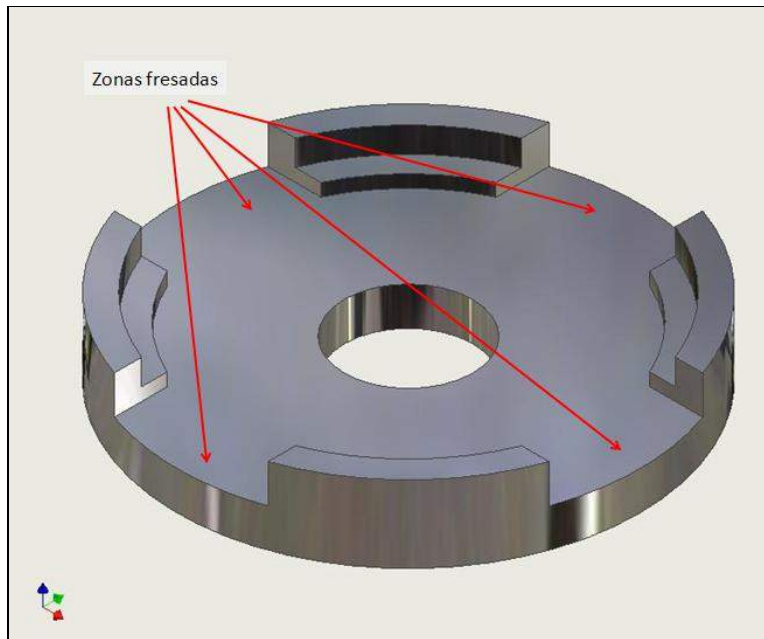


Imagen 7.7 Zona fresada de los discos mezcladores

Luego, para poder cambiar con más facilidad los discos, se agregó una parte al mezclador. Se mando a fabricar una pieza que haga de tapa del mezclador y se perforo totalmente la parte interna, ya que antes una de las bridas tenía un diámetro interno menor al de la camisa para mantener los discos dentro de la camisa.

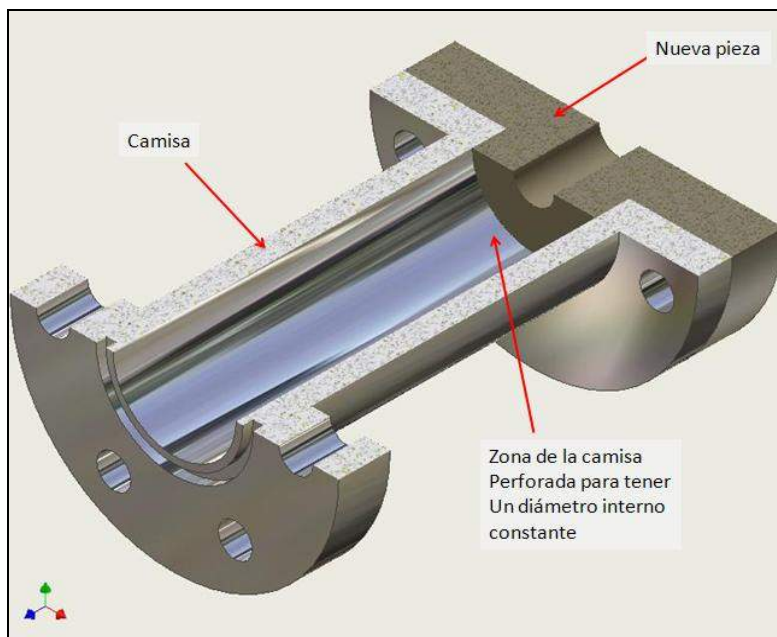


Imagen 7.8 Camisa del mezclador y su nueva tapa

También se agregó el control de temperatura del mezclador estático. Las primeras pruebas fueron realizadas con el mezclador sin calefacción o con una cinta calefactora

controlada por la termocupla ubicada en el soporte de la bomba de engranajes. Con estos métodos no se obtuvieron buenos resultados, controlando con la termocupla de el soporte de la bomba de engranajes la temperatura, el sistema fluctuaba y no se obtenía un caudal constante, y sin calefacción la caída de presión fue demasiada, se rompió la pieza de caucho del manchón y a la bomba de engranajes se le dificultaba muchísimo tener un régimen constante. Para solucionar esto, se hizo un agujero en la brida de la camisa del mezclador estático para colocar una termocupla y se colocaron cuatro resistencias en paralelo de 100 W.

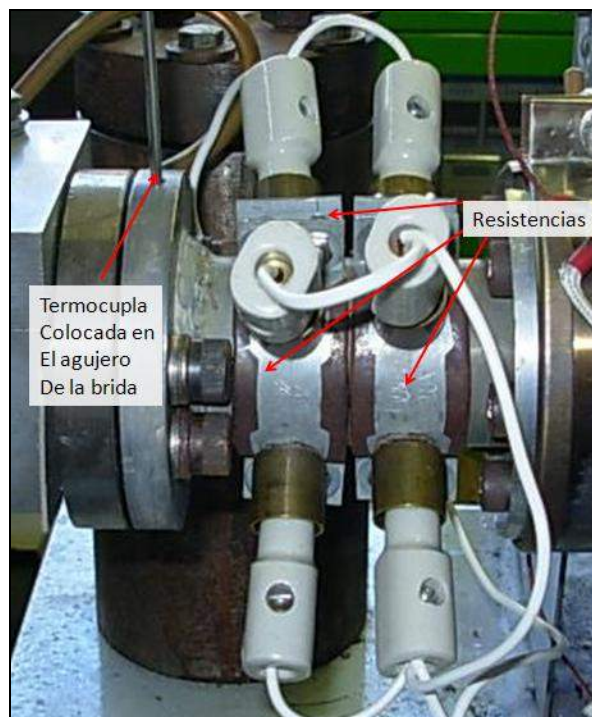


Imagen 7.9 Mezclador con las resistencias y la termocupla

9 DESARROLLO DE UN MEZCLADOR DINÁMICO

Al realizar la puesta a punto de la extrusora, y después de obtener PS espumado con algunas dificultades derivadas principalmente de la caída de presión al pasar el PS por el mezclador estático y el sistema de enfriamiento del cabezal, se decidió diseñar un sistema de mezclado dinámico, con un enfriador. La razón para utilizar un mezclador-enfriador dinámico es que en este tipo de accesorios la velocidad de deformación del líquido es mucho mayor que en el equivalente estático, y se espera entonces arribar a un diseño que mezcle y remueva calor con mayores valores de caudal y menores caídas de presión.

Para obtener una espuma homogénea con una alta densidad de burbujas, una pequeña distribución de tamaño de burbujas, y de pequeño tamaño de celda es importante poder asegurar un mezclado intensivo. El diseño primero del sistema de producción de espumado se había basado en un mezclador estático, para producir el mezclado al forzar al fundido a circular por un camino tortuoso y de pequeño espesor, con estrechamientos y cambios bruscos de velocidad para producir flujo elongacional y mezclado por dispersión. Estos sistemas son mucho más sencillos de construir, armar y operar, pero generan tensiones de corte altas, con los consiguientes aumentos en las caídas de presión. Sin embargo las espumas obtenidas no fueron de la calidad esperada, principalmente por el aumento brusco de la viscosidad del PS al enfriarse.

Luego de haber explorado muchas posibilidades con el mezclador estático, y habiendo realizado todos los cambios de diseño y parámetros de operación mencionados anteriormente, se decidió diseñar un mezclador dinámico.

Simultáneamente que se mejora el mezclado, se refrigerará la zona, para poder controlar mejor la temperatura en la región

9.1 Geometría

El diseño del mezclador corresponde a TWENTE, quien patentó dicha invención. La forma en que el fundido circula por los huecos es lo que produce el mezclado (Imagen 8.1). El anillo cumple la función de transportar el fundido de un hueco a otro del rotor.

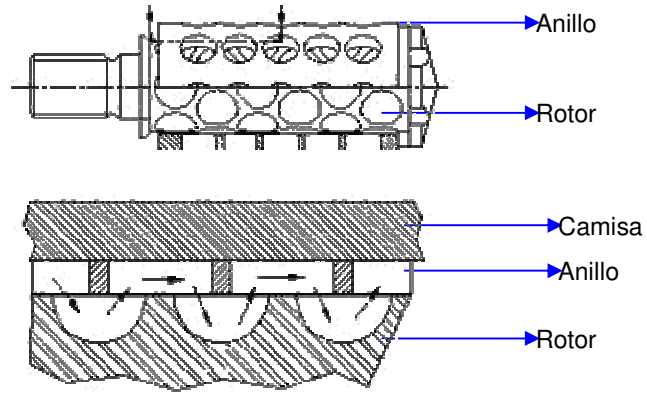


Imagen 8.1 Diagrama funcionamiento del mezclador TWENTE

Sin embargo, el mismo carece de sección de enfriado. La siguiente imagen muestra las diferentes componentes del mezclador dinámico y el enfriador:

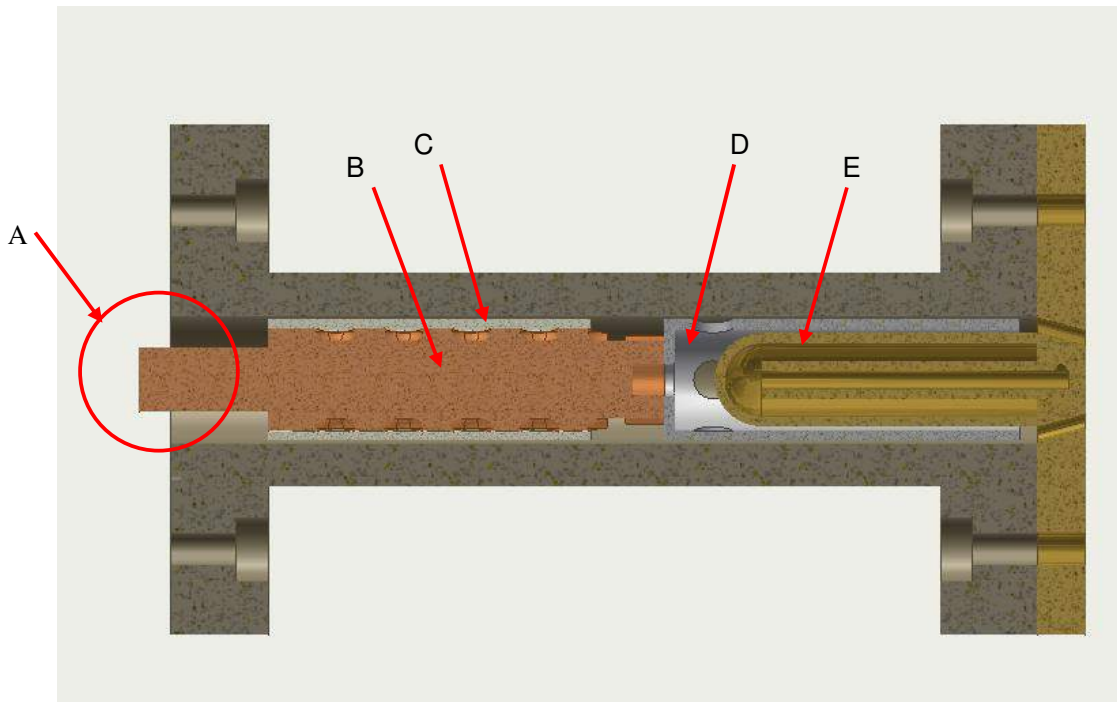


Imagen 8.2 Mezclador dinámico y zona de enfriamiento

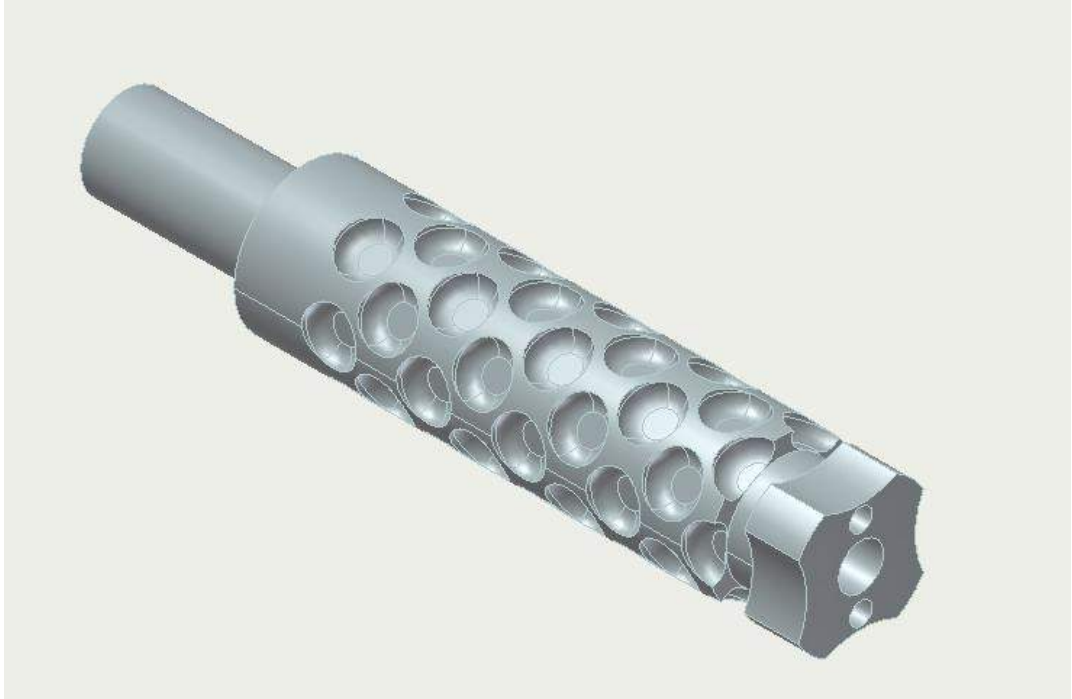


Imagen 8.3 Pieza anexada al tornillo de extrusión. (A y B)

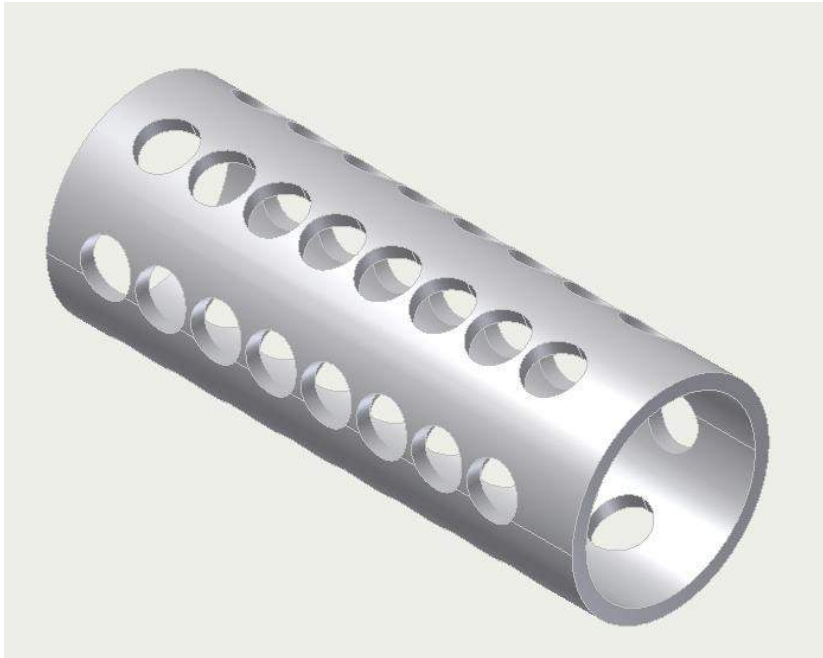


Imagen 8.4 Anillo rotante del mezclador dinámico (C)

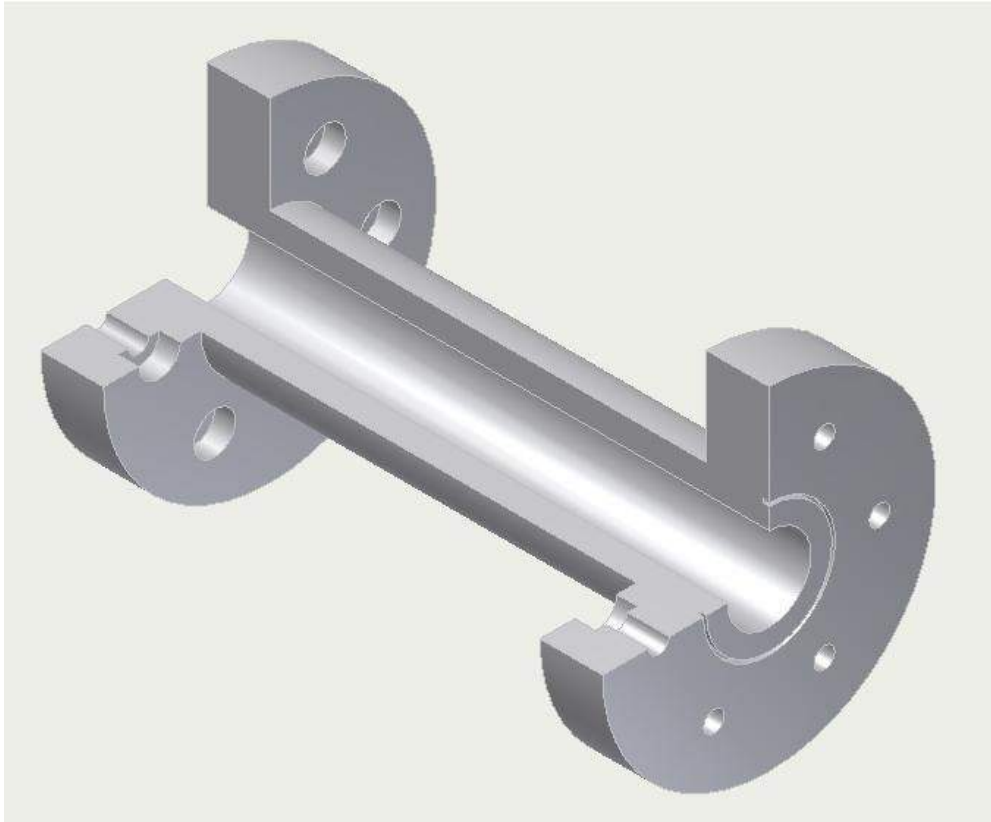


Imagen 8.5 Camisa que recubre el mezclador dinámico y el enfriador

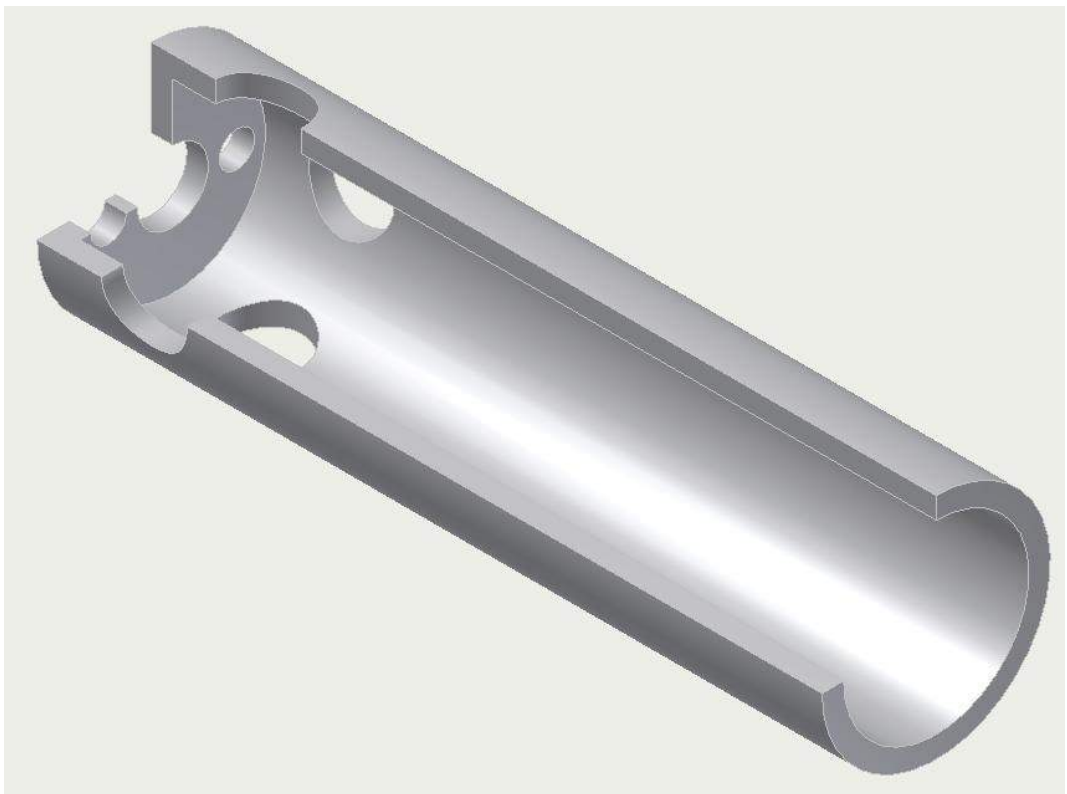


Imagen 8.6 Divisor de flujo en enfriador (D)

El mezclador dinámico consiste en una extensión del tornillo de extrusión (A); es decir, se encuentra adosado coaxialmente a la parte final del mismo. Posee en el eje central (B) pequeños huecos para fraccionar la corriente de líquido en otras corrientes que son recogidas y fraccionadas por el anillo rotante(C), ubicado entre la camisa y la extensión del tornillo, La pieza (C) rota a la mitad de la velocidad del tornillo, variando la comunicación de los huecos del eje y contribuyendo a intensificar el fraccionamiento y recombinación de las corrientes de líquido que constituían el caudal de la extrusora. Al final se reunifica el caudal, con una mínima caída de presión.

Al salir del mezclador el polímero será refrigerado en la zona de enfriamiento. El sistema de refrigeración consiste en un enfriador interno (E) y otro externo. Para la parte interior, la pieza posee conductos, como muestra la imagen 8.7, para permitir la circulación del fluido de refrigeración. En el interior de la camisa y por fuera del enfriador interno una pieza (D), rota, para cizallar el fluido, disminuir la viscosidad por aumento de la velocidad de deformación, e impedir la formación de corrientes preferenciales de polímero fundido, que pueden ser causadas por temperaturas diferentes ó concentraciones de CO₂ diferentes, ó ambas. En la parte externa de la camisa se encuentran canales para circulación de fluido de enfriamiento.

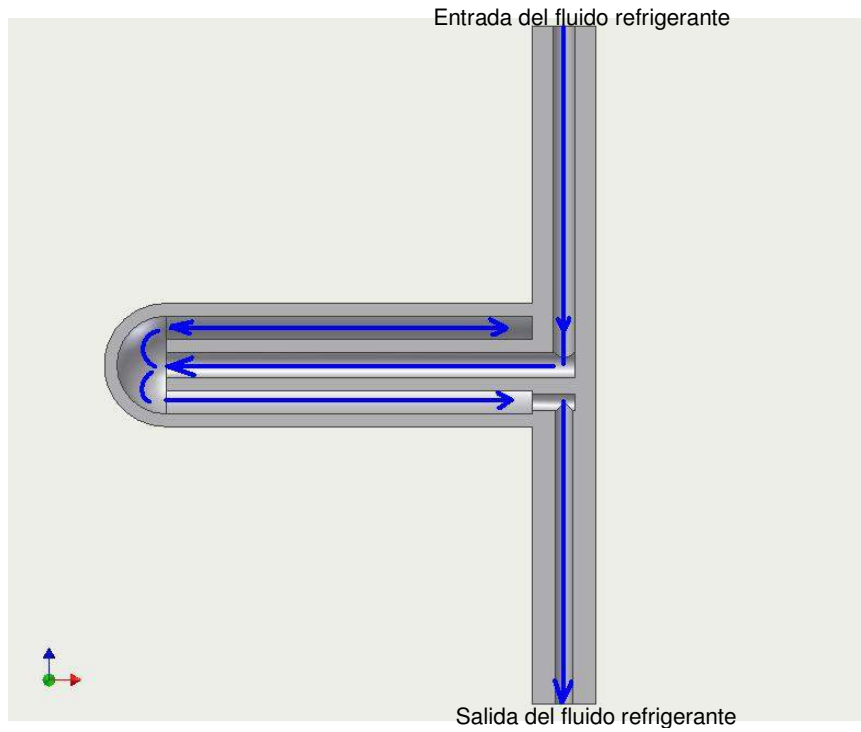


Imagen 8.7 Zona de enfriamiento

La refrigeración debe estar limitada a la zona posterior al mezclador. No debe enfriarse el polímero durante el mezclado, debido a que esto producirá un aumento en la viscosidad, haciendo que el anillo deje de rotar. Esto produciría que no haya mezclado en la región destinada a tal fin. En la imagen 8.8 se muestra el sector que debe permanecer con temperatura y cual no:

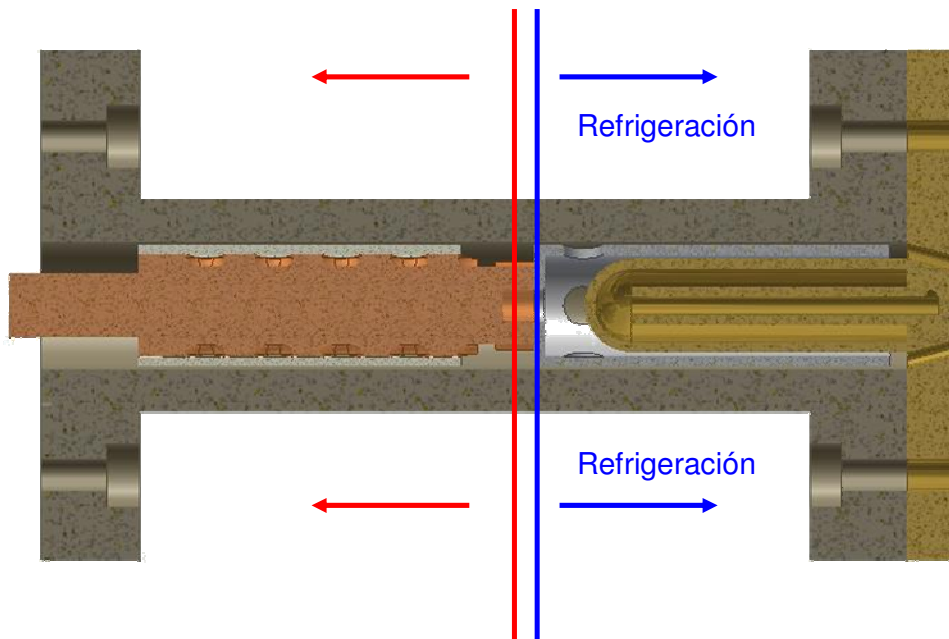


Imagen 8.8 Diagrama del mezclador-enfriador

9.2 Software de simulación

Agustín Sisamon y Marcos Dondero diseñaron un programa de cálculo para la simulación de la etapa de enfriamiento. El mismo consiste en un balance de energía en la capa de líquido, que contempla gradientes de presión, conducción de calor, enfriamiento en las superficies, y generación de calor por cizalla en el líquido. La viscosidad del fundido es calculada en cada punto como función de su temperatura y de la velocidad de deformación, y sucesivas iteraciones permiten arribar a la solución para operación en estado estacionario. Es posible calcular las distribuciones de temperatura, de viscosidad, de velocidad de deformación y de velocidades en todo punto del líquido comprendido en la zona del enfriador. De los datos de distribución de velocidad a la salida se calcula el caudal, y de los datos de distribuciones de temperatura y de velocidad axial se calcula la temperatura de mezclado del líquido a la salida. El cálculo se realiza para una determinada caída de presión que se especifica como parámetro de entrada junto con las medidas que determinan la geometría, y las propiedades físicas y reológicas del material a procesar.

El sistema de cálculo utiliza el principio de diferencias finitas, para poder aproximar una solución a las ecuaciones de transferencia de calor que corresponden al sistema enfriador.

El sistema a aproximar corresponde al fluido circulando por el interior de dos paredes cilíndricas concéntricas. Sin embargo, para simplificar estas ecuaciones a un sistema en dos dimensiones el programa aproxima el flujo con uno de sección rectangular, debido a que en relación al espesor de la película de fundido (G), el diámetro (D) de la pieza es muy grande (Imagen 8.9).

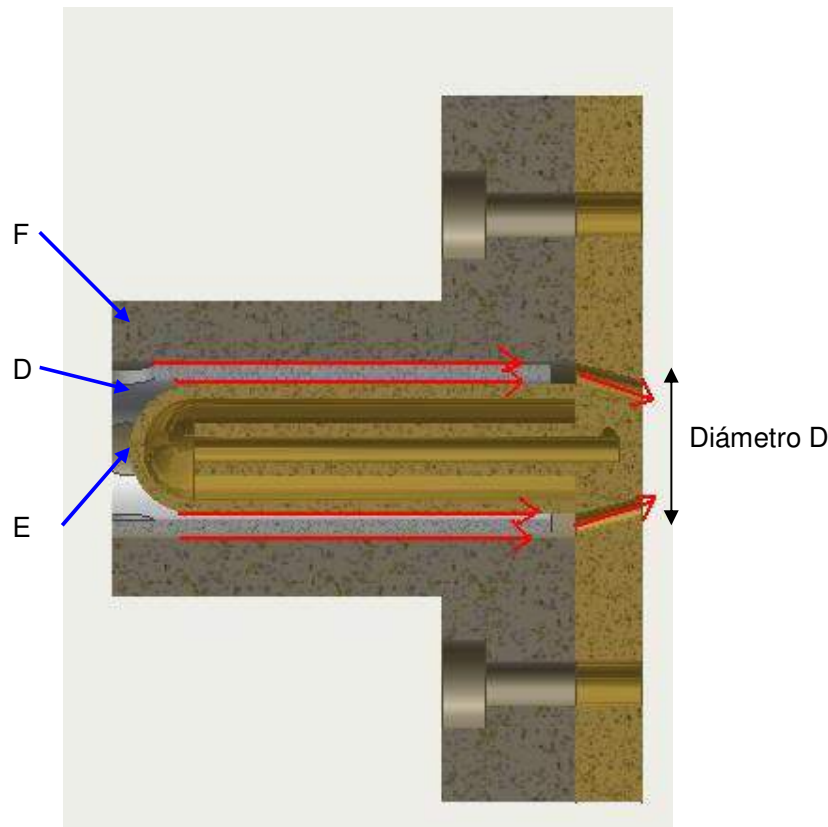
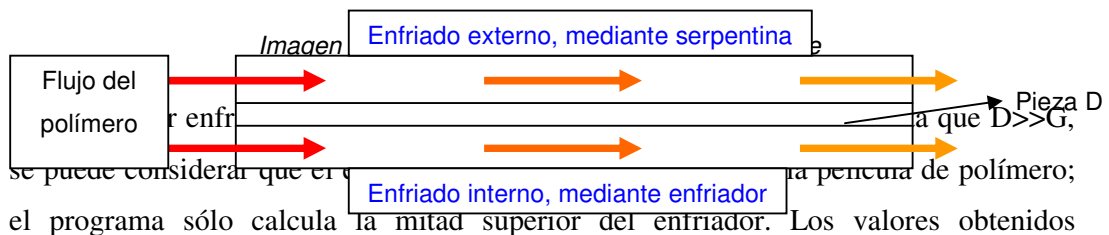


Imagen 8.9 Zona de enfriamiento, el polímero fundido (en rojo) circula entre la pared (F), la pieza estática del enfriador (E), y la rotatoria(D).



corresponden a la mitad del caudal, y el espesor de película colocado en el programa es la distancia entre la camisa y la pieza intermedia, o la pieza intermedia y el enfriador interior.

9.2.1 Ingreso de datos

El ingreso de datos se realiza mediante una ventana imagen XXXX.XY+3, teniendo en cuenta que:

P0; es la Presión a la entrada del fundido [Pa]

PL; es la Presión a la salida del fundido [Pa]

G; es la mitad del espesor de la película de fundido [m]

L; la longitud de la pieza rotante [m]

T0; es la temperatura de pared [K]

T1; es la temperatura con la que ingresa el fundido [K]

Diámetro; es el diámetro de la pieza rotante [m]

RPM; es la velocidad con la que gira el tornillo de extrusión

The screenshot shows the FHES software interface with the following data entered:

- Geometría y Proceso:** L [m] = 0.15, G [m] = 0.002, Po [Pa] = 30000000, PL [Pa] = 26000000, Vo = 0.08378.
- Temperaturas:** T0 [K] = 400, T1 [K] = 473.
- Dimensiones:** Diámetro (m) = 0.04, RPM = 40.
- Modelo de Viscosidad (Cross-WLF):** D1 [Pa·s] = 1000000000000000, n = 0.21, Tau* [Pa] = 70000, A1 = 29.9, A2 = 31.1, T* [K] = 350.
- Propiedades del material:** k [W/(m·K)] = 0.185, rho [kg/m³] = 1100, Cp [J/(kg·K)] = 2000.

Imagen 8.11 Captura de pantalla de la ventana principal del software

También es necesario completar los datos del material, como parámetros de Cross WLF, y propiedades térmicas (conductividad, k y capacidad calorífica, C_p), y la densidad (ρ). Estos datos se utilizan para calcular la dependencia de la viscosidad con la temperatura, y para las ecuaciones de transferencia de calor.

9.2.2 Resultados de la simulación

El programa parte de un perfil de velocidades y de temperaturas impuesto. Utilizando el método de diferencias finitas, obtiene una posible solución. Luego compara si la solución obtenida difiere mucho del valor inicial tomado. Si la aproximación inicial está lejos del valor final obtenido, el programa repite los cálculos, partiendo de los ya calculados. De esta manera cuando los valores iniciales son iguales a los calculados (o cercanos) el sistema convergió a una solución.

Para controlar esto, el software cuenta con dos tipos de corte de la simulación:

1. Por correcciones; Al realizar la cantidad de iteraciones (correcciones) especificada por el usuario, el programa se detiene.
2. Por mínimo error; La diferencia entre el valor inicial y el valor calculado es menor que el valor especificado por el usuario el software interpreta que el valor obtenido es suficientemente bueno como para ser tenido en cuenta.

La imagen 8.12 muestra la ventana de resultados, en la cual se tiene lectura de los diferentes calores involucrados en el proceso, así el caudal, y la temperatura de mezcla. El gráfico muestra dos factores de correlación, uno es el factor de presión y el otro de cizalla, que representan cual es la convergencia de la solución en las sucesivas iteraciones.

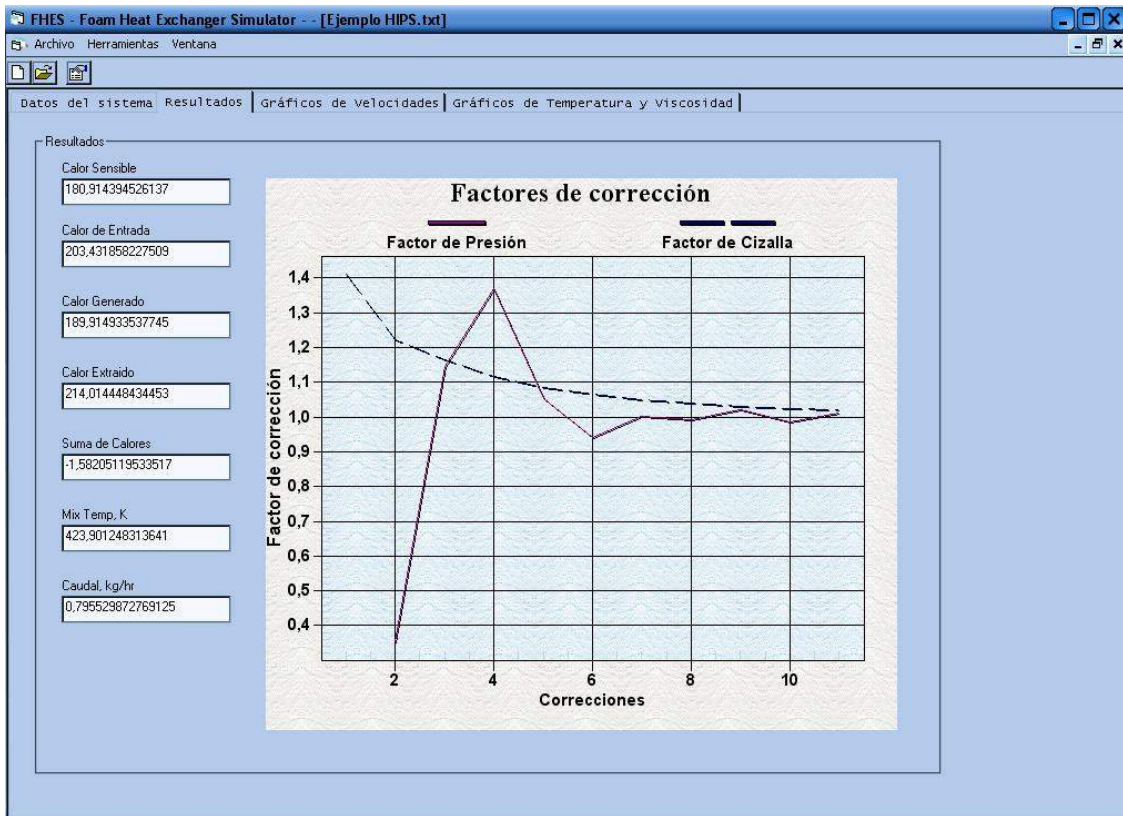


Imagen 8.12 Captura de Pantalla de la pantalla de resultados

El programa devuelve valores de Caudal, en kg/h, y de temperatura de mezclado (Mix Temp) en K. En esta ventana podemos ver además la calidad de la aproximación. Cuanto más se acerquen los valores de los factores, mejor será la estimación de la solución.

A su vez el programa permite observar perfiles de componentes de velocidad, de temperatura, de velocidad de deformación y de viscosidad, desde la entrada del fundido en el enfriador hasta la salida del mismo:

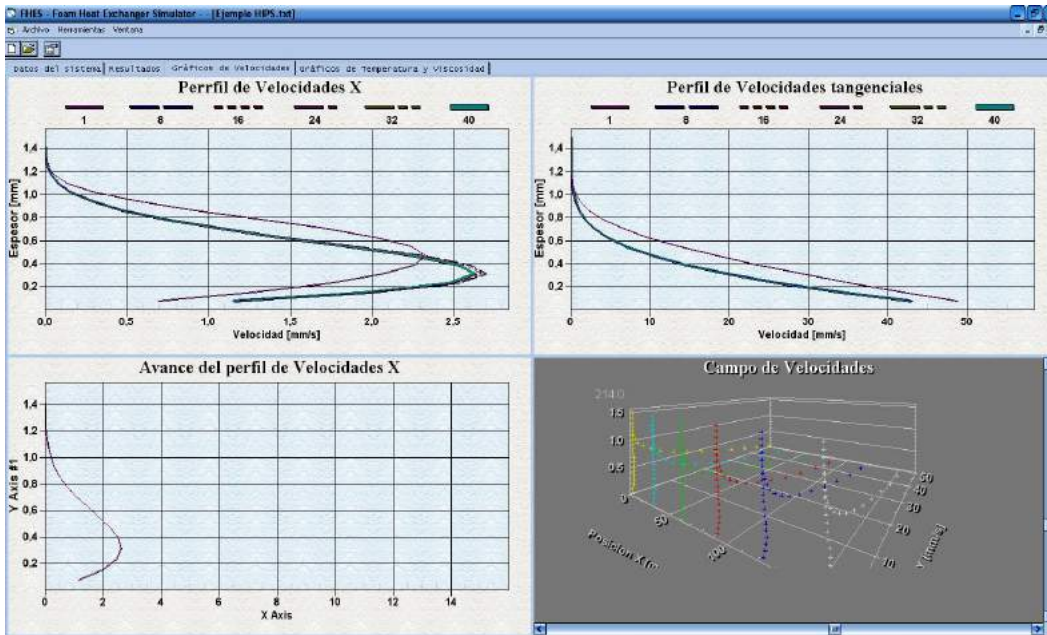


Imagen 8.13 Captura de Pantalla de la pantalla de perfiles de velocidades

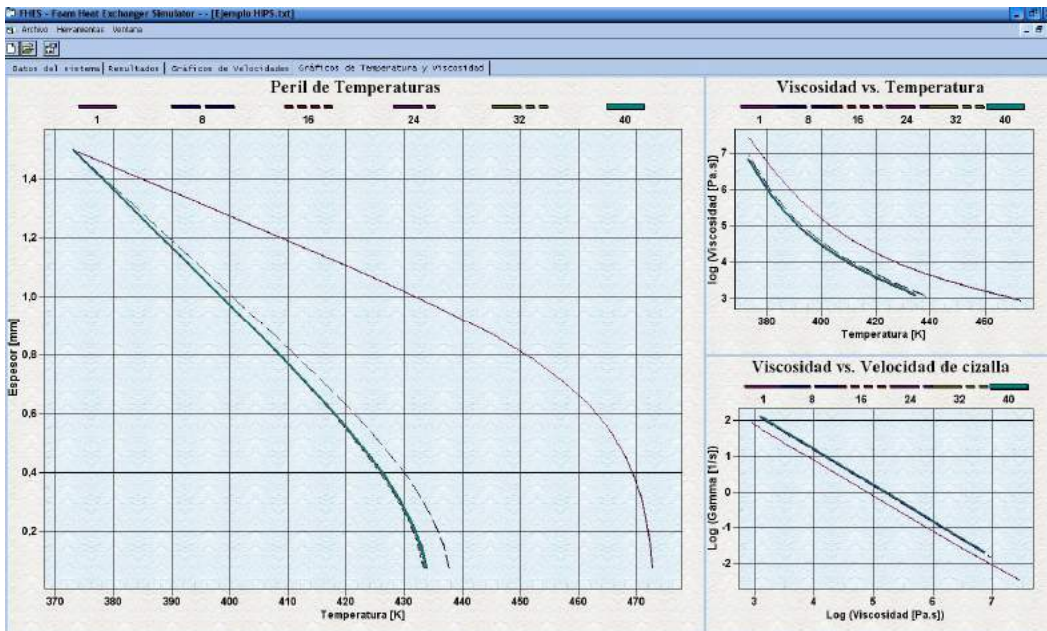


Imagen 8.14 Captura de Pantalla de la pantalla de perfil de temperaturas

Como complemento y a modo de corroboración se pueden observar las viscosidades en función de la temperatura, así como la curva de viscosidad en función de la velocidad de corte.

9.3 Simulaciones

El objetivo de utilizar este programa está en poder diseñar la pieza de manera apropiada y con dimensiones tales que la viscosidad del polímero, así como su temperatura y caudal se mantengan dentro de la posible ventana de proceso para su extrusión. La caída de presión es fija e impuesta por el usuario, y corresponde a la diferencia entre la presión de entrada y la de salida. (En este caso se considera que una caída de presión de 4MPa es razonable, porque la extrusora desarrolla fácilmente 40 MPa, y una caída del 10 % no es demasiado).

Las medidas de la geometría, las revoluciones a las que gira el tornillo, y las temperaturas de entrada y salida pueden ser modificadas, para obtener condiciones óptimas de enfriamiento, y caudal. Sin embargo, todas poseen sus límites, debido a operabilidad del proceso, o de factores geométricos y de eficiencia de la pieza.

Las simulaciones se realizaron para PS, PP 1100N, PP 1102H y PP 2500E, para los cuales fueron calculados previamente los parámetros del modelo Cross WLF. El objetivo fue el de alcanzar para una misma geometría valores aceptables de caudal y de temperatura de mezcla, siendo esta la temperatura en promedio, y pesada por la velocidad, a la salida del enfriador. (La caída de temperatura esperada es de 20°C, y el caudal debe estar cercano a los 10 kg/h, ya que la extrusora posee ese límite de producción).

Las propiedades térmicas utilizadas fueron:

	PS	PP
$k \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	0.185	0.234
$\delta \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	1100	912
$C_p \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$	2000	2803

Tabla 8.1 Propiedades del poliestireno y los diferentes polipropilenos

Tanto las variables geométricas como los resultados fueron tabulados:

						PS	PP 1100N	PP 1102H	PP 2500E
--	--	--	--	--	--	----	----------	----------	----------

L [m]	G [m]	T0 [K]	T1 [K]	D [m]	rpm	Tmix [K]	Q [kg/h]	Tmix [K]	Q [kg/h]	Tmix [K]	Q [kg/h]	Tmix [K]	Q [kg/h]
0,15	0,0015	373	473	0,04	20	412	0,94	387	1,8	392	1,28	402	0,9
0,15	0,002	373	473	0,04	20	417	2,06	392	5,04	395	2,94	407	1,1
0,15	0,0025	373	473	0,04	20	423	4,76	437	23,92	407	7,1	412	3,1
0,2	0,0025	373	473	0,04	20	421	2,84	401	9,04	397	4,14	411	2,2
0,2	0,0015	373	473	0,04	30	423	1,18	396	1,9	403	1,34	418	0,9
0,15	0,0015	373	473	0,04	30	424	1,6	396	2,7	403	1,88	419	1,1
0,15	0,0015	373	473	0,04	40	433	2,38	404	3,68	414	2,54	435	1,6
0,15	0,002	373	473	0,045	20	420	2,78	396	6,56	399	3,72	412	2,2
0,15	0,0015	373	473	0,045	40	438	3,18	409	4,74	420	3,24	443	2,2
0,15	0,002	373	473	0,045	40	446	7,78	426	14,96	429	7,7	452	4,1
0,15	0,002	393	473	0,045	40	453	9,54	438	18,46	439	8,92	462	4,1
0,15	0,002	393	463	0,045	40	452	8,92	433	16,12	438	8,52	462	4,1
0,15	0,0025	373	473	0,045	40	457	17,22	452	41,04	444	16,4	461	8,1
0,15	0,0025	373	473	0,045	30	445	12,14	447	35,08	431	12,82	441	6,1
0,15	0,0025	373	473	0,045	20	427	6,68	440	28,46	412	8,84	417	4,1
0,2	0,0025	373	473	0,045	30	439	7,26	424	17,94	420	8,06	439	4,1
0,25	0,0025	373	473	0,04	20	420	2,04	392	4,88	398	3,06	412	0,9

Tabla 8.2 Variables geométricas utilizadas y resultados de las simulaciones

Las distintas variables afectan los resultados de manera consistente:

L: Que es la longitud de la pieza, al ser aumentada produce un descenso en el caudal, y una mayor caída de la temperatura, debido a que es mayor el área a la cual está expuesto el fundido polimérico. Este efecto no es muy notorio, por lo cual no resulta conveniente alargar la pieza. Cuanto mayor es esta longitud, mayor es la generación de calor en la zona final de la pieza:

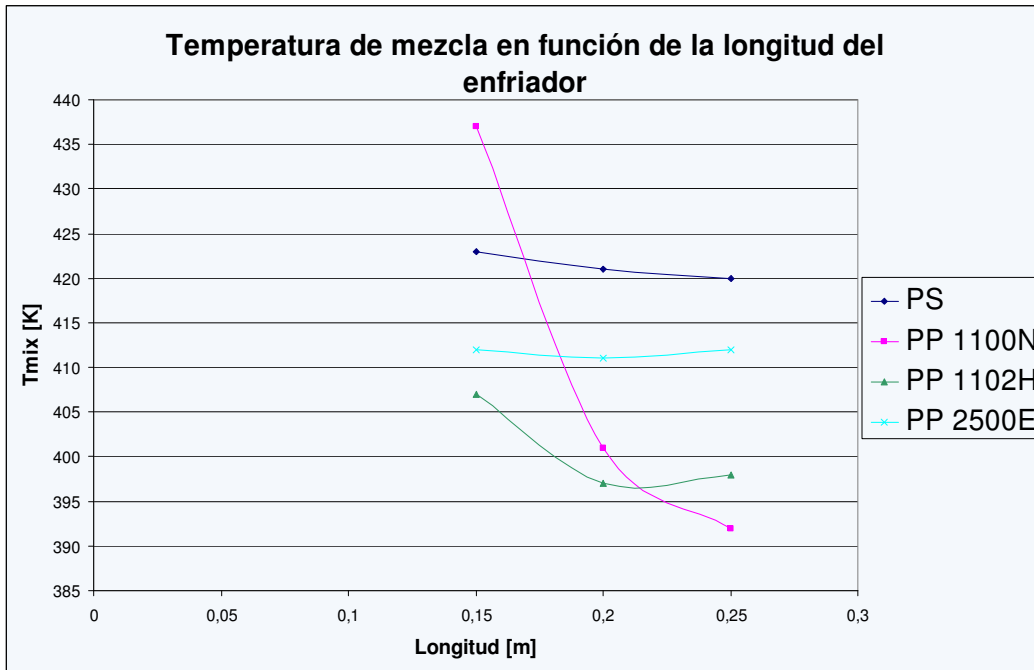


Imagen 8.15 Variación de la Temperatura de mezcla en función de la longitud del enfriador. Tomando $G=0.0025m$, $D=0.04m$, $T_0=373K$, $T_1=473K$ y $rpm=20$

La imagen 8.15 muestra, además de la variación de la temperatura de mezcla a la salida en función de la longitud del enfriador, cómo el peso molecular del polímero modifica esta relación. Para el caso del PP 1100N, polímero de menor peso molecular, hay una caída importante en la temperatura, esto se debe a que la generación de calor interna por cizalla cae debido al aumento en la longitud, y a que este polímero posee bajo peso molecular, y asociado a esto, baja viscosidad. En cambio el PS, y el PP 2500E, ambos con mayor peso molecular, parecen inalterables con la longitud de enfriado. Esto es debido a que su alta viscosidad, hace que el calor producido por cizalla mantenga la temperatura y no se produzca un descenso de la misma por el aumento en la longitud del enfriador (lo cual produce mayor enfriado exterior).

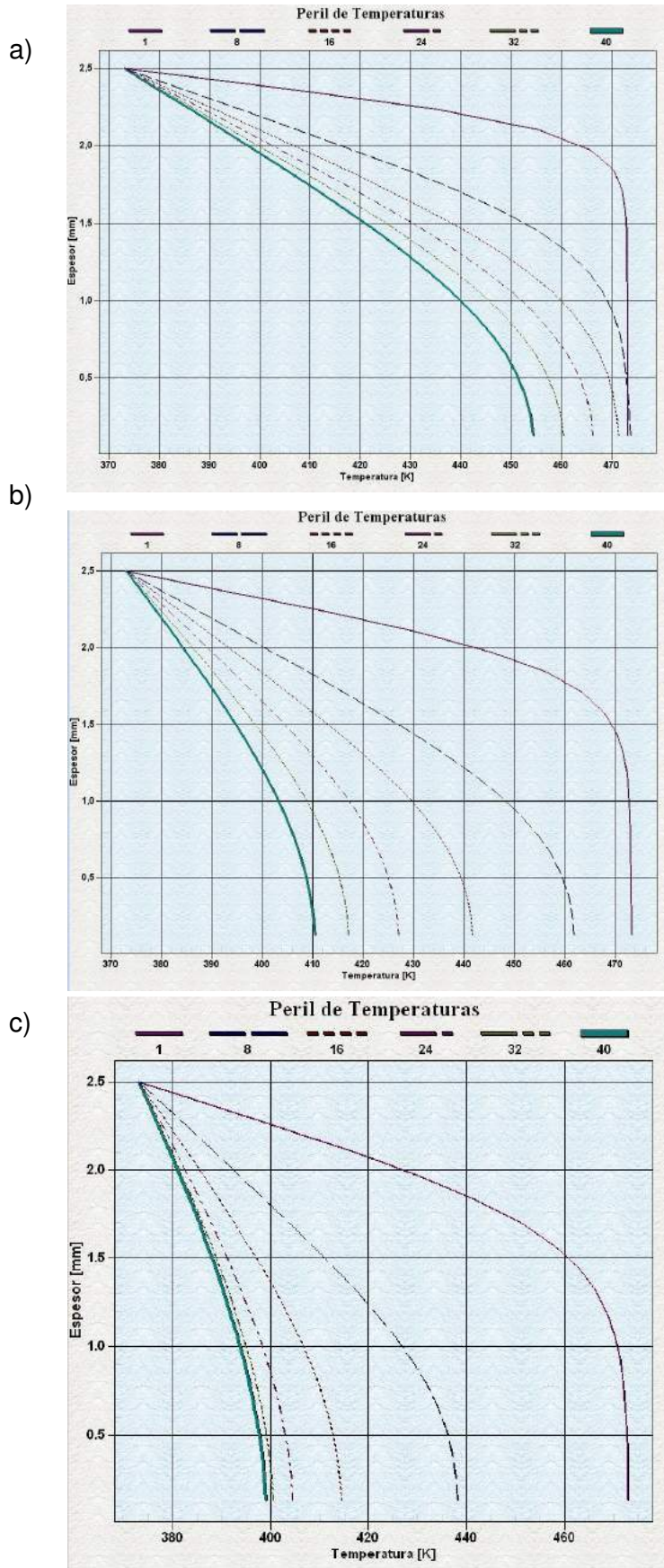


Imagen 8.16

Perfiles de temperaturas para el PP 1100N;

- a) $L=0.15m$
- b) $L=0.2m$
- c) $L=0.25m$

Con :
 $G=0.0025m$
 $D=0.04m$
 $T_0=373K$
 $T_1=473K$
 $rpm=20$

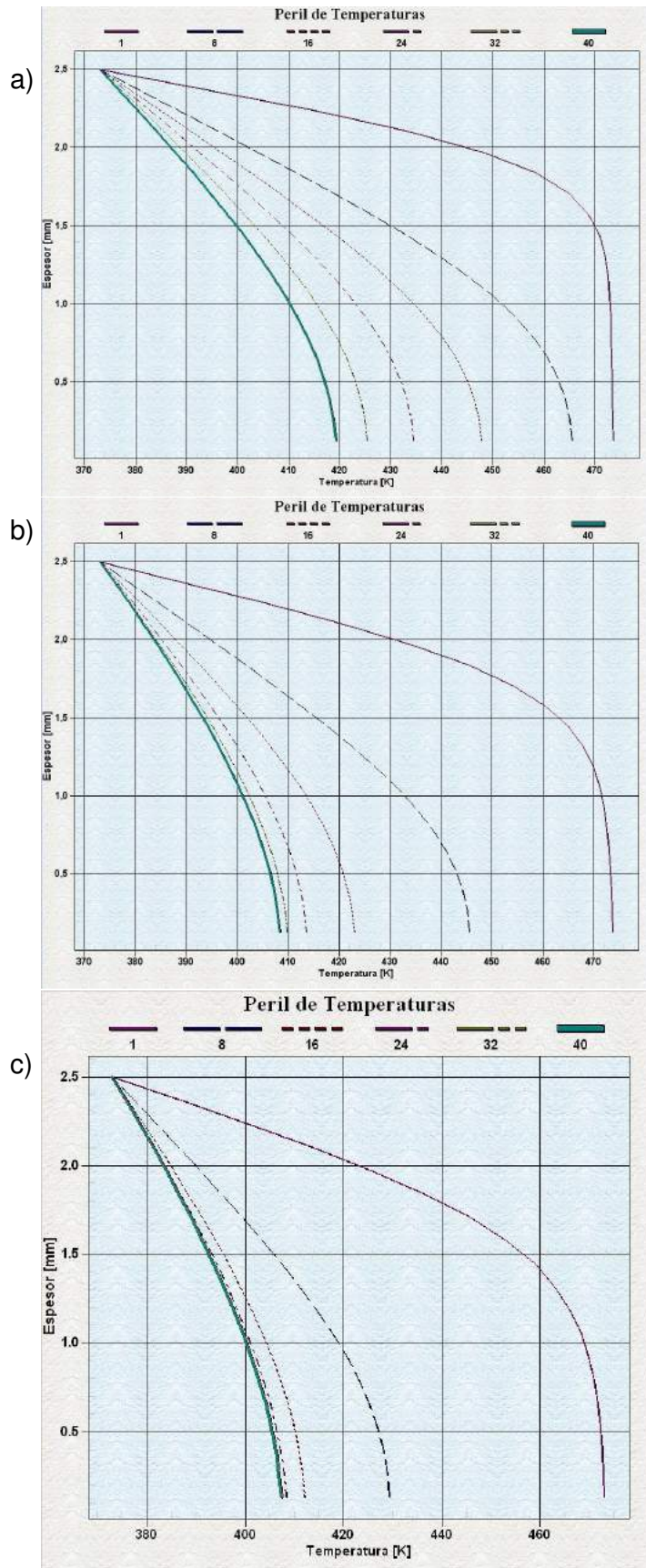


Imagen 8.17

Perfiles de temperaturas para el PP 1102H;

a) $L=0.15m$

b) $L=0.2m$

c) $L=0.25m$

Con :
 $G=0.0025m$
 $D=0.04m$
 $T_0=373K$
 $T_1=473K$
 $rpm=20$

Se puede apreciar como al aumentar la longitud la temperatura desciende, pero luego de un valor la temperatura aumenta su magnitud.

A su vez, en el perfil de temperatura, se aprecia la evolución de la temperatura con la posición del fundido a lo largo de la longitud (Imagen 8.16 y 8.17). Se puede observar como al alcanzar un equilibrio de temperatura, el perfil se mantiene constante en lo que resta de la longitud, por lo cual es en vano aumentar esta dimensión para producir un mayor descenso de temperatura. La zona deseable de operación es aquella en que el polímero se mantiene descendiendo la temperatura, por lo que la longitud óptima es aquella en que la temperatura se enfría solamente y no aumenta en ninguna posición.

G: Representa el espesor de película de fundido que circula; es la distancia entre la camisa y la pieza intermedia (y es también la distancia entre la pieza intermedia y la pieza del enfriador interna). Al aumentar su valor, aumenta el caudal, debido a que más cantidad de fundido atraviesa la sección, pero también ocurre un aumento en la temperatura de mezcla. Al pasar mayor cantidad de polímero mayor es la cantidad de calor a remover.

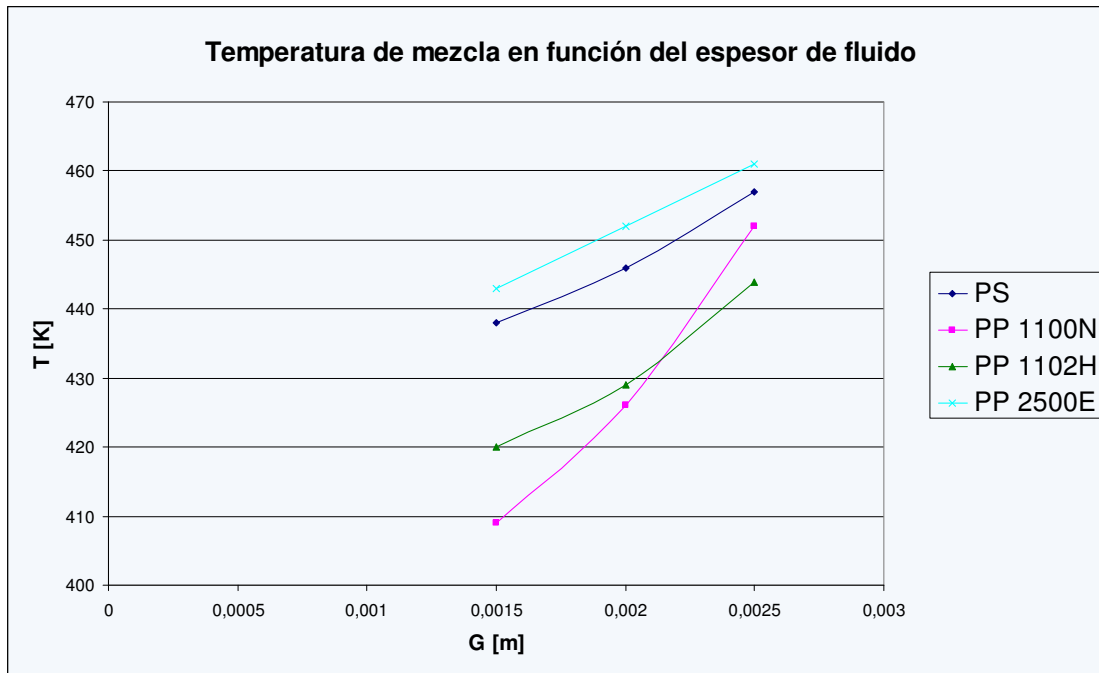


Imagen 8.18 Variación de la Temperatura de mezcla en función de la longitud del enfriador. Tomando $L=0.15m$, $D=0.045m$, $T_0=373K$, $T_1=473K$ y $rpm=40$

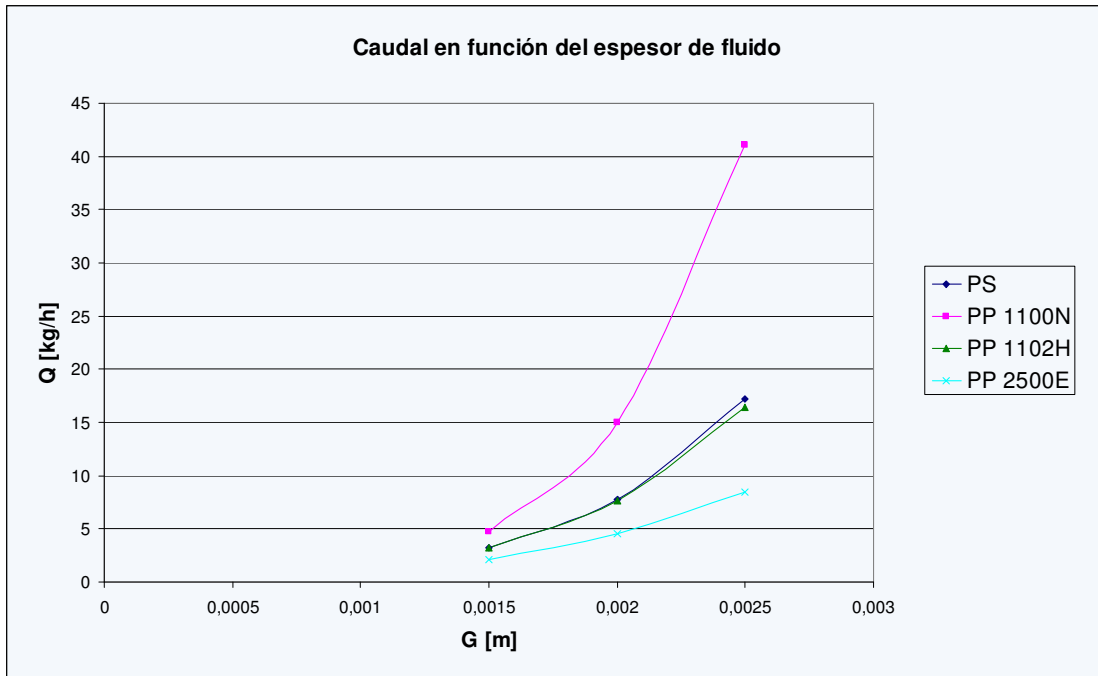


Imagen 8.19 Variación del caudal en función de la longitud del enfriador. Tomando $L=0.15m$, $D=0.045m$, $T_0=373K$, $T_1=473K$ y $rpm=40$

Y para otras condiciones de operación:

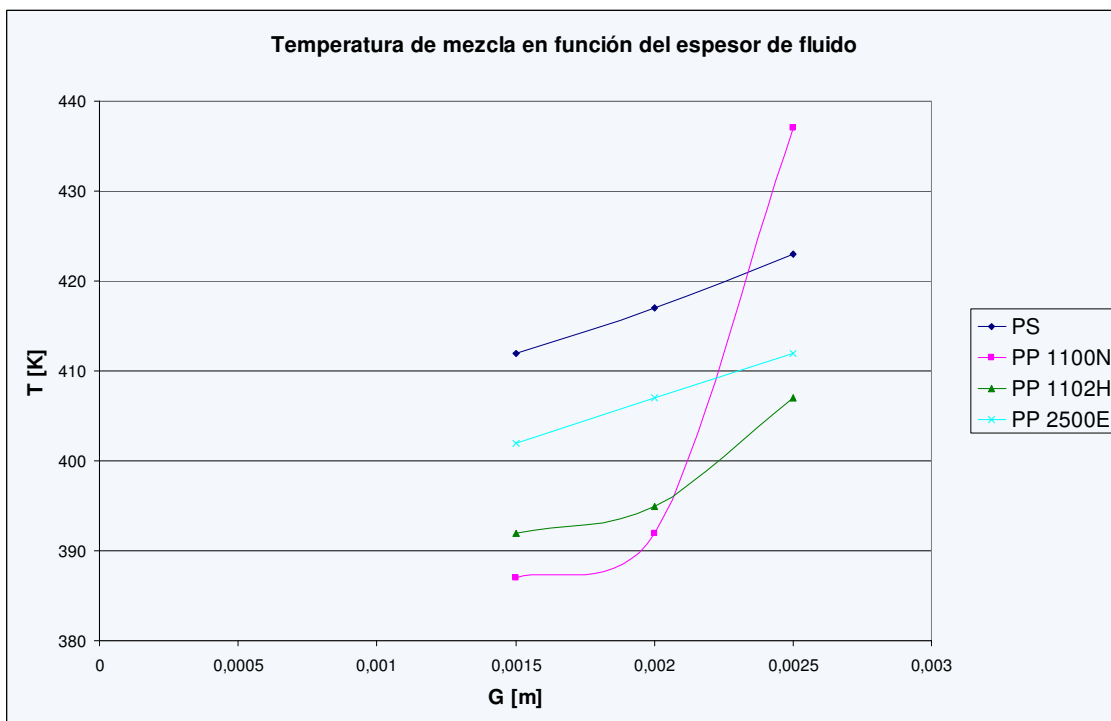


Imagen 8.20 Variación de la temperatura de mezcla en función de la longitud del enfriador. Tomando $L=0.15m$, $D=0.04m$, $T_0=373K$, $T_1=473K$ y $rpm=20$

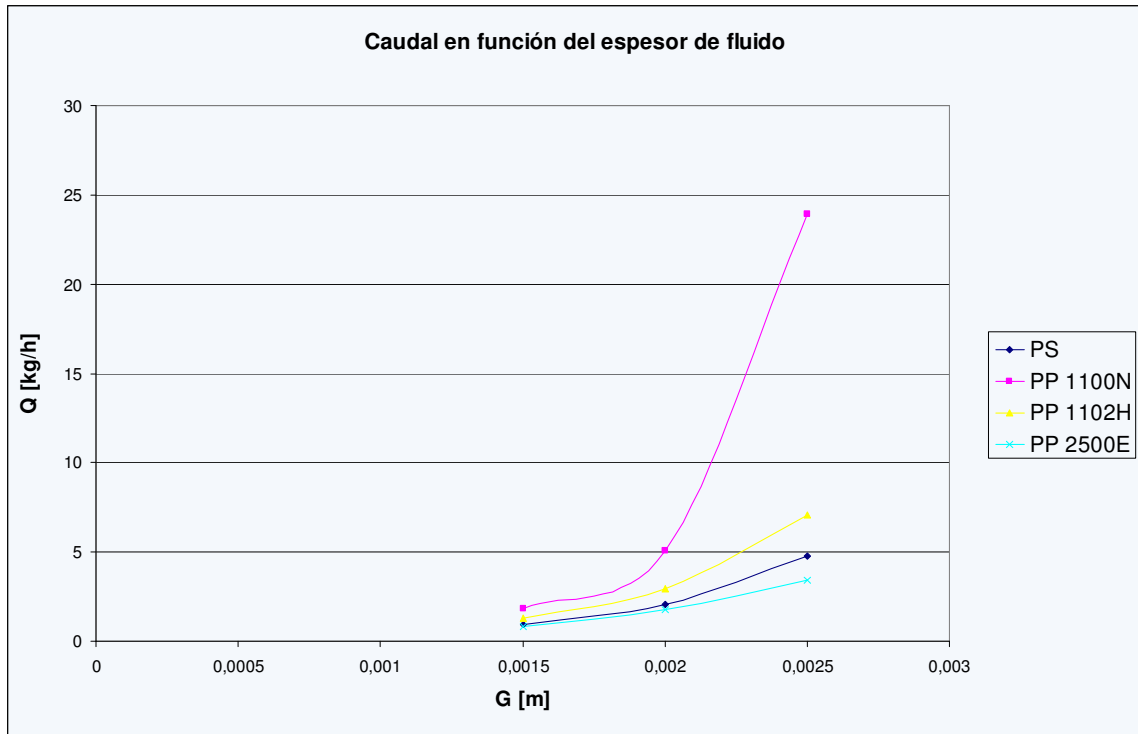


Imagen 8.21 Variación del caudal en función de la longitud del enfriador. Tomando $L=0.15m$, $D=0.04m$, $T_0=373K$, $T_1=473K$ y $rpm=20$

T0: Al disminuir la temperatura de pared disminuye la temperatura de mezcla del fundido, a expensas de disminuir el caudal, debido a un aumento en la viscosidad. Sin embargo, este valor posee un límite. Si la temperatura baja demasiado el fundido se torna demasiado viscoso, y en lugar de disminuir la temperatura la misma aumenta, debido a que hay generación de calor por el roce interno.

T1: La temperatura de entrada del polímero puede facilitar el enfriado, pero es preferible mantener la temperatura de entrada en aproximadamente $200^{\circ}C$, que es una temperatura típica de salida del mezclado dinámico.

D: Es un diámetro característico de la pieza. Al ser tan pequeño el espesor de fundido, el diámetro sobre él, o debajo de él puede considerarse constante. Sin embargo, el aumentar esta medida, produce un aumento en el caudal, debido a que aumenta el área transversal de fundido. La temperatura de mezcla aumenta su valor, pero en menor medida que al cambiar otras variables.

Rpm: Velocidad de rotación del tornillo. Es directamente proporcional con la velocidad de avance del fundido polimérico. Este parámetro no es geométrico, pero nos

permite controlar la ventana operacional en la cual estamos situados. Al aumentar su valor, el caudal aumenta, y también la temperatura de mezcla, debido a que el polímero pasa por el enfriador con mayor velocidad, sin llegar a enfriarse tanto como a velocidades menores.

En caso de no poder determinar una ventana de proceso apropiada es posible cambiar el polímero utilizado para mejorar sus propiedades, y así obtener caídas de temperatura y caudal dentro de los valores requeridos. La imagen 8.22 muestra la relación entre el caudal y el melt index de los diferentes PP.

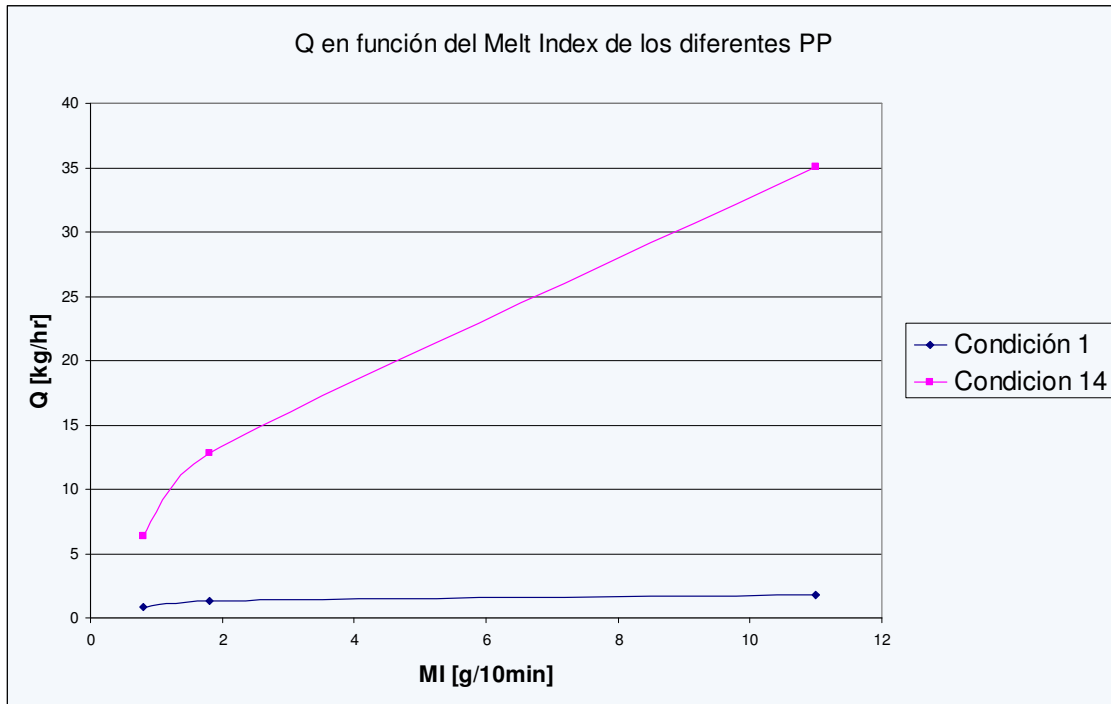


Imagen 8.22 Variación del caudal, con el MI de los distintos PP.

MI de PP 1100N = 11 g/10min

MI de PP 1102H = 1.8 g/10min

MI de PP 2500E = 0.8 g/10min

Para dos condiciones de simulación diferentes:

Condición 1: $L=0.15m$, $G=0.0015m$, $D=0.04m$, $T_0=373K$, $T_1=473K$ y $rpm=20$

Condición 14: $L=0.15m$, $G=0.0025m$, $D=0.045m$, $T_0=373K$, $T_1=473K$ y $rpm=30$

Una posibilidad es la de realizar una mezcla de polipropilenos para obtener una curva de viscosidad vs velocidad de deformación, tal que la mezcla se comporte de

manera tal de optimizar el procesamiento. Para ello es necesario que a valores de pequeñas velocidades de deformación posea una alta viscosidad, ya que será ésta la condición de salida del cabezal de extrusión, y es preciso elevar la viscosidad lo más posible, para la formación de la estructura celular de la espuma. A su vez es importante que a altas velocidades de deformación la viscosidad descienda considerablemente, para que el mezclado resulte más efectivo.

La imagen 8.23 esquematiza el objetivo de realizar una mezcla de polipropilenos.

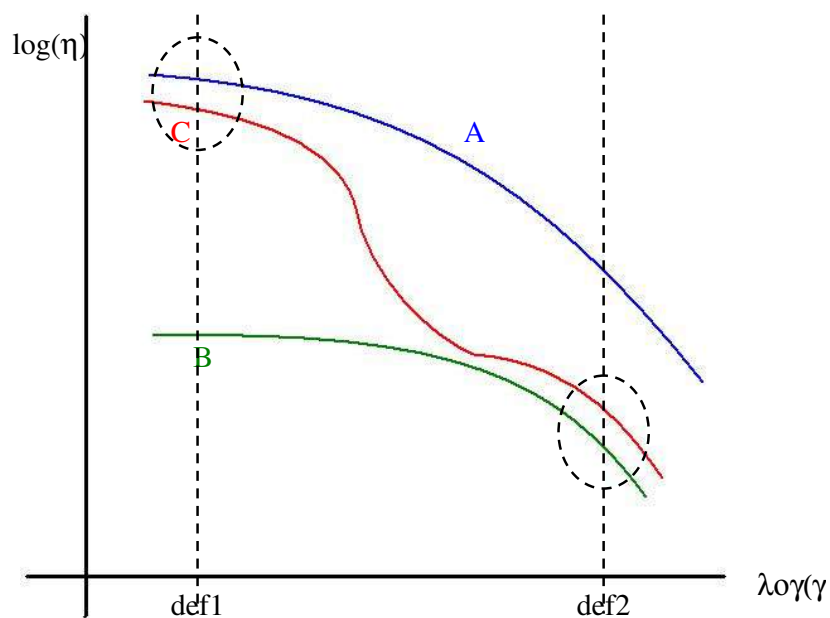


Imagen 8.23 Esquema de el efecto de la mezcla de polímeros.

El polímero A, posee mayor peso molecular que el polímero B, dando curvas de viscosidad vs velocidad de deformación como las del diagrama. Una mezcla C, de ambos, produciría una alta viscosidad a bajas velocidades de deformación (def1) y una baja viscosidad a altas velocidades de deformación (def2), condiciones que son deseables para este tipo de procesamiento.

De acuerdo a lo simulado se pudo determinar que las posibles variables de proceso que conducen a valores de caudal y de caídas de temperatura adecuados para este proceso son, para cada material:

	L [m]	G [m]	T0 [K]	T1 [K]	D [m]	rpm	Tmix [K]	Q [kg/h]
PS	0,15	0,0020	393	473	0,045	40	453	9,54
PP1100N	0,20	0,0025	373	473	0,040	20	401	9,04
PP1102H	0,15	0,0025	373	473	0,045	30	431	12,82
PP2500E	0,15	0,0025	373	473	0,045	30	441	6,4

Tabla 8.3 Valores de simulación con resultados en la ventana de proceso

Para mejorar la ventana de proceso se puede hacer:

- Mezcla de polímeros para lograr valores de viscosidad apropiados para cada velocidad de corte (como se mencionó anteriormente)
- En lugar de utilizar una pieza de sección cilíndrica, diseñar una pieza cónica. De esta manera, la geometría de la pieza puede ser variada para un mismo 'set' de piezas, ya que modificando las distancias de las piezas internas, los valores de G cambian.

10 RESULTADOS

A continuación se mostrarán imágenes tomadas con una lupa de las espumas obtenidas. Mejores fotografías se obtendrán en el futuro con microscopía y métodos de corte de la espuma más adecuados

En la siguiente tabla se muestran los parámetros de operación relevados durante la producción de las espumas.

	T1	SP1	T2	SP2	T3	SP3	T4	SP4	T5	Tmezcl	P1	P2	RPM1	RPM2	RPM3
1	164	90	174	150	187	190	175	170	131	-	930	1000	-	-	-
2	166	90	175	150	192	190	174	170	131	-	1030	1060	-	-	-
3	166	90	176	150	188	190	174	170	130	-	1400	1390	-	-	-
4	167	90	174	150	191	190	169	170	129	-	750	920	-	-	-
5	167	90	174	150	191	190	169	170	133	-	750	920	-	-	-
6	166	90	175	150	189	190	169	170	134	-	610	110	-	-	-
7	167	90	176	150	189	190	169	170	134	-	650	1050	-	-	-
8	150	150	175	175	187	190	176	175	135	165	2640	1130	14	40	40
9	150	150	175	175	182	180	176	175	125	150	2500	1025	14	40	40

Tabla 9.1

SP1, SP2, SP3, SP4 y SP5 son los set points utilizados en el programa, T1, T2, T3, T4 y T5 son las temperaturas de las zonas uno, dos, tres, cuatro y cinco respectivamente. P1 es la presión antes de la bomba de engranajes y P2 es la presión luego de la bomba. T_{mezcl} es la temperatura del mezclador, esta temperatura no existe en los primeros 7 ensayos, ya que fue una modificación hecha luego. RPM1 es la velocidad de la bomba de engranajes, RPM2 es la velocidad del tornillo de la extrusora y RPM3 son los ciclos por minuto de a bomba de líquido.



Foto 9.1 Espuma número 1

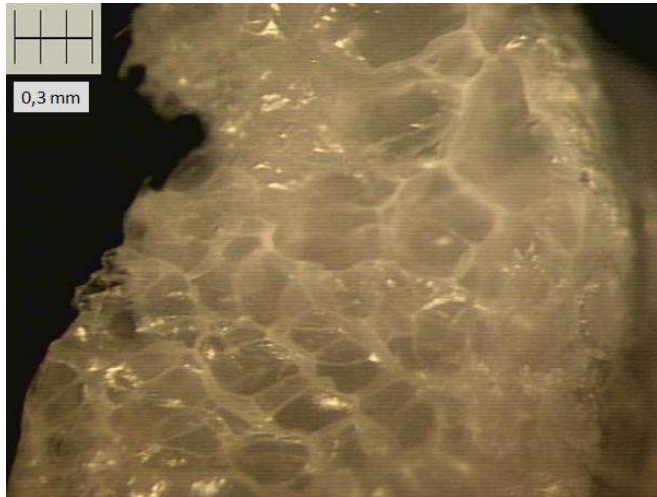


Foto 9.2 Espuma número 2



Foto 9.3 Espuma número 3

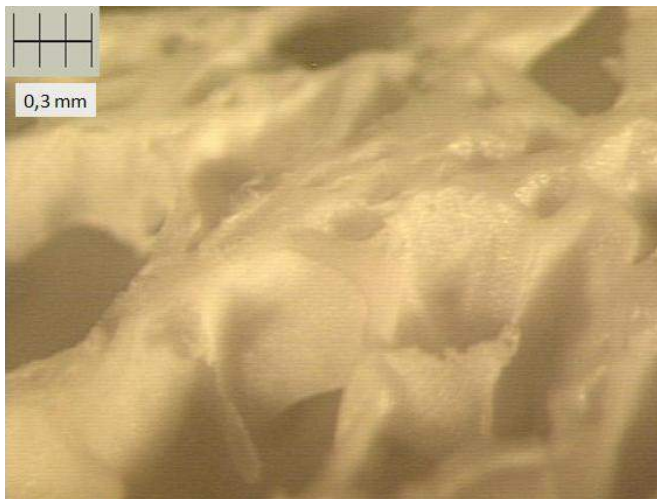


Foto 9.4 Espuma número 4

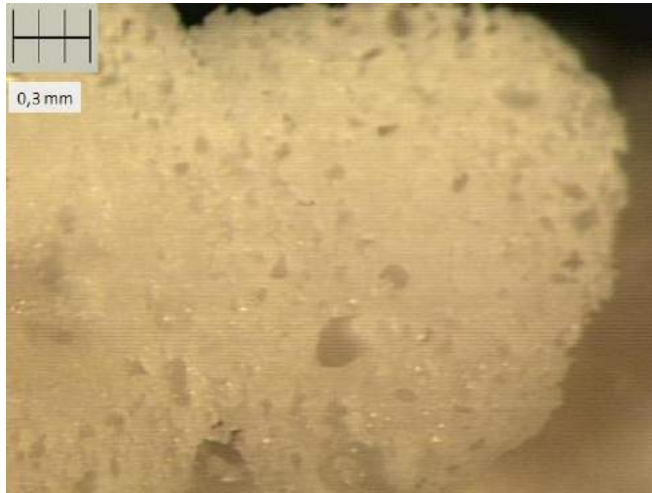


Foto 9.5 Espuma número 5



Foto 9.5 Espuma número 6



Foto 9.7 Espuma número 7

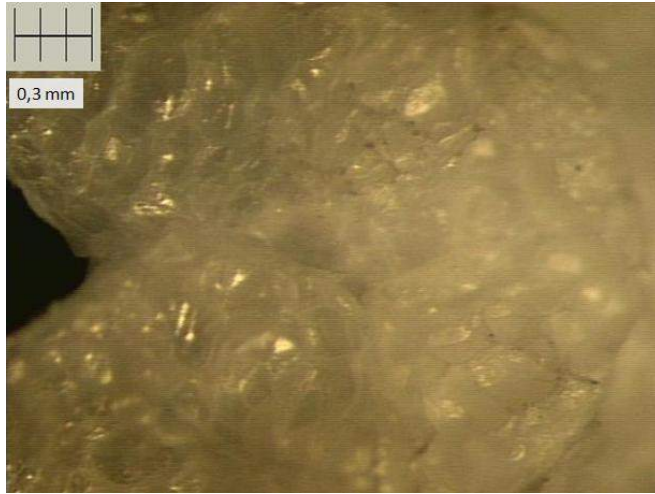


Foto 9.8 Espuma número 8

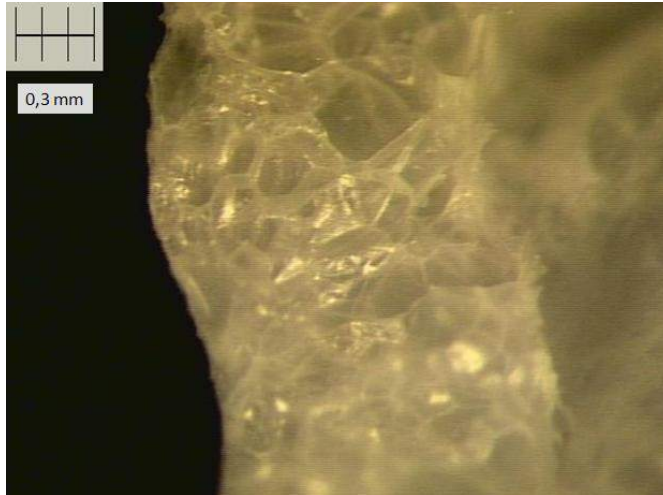


Foto 9.9 Espuma número 9

11 CONCLUSIONES

- El diseño mecánico del sistema fue correcto y funcionó satisfactoriamente y sin roturas, a presiones de hasta 12000 psi.
- Se obtuvieron presiones de funcionamiento estables en los puntos de medición de presión, a la salida de la extrusora y a la salida de la bomba de engranajes.
- La bomba de líquido funcionó correctamente a presiones de hasta 40 MPa.
- Las modificaciones hechas al mezclador estático permitieron reducir la caída de presión a los niveles adecuados para el funcionamiento.
- La acción del mezclador estático no es suficientemente buena para la obtención de espumas de poliestireno de calidad uniforme.
- Los resultados indican que el mezclador estático puede ser adecuado para procesar espumas de polipropileno.
- La calidad de espumas de polipropilenos producidas con mezclas de polipropilenos es mejor que la obtenida con un solo tipo de polímero, de acuerdo a lo esperado.

12 TRABAJOS A FUTURO

- Mezcla de polímeros para lograr valores de viscosidad apropiados para cada velocidad de corte (como se mencionó anteriormente), para bajar la **h** en el mezclador dinámico y aumentarla a la salida.
- Utilizar un mezclador dinámico del tipo de anillo rotante en lugar de uno estático, especialmente para poliestirenos.
- Evaluar la posibilidad de inyectar líquido al extremo de la extrusora, justo antes del mezclador dinámico, donde se esperan valores de presión menores.
- En lugar de utilizar piezas mezcladoras y enfriadoras de sección cilíndrica, diseñar piezas cónicas con exteriores desplazables. De esta manera, la geometría de la pieza puede ser variada para un mismo 'set' de piezas, ya que modificando las distancias entre las piezas interna y externas cambian los valores de espesor de las capas de fundido.
- Evaluar la posibilidad de pelletizar las espumas de semicristalinos, para fabricar piezas de espumas estructurales con adhesión por cristalización.

13 BIBLIOGRAFÍA

01. Chul B. Park, Amir H. Behraves, and Ronald D. Venter, "*Low Density Microcellular Foam Processing in Extrusion Using CO₂*", Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, Ontario, Canada M5S 3G8

02. Xiangmin Han, Kurt W. Koelling, David Tomasko, and L. James Lee, "*Extrusion of Polystyrene Mycrocellular Foam With Supercritical CO₂*", Department of Chemical Engineering, The Ohio-State University, 140W. 19th Ave, Koffolt Lab, Columbus, OH43210

03. Xiang Xu and Chul B. Park, "*Effectos of the Die Geometry on the Expansion Ratio of Polystyrene Foams Blown Witl Carbon Dioxide*", Microcellular Plastics Manufacturing Laboratory, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto, Ontario, Canada M5S 3G8

04. Lee Chen, Rich Straff and Xiang Wang, "*Effect of Filler Size on Cell Nucleation during Foaming Process*", Trexel, Inc.

05. X. Han, K. W. Koelling, D. L. Tomasko, and L. J. Lee "*Process optimization in microcellular foam extrusion*" ANTEC 2001 Proceedings.

06. Zehev Tadmor Costas G. Gogos "*Principles of polymer processing* ", Editorial Willey.

07. Marco Dondero, José Carella y Julio Borrajo "(CO₂ + 2-propanol) mixture as a foaming agent for polystyrene: A simple thermodynamic model for the high pressure VLE-phase diagrams taking into account the foam vitrification". Journal of Applied Polymer Science, 104(4), 2663-2671 (2007) - ISSN: 0021-8995.

08. Tae-Hyong Chong, Young-Wook Ha, y Dae-Jin Jeong, "*Effects of dissolved gas on the viscosity of HIPS in manufacture of microcellular plastics*" Polymer Engineering and Science, (2003) Vol. 43, N° 6, Page 1337-1344.

09. Richar Gendron, “*Thermoplastic Foam Processing, Principles and Development*”, CRC Press.
10. Stanley Middleman “Fundamentals of Polymer Processing”
11. G. Baird and D. I. Collias, “*Polymer Processing, Principles and Design*”, John Wiley & Sons, New York (1998), 213-240.
12. R. Berens, G. S. Huvard, “*Supercritical Fluid Science and Technology*”, K. P. Johnston and J. M. L. Penniger, Eds. American Chemicalsociety, Washington DC, (1989), 207-253.
13. J. F. Agassant, P. Avenas, J. Ph. Sergent, and P. J. Carreau, “*Polymer Processing, Principles and Modeling*”, Hanser Publishers, New York (1991), 189-220.
14. K. A. Arora, A. J. Lesser, and T. McCarthy, “Preparation and Characterization of Microcellular Polystyrene Foams Processed in Supercritical Carbon Dioxide”, *Macromolecules* 31, 4614-4620 (1998).
15. L. Chen, H. Sheth, and R, Kim, “*Gas Absorption with Filled Polymer Systems*”, ANTEC 2000 Proceedings, 1950-1954.
16. M. Xanthos, R. Dhavalikar, V. Tan, S. K.Dey, and U. Yilmazer, “*Properties and Applications of Sandwich Panels Based on PET Foams*”, ANTEC 2000 Proceedings, 1886-1890.
17. Proceedings R.Koningsveld, W.H.Stocmeyer and Nies, “*Polymer Phase Diagrams*” Oxford University Press, (2001).
18. S. G. Kazarian “*Polymer Processing with Supercritical Fluids*” *Polymer Science Ser. C*, Vol 42, No 1, 78-101, (2000).
19. Y. Yuan and F. Shutov, “*Double Foam-in-Foam Polymer Materials*”, ANTEC 2001 Proceedings.

14 ANEXO A: HOJAS TÉCNICAS DE LOS POLÍMEROS UTILIZADOS

14.1 Poliestireno de Alto Impacto



Poliestireno Alto Impacto 4600 Inyección

Propiedades	ISO			ASTM		
	Norma	Unidades	Valores típicos	Norma	Unidades	Valores típicos
Reológica						
Índice de fluidez (200°C, 5Kg) (a)	1133	g/10 min	10	D-1238	g/10 min	10
Mecánicas						
Resistencia tracción a la deformación (a)	527	MPa	19	D-638	MPa	20
Elongación a rotura (a)	527	%	40	D-638	%	40
Módulo elástico en tracción (a)	527	MPa	1850	D-638	MPa	1860
Dureza Rockwell (escala L/M) (b)	2039/2	-	M33	D-785	-	M33
Resistencia a la flexión (a)	178	MPa	38	D-790	MPa	38
Resistencia al impacto IZOD - espesor 4 mm (a)	180/1A	kJ/m ²		-	-	-
Resistencia al impacto IZOD - espesor 3,2 mm (a)	-	-	117	D-256	J/m	117
					Pie.Lb/pulg	2,2
Térmicas						
Temperatura de deflexión bajo carga (1,8 MPa, 120°C/h) (a) 1/2x1/2	75	°C	80	D-648	°C	79
Punto Vicat (1Kg, 50°C/h) (a)	306	°C	94	D-1525	°C	94
Punto Vicat (5Kg, 50°C/h) (a)	306	°C	88	D-1525	°C	88
Punto Vicat (1Kg, 120°C/h) (a)	306	°C	95	D-1525	°C	95
Físicas						
Densidad (b)	1183	g/cm ³	1,06	D-792	g/cm ³	1,06
Absorción de humedad (b)	62	%	<0,1	D-570	%	<0,1
Contracción en molde (b)	-	-	-	D-955	%	0,7
Resistencia a la llama - espesor 1,6 mm (b)	UL-94	clase	HB	-	-	-

Todos los ensayos mecánicos fueron realizados a 23°C.

Los valores típicos ofrecen una orientación al usuario y no deben ser considerados como límites de especificación del material.

(a) Propiedades medidas por lab. Petrobras Energía

(b) Valores de bibliografía.

PETROBRAS ENERGÍA SA

Maipú 1 - 8° piso - C1084ABA - Buenos Aires - Argentina - Tel/Fax (54-11) 4344-7200 / (54-11) 4344-7222

PS-002/Rev 02/Nov 07

PETROBRAS

INNOVA 4600

Descripción del Producto

Poliestireno de alto impacto que combina una elevada fluidez con un buen balance de propiedades mecánicas, lo que le confiere un insuperable desempeño en el proceso de inyección. Además está adecuado especialmente para el moldeo de piezas de gran porte, de uso general o de complicado diseño y de difícil llenado.

Aplicaciones

Aplicaciones típicas: juguetes, piezas técnicas, electrodomésticos, cosmética, electro-electrónicos, partes internas de heladeras y artículos del hogar.

Procesamiento

Moldeo por inyección:	temperatura de masa 180-230°C temperatura de molde 40-70°C
-----------------------	---

Legislación

Cuando es utilizado bajo su forma original sin modificaciones y en las condiciones de procesamiento recomendadas, el producto cumple con las exigencias de la norma 21 CRF 177.1640 de FDA y de los organismos nacionales INAL y SENASA con las resoluciones de GMC-MERCOSUR para uso de embalajes en contacto con alimentos.

Seguridad

Durante el procesamiento del 4600 en las condiciones recomendadas, pueden liberarse cantidades de vapor de estireno muy reducidas. En locales con adecuada ventilación y renovación de aire, la concentración de estireno permanecerá en un nivel muy inferior al límite de exposición expresado por la ACGIH, no representando riesgos conocidos a la salud.

Nota

Las informaciones aquí contenidas están de acuerdo con nuestro mejor conocimiento, indicándose valores típicos obtenidos para las resinas da PETROBRAS. Estos datos están orientados a permitir la selección y la utilización adecuadas de los productos. Sin embargo, estos valores no deben ser considerados como garantía de desempeño.

PARA INFORMACIÓN ADICIONAL, PÓNGASE EN CONTACTO CON
CON EL DEPARTAMENTO DE DESARROLLO Y TECNOLOGÍA

14.2 Polipropileno 1100N

CUYOLEN®
POLIPROPILENO



PETROQUIMICA CUYO S.A.I.C.
Carlos Pellegrini 1163 - Piso 6°
(C1009ABW) Buenos Aires, Argentina
Tel.: (54-11) 4393-6600 - Fax: (54-11) 4394-6940

Hoja Técnica

Homopolímero 1100N

USO PRINCIPAL: INYECCIÓN/EXTRUSIÓN

Adecuado para piezas técnicamente complejas.

PROPIEDADES GENERALES

- ♦ Buena rigidez
- ♦ Buen brillo superficial

PROPIEDADES	MÉTODO	UNIDAD	VALOR
Índice de fluencia (230°C/2.16 kg)	ISO 1133	g/10 min	11

PROPIEDADES MECÁNICAS

Módulo de elasticidad en Flexión (1)	ISO 178	MPa	1450
Esfuerzo de tracción en la fluencia (2)	ISO 527-2	MPa	35
Elongación en la fluencia (2)	ISO 527-2	%	8
Resistencia al impacto Charpy c/e a 23°C (1)	ISO 179	KJ/m ²	3

PROPIEDADES TÉRMICAS

Temperatura de deflexión HDT/A (1,80 MPa) (1)	ISO 75-2	°C	55
Temperatura de deflexión HDT/B (0,45 MPa) (1)	ISO 75-2	°C	85

NOTAS :

- (1) Probeta inyectada de 4 mm * 10 mm * 80 mm
- (2) Probeta inyectada de acuerdo a ISO 3167/A

En su composición este producto cumple con la reglamentación FDA (21 CFR 177, 1520 polímeros olefinicos).
Además se encuentra aprobado por SENASA Resolución N° 442-90.

Los productos para ser usados en aplicaciones médicas o farmacéuticas están sujetos a normas y regulaciones legales especiales. Los productos CUYOLEN® no son específicamente aptos para estas aplicaciones, por lo que la responsabilidad de su uso en dicho sector es solo del cliente.

La información suministrada en esta publicación se basa en nuestro conocimiento y experiencia actuales. Debido a que muchos factores pueden afectar las propiedades del artículo final, los datos presentados aquí no eximen al transformador de la responsabilidad de realizar sus propios controles y ensayos, sobre los artículos que produce. Tampoco estos datos implican una garantía jurídica relativa al cumplimiento de una dada propiedad específica o a la idoneidad del material para una aplicación concreta. Todo el que reciba CUYOLEN® será responsable por sí mismo de los derechos de patente existentes así como del cumplimiento de las leyes y disposiciones vigentes.



Revisión: 20 12/10/2005

14.3 Polipropileno 1102H



PETROQUIMICA CUYO S.A. I.C.
Carlos Pellegrini 1163 - Piso 6°
(C1009ABW) Buenos Aires, Argentina
Tel.: (54-11) 4393-6600 - Fax: (54-11) 4394-6940

Hoja Técnica

Homopolímero 1102H

USO PRINCIPAL: EXTRUSIÓN/SOPLADO

Extrusión de caños y láminas para termoformado.
Soplado de recipientes.
Cintas para tejer, monofilamentos y flejes de embalaje.

PROPIEDADES GENERALES

- ♦ Buena procesabilidad
- ♦ Buena rigidez
- ♦ Buena estabilidad del fundido
- ♦ Buena transparencia de contacto

PROPIEDADES FÍSICAS

MÉTODO

UNIDAD

VALOR

Índice de fluencia (230°C/2.16 kg)

ISO 1133

g/10 min

1,8

PROPIEDADES MECÁNICAS

Módulo de elasticidad en Flexión (1)

ISO 178

MPa

1400

Esfuerzo de tracción en la fluencia (2)

ISO 527-2

MPa

34

Elongación en la fluencia (2)

ISO 527-2

%

9

Resistencia al impacto Charpy c/e a 23°C (1)

ISO 179

KJ/m²

5

PROPIEDADES TÉRMICAS

Temperatura de deflexión HDT/A (1,80 MPa) (1)

ISO 75-2

°C

55

Temperatura de deflexión HDT/B (0,45 MPa) (1)

ISO 75-2

°C

85

NOTAS :

- (1) Probeta inyectada de 4 mm * 10 mm * 80 mm
(2) Probeta inyectada de acuerdo a ISO 3187/A

En su composición este producto cumple con la reglamentación FDA (21 CFR 177, 1526 polímeros olefinicos).

Además se encuentra aprobado por SENASA Resolución N° 413-90

Los productos para ser usados en aplicaciones médicas o farmacéuticas están sujetos a normas y regulaciones legales especiales. Los productos CUYOLEN® no son específicamente aptos para estas aplicaciones, por lo que la responsabilidad de su uso en dicho sector es solo del cliente.

La información suministrada en esta publicación se basa en nuestro conocimiento y experiencia actuales. Debido a que muchos factores pueden afectar las propiedades del artículo final, los datos presentados aquí no eximen al transformador de la responsabilidad de realizar sus propios controles y ensayos, sobre los artículos que produce. Tampoco estos datos implican una garantía jurídica relativa al cumplimiento de una dada propiedad específica o a la idoneidad del material para una aplicación concreta. Todo el que recibe CUYOLEN® será responsable por sí mismo de los derechos de patente existentes así como del cumplimiento de las leyes y disposiciones vigentes.



Revisión: 20 - 12/10/2005

14.4 Polipropileno 2500E

CUYOLEN®
POLIPROPILENO



PETROQUIMICA CUYO S.A.I.C.
Carlos Pellegrini 1163 - Piso 6º
(C1009ABW) Buenos Aires, Argentina
Tel.: (54-11) 4393-6600 - Fax: (54-11) 4394-6940

Hoja Técnica

Copolímero de Impacto 2500 E

USO PRINCIPAL: EXTRUSIÓN/SOPLADO

Extrusión de caños y láminas de buena resistencia mecánica.
Soplado de envases.

PROPIEDADES GENERALES

- ♦ Alto peso molecular
- ♦ Alta estabilidad del fundido
- ♦ Elevada resistencia al impacto a bajas temperaturas

PROPIEDADES FÍSICAS

PROPIEDADES FÍSICAS	MÉTODO	UNIDAD	VALOR
Índice de fluencia (230°C/2.16 kg)	ISO 1133	g/10 min	0,8

PROPIEDADES MECÁNICAS

Módulo de elasticidad en Flexión (1)	ISO 178	MPa	1000
Esfuerzo de tracción en la fluencia (2)	ISO 527-2	MPa	22
Elongación en la fluencia (2)	ISO 527-2	%	9
Resistencia al impacto Charpy c/e a 23°C (1)	ISO 179	KJ/m ²	60
a 0°C	ISO 179	KJ/m ²	12
a -30°C	ISO 179	KJ/m ²	6

PROPIEDADES TÉRMICAS

Temperatura de deflexión HDT/A (1,80 MPa) (1)	ISO 75-2	°C	48
Temperatura de deflexión HDT/B (0,45 MPa) (1)	ISO 75-2	°C	80

NOTAS :

- (1) Probeta inyectada de 4 mm * 10 mm * 80 mm
(2) Probeta inyectada de acuerdo a ISO 3167/A

En su composición este producto cumple con la reglamentación FDA (21 CFR 177, 1520 polímeros olefinicos).
Además se encuentra aprobado por SENASA Resolución N° 1280-94.

Los productos para ser usados en aplicaciones médicas o farmacéuticas están sujetos a normas y regulaciones legales especiales. Los productos CUYOLEN® no son específicamente aptos para estas aplicaciones, por lo que la responsabilidad de su uso en dicho sector es solo del cliente.

La información suministrada en esta publicación se basa en nuestro conocimiento y experiencia actuales. Debido a que muchos factores pueden afectar las propiedades del artículo final, los datos presentados aquí no eximen al transformador de la responsabilidad de realizar sus propios controles y ensayos, sobre los artículos que produce. Tampoco estos datos implican una garantía jurídica relativa al cumplimiento de una dada propiedad específica o a la idoneidad del material para una aplicación concreta. Todo el que reciba CUYOLEN® será responsable por sí mismo de los derechos de patente existentes así como del cumplimiento de las leyes y disposiciones vigentes.



Revisión: 20 12/10/2005

15 ANEXO B: VARIADORES DE FRECUENCIA Y SENSORES DE PRESIÓN

15.1 Hojas técnicas del variador de frecuencia micromaster 420

Orientaciones para la selección	
MICROMASTER 420	
Características principales	<i>"El universal"</i> para redes trifásicas y conexión opcional del bus de campo, p.ej.: con cintas transportadoras, transporte de material, bombas, ventiladores y máquinas operadoras
Gama de potencias	0,12 kW a 11 kW
Gamas de tensión	1 AC 200 V a 240 V 3 AC 200 V a 240 V 3 AC 380 V a 480 V
Regulación	<ul style="list-style-type: none">• Característica <i>Wf</i>• Característica multipunto (característica <i>Wf</i> parametrizable)• FCC (regulación corriente-flujo)
Regulación del proceso	Regulador PI interno
Entradas	3 entradas digitales 1 entrada analógica
Salidas	1 salida analógica 1 salida por relé
Conexión al sistema de automatización	El partner ideal para sus tareas de automatización, tanto SIMATIC S7-200 como SIMATIC S7-300/400 (TIA) y SIMOTION
Características adicionales	<ul style="list-style-type: none">• Sistema BICO

15.2 Hoja técnica del variador de frecuencia sinamic g110

Datos técnicos	
Rango de potencia	0,12 kW a 3,0 kW
Tensión de red	1 AC 200 V a 240 V \pm 10%
Frecuencia de red	47 Hz a 63 Hz
Frecuencia de salida	0 Hz a 650 Hz
cos ϕ	\geq 0,95
Rendimiento del convertidor	en modelos < 0,75 kW: 90% a 94% en modelos \geq 0,75 kW: \geq 95%
Capacidad de sobrecarga	Corriente de sobrecarga 1,5 x corriente asignada de salida (es decir, 150% de capacidad de sobrecarga) durante 60 s, después 0,85 x corriente asignada de salida durante 240 s, tiempo de ciclo 300 s
Corriente de pre carga	no superior a la corriente asignada de entrada
Método de control	Característica <i>U/f</i> lineal (con elevación de tensión parametrizable); característica <i>U/f</i> cuadrática; característica multipunto (característica <i>U/f</i> parametrizable)
Frecuencia de pulsación	8 kHz (estándar) 2 kHz a 16 kHz (en escalones de 2 kHz)
Frecuencias fijas	3, parametrizables
Banda de frecuencias inhibible	1, parametrizable
Resolución de consigna	0,01 Hz digital 0,01 Hz serie 10 bits analógica (potenciometro motorizado 0,1 Hz)
Entradas digitales	3 entradas digitales parametrizables, sin aislamiento galvánico, tipo PNP, compatibles con SIMATIC
Entrada analógica (variante analógica)	1, para consigna (0 V a 10 V, escalable o utilizable como cuarta entrada digital)
Salida digital	1 salida por optoacoplador con aislamiento galvánico (24 V DC, 50 mA, ohm., tipo NPN)
Puerto serie (variante USS)	RS485, para servicio con protocolo USS
Longitud del cable al motor	máx. 25 m (apantallado) máx. 50 m (no apantallado)
Compatibilidad electromagnética	todos los convertidores con filtro CEM integrado para sistemas de accionamiento en instalaciones de categoría C2 (disponibilidad restringida), el valor límite cumple EN 55 011, clase A, grupo 1 además todos los convertidores con filtro cumplen, si se usan cables apantallados con una longitud máx. de 5 m, los límites de EN 55 011, clase B
Frenado	por inyección de corriente continua
Grado de protección	IP20
Temperatura de servicio	-10 °C a +40 °C hasta +50 °C con derating
Temperatura de almacenamiento	-40 °C a +70 °C

Datos técnicos (continuación)				
Humedad relativa del aire	95% (condensación no permitida)			
Altitud de instalación	hasta 1000 m sobre nivel del mar sin reducción de potencia corriente asignada de salida con 4000 m sobre nivel del mar: 90% tensión de red hasta 2000 m sobre nivel del mar: 100% con 4000 m sobre nivel del mar: 75%			
Funciones de protección contra	subtensión, sobretensión, defecto a tierra, cortocircuito, vuelco del motor, protección térmica del motor <i>P_t</i> , sobretensión en convertidor, sobretensión en motor			
Conformidad con normas	UL, cUL, CE, c-tick			
Marcado CE	según Directiva de baja tensión 73/23/CEE			
Dimensiones y pesos (sin accesorios)	Tamaño de caja	Dimensiones A x A x P	Peso, aprox. (kg)	
	(FS)	mm	sin filtro	con filtro
	A \leq 0,37 kW	150 x 90 x 116	0,7	0,8
	A 0,55 kW y 0,75 kW	150 x 90 x 131	0,8	0,9
	A \leq 0,37 kW con disipador plano	150 x 90 x 101	0,6	0,7
	A 0,55 kW y 0,75 kW con disipador plano	150 x 90 x 101	0,7	0,8
	B	160 x 140 x 142	1,4	1,5
	C 2,2 kW	181 x 184 x 152	1,9	2,1
C 3,0 kW	181 x 184 x 152	2,0	2,2	

15.3 Hoja técnica de los sensores de presión dynisco.



Features

- Adjustable zero and span
- Accuracy better than $\pm 1.0\%$
- DyMax™ coated stainless steel wetted parts
- 4 - 20 mA outputs
- 0 - 500 to 0 - 10,000 psi
- Internal 80% shunt calibration

Benefits

- Repeatable, reliable pressure measurements
- Superior abrasion resistance
- Direct input to supervisory control systems
- Wide variety of pressure ranges
- Easy to install and set-up

Description

The DYN-X-MA Series transmitter is a $\pm 1.0\%$ sensor ideal for general purpose melt pressure measurements requiring simple installation, repeatability and reliability. The DYN-X-MA transmitters provide the industry standard 4 - 20 mA amplified signal designed to work with DCS and PLCs. The DYN-X-MA comes equipped with adjustable zero and span pots. Optional thermocouple or RTD configurations are available to provide melt temperature. The DYN-X-MA features a 1/2-20 UNF thread for installation in standard transducer mounting holes and can be supplied with a variety of electrical connections.

Specifications

PERFORMANCE CHARACTERISTICS

Output: 4 - 20 mA
Input Voltage: 14 - 36 Vdc
Combined Error: $\pm 1.0\%$ FSO,
(Including Linearity, Repeatability & Hysteresis)
Repeatability: $\pm 0.2\%$ FSO
Configuration: Four-arm bonded foil Wheatstone bridge
strain gage
Load Resistance: 0 - 1,100 Ohms
Over Pressure: 2 X FSO or 35,000 psi (whichever is less)
Internal Shunt Calibration (R-Cal): 80% FSO $\pm 0.5\%$
Insulation Resistance: 1000 megohms @ 50 Vdc

TEMPERATURE & MECHANICAL CHARACTERISTICS

Max Diaphragm Temperature: 750°F (400°C)
Zero Shift (due to temperature change):
25 psi/100°F Typical (45 psi/100°C)
Electronics Operating Temperature:
-20°F to 185°F (-25°C to 85°C)
Zero Shift Due to Temperature Change:
 $\pm 0.05\%$ FS/°F max ($\pm 0.10\%$ FS/°C max)
Mounting Torque: 500 inch/lbs. maximum
Standard Wetted Parts: DyMax™ coated 15-5 PH SST

www.dynisco.com

15.4 Hoja técnica del variador de frecuencia WEG

Potencia: 0,25 hasta 3 Hp
Tensión de entrada: 100-127 V y 200-240 V
Control V / F
Grado de Protección IP20
Trifásico
150% de capacidad de sobrecarga de corriente
Control DSP salida PWM
Frecuencia de conmutación ajustable 2.5 - 15 Hz
4 entradas digitales programable aislada
Salida a relé programable

Una entrada analógica programable aislada

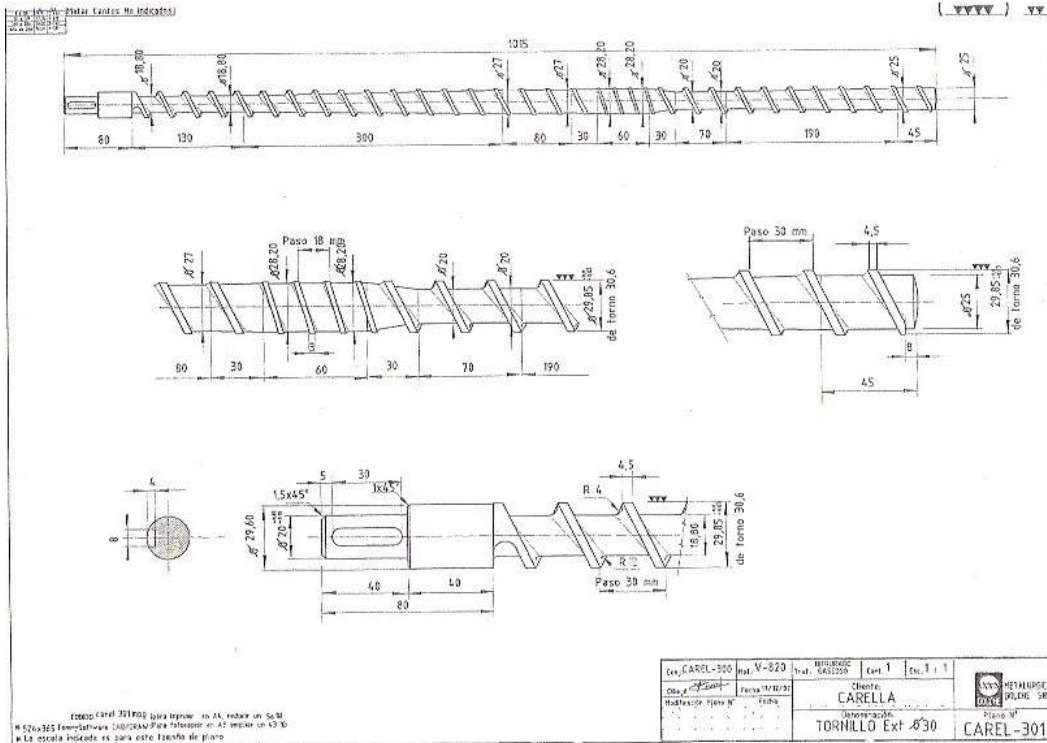
Características de diagnóstico: Sobrecorriente, sobrecarga del motor, sobretemperatura del convertidor, cortocircuito en la salida, sobretensión y subtensión del conductor CC y falla externa

Características de control: aceleración y desaceleración de rampa lineal y "S", control local / remoto, frenado CC, aceleración de par, compensación de deslizamiento del motor, velocidades pre ajustables, límites de frecuencia ajustables máximos y mínimos, límite de corriente de salida ajustable, JOG

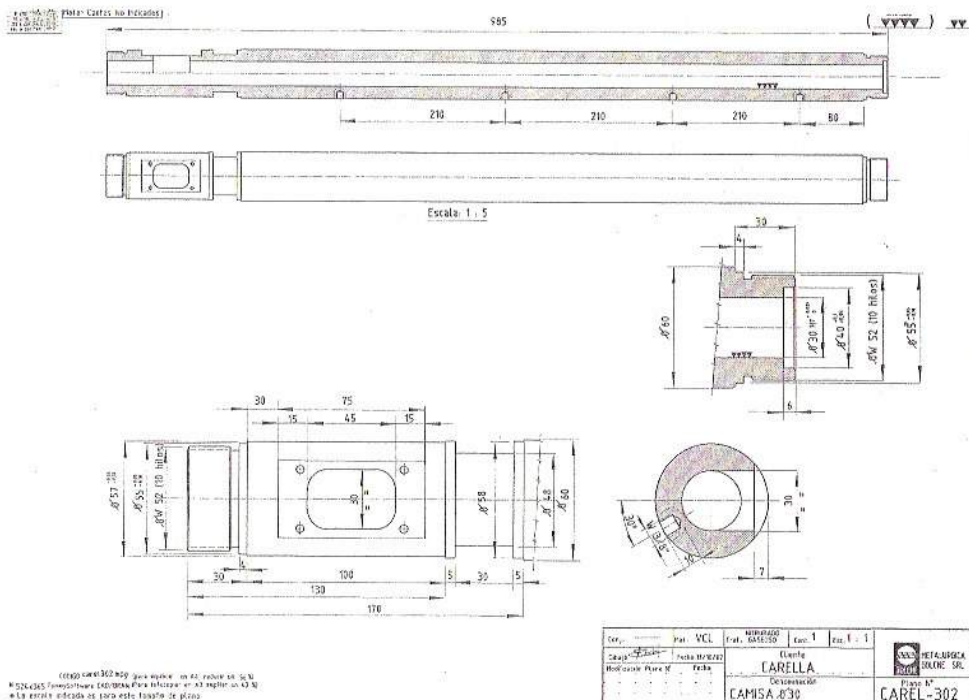
Lecturas de la pantalla: velocidad del motor, frecuencia, tensión, corriente, última falla, temperatura del disipador y status del convertidor.

16 ANEXO C: PLANOS

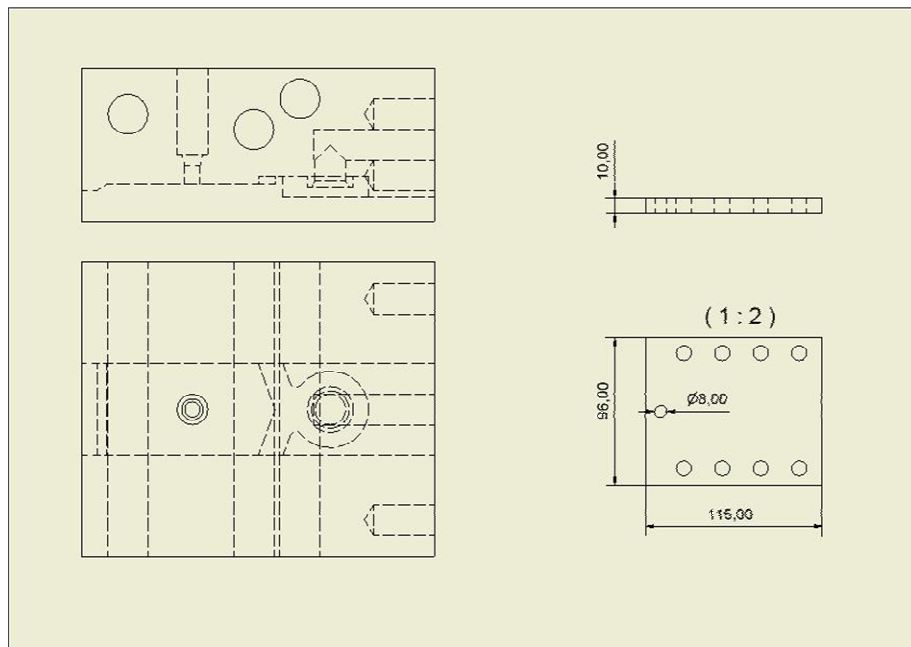
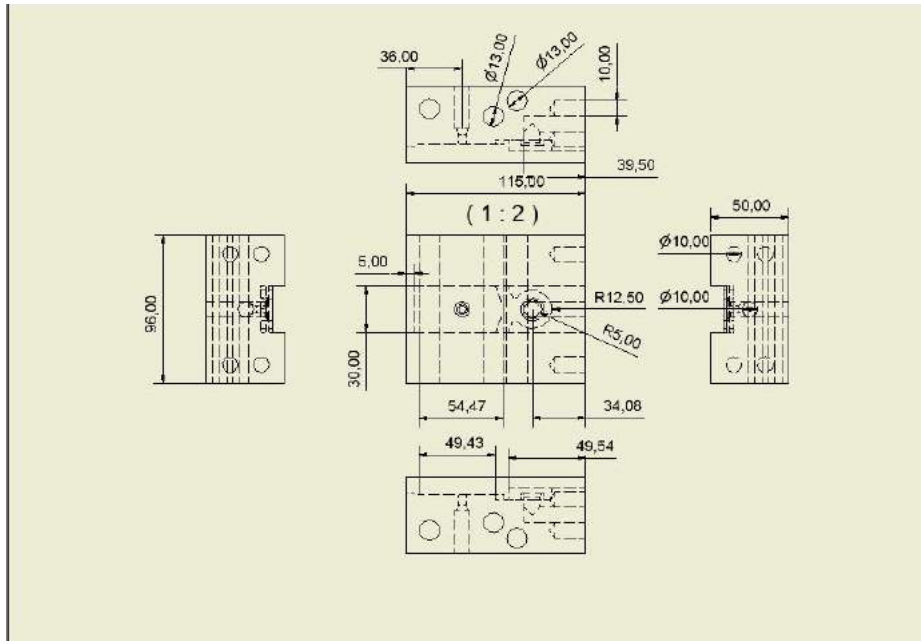
16.1 Tornillo de extrusora sin mezcladores



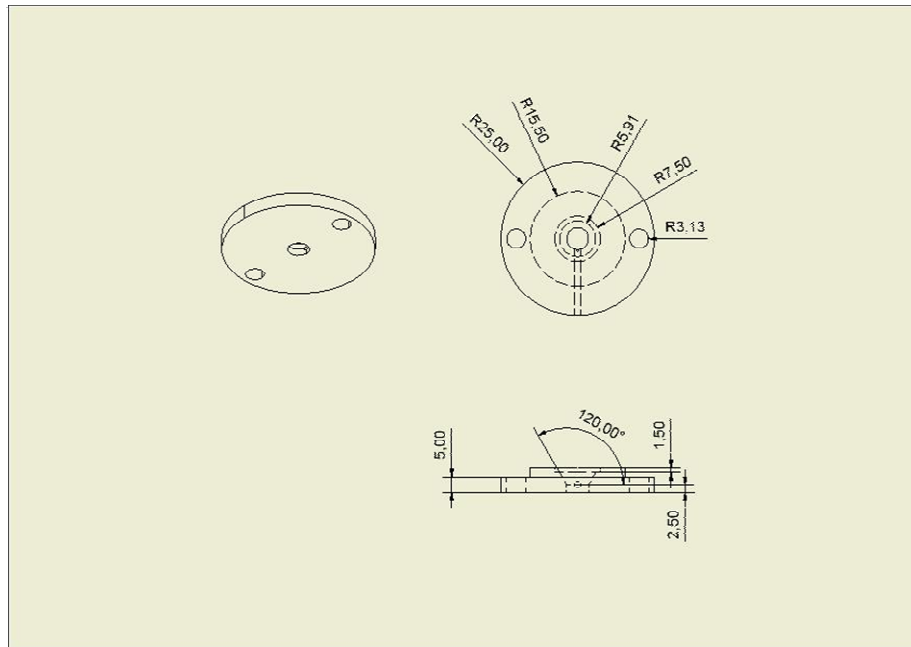
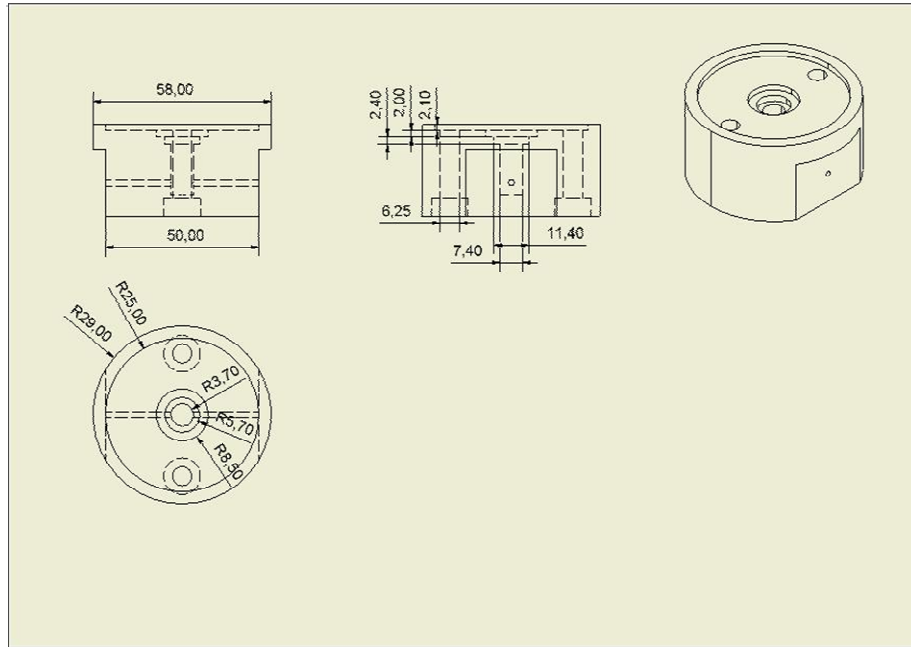
16.2 Camisa extrusora

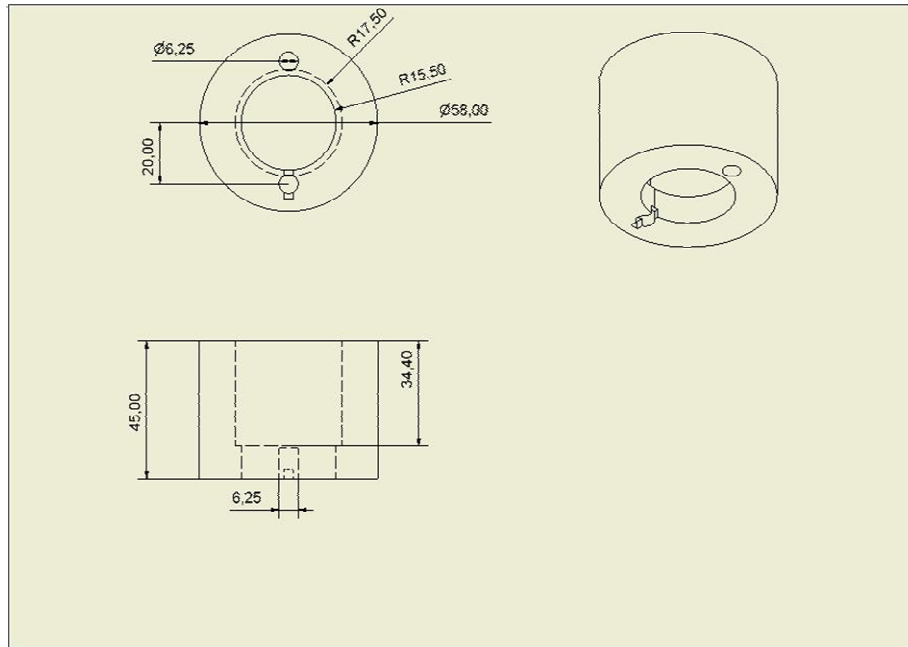


16.3 Cabezal de espumado

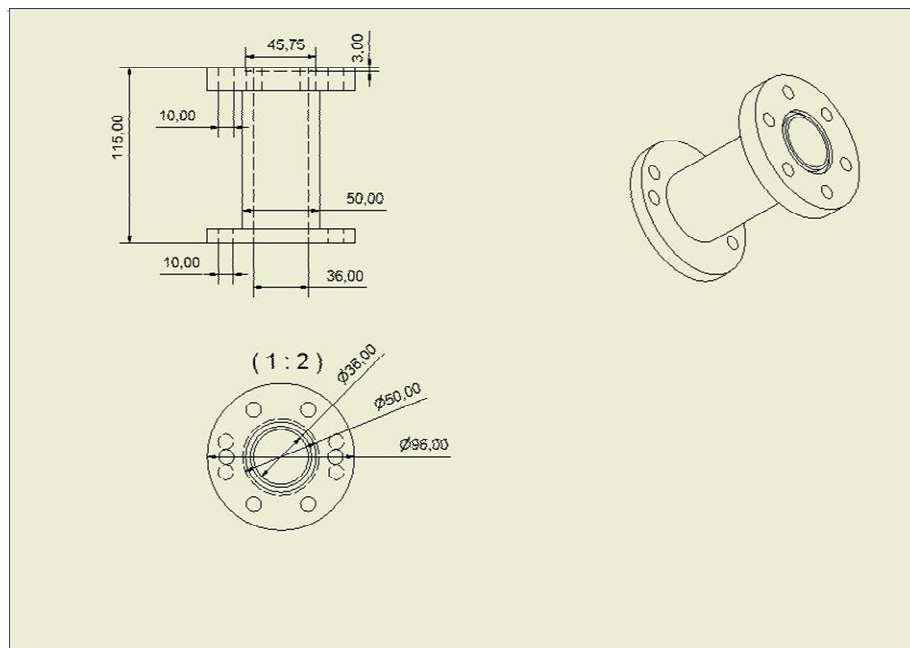


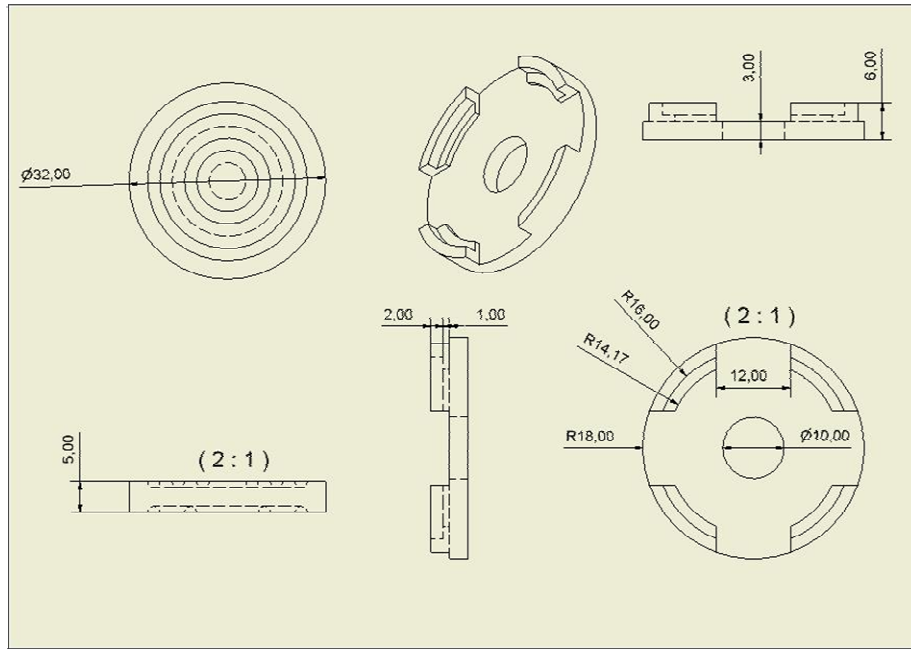
16.4 Bomba de líquido



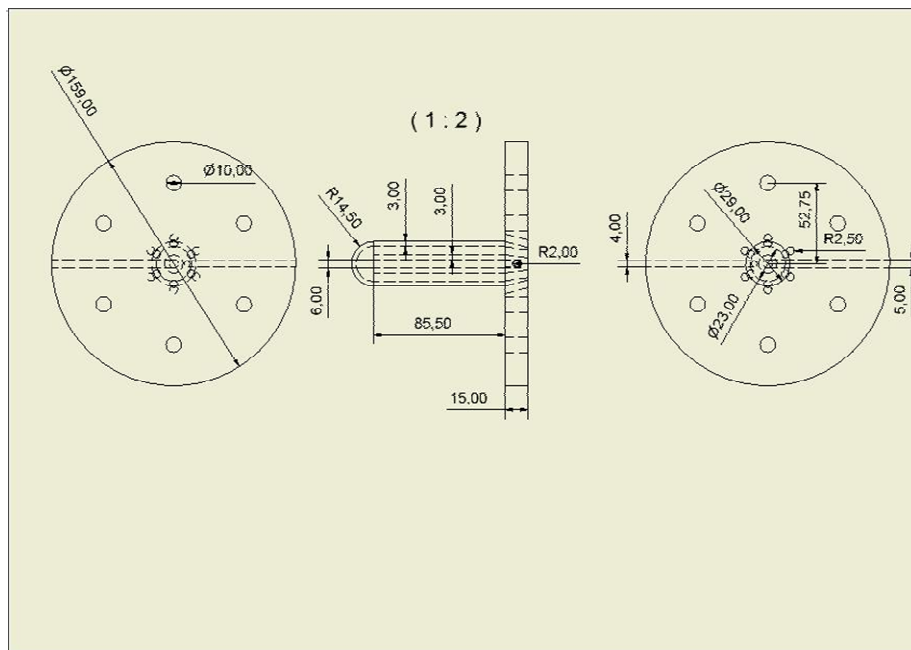


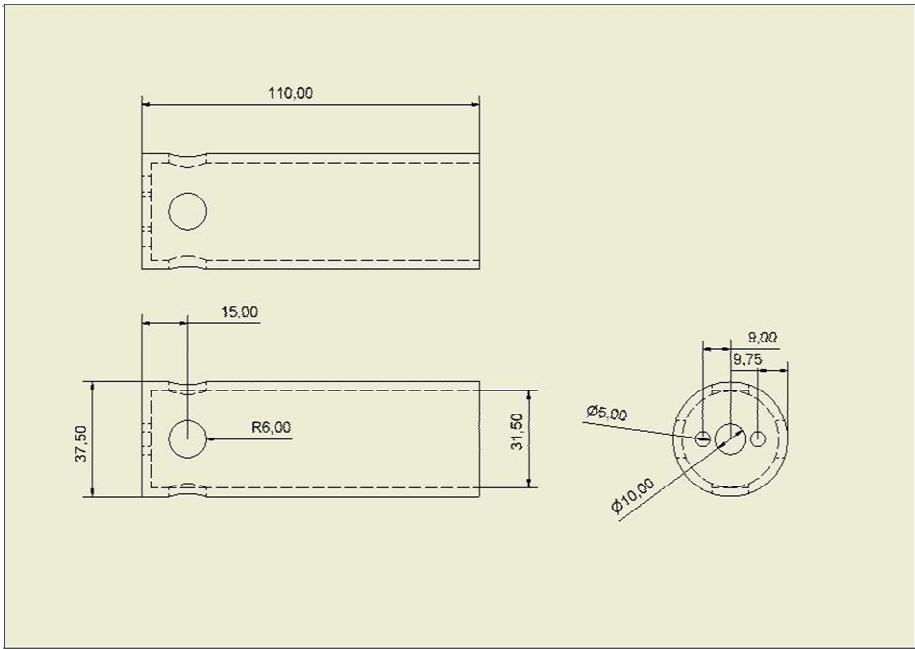
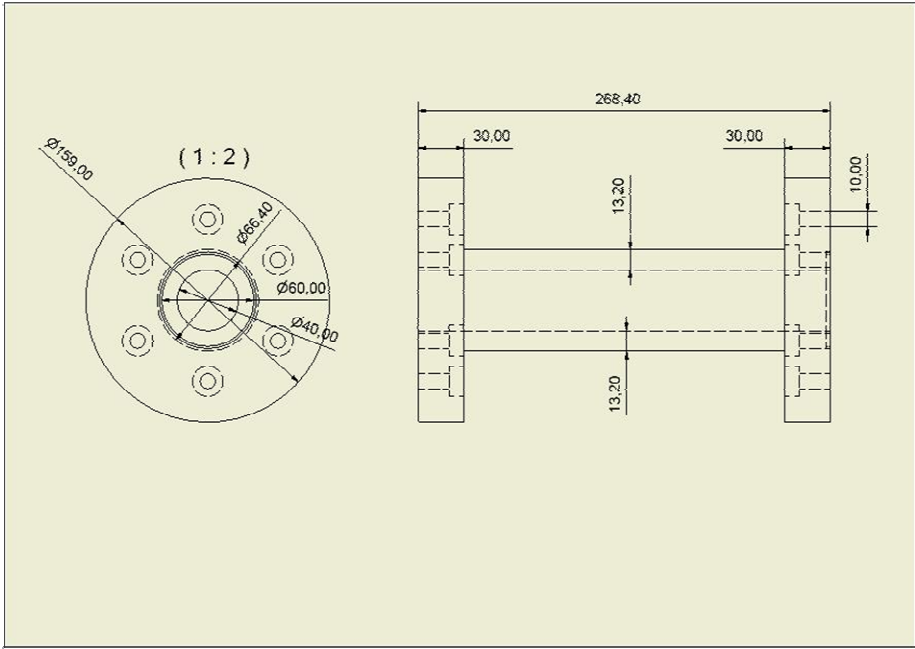
16.5 Mezclador



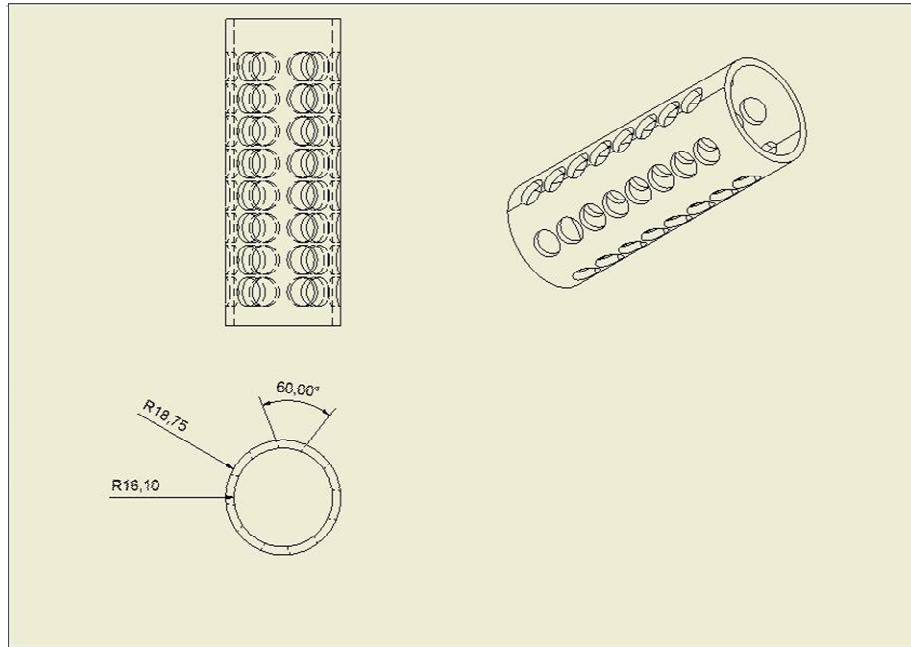


16.6 Enfriador





16.7 Mezclador dinámico



16.8 Bomba de engranajes

