

2009



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN DADO PARA EXTRUSIÓN DE PERFIL TUBULAR PLÁSTICO DE SECCIÓN CIRCULAR

Tesis que presenta para obtener el título de Ingeniero Mecánico

José de Jesús Martínez López



Directora de la Tesis:
M.I. Magdalena Trujillo Barragán

Ciudad Universitaria, México Distrito Federal

*José de Jesús Martínez López
apasionado de la ingeniería mecánica,
el diseño mecánico e industrial, la
manufactura y el ciclismo de montaña.*

Agradecimientos

Antes que a nadie más, a mi familia, a mis papas Jesús y Hermelinda y a mi hermana Verónica, por apoyarme, por ayudarme y por aguantarme toda la vida pero más durante mi periodo como estudiante de ingeniería.

Quiero agradecer a la maestra Magdalena por confiar en mí y brindarme la oportunidad de trabajar con ella y a toda la administración que llevo conmigo para conformar el H. Laboratorio de Procesamiento de Plásticos.

Después, a todos los que me brindaron su amistad y compañerismo que de manera directa o indirecta me ayudaron no sólo a ver concluido este trabajo sino a crecer como persona. Esto va para todos los que me ayudaron en la facultad, en las clases, en los talleres, para los que me alegraron y convivieron conmigo, para los que me distrajeron de mis actividades académicas para ir a "platicar", para los que comparten me vicio de los domingos...

Introducción

Este trabajo surge de la actual necesidad por conocer y manejar con facilidad y detalle los procesos de los plásticos, en especial el proceso de extrusión.

En los últimos años, los materiales plásticos han sido utilizados para la sustitución de materiales tanto metálicos como cerámicos; esto debido al notable impacto en los costos de producción y de materias primas.

Es importante este trabajo porque ahora se cuenta con el equipo de extrusión dentro de la Facultad de Ingeniería, y es necesario implementar el manejo de un equipo así no sólo para conocer el proceso, sino por el potencial que representa una máquina como esta. La máquina es antigua pero los componentes principales no han cambiado aún en los extrusores más recientes.

Dentro de la Facultad de Ingeniería; desde hace algunos años se ha implementado un laboratorio de materiales plásticos que contaba hasta hace poco con una inyectora automática y varios inyectores manuales, teniendo como principal proceso, el de inyección. Pero desde finales de 2007 se cuenta además con un extrusor, el cual hasta antes de concluido este trabajo no contaba con dado alguno por lo que el sistema de extrusión estaba incompleto.

Tanto la puesta en marcha del extrusor, como el diseño de dados, nos permitirán desarrollar productos de materiales plásticos y compuestos del tipo continuo.

Un extrusor crea la posibilidad de reciclar materiales con facilidad; además de la de generar gránulos o "pellets" de nuevos materiales que puedan ser utilizados en otros procesos como el de inyección. También éste extrusor servirá para la implementación de prácticas a los alumnos que cursan las asignaturas correspondientes a manufactura de materiales.

Descripción de contenido

Capítulo 1. El Proceso de extrusión

Se presenta una descripción del proceso de extrusión; algunas de las diferentes técnicas de así como sus características. Al igual que se explica la teoría necesaria para realizar este trabajo.

Capítulo 2. Materiales para procesos de extrusión

Son presentados los antecedentes históricos de los plásticos y su evolución. Así como consideraciones que se deben tomar durante el proceso de extrusión.

Capítulo 3. Planteamiento del problema y su solución

Aquí se explican los trabajos previos para llegar al planteamiento principal del problema así como las consideraciones para llegar a su solución.

Capítulo 4. Diseño y fabricación del dado de extrusión

En este capítulo se presenta el desarrollo del diseño del dado

Capítulo 5. Resultados

Se exponen los diferentes resultados a partir del diseño del dado; se explica su manufactura, puesta en marcha y los resultados obtenidos de pruebas realizadas.

Índice descriptivo

Objetivos	1
Alcances	1
Antecedentes	3
Capítulo 1	
Proceso de extrusión	5
1.1. Proceso de extrusión	5
1.2. Características de un extrusor de tornillo simple	7
1.3. Mecanismos de flujo	10
1.4. Análisis del flujo	14
1.5. Influencia de las propiedades del polímero	18
1.6. Orientación y cristalización	20
1.7. Eficiencia de un extrusor	20
1.8. Propiedades viscosas de los fundidos	22
1.9. Funciones de viscosidad y flujo	22
Capítulo 2	
Materiales para procesos de extrusión	25
2.1. Antecedentes Históricos de los Plásticos	25
2.2. Clasificación de los Plásticos	28
2.3. Característica de los plásticos extrudidos	30
2.4. Cedencia de plásticos	32
2.5. Materiales para la experimentación de este trabajo	42
Capítulo 3	
Planteamiento del problema y su solución	49
3.1. Puesta en marcha del extrusor	50
3.2. Variables controlables del proceso	51
3.3. Piezas del extrusor NIETO	53
3.4. Diseño del dado de extrusión	58

Diseño y manufactura de un dado para extrusión de perfil tubular plástico de sección circular

3.5. Reglas generales para el diseño de dados de extrusión	60
3.6. Requerimientos y especificaciones	62
Capítulo 4	
Diseño y fabricación del dado de extrusión	65
<hr/>	
4.1. Análisis de propuestas	66
4.2. Diseño del dado	72
Capítulo 5	
Resultados	93
<hr/>	
5.1. Modelado	93
5.2. Manufactura	98
5.3. Instalación del dado	104
5.4. Pruebas y experimentación.	105
Conclusiones	113
<hr/>	
Aportaciones futuras	114
<hr/>	
Apéndice	124
<hr/>	
Planos del dado	116
Ficha técnica de los materiales de prueba	129
Referencias bibliográficas	131
<hr/>	

Objetivos

1. Puesta en marcha de un extrusor para productos plásticos de tipo perfilaría dentro de los laboratorios de materiales y manufactura de la Facultad de Ingeniería.
2. Diseñar, manufacturar y probar un dado simple para extrusión de plástico mediante el análisis del material a procesar utilizando sistemas de CAD, CAM y manufactura por Control Numérico y convencional.

Alcances

Al final de este trabajo el extrusor de plásticos marca NIETO tendrá un correcto funcionamiento para uso en prácticas de laboratorio. Esto gracias a la implementación de un dado de extrusión para fabricar perfiles tubulares.

Antecedentes

Actualmente es difícil si no es que imposible comprender el funcionamiento y dinamismo de la industria de los plásticos sin la existencia del proceso denominado extrusión. Es el proceso por el cual se genera la película, el producto plástico de mayor difusión en nuestra civilización. Además de que la extrusión sirve de apoyo a otros procesos como la inyección y el soplado.

La extrusión es el proceso de transformación primario donde el plástico se funde y plastifica por medio de un husillo; a la vez que es impulsado a salir bajo presión a través de una matriz metálica o dado que le confiere una forma útil, para finalmente ser enfriado provocando así su solidificación. Normalmente la materia prima son pellets o gránulos de plástico, aunque los polvos, hojuelas, compactados y moliendas son utilizados también de forma exitosa. Los productos obtenidos por extrusión tienen una sección transversal constante como: tubos, perfiles y láminas; o periódica como la tubería corrugada.

La extrusión es uno de los primeros procesos que nacen como necesidad del hombre para encontrar métodos de producción de artículos plásticos en altos volúmenes y con bajos costos.

Se tienen datos de los primeros intentos de desarrollo de maquinaria de extrusión para transformación de gutapercha, cuando en el año de 1845, Bewley diseña un extrusor para la fabricación de tubos. Es notable este desarrollo por sentar las bases y la inquietud para futuros investigadores sobre la mejora y optimización de este proceso ya que en esos días no se contaba con motores eléctricos, elementos de calefacción o sistemas electrónicos como los que se tienen en la actualidad. Es hasta 1879 que M. Gray patenta el primer extrusor, ya con diseños más adecuados y con muchos de los elementos que tienen los extrusores actuales. Se utilizó un husillo denominado "Arquimedeano" que prácticamente continúa siendo utilizado, aunque con múltiples modificaciones.

El concepto de "Arquimedeano" proviene del diseño generado por Arquímedes (250 a.C.) para bombear agua con un tornillo sin fin dentro de un tubo en embarcaciones dañadas durante combates.

Diseño y manufactura de un dado para extrusión de perfil tubular plástico de sección circular

Es también en 1879 cuando Francis Shaw construye formalmente el primer extrusor comercial en Inglaterra. Un año después, en 1880, John Royle & Sons. Producen el primer extrusor de husillo para la fabricación de tubería de hule en los Estados Unidos. Y en 1890 construyen el primer extrusor para forro de alambre y cable que eran elementos conductores requeridos por inventos como el telégrafo de Morse, el teléfono de Bell en 1876, o la lámpara de Edison.

Es en la primera mitad del siglo pasado donde se muestra un crecimiento importante del proceso debido al auge de nuevos materiales y la necesidad de su procesamiento.

Así, en 1941 la empresa Plax Corp. produce en Estados Unidos la primera lámina de poliestireno biaxialmente orientada. En 1948 DuPont inicia pruebas de producción de polietileno sobre papel.

Finalmente la aceptación social de los materiales plásticos por sus ventajas y como sustitutos de materiales tradicionales por su amplia gama de coloridos y versatilidad de producción y el perfeccionamiento de los procesos utilizando las nuevas tecnologías han hecho del proceso de extrusión unos de los principales en cuanto a procesamiento de plásticos.

Capítulo 1

Proceso de extrusión

1.1. Proceso de extrusión

Extrusión es, en general, la acción de dar forma o moldear una masa haciéndola salir por una abertura especialmente dispuesta. Además se clasifica como un proceso continuo, es decir, que durante todo instante del trabajo normal de una máquina se obtiene producto invariablemente.

La extrusión presenta alta productividad y es el proceso más importante de obtención de formas plásticas en volumen de consumo, su operación es de las más sencillas, ya que una vez establecidas las condiciones de operación, el proceso continúa sin problemas de forma constante con alta productividad. El costo de la máquina de extrusión es moderado, en comparación con otros procesos como inyección, soplado o calandreo, y con una buena flexibilidad para cambios de productos sin necesidad de hacer inversiones mayores.

La característica principal es que los productos obtenidos por extrusión deben tener una sección transversal constante en cualquier punto de su longitud como: tubos, perfiles y láminas.

El proceso se inicial cuando material polimérico es alimentado por medio de una tolva en un extremo de la máquina y debido a la acción de temperatura que proviene normalmente de resistencias eléctricas y por la fricción de un elemento giratorio denominado husillo que gira concéntricamente dentro del también llamado cañón con una separación milimétrica entre ambos; el material es fundido y debido al empuje generado dentro del cañón, es forzado a pasar a través de un dado también conocido como boquilla que le confiere la geometría final. [3]

Técnicas de extrusión

Las principales técnicas para extrusión se clasifican como sigue:

Extrusores de un sólo husillo

Los extrusores más comunes utilizan un sólo husillo en el cañón. Este husillo tiene comúnmente una cuerda, pero puede tener también dos.

Extrusores de doble husillo

Los extrusores de doble husillo proporcionan un empuje mucho mayor que el de un sólo husillo, aceleraciones de material mucho mayores, esfuerzos cortantes relativamente altos y mezclado intensivo. Para algunos materiales este proceso es demasiado agresivo, por lo cual resulta inadecuado, existe la creencia de que los concentrados de color se realizan en su mayoría en este tipo de extrusores, sin embargo, la mayoría de los pigmentos sufren degradación debida a las condiciones tan agresivas del proceso, por ello, la mayoría de los fabricantes de concentrados utilizan un cañón largo de un solo husillo.

Existen dos tipos de doble husillo: los que engranan y los que no engranan, de los que engranan existen dos posibilidades, los co-rotativos y los contra rotativos, según las direcciones en las que estos giran.

El flujo generado en un doble husillo que engrana y es contra rotativo genera un flujo en forma de C el cual tiene las características de un bombeo positivo, disminuyendo drásticamente la influencia de la viscosidad del material para su transporte y generando un bombeo muy eficiente. Las desventajas de este proceso es que los husillos son empujados por el material hacia las paredes del cañón, lo que evita el huso de altas velocidades; también existe el problema del mezclado ineficiente, mientras más rápido se transporta el material, menos eficiente es el mezclado.

En los husillos que si engranan y son co-rotativos, el flujo tiene mayor dependencia en la viscosidad del material, aunque mucho menor que en los extrusores de un solo husillo. En este tipo de arreglo los husillos no son empujados hacia la pared del cañón, por ello se permiten altas velocidades, además el material pasa de un husillo a otro logrando un flujo alternante que ayuda a una mezcla más homogénea.

Este trabajo se enfoca al trabajo desarrollado con un extrusor simple de un solo husillo.

1.2. Características de un extrusor de tornillo simple

El tornillo de un extrusor tiene uno o dos “hilos” en espiral a lo largo de su eje. El diámetro medido hasta la parte externa del hilo es el mismo en toda la longitud para permitir un ajuste preciso en una camisa cilíndrica, con un claro apenas suficiente para dejarlo rotar. La “raíz” o núcleo es de diámetro variable, de manera que el canal en espiral disminuye desde el extremo de alimentación hasta el extremo del dado; aunque existen modificaciones con fines especiales. Una consecuencia de que disminuya la profundidad del canal es el incremento de la presión a lo largo del extrusor y esta es la que impulsa el material fundido a pasar a través del dado. En la figura 1.1 se muestran las zonas en que se divide el husillo. [7]

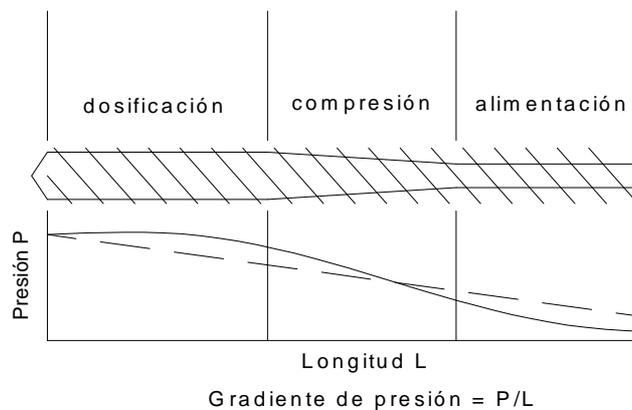


Figura 1.1. Zonas en un extrusor de tornillo simple.

Zona de alimentación

Es la primera parte del extrusor donde se alimenta la materia prima, comúnmente denominada como zona de “alimentación”, aquí se precalienta y transporta el polímero a las partes siguientes. La altura de la cuerda es la mayor y la longitud de esta zona es tal que hay una alimentación correcta hacia adelante, ni deficiente ni excesiva.

Zona de compresión

La segunda zona tiene una profundidad de canal decreciente. Esta zona tiene diferentes funciones y se le conoce como zona de “compresión” o “transición”. Los pellets precalentados pasan a esta zona para ser comprimidos y transformados en líquidos viscosos. En esta zona se pretende controlar las caídas de presión debidas a la transformación descrita.

Existe una modificación en el diseño ideal para cada tipo de polímero. Para un polímero que funde poco a poco, por ejemplo, el polietileno de baja densidad,

es apropiado un tornillo con la longitud total dividida en tres zonas iguales. Los tornillos de ese tipo se conocen a menudo como tornillos para polietileno. Si el polímero funde en forma abrupta, el criterio general es que se requiere una zona de compresión muy corta, por lo común, de una longitud de sólo una vuelta de la espiral o hélice del tornillo; un ejemplo de tal polímero es el nylon, de donde proviene el nombre común tornillo para nylon para este diseño. Sin embargo, esta opinión tiene poca justificación teórica y estos polímeros se comportan bien en tornillos de compresión continua. No obstante, los tornillos de compresión rápida se utilizan mucho para el nylon y otros polímeros semicristalinos, como el polipropileno y el acetal. El cloruro de polivinilo es un polímero difícil de extrudir, ya que funde aún más lentamente que el polietileno. Realmente es un caucho termoplástico y tiene inusuales propiedades a la fricción; con frecuencia, se procesa mejor utilizando un tornillo que tenga una larga zona de compresión en toda su longitud, algunas veces con la adición de una zona de dosificación o de bombeo (Fig. 1.2).

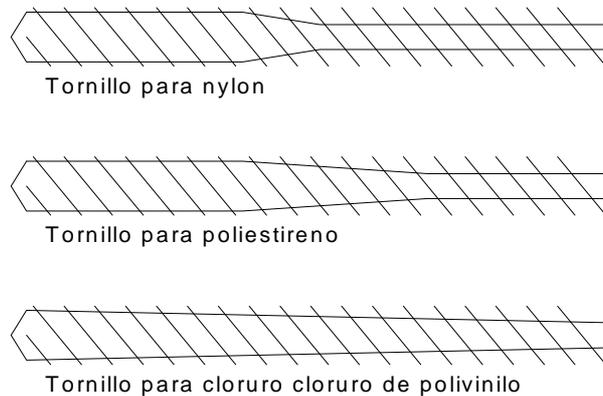


Figura 1.2. Diferencias en el diseño de husillos.

Zona de dosificación

Aquí se tiene una altura del hilo constante, su función es la de homogeneizar el material fundido y con ello suministrar a la región del dado material de calidad homogénea a temperatura y presión constantes.

Zona del dado

La zona final de un extrusor, es la zona del dado, que termina en el propio dado. Situado en esta región se halla el porta mallas. Esta consta, por lo común de una placa de acero perforada conocida como placa rompedora y un juego de mallas de dos o tres capas de gasa o mallas de alambre situadas en el lado del tornillo.

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

- Evitar el paso del material extraño, por ejemplo, polímero no fundido, polvos, cuerpos extraños.
- Crear un frente de presión cuando se opone una resistencia al bombeo de la zona anterior.
- Eliminar la “memoria de giro” del material fundido.

Una descripción más detallada de estas funciones es:

La separación de partículas diferentes al material procesado o cribado ayuda a reducir los defectos del producto. Es sorprendente cuán a menudo quedan atrapadas en la malla partículas de metal, o incluso, tuercas o tornillos pequeños así como, por ejemplo aglomerados de material de relleno que han escapado a la dispersión. Además de hacer que el producto salga defectuoso, las partículas metálicas dañan el dado, lo cual es un grave problema, pues los dados son caros y difíciles de reparar.

La importancia de crear un frente de presión radica en que ésta presión es la que suple la fuerza impulsora para vencer la resistencia del dado.

En muchos casos, el polímero “recuerda” su trayectoria de giros a lo largo del espiral del tornillo, aún después de haber pasado por el dado y esto puede provocar deformaciones por torsión del producto. Los polímeros al estar formados por moléculas de cadena larga, enrollados y enmarañados incluso cuando están fundidos; consiguen tener un comportamiento visco-elástico. Los materiales fundidos, aunque la mayoría son viscosos, tienen también propiedades elásticas importantes. Cuando el material fundido se somete a un tratamiento mecánico prolongado, como el paso por un tornillo, se produce un notable alineamiento de las cadenas; esto se nota como una tendencia hacia recuperar elásticamente este alineamiento como la configuración de energía óptima.

El paso a través del dado es rápido, sin que haya tiempo de sustituir la configuración de espiral por una nueva. El resultado es una tendencia del producto a torcerse una vez que escapa a la restricción del dado y antes de que endurezca.

1.3. Mecanismos de flujo

Fusión

El polímero funde por acción mecánica en combinación con la elevación de su temperatura por medio de calentamiento del cañón. La acción mecánica incluye los esfuerzos de corte y el arrastre, que empuja el polímero hacia la boquilla e implica un incremento en la presión.

La primera fusión que se presenta en el sistema ocurre en la pared interna del cañón, en forma de una delgada película, resultado del incremento en la temperatura del material y posteriormente también debida a la fricción. Cuando esta película crece, es desprendida de la pared del cañón por el giro del husillo, en un movimiento de ida y vuelta y luego un barrido, formando un patrón semejante a un remolino, o rotatorio sin perder el arrastre final. Esto continúa hasta que se funde todo el polímero.

Si el material se adhiere al husillo y resbala sobre la pared del cañón, entonces el arrastre es cero, y el material gira con el husillo. Si en cambio, el material no resbala con la pared del cañón y resbala con el husillo, entonces el arrastre es máximo y el transporte de material ocurre.

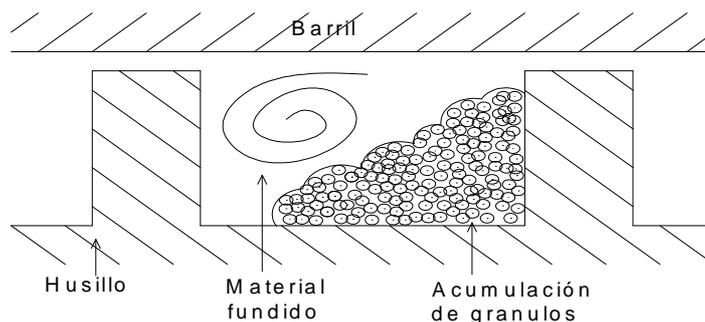


Figura 1.3. Proceso de fusión.

Transporte

Para comprender el mecanismo de transporte, se consideran dos extremos.

1. El material se adhiere al tornillo y se desliza sobre el barril. Bajo estas condiciones, el tornillo y el material simplemente girarían como un cilindro sólido y no habría transporte.
2. El material resiste la rotación en el barril y se desliza sobre el tornillo. Ahora tiende a ser transportado axialmente como un tornillo de Arquímedes usado para transportar sólidos.

En realidad, hay fricción tanto en el tornillo como en el barril, y esto conduce al mecanismo de transporte principal, el flujo de arrastre. Este es literalmente el

arrastre del material fundido a lo largo del tornillo como resultado de las fuerzas de fricción, y es el equivalente al arrastre viscoso entre las placas estacionaria y móvil separadas por un medio viscoso. Esto constituye la componente de transporte del extrusor.

Se le opone a la componente del flujo de presión producido por el gradiente de presión que hay a lo largo del extrusor. Hay presión alta en el extremo del dado y baja en el extremo de alimentación. Este gradiente de presión se opone al flujo de arrastre. Es importante comprender que no hay flujo real resultante debido a la presión, únicamente es una oposición.

El componente final en el modelo de flujo es el flujo de fuga. Hay un espacio finito entre el tornillo y el barril a través del cual se puede fugar el material. Este es también un flujo impulsado por presión que desde luego también se opone al flujo de arrastre. Por lo tanto, el flujo total es el balance de estos componentes.

$$\text{Flujo total} = \text{flujo de arrastre} - \text{flujo de presión} - \text{flujo de fuga.}$$

Calentamiento y enfriamiento

En las máquinas de alta velocidad, prácticamente todo el calentamiento proviene del esfuerzo de corte al que se somete el material fundido viscoso. Por lo común, algo de calor se genera por esta fuente y algo por los calentadores del barril del extrusor. También hay enfriadores, tipo abanicos, para disipar el exceso de calor. Todo el sistema se controla por medio de termostato para tener una precisión de la temperatura del material fundido. La longitud de la máquina se divide en tres o cuatro secciones para favorecer la variación de la temperatura y obtener un proceso óptimo.

Puede considerarse que la condición de operación práctica se halla entre los extremos de la operación adiabática, en donde sólo habría calor proveniente de la disipación viscosa, y de la operación isotérmica, en donde la temperatura sería la misma en todos los puntos, al generar el calor por medio de calentadores o al disiparlo por medio de enfriadores para contrarrestar los cambios en la temperatura del material fundido. Los extrusores reales no son de uno ni de otro tipo; incluso las máquinas conocidas como adiabáticas deben tener pérdidas de calor y una máquina que se alimenta con materia prima fría no puede trabajar isotérmicamente. Sin embargo, la zona de bombeo se aproxima a las condiciones isotérmicas.

1.4. Análisis del flujo

Reometría y reología

La reología estudia principalmente fluidos que tienen estructura y que se conocen normalmente como fluidos no newtonianos (por no cumplir con la ley de viscosidad de Newton). Para ser concisos, la mayoría de los fluidos que se encuentran en la naturaleza son no newtonianos. Sin embargo cuando se hace un análisis del comportamiento del flujo, las ecuaciones se vuelven tan complejas que con frecuencia se recurre a suposiciones newtonianas para la aproximación de parámetros de operación.

Los fluidos poliméricos presentan propiedades mecánicas interesantes entre las que se destacan una viscosidad no constante que depende de la velocidad de corte (carácter no-newtoniano), una componente recuperable de la deformación (viscoelasticidad) y diferencias de tensiones normales.

El estudio de estas propiedades tiene gran interés desde dos puntos de vista. Por un lado, las propiedades influyen de manera crucial en el procesamiento industrial de los materiales. Además, dado que la mayor parte de dicho procesado implica el manejo de los polímeros en disolución o en fundido, resulta de crucial importancia disponer de métodos fiables de caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales. Por otro lado, la causa física de dichas propiedades está en las múltiples conformaciones que pueden adoptar las macromoléculas y en la interacción entre ellas. Esto hace que la reología de los materiales poliméricos sea un campo especialmente atractivo para la utilización de los métodos de la Mecánica Estadística.

La reología en el proceso de extrusión aporta datos muy importantes para la comprensión y el diseño de esta tecnología. El estudio de un flujo de polímero por medio de reología comienza con la reometría capilar, estudiando el flujo de polímero a través de un dado capilar utilizando las mismas consideraciones que se utilizaron para el flujo a través de un canal simple.

Flujo de arrastre

Para poder entender el movimiento del flujo de arrastre se toma en cuenta el flujo que hay entre un par de placas paralelas y luego se relaciona el comportamiento con el de un canal de extrusor. En la figura 1.4 se muestran dos placas paralelas separadas por una distancia H y un flujo viscoso entre ellas. La placa móvil tiene una velocidad V_d en la dirección mostrada

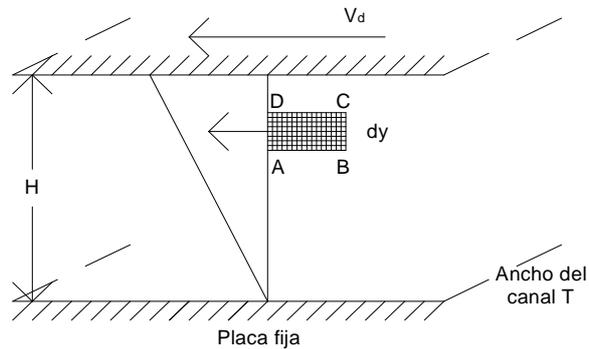


Figura 1.4. Flujo de arrastre entre placas paralelas.

Supóngase un pequeño elemento de tamaño finito de fluido, $ABCD$, a una distancia y de la placa estacionaria.

El cambio de flujo volumétrico, dQ , para este elemento, está dado por

$$dQ = TV_d dy \quad (1.01)$$

Supóngase que el gradiente de velocidad lineal y la velocidad de $ABCD$ está dado por

$$V = \frac{V_d y}{H} \quad (1.02)$$

Al sustituir (1.02) en (1.01), se tiene

$$dQ = \frac{TV_d y dy}{H} \quad (1.03)$$

Si se integra (1.03) para relacionar la profundidad H y encontrar el flujo de arrastre dQ tenemos

$$dQ = \int \frac{TV_d y dy}{H}$$

$$Q_d = \frac{1}{2} THV_d \quad (1.04)$$

Ahora se tiene una situación de placas paralelas en un tornillo de un extrusor, si se puede imaginar el canal del tornillo como un canal similar excepto que la disposición es en espiral. En la figura 1.5 se muestran las dimensiones apropiadas. El barril simula la placa estacionaria, y el tornillo giratorio, la placa móvil. El elemento de material fluido se halla entre el barril y el tornillo giratorio. H es la profundidad del canal. T es la distancia perpendicular entre hilos. N es la velocidad del tornillo en revoluciones por minuto.

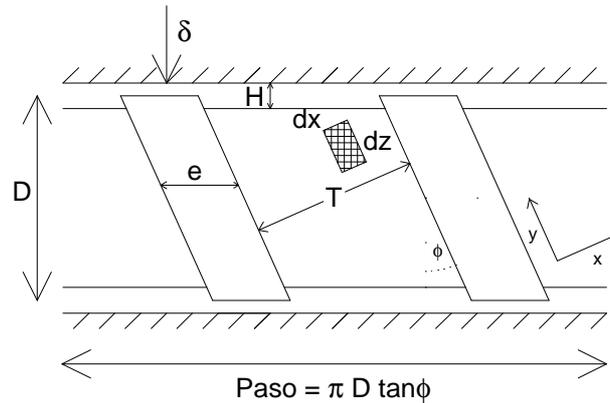


Figura 1.5. Flujo de arrastre en un husillo de extrusión.

El movimiento angular del elemento de material fluido y las dimensiones pueden expresarse como funciones del ángulo de hilo ϕ

$$V_d = \pi D N \cos \phi$$

$$T = (\pi D N \tan \phi - e) \cos \phi$$

Al volver a las placas paralelas (ecuación (1.04)), y al sustituir T y V_d , se tiene

$$Q_d = \frac{1}{2}(\pi D N \tan \phi - e) \cos \phi \cdot H \cdot \pi D N \tan \phi$$

$$Q_d = \frac{1}{2}(\pi D N \tan \phi - e)(\pi D N \cos^2 \phi) H$$

e es pequeño en comparación con el paso del tornillo, de modo que

$$Q_d = \frac{1}{2}\pi^2 D^2 N \tan \phi \cos^2 \phi \cdot H$$

$$Q_d = \frac{\frac{1}{2}\pi^2 D^2 N \text{sen } \phi \cos^2 \phi \cdot H}{\cos \phi}$$

$$Q_d = \frac{1}{2}\pi^2 D^2 N \text{sen } \phi \cos \phi H \quad (1.05)$$

Así, se ve que el flujo de arrastre depende de:

- Diámetro del tornillo D^2
- Velocidad del tornillo N
- Profundidad del canal H
- Ángulo de hélice ϕ

Flujo de presión

El siguiente paso es el de encontrar una expresión para el flujo de presión. Nuevamente, se observa un elemento finito de fluido en un canal entre placas paralelas y luego se aplica el resultado al canal de un extrusor. En la figura 1.6 se muestra el elemento de fluido viscoso en un gradiente de presión. Las fuerzas que actúan sobre el elemento finito de fluido son, por unidad de ancho

$$F_1 = \left(P + \frac{\partial P}{\partial z} dz \right) 2y$$

$\left(\frac{\partial P}{\partial z} dz \right)$ es el incremento debido al gradiente de presión a lo largo del elemento de longitud dz)

$$F_2 = P 2y$$

$$F_3 = \tau dz \quad (\text{la relación viscosa})$$

En el flujo estacionario, éstos están en equilibrio

$$F_1 = F_2 + 2F_3 \quad (1.06)$$

La cual se reduce a

$$\tau = y \frac{\partial P}{\partial z} \quad (1.07)$$

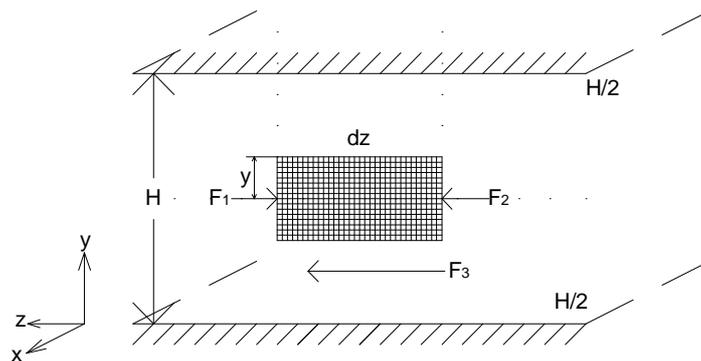


Figura 1.6. Fuerzas que actúan sobre un elemento de fluido en un gradiente de presión.

Si se supone que es un fluido newtoniano

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

$$\tau = \eta \frac{dV}{dy}$$

Al sustituir τ en (1.07) y suponer que la presión varía en la dirección z únicamente

$$\eta \left(\frac{dV}{dy} \right) = y \left(\frac{dP}{dz} \right)$$

$$\frac{dV}{dy} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{dP}{dz} \right) y$$

Se puede integrar ahora esta expresión para encontrar la velocidad V

$$\int_0^V dV = \frac{1}{\eta} \left(\frac{dP}{dz} \right) \int_{H/2}^y y dy$$

$$V = \frac{1}{\eta} \left(\frac{dP}{dz} \right) \left(\frac{y^2}{2} - \frac{H^2}{8} \right) \quad (1.08)$$

De aquí se tiene que la variación del flujo volumétrico dQ está dada por

$$dQ = VT dy \quad (1.09)$$

A sustituir (1.08) en (1.09) e integrar para obtener el flujo de presión Q_p

$$dQ = \frac{1}{\eta} \left(\frac{dP}{dz} \right) \left(\frac{y^2}{2} - \frac{H^2}{8} \right) T dy$$

Para $2y$

$$Q_p = \int_0^{H/2} \frac{1}{\eta} \left(\frac{dP}{dz} \right) T \left(\frac{y^2}{2} - \frac{H^2}{8} \right) dy$$

$$Q_p = \left(\frac{1}{12\eta} \right) \left(\frac{dP}{dz} \right) TH^3 \quad (1.10)$$

Ahora se puede usar esta expresión en el canal de un husillo de un extrusor

$$T = \pi D \tan \phi \cos \phi \quad (\text{se ignora } e) \quad (1.11)$$

Ahora

$$\sin \phi = \frac{dl}{dz}$$

Por lo tanto

$$\left(\frac{dP}{dz} \right) = \left(\frac{dP}{dl} \right) \sin \phi \quad (1.12)$$

$$Q_P = \frac{\pi DH^3 \text{sen}^2 \phi}{12\eta} \left(\frac{dP}{dl} \right)$$

$$Q_P = \frac{\pi DH^3 \text{sen}^2 \phi}{12l} \left(\frac{\Delta P}{\eta} \right) \quad (1.13)$$

Se ve entonces que el flujo de presión depende de:

- Las dimensiones del husillo, al depender de la tercera potencia de la profundidad del canal.
- El gradiente de presión.
- La viscosidad del flujo.

Flujo de fuga

El flujo de fuga es otra componente del flujo debido a la presión. En este caso, la forma es la de un canal ancho;

$H = \delta$, la profundidad del canal y;
 $T = \pi D / \cos \phi$, el ancho del canal (Fig. 1.7).

El flujo de fuga es pequeño en comparación con el flujo de arrastre y el flujo de presión, y puede ignorarse al calcular el flujo total. Únicamente tiene significado práctico en máquinas desgastadas en las cuales se vuelve grande el espacio libre que hay entre el tornillo y el barril.

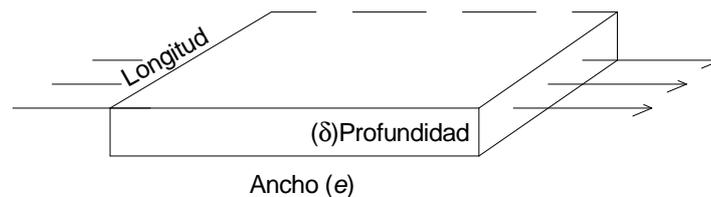


Figura 1.7. Fuga a través de una ranura ancha.

Flujo total

Se puede encontrar fácilmente el flujo de salida total Q sumando las expresiones para el flujo de arrastre y el flujo de presión

$$Q = Q_d + Q_P$$

$$Q = \frac{1}{2}\pi^2 D^2 NH \sin \phi \cos \phi - \frac{\pi DH^3 \sin^2 \phi \Delta P}{12\eta l} \quad (1.14)$$

Esta expresión es un poco compleja, pero se simplifica para fines prácticos. Para un extrusor dado, l , H , D y ϕ son fijos; y las variables prácticas para la operación del extrusor son

- La rapidez del husillo N
- La presión frontal P
- La viscosidad del material fundido.

entonces se consigue una ecuación compacta:

$$Q = \alpha N - \beta \left(\frac{\Delta P}{l} \right)$$

$$\text{Con: } \alpha = \frac{1}{2}\pi^2 D^2 H \sin \phi \cos \phi \quad \text{y} \quad \beta = \frac{\pi DH^3 \sin^2 \phi}{12\eta}$$

1.5. Influencia de las propiedades del polímero

La expresión final para el flujo total a la salida de un extrusor es una simplificación porque faltan dos factores importantes que son a) las propiedades reológicas para los fluidos no newtonianos de la mayoría de los polímeros fundidos y b) sus propiedades de fricción.

La importancia del arrastre debido a la fricción en la pared del barril puede valorarse al comparar con el apriete de un tornillo con una tuerca. La tuerca debe mantenerse ajustada o el tornillo quedará flojo. De la misma manera, el arrastre por fricción evita que el material fundido gire simplemente junto con el tornillo. Sin embargo, a diferencia de la tuerca que sujeta firmemente, la fuerza de fricción es variable, depende del tipo de polímero y de las condiciones. Cuanta más fricción haya, menor será la tendencia a girar con el tornillo, de aquí la relación de tornillos más largos en los últimos años. Estos tornillos tienden a llevar a una mayor área superficial del barril y generar mayor fuerza de fricción.

La expresión general para el flujo de arrastre se determinó considerando que el material fundido se comporta como un fluido newtoniano; que por lo tanto la viscosidad es la misma en todos los puntos y que existe un gradiente de velocidad que va desde cero en el tornillo hasta un valor máximo en la pared del barril. Estas suposiciones conducen al factor 1/2 de la ecuación del flujo de arrastre:

$$Q_d = \frac{1}{2}\pi^2 D^2 NH \sin \phi \cos \phi$$

es decir es una constante de integración.

Pero sabiendo que estos materiales son fluidos no newtonianos; y que la velocidad no puede ser cero en el tornillo ya que eso significaría la presencia de

una capa estancada que se degradaría. El material debe deslizarse sobre las superficies y las características de deslizamiento se presentan mediante los coeficientes principales de fricción. Estos varían en un amplio intervalo para diferentes polímeros; además dependen en gran medida de la temperatura. La condición de flujo de arrastre se representa mejor si se reemplaza el factor 1/2 por uno más general, F , el cual incluye los comportamientos friccional y viscoso del polímero.

$$Q_d = F(\pi^2, D^2, N, H, \text{sen } \phi, \text{cos } \phi)$$

La Tabla 1.1 muestra diferentes coeficientes de fricción para los plásticos comunes.

Tabla 1.1. Coeficientes de fricción de varios polímeros

Polímero	Coeficiente de fricción (μ)
PTFE	0.04 – 0.15
LDPE	0.03 – 0.08
HDPE	0.08 – 0.20
PP	0.67
PS	0.33 – 0.50
PMMA	0.25 – 0.50
Nylon	0.15 – 0.40
PVC	0.20 – 0.90
SBR	0.50 – 3.00
NR	0.50 – 3.00

Bajo condiciones ideales, $F = \frac{1}{2}$, pero con baja fricción del barril, la alta fricción del tornillo y baja viscosidad aparente, $F \rightarrow 0$ y el flujo de arrastre tienden a cero. Bajo estas consideraciones, el manejo eficiente del extrusor se hace muy difícil; la ecuación del flujo de arrastre indica que se necesita un tornillo de diámetro grande rotando a alta velocidad para maximizar la salida, pero esto tiende a incrementar la velocidad de corte de acuerdo a la velocidad de deformación dada por:

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi DN}{H} \tag{1.15}$$

Lo cual disminuye la viscosidad incluso después y , por lo tanto disminuye F . Un problema posterior es que el coeficiente de fricción depende de la temperatura que es diferente para cada material y es un aspecto importante para facilitar el manejo de un extrusor. Por ejemplo, para el polietileno de baja densidad a 100°C, $\mu = 1$, y a 250°C, $\mu = 0.055$, en consecuencia, se desliza bien contra la pared caliente del barril. La fricción disminuye con la temperatura, al proporcionar una

autorregulación del calor que se genera debido a la fricción. Este material es conformado con gran facilidad en un extrusor de tornillo simple. Este comportamiento contrasta con el del cloruro de polivinilo no plastificado (PVC), que tiene lo opuesto, a 100°C, $\mu = 0.06$, y a 150°C, $\mu = 1.00$. Ahora la fricción necesaria para mantener la producción se excede fácilmente; al elevarse la temperatura para obtener un material con fundido óptimo, aumenta la respuesta a la fricción y se produce sobrecalentamiento debido al calor generado por ésta con lo que se degrada fácilmente. El cloruro de polivinilo es un polímero de notable inestabilidad térmica, requiere sistemas de estabilización térmica bastante complejos como aditivos bajo buenas condiciones de manufactura. Dado el análisis anterior, el PVC tendería a quedarse en el tornillo y de acuerdo a la configuración del husillo respecto a toda la máquina, es necesaria la presencia de tornillos gemelos.

1.6. Orientación y cristalización

Desde que el material entra al dado existe una alineación de las moléculas. En láminas o en los perfiles formados a la salida del dado comienza a disminuir su temperatura inmediatamente, en ese momento puede ser que el extrudido sea jalado, con esto se logra una mayor orientación longitudinal de las moléculas, que se ordenan en la dirección que es aplicada la fuerza de extensión.

A la salida del dado también comienza la cristalización, la cual puede ser controlada de acuerdo con la extensión y la variación de enfriamiento.

La cristalización puede aumentar por extensión gracias a rodillos que tiran del material, esta fuerza causa que las moléculas se orienten en la dirección en que el material es forzado y esta orientación incrementa el grado de cristalinidad y por lo tanto el grado de resistencia del material. Esta técnica es utilizada típicamente en extrusión de láminas y películas.

1.7. Eficiencia de un extrusor

El proceso de fusión es eficaz al principio, pero conforme avanza la proporción del canal ocupado por los sólidos disminuye de modo que reduce el contacto entre los sólidos y la camisa caliente. La "masa" de sólidos se rompe y las partículas sólidas se funden gracias a la temperatura del material fundido que hay alrededor. Esta es una fuente heterogénea y, desde luego, una de las funciones de la zona de dosificación es la de homogeneizarla. Puede resumirse el efecto de las diferencias en las características del husillo como sigue:

1. Canal más profundo: transporta más material, pero tarda más en completar la fusión;
2. Operación rápida: aumenta la producción, pero los sólidos persisten a lo largo del husillo al terminar la operación;

3. Un canal menos profundo puede ayudar a una operación rápida para aumentar la producción debido a una fusión más efectiva, pero el peligro está en que el alto esfuerzo de corte que resulta puede conducir a un sobrecalentamiento.

Prácticamente todos los husillos se hacen con un aparente ángulo de hélice "cuadrado", y tienen una vuelta de hélice de longitud igual a su diámetro. Se puede llegar a un estudio razonado sobre el ángulo cuadrado de manera correcta a partir de la suposición de la eficiencia volumétrica, al utilizar la expresión para el flujo de arrastre.

La velocidad axial "ideal", V_a , puede describirse como

$$V_a = \text{paso de husillo} \times \text{rapidez del husillo}$$

$$V_a = \pi D \tan \phi \times N$$

La componente de la velocidad paralela al hilo del husillo es V_d

$$V_d = V_a / \sin \phi$$

$$V_d = (\pi D \tan \phi \times N) / \sin \phi$$

El flujo de salida "ideal", esta dado por Q_i

$$Q_i = V_d \times \text{sección transversal del canal}$$

$$Q_i = \frac{\pi D N \tan \phi}{\sin \phi} (\pi D H \tan \phi) \cos \phi$$

$$Q_i = \pi^2 D^2 \pi D H \tan \phi$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{Q_{max}}{Q_i} = \frac{\frac{1}{2} \pi^2 D^2 H N \sin \phi \cos \phi}{\pi^2 D^2 H N \tan \phi} = \frac{1}{2} \cos^2 \phi \quad (1.16)$$

Así, la eficiencia volumétrica, al menos del flujo de arrastre, depende únicamente de ϕ

De acuerdo a la experiencia, existe un valor universalmente aceptado para ϕ de 17.66°. La eficiencia para un husillo con este ángulo es de 45.4%, si se hace 10° más escarpado, la eficiencia sube sólo a un 48.5%, y disminuye la capacidad de tener una presión frontal útil en el dado. A valores más altos de ϕ la eficiencia cae drásticamente. Por esto la decisión general de adoptar un ángulo cuadrado intermedio.

1.8. Propiedades viscosas de los fundidos

Durante el proceso de flujo, como ocurre en los dados de extrusión, el fundido está sujeto a velocidades de deformación cortantes. Este flujo cortante es causado por el hecho de que los fundidos se adhieren a las paredes del dado. A esto se le denomina adhesión Stokeana. Lo que resulta en un cambio en la velocidad del flujo a través del área del canal del dado y se representa mediante la siguiente ecuación.

$$\dot{\gamma} = -\frac{dv}{dy} \quad (1.17)$$

v = velocidad del flujo
 y = dirección del cortante

Durante un estado estable de flujo cortante ocurre un esfuerzo cortante τ entre dos capas del fluido en un punto. En el caso simple de un Fluido Newtoniano este esfuerzo cortante es proporcional a la deformación cortante:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1.18)$$

La constante de proporcionalidad η se denomina viscosidad dinámica o simplemente viscosidad y tienen dimensiones de $[Pa \cdot s]$. La viscosidad es la medida de la resistencia interna de un fluido a fluir bajo esfuerzos cortantes. Generalmente los polímeros fundidos no se comportan como fluidos newtonianos puesto que su viscosidad no es constante ya que depende de la deformación cortante. En referencia a la ecuación (1.18) válida para fluidos newtonianos puede expresarse también de esta manera:

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma} \quad (1.19)$$

o

$$\eta(\dot{\gamma}) = \tau/\dot{\gamma} \neq \text{constante} \quad (1.20)$$

1.9. Funciones de viscosidad y flujo

Cuando se grafica la viscosidad η en función de la velocidad de deformación cortante $\dot{\gamma}$ en una gráfica doble logaritmo se obtienen una función que se muestra en la figura 1.8 válida para polímeros a temperatura constante. Se puede ver que para bajas deformaciones, la viscosidad permanece constante, aunque en ciertos puntos con incrementos lineales.

Esto se debe a la disminución de la viscosidad al incrementarse la velocidad de deformación cortante y se conoce como comportamiento pseudoplástico. La viscosidad constante a bajas velocidades de deformación se conoce como viscosidad cero, η_0 .

A la vez que la representación gráfica de la viscosidad vs. La velocidad de deformación constante se conoce como curva de viscosidad, la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación se conoce como curva del flujo (Fig. 1.9), para un fluido newtoniano, la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación cortante es directamente proporcional por lo que una gráfica log-log tiene una línea recta con una inclinación de e1, lo que significa que el ángulo entre la abscisa y la curva del flujo es de 45° y cualquier desviación de esta curva representa un comportamiento no newtoniano.

Para un fluido pseudoplástico la inclinación es mayor a 1 lo que significa que el esfuerzo cortante incrementa de manera progresiva. Por el contrario el esfuerzo cortante aumenta en menor relación por la velocidad de deformación cortante.

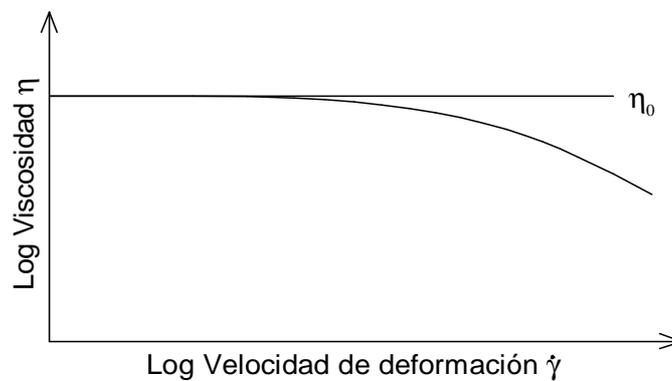


Figura 1.8. Representación de la dependencia de la viscosidad sobre la velocidad de corte mediante una curva.

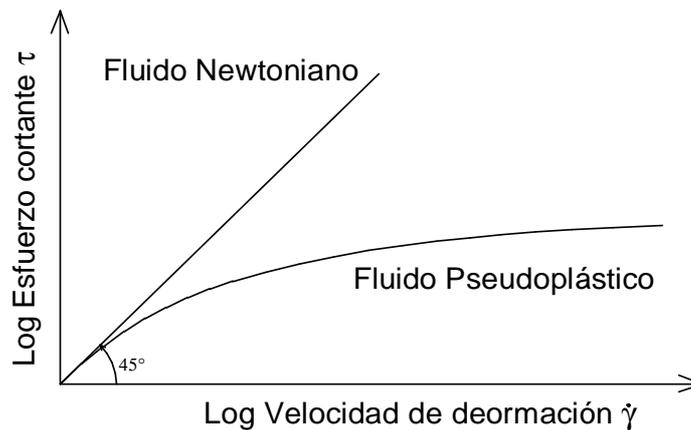


Figura 1.9. Representación de la dependencia de la velocidad de corte con el esfuerzo cortante mediante una curva de flujo.

Capítulo 2

Materiales para procesos de extrusión

2.1. Antecedentes Históricos de los Plásticos [3]

La industria del plástico es una industria joven que en el año 2004 cumplió 94 años de edad. Los primeros 50 años correspondieron a la investigación y la implementación de los descubrimientos realizados, los siguientes veinte años en la difusión de información y aprovechamiento de ellos y los últimos veinte años en optimizar el uso de los mismos.

La investigación de estos materiales inició desde 1830, cuando la investigación pura conduce a muchos científicos a la síntesis de materias primas, que después serán aprovechadas en la elaboración de diferentes plásticos.

A diferencia de materiales existentes en la naturaleza como, la madera y la piel de animales, que han sido utilizadas desde el origen de la humanidad; vidrio y metal que registran su uso en las primeras civilizaciones como Babilonia y Egipto; el plástico, es el primer material sintético, creado por el hombre.

Antes de la aparición del primer plástico sintético, el hombre ya utilizaba algunas resinas naturales, como el betún, gutapercha, goma, laca y ámbar, con los que podían fabricar productos útiles y lograr aplicaciones diversas. Se tienen referencias de que éstas se utilizaban en Egipto, Babilonia, India, Grecia y China, para una variedad de aplicaciones desde el modelo básico de artículos rituales hasta la impregnación de los muertos para su momificación.

El desarrollo de estas sustancias se inició en 1860, cuando el inventor estadounidense Wesley Hyatt desarrolló un método de procesamiento a presión de la piroxilina, un nitrato de celulosa de baja nitración tratado previamente con alcanfor y una cantidad mínima de alcohol. Su producto, es patentado con el

nombre de celuloide, se utilizó para fabricar diferentes objetos, desde placas dentales a cuellos de camisa. El celuloide tuvo un notable éxito comercial a pesar de ser inflamable y deteriorarse al exponerlo a la luz. Sin embargo, no es hasta 1907 cuando se introducen los polímeros sintéticos, cuando el Dr. Leo Baeckeland descubre un compuesto de fenol-formaldehído al cual denomina "baquelita" y que se comercializa en 1909. Este material presenta gran resistencia mecánica aislamiento eléctrico y resistencia a elevadas temperaturas.

Entre los productos desarrollados durante este periodo están los polímeros naturales alterados, como el rayón, fabricado a partir de la celulosa, del nitrato de celulosa o del etanoato de celulosa.

En 1920 se produjo un acontecimiento que marcaría la pauta en el desarrollo de materiales plásticos. El químico alemán Hermann Staudinger aventuró que éstos se componían en realidad de moléculas gigantes o macromoléculas. Los esfuerzos dedicados a probar esta afirmación iniciaron numerosas investigaciones científicas que produjeron enormes avances en esta parte de la química.

Evolución

Los resultados alcanzados por los primeros plásticos incentivaron a los químicos y a la industria a buscar otras moléculas sencillas que pudieran enlazarse para crear polímeros. En la década de los 30, químicos ingleses descubrieron que el gas etileno polimerizaba bajo la acción del calor y la presión, formando un termoplástico al que nombraron polietileno (PE). Hacia los años 50 aparece el polipropileno (PP).

Al reemplazar en el etileno un átomo de hidrógeno por uno de cloruro se produjo el cloruro de polivinilo (PVC), un plástico duro y resistente al fuego, especialmente adecuado para cañerías de todo tipo. Al agregarles diversos aditivos se logra un material más blando, sustituto del caucho, comúnmente usado para ropa impermeable, manteles, cortinas y juguetes. Un plástico parecido al PVC es el politetrafluoretileno (PTFE), conocido popularmente como teflón y usado para rodillos y sartenes antiadherentes.

Otro de los plásticos desarrollados en los años 30 en Alemania fue el poliestireno (PS), un material transparente comúnmente utilizado para vasos. El poliestireno expandido (EPS), una espuma blanca y rígida, usado básicamente para embalaje y aislante térmico.

También en los años 30 se crea la primera fibra artificial, el nylon. Su descubridor fue el químico Wallace Carothers, que trabajaba para la empresa Dupont. Descubrió que dos sustancias químicas como el hexametildiamina y ácido

adípico, formaban polímeros que bombeados a través de orificios y estirados formaban hilos que podían tejerse. Su primer uso fue la fabricación de paracaídas para las fuerzas armadas estadounidenses durante la Segunda Guerra Mundial, extendiéndose rápidamente a la industria textil en la fabricación de medias y otros tejidos combinados con algodón o lana. Al nylon le siguieron otras fibras sintéticas como por ejemplo el orlón y el acrilán.

En la presente década, principalmente en lo que tiene que ver con el envasado en botellas y frascos, se ha desarrollado vertiginosamente el uso del tereftalato de polietileno (PET), material que viene desplazando al vidrio y al PVC en el mercado de envases.

La Segunda Guerra Mundial

Durante la Segunda Guerra Mundial, tanto los aliados como las fuerzas del eje sufrieron reducciones en sus suministros de materias primas. La industria de los plásticos demostró ser una fuente inagotable de sustitutos aceptables. Alemania, por ejemplo, que perdió sus fuentes naturales de látex, inició un gran programa que llevó al desarrollo de un caucho sintético utilizable. La entrada de Japón en el conflicto mundial cortó los suministros de caucho natural, seda y muchos metales asiáticos a Estados Unidos. La respuesta estadounidense fue la intensificación del desarrollo y la producción de plásticos. Las poliamidas se convirtieron en una de las fuentes principales de fibras textiles, los poliésteres se utilizaron en la fabricación de blindajes y otros materiales bélicos, y se produjeron en grandes cantidades varios tipos de caucho sintético.

El auge de la posguerra

Durante los años de la posguerra se mantuvo el elevado ritmo de los descubrimientos y desarrollos de la industria de los plásticos. Tuvieron especial interés los avances en plásticos técnicos, como los policarbonatos, los acetatos y las poliamidas. Se utilizaron otros materiales sintéticos en lugar de los metales en componentes para maquinaria, cascos de seguridad, aparatos sometidos a altas temperaturas y muchos otros productos empleados en lugares con condiciones ambientales extremas. En 1953, el químico alemán Karl Ziegler desarrolló el polietileno, y en 1954 el italiano Giulio Natta desarrolló el polipropileno, que son los dos plásticos más utilizados en la actualidad. En 1963, estos dos científicos compartieron el Premio Nobel de Química por sus estudios acerca de los polímeros.

Las investigaciones de 1990 al 2000 se orientan a la combinación entre polímeros para formar mezclas poliméricas y aleaciones plásticas cuando se adicionan agentes de acoplamiento o compatibilizadores como los silanos, titanatos y hules termoplásticos, siendo la innovación la que mueve el desarrollo tecnológico de esta industria.

El final del Siglo XX se caracteriza por la suma de empresas que se fusionan y unen sus desarrollos originando nuevas oportunidades para el material que se considera la co-creación del hombre el plástico.

2.2. Clasificación de los Plásticos

La utilización de los polímeros sintéticos en la industria ha crecido enormemente debido a sus propiedades y la amplia gama de posibilidades que ofrecen. Existe una gran variedad de polímeros, lo que dificulta su clasificación, pero básicamente se pueden distinguir tres grupos de polímeros fundamentales: termoplásticos, termofijos y elastómeros.

Termoplásticos

Los termoplásticos son polímeros con una estructura molecular lineal, pudiendo tener ramas o no, pero no presentan una estructura con reticulaciones. Este tipo de enlace permite la movilidad de las moléculas ante la aplicación de calor, obteniendo un fluido viscoso. Esta característica permite conformar el material tantas veces como queramos por aplicación de temperaturas elevadas y/o presión. Podemos ver estas estructuras en las figura 2.1.

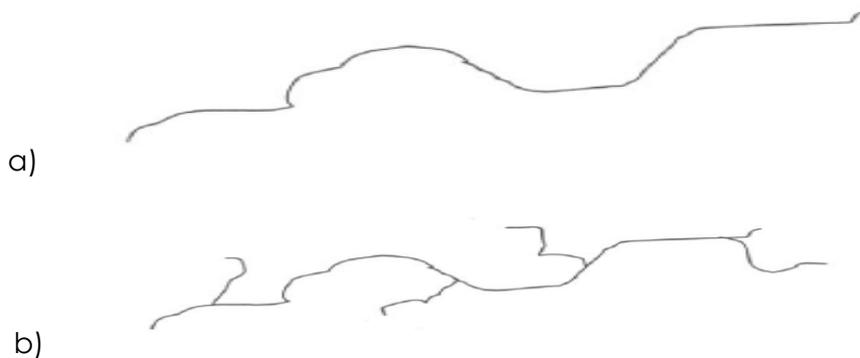


Figura 2.1. a) Estructura lineal sin ramificaciones;
b) Estructura lineal con ramificaciones

Termofijos

Los termofijos en cambio, presentan una estructura molecular altamente reticulada, con fuertes enlaces covalentes que restringen prácticamente en su totalidad la movilidad de las moléculas. En la figura 2.2 se muestra la diferencia con las estructuras anteriores. La aplicación de temperatura sobre estos polímeros, refuerzan esta estructura, por lo que también reciben el nombre de termoestables. Estos polímeros son rígidos y duros, por lo que en ocasiones, son

también llamados duroplásticos. El proceso de formación de sus redes moleculares recibe el nombre de curado.



Figura 2.2. Estructura reticulada.

Elastómeros

Los elastómeros son materiales de moléculas grandes que se caracterizan por su elevada elasticidad y la capacidad de estiramiento y rebote, recuperando su forma primitiva una vez que se retira la fuerza que los deformaba. Los elastómeros tienen una estructura molecular reticulada al igual que los termofijos, pero menos extensa, de forma que sus moléculas tienen más movilidad. Comprenden los cauchos naturales y sintéticos; entre estos últimos se encuentran el neopreno y el polibutadieno. El proceso de deformación de sus enlaces recibe el nombre de vulcanización.

Comodities

Comodities son aquellos que suponen una gran facilidad de procesamiento, disponibilidad y precios accesibles de acuerdo a la demanda mundial. De acuerdo a su importancia comercial por sus aplicaciones en el mercado, se encuentran los siguientes materiales:

Tabla 2.1. Clasificación de algunos polímeros según sus aplicaciones.

Nombre	Abreviatura	Número de identificación
Polietilentereftalato	PET o PETE	1
Polietileno de alta densidad	PEAD o HDPE	2
Policloruro de vinilo o Vinilo	PVC o V	3
Polietileno de baja densidad	PEBD o LDPE	4
Polipropileno	PP	5
Poliestireno	PS	6
Otros	Otros	7

Plásticos de ingeniería

Son los materiales que se utilizan de manera muy específica, creados prácticamente para cumplir una determinada función, requieren tecnología especializada para su fabricación o su procesamiento y de precio relativamente

alto. Estos materiales tienen aplicaciones en todo lo relacionado a soportar cargas, temperaturas elevadas o desgastes, su trabajo principalmente es mecánico. A continuación se muestra la pirámide de uso y clasificación de los materiales plásticos más comunes.

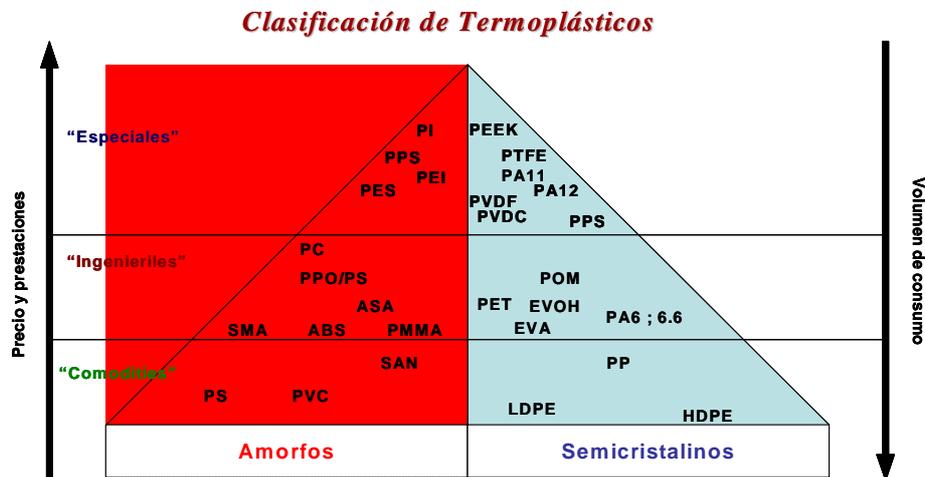


Figura 2.3. Pirámide de los materiales plásticos
(Centro Catalán del Plástico, CCP 2007)

2.3. Característica de los plásticos extrudidos

Cada resina termoplástico tiene sus propios atributos y escoger el correcto material para cada aplicación es una faceta muy importante sobre todo para el diseño de partes. El material seleccionado debe ser capaz de ser extrudido en el perfil diseñado. Las especificaciones de un material pueden coincidir perfectamente con los requerimientos de un diseño, pero si este material tiene un bajo punto de fusión y baja rigidez puede resultar imposible extrudir el material a una geometría deseada. Es importante seleccionar un material que cumpla con los requerimientos tanto de diseño como de proceso. Ejemplos de materiales que son buenos para extrusión son los siguientes:

- Acrílico
- Acrilonitrilo Butadieno Styreno (ABS)
- Policarbonato (PC)
- Poliéster (PETG)
- Polietileno de alta densidad (High Density-HDPE)
- Polietileno de baja densidad (Low Density-LDPE)
- Polipropileno (PP)
- Polistireno multipropósitos (General Purpose-GPPS)
- Polistireno de alto impacto (High Impact-HIPS)
- Cloruro de Polivinilo rígido (Rigid-RPVC)
- Cloruro de Polivinilo flexible (Flexible-FPVC)

Se describen a continuación algunas de las características a tenerse en cuenta en materiales utilizados para extrusión:

Estética

Lo primero en lo que la mayoría de las personas pone atención es en el color y el acabado superficial de las piezas plásticas. El color es una característica muy importante que se pueden obtener mediante el uso de materia prima comercial o con materiales que pueden ser formulados para cumplir con objetivos muy específicos de un producto. Se puede seleccionar un material base que puede tener un acabado mate, brillante, o altamente brillante, lo que acentúa los colores. Se pueden añadir además partículas metálicas que creen un efecto de brillo.

Los acabados superficiales pueden ser ligeramente rugosos o casi llegar a un acabado de espejo. Esto, dentro de los procesos de extrusión depende del estado y los acabados superficiales de las secciones del dado en contacto con la superficie del producto.

Transparente es uno de los "colores" más extrudidos. Éste es un color muy subjetivo porque puede ser transparente como el agua o tener ligeros tintes de color (verde, azul, ámbar, rojo, etc.). Pueden tener una claridad escasa con la cual sean legibles sólo objetos colocados justo detrás de la pieza (traslucidos); o pueden ser transparentes como los vidrios.

Tabla 2.2. Comparativa entre los costos relativos y la claridad relativa.

Material	Costo relativo al PVC	Intervalo de claridad (1 mejor)
Acrílico	1.6	2
Butirato	2.4	4
GPPS	0.7	3
PETG	1.5	6
Polycarbonato	2.0	1
PVC	1.0	7
Stirolux	1.0	5

La Tabla 2.2 muestra el intervalo de claridad con respecto al costo y la diversidad de materiales mostrados. El intervalo de claridad se basa en la experiencia de los materiales extrudidos.

Cuando es imposible conseguir un material que cumpla con todos los requerimientos necesarios, hay la posibilidad de mezclar materiales con aditivos. La resistencia de un material, estabilidad, dureza y apariencia pueden ser modificadas, pero algunas veces con el riesgo de perder o disminuir otros atributos.

Tabla 2.3. Comparativa entre algunas de las características inherentes de algunos materiales extrudidos.

	Rigidez	Brillo	Estabilidad Térmica	Estabilidad UV	Retardante Flama	Resistencia Química y a Solventes	Resistencia al Impacto	Costo
Acrílico	Excelente	Excelente	Bueno	Excelente	Pobre	Pobre	Bueno	Alto
ABS	Excelente	Bueno	Pobre	Pobre	Pobre	Pobre	Excelente	Bajo
PC	Excelente	Excelente	Excelente	Excelente	Bueno	Malo	Excelente	Alto
PETG	Bueno	Excelente	Pobre	Bueno	Pobre	Varía	Bueno	Medio
HDPE	Excelente	Bueno	Pobre	Pobre	Pobre	Bueno	Excelente	Bajo
LDPE	Pobre	Pobre	Pobre	Pobre	Pobre	Bueno	Excelente	Bajo
PP	Excelente	Pobre	Excelente	Pobre	Pobre	Excelente	Excelente	Medio
GPSS	Excelente	Excelente	Pobre	Pobre	Pobre	Pobre	Pobre	Bajo
HIPS	Excelente	Pobre	Pobre	Pobre	Pobre	Pobre	Bueno	Bajo
FPVC	Pobre	Pobre	Pobre	Pobre	Bueno	Pobre	Excelente	Bajo
RPVC	Excelente	Bueno	Pobre	Pobre	Bueno	Varía	Excelente	Bajo

2.4. Cedencia de plásticos

La cedencia es un sinónimo de falla plástica en materiales. Existen algunos criterios de falla bien definidos (por ejemplo: Tresca, Von Mises, Coulomb), los cuales son capaces de predecir el comportamiento de un material dúctil ante una inminente falla, como es el caso del acero. Además, una falla dúctil comúnmente puede estar relacionada a características microestructurales (como lo son las dislocaciones) y subsecuentemente explicadas en términos de su procesamiento y factores físicos como la temperatura, que influye en la probabilidad de cedencia, y los esfuerzos de cedencia correspondientes a los diferentes materiales.

En un contexto más general, los productos plásticos se diferencian de los componentes metálicos en diferentes formas:

1. Los plásticos son muy difícil de categorizar totalmente como materiales dúctiles o frágiles; esto es porque la gran cantidad de factores que pueden contribuir a fragilizar un material predominantemente dúctil (y viceversa). Esto incluye factores que dependen de la temperatura y del tiempo, y elementos de la microestructura, morfología, o formulaciones del material que varían el peso molecular, cristalinidad, orientación, ramificación de las cadenas poliméricas, y la presencia de aditivos, plastificantes y fibras de refuerzo.
2. La respuesta de un plástico en el punto de cedencia es inelástico. Claramente, el inicio de la falla por cedencia es influenciada por los eventos que la preceden.

3. La microestructura de piezas fabricadas es muy compleja. El tratar de explicar la cedencia con base a estos términos no se ha llegado a una etapa de investigación profunda.

Mientras que la cedencia es un modo preferible y predecible para conocer fallas en productos plásticos, el contexto general de la cedencia abarca mucho más que el criterio de una falla de gran escala; por ejemplo, la cedencia múltiple localizada es un método eficaz para el temple de algunos materiales plásticos comerciales. También, es posible el procesamiento de algunos termoplásticos al conformarlos o estamparlos de manera uniaxial o biaxial; estos métodos de procesamiento utilizan la habilidad del plástico para someterse a cedencia y grandes deformaciones controladas de una manera estable. Ejemplos de estos productos incluyen monofilamentos y cintas orientadas de PP o PETP, y películas biaxiales orientadas como láminas y botellas. Es por estas razones que la cedencia se considera como una faceta dentro de los intervalos de deformación.

Aspectos del proceso de cedencia baja esfuerzos de tensión

La mayoría de los medios convenientes por los cuales se puede estudiar la resistencia de un material bajo una carga aplicada utilizan una prueba bajo deformación constante por flexión, o tensión directa

La mayoría de los elementos de una falla por cedencia dúctil pueden observarse claramente en los datos de obtenidos por carga extensión (o, esfuerzo nominal-deformación); esto está relacionado a la gráfica de esfuerzo – deformación y los cambios en la apariencia física y de varios cambios microestructurales que ocurren.

Considerando la información de la figura 2.4; los números entre paréntesis indican la relación entre la apariencia de las probetas y los puntos de interés en la traza durante una prueba a tracción.

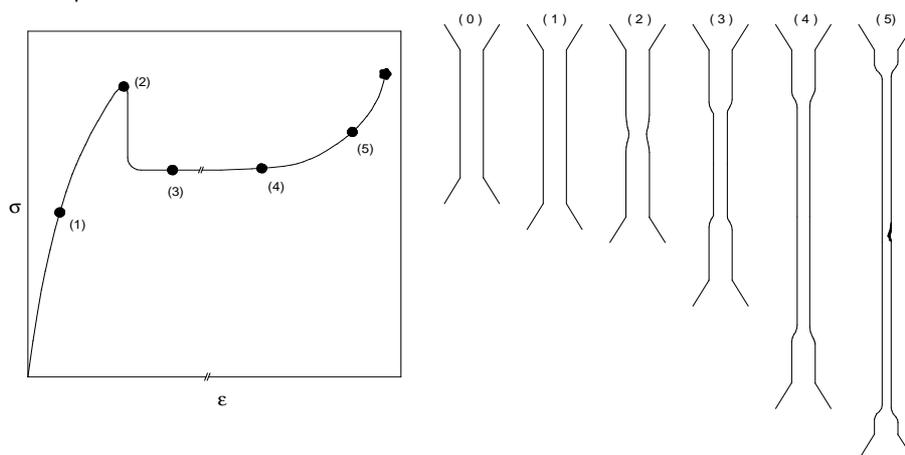


Figura 2.4. Relación nominal entre esfuerzo nominal y deformación para un plástico dúctil que soporta cedencia y estirado en frío. La apariencia física de la probeta es también ilustrada en varias etapas de la prueba.

- (1) Comportamiento antes de la cedencia. Los materiales que muestran claramente un punto de cedencia inevitablemente exhiben características de deformación sensibles al tiempo y la temperatura (y un comportamiento no lineal de esfuerzo-deformación) bajo condiciones equivalentes. En contraste, los materiales resistentes pero frágiles muestran una respuesta predominantemente elástica (lineal) la cual finaliza abruptamente (usualmente sin algún signo marcado de cedencia), ya que en el momento de fallar ocurre una ruptura que rápidamente se propaga.
- (2) El punto de cedencia. El esfuerzo de cedencia define el límite máximo superior de diseño para cualquier material plástico del que se espere falle de una manera dúctil. En el punto de cedencia, las cadenas moleculares se deslizan unas con a otras; como un proceso de deformación, si se produce en regiones cristalinas o amorfas, es enteramente irreversible y es ejemplificado como un pico en que se reduce drásticamente la carga soportada durante el experimento. La sección transversal de la probeta se reduce inmediatamente; este fenómeno se ha denominado en inglés como *necking* y es comúnmente observado en plásticos cristalinos sobre T_g .
- (3) , (4) Estirado en frío. El esfuerzo aumenta en la vecindad de la región estirada, por esto las mayores deformaciones ocurren frecuentemente en los elementos de material cercanos a este punto. Aunque las moléculas se alinean en la dirección del esfuerzo aplicado; la resistencia local aumenta como resultado, y se alcanza un punto donde la mayor resistencia a la deformación en la región plástica-deformada (anisotrópica) compensa el incremento simultáneo del esfuerzo real. La reducción de área después de la cedencia se vuelve estable; deformaciones posteriores derivan en una reducción de área transversal en todo lo largo de la probeta. Este proceso es conocido como estirado en frío, lo que ocurre bajo un esfuerzo por tensión comúnmente independiente del nivel de deformación. El aumento de la resistencia debido a la orientación de las moléculas, o endurecimiento por deformación involucra gran cantidad de deformaciones en una región pequeña de material; consecuentemente, el estiramiento en frío a lo largo de toda la probeta se refleja como una elongación de más del cien por ciento, o por un estiramiento de varias veces la longitud original de la probeta.
- (5) Fibrilación y fractura. En el punto en el cual el relativamente complicado e isotrópico material ha sido altamente deformado (normalmente referido a una morfología cristalina de cadenas extendidas formada durante el estiramiento en frío), la carga incrementa mientras que la deformación

aplicada es resistida por las microestructuras alineadas uniaxialmente (de mayor rigidez). A pesar de que la resistencia y la rigidez son propiedades paralelas a la dirección en las que el material es estirado, segmentos de material adyacentes de cadenas paralelas son jaladas sólo por fuerzas secundarias de los enlaces; la fibrilación longitudinal usualmente antecede a una eventual falla, toda vez que el material remanente en de la sección transversal reducida es incapaz de resistir la carga aplicada.

Datos reales de Esfuerzo – Deformación – La construcción de Considère

Claramente, la estabilidad en la reducción del área transversal en las probetas es un criterio importante que determina la tendencia al estiramiento. Dado que la sección transversal del material cambia significativamente como resultado de la cedencia, es apropiado trabajar en términos del esfuerzo real y no con los valores nominales. Un primer procedimiento sugerido por Considère, basado en las características de los esfuerzos y deformaciones reales puede ser utilizado para evaluar la probabilidad de que ocurra la cedencia y la viabilidad de una reducción de área estable. El procedimiento se basa en la suposición de un volumen constante; su validez entonces se extiende al comportamiento que se tienen cuando ocurre la cedencia puesto que no involucra agrietamientos de gran escala, los cuales de otra manera podrían resultar en una significativa dilatación. Utilizando esta suposición, se puede establecer que el producto de la sección transversal (A) y la longitud de la probeta (l) permanecen constantes mientras que la fatiga ocurre:

$$A_0 \cdot l_0 = A \cdot l$$

(el subíndice cero se refiere a la condición no deformada). La deformación se da por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1$$

Entonces:

$$\begin{aligned} A &= \frac{A_0 \cdot l_0}{l} \\ &= \frac{A_0}{(1+\varepsilon)} \end{aligned}$$

El esfuerzo (σ') es la fuerza por unidad de área, así que:

$$\sigma' = \frac{F}{A}$$

$$= \frac{F(1+\varepsilon)}{A_0}$$

$$= \sigma(1 + \varepsilon)$$

Hay que notar dos puntos aquí:

- (1) En cualquier deformación finita, el esfuerzo real siempre excede al esfuerzo nominal;
- (2) $(1 + \varepsilon) = \frac{l}{l_0} = R$ (R es el intervalo de extensión)

Dada que la fuerza de estirado, $F = A_0 \cdot \frac{\sigma}{(1+\varepsilon)}$, entonces:

$$\frac{dF}{d\varepsilon} = c \cdot \frac{d\sigma}{d\varepsilon} + \frac{\sigma \cdot A_0}{(1+\varepsilon)^2}$$

Si se selecciona apropiadamente el lugar donde ocurre la cedencia en un diagrama de Esfuerzo-Deformación (por ejemplo donde $\frac{dF}{d\varepsilon} = 0$), entonces:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{\sigma}{1+\varepsilon} = \frac{\sigma}{R} \quad (2.1)$$

Esta condición se satisface si es posible construir una recta tangente la curva real de esfuerzo-deformación desde una posición $R = 0$ ($\varepsilon = -1$) en la abscisa. Dos ejemplos de cedencia dúctil se pueden describir en la figura 2.5.

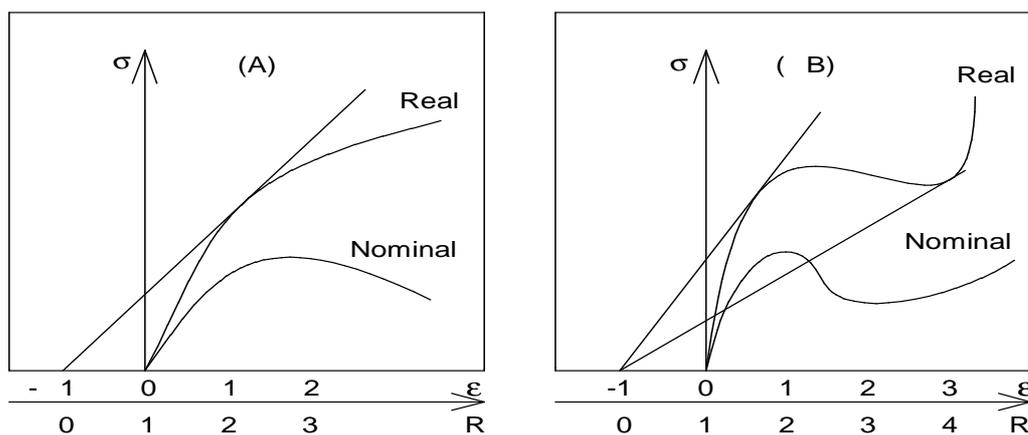


Figura 2.5. Uso de la consideración de Considère (esfuerzo (σ) vs. deformación (ε), o intervalo de extensión (R)) para ilustrar las condiciones de una cedencia estable (A) e inestable (B) en plásticos.

Figura 2.5(A). La ecuación (2.1) se satisface; la cedencia se localiza en el punto donde la tangente desde $R = 0$ donde interseca al eje de las abscisas. A pesar de que la reducción de área no es estable; la sección transversal de la probeta se vuelve progresivamente más delgada hasta que ocurre una ruptura.

Figura 2.5 (B). La ecuación (2.1) se satisface dos veces; esta es la condición para la propagación de una reducción de área estable en probetas, seguido de un estirado en frío.

Esta aproximación da información sobre la probabilidad de que ocurra la reducción de área o el estiramiento en materiales plásticos; adicionalmente esto sólo ayuda a definir el esfuerzo de cedencia (el esfuerzo real en la máxima carga) con una mayor precisión.

Calentamiento adiabático durante la cedencia

Por mucho tiempo ha sido aceptado que la energía absorbida por la deformación se transforma en calor durante el proceso de cedencia, provocando localmente que la temperatura aumente con la correspondiente modificación de las propiedades. A pesar de que se intenta explicar la reducción de área y el estiramiento en función de estas bases, no es correcto del todo. Dado que el incremento local de temperatura está en función de la deformación, y por esto una temperatura modesta corresponde a una leve deformación. Este efecto puede ser apreciado de manera sencilla al estirar una muestra pequeña de un polímero de bajo módulo elástico (por ejemplo el empaque plástico de polietileno comúnmente utilizado para formar los "six-pack's").

Ward y algunos otros autores han descrito una explicación a los efectos térmicos durante la cedencia al mostrar que el calentamiento adiabático influye en la magnitud de los esfuerzos de estirado (especialmente en valores de deformación próximos a 0.1 s^{-1}) pero esto no modifica la relación esperada entre el esfuerzo de cedencia y la velocidad de deformación. La disminución de la rigidez es debida al calentamiento, y por esto no es la única o adecuada explicación para la cedencia y el estirado en frío; el mecanismo parece afectar los esfuerzos posteriores al de cedencia pero sólo si la deformación es tal que la cantidad de calor generado excede la pérdida de calor de los alrededores.

Agrietamiento y cedencia al cortante

Muchas de las afirmaciones se han obtenido de observar el proceso de cedencia de materiales plásticos durante pruebas de tracción, con el consecuente aumento en la comprensión de los factores que contribuyen a lo que se ha considerado como un incipiente proceso de falla. Sin embargo, dado que se ha reconocido que cualquier forma de micro-cedencia es sinónimo de absorción de energía en ocasiones sin ninguna falla aparente, se ha puesto mucha atención en

estudiar preferentemente la cedencia como una transformación o fragilización de materiales plásticos, significando un aumento en su resistencia (predominantemente). Esta es la ruta para mejorar las propiedades de impacto y fractura de la mayoría de los plásticos amorfos (estirenos, PVC modificado), y de algunos termoplásticos de ingeniería semi-cristalinos (PA, POM, PBTP).

Formación y estructura de la grietas

El agrietamiento es usualmente una forma de cedencia, pero no exclusivamente observado en termoplásticos vítreos sometidos a esfuerzos por debajo de T_g . Aunque la cedencia por agrietamiento en cualquier producto siempre es algo indeseable (esta ocurre en niveles de deformación del orden de 60 – 80% en una “falla frágil por deformación; y por eso siempre precede a una eventual falla), aunque el que ocurra no es algo catastrófico dado que la microestructura agrietada es capaz de soportar todavía algunas fuerzas significativas.

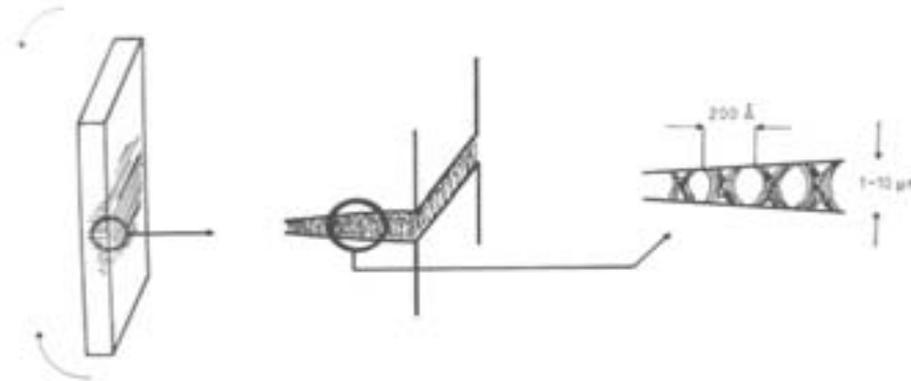


Figura 2.6. Formación y estructura de las grietas en los plásticos.

La figura 2.6 representa la formación de grietas y fisuras en la superficie de un polímero (como es el caso del poliestireno puro), provocado por una carga flexionante; el crecimiento de las grietas se encuentra en un plano perpendicular a la dirección de las fibras que se encuentra sometidas a máximo esfuerzo (de tensión). A la vista, las grietas son aparentemente líneas similares a un cabello; aunque las grietas pueden desencadenar una ruptura bajo condiciones de esfuerzo prolongadas, éstas no deben ser consideradas siempre dentro de este contexto porque los defectos están ligados a microfibrilaciones orientadas – filamentos de material cedido o estirado el cual está orientado o es paralelo a la dirección de los esfuerzos - lo que contribuye significativamente a una mayor resistencia a deformarse. El proceso de agrietamiento y cedencia genera dilataciones: se forman vacíos entre el material orientado y las superficies adyacentes de material no agrietado.

El agrietamiento está relacionado comúnmente con deformaciones críticas, que se incrementa si la temperatura disminuye, o si el nivel de deformación aumenta. La aplicación de esfuerzos paralelos a la orientación de una pieza inyectada

parece tener un efecto similar, pero la observación más sorprendente es la extensión en la que las grietas se aceleran en presencia de un ambiente activo. La absorción de vapor parece reducir el movimiento necesario para el agrietamiento debido a un efecto de pseudoplastificación. Los plásticos amorfos son particularmente propensos al agrietamiento por esfuerzos debidos al ambiente, en combinación con moléculas orgánicas como las cetonas, clorados y otros solventes altamente polarizados.

Aumento de la resistencia debido a múltiples cedencias

Los criterios de cedencia comúnmente son acotados en términos de los parámetros de los esfuerzos cortantes críticos. Evidencias de una cedencia por cortante se pueden observar como fisuras, que ocurren en planos de máximo esfuerzo cortante (ver Fig. 2.7). A diferencia del agrietamiento, la cedencia por cortante no provoca dilataciones y puede asumirse que ocurre a volumen constante; las fisuras son zonas de altas deformaciones. En común con otras formas de gran deformación plástica, la deformación a la cual ocurre una cedencia por cortante representa una limitante para los polímeros dúctiles dentro del diseño mecánico.



Figura 2.7. Imagen por microscopía electrónica que muestra las fisuras en un monofilamento de polietileno provocadas por una carga excesiva.

Si la cedencia es múltiple pero localizada, la proporción de la energía almacenada disminuye puesto que de otra manera puede contribuir a una falla frágil. Esta condición deseada para disipar la máxima energía se consigue provocando múltiples zonas de cedencia, esto se puede hacer a través de agrietamiento o por cedencia al cortante. Con esto queda establecido el aumento de resistencia en los termoplásticos, este concepto se utiliza además en la zona cauchosa en la copolimerización (por ejemplo butadieno en SAN, etileno en PP) o por mezcla directa (por ejemplo goma acrílica en PVC o PBTP). Algunos

criterios de selección para gomas plásticas endurecidas pueden resumirse como sigue:

- (1) La goma debe existir en una segunda fase discreta, usualmente como esferoides;
- (2) Adhesión entre la goma y la matriz polimérica debe ser optimizada;
- (3) La copolimerización o el proceso en el que se forma un compuesto debe dispersar efectivamente la fase cauchosa;
- (4) El tamaño óptimo de las partículas y su distribución puede variar las características de cedencia de la matriz;
- (5) Para una relajación efectiva, la temperatura T_g del elastómero debe estar por debajo de lo mínimo esperado como temperatura de operación del polímero endurecido.

Ha habido varios intentos para predecir los mecanismos teóricos de la fase cauchosa, algunas de las cuales son inevitablemente específicas a combinaciones dadas de polímeros. Como una indicación más general, se puede adoptar la siguiente secuencia:

- Sobre la carga, la presencia de una fase elastomérica concentra y hace más complicada la distribución de los esfuerzos en la matriz;
- El esfuerzo de cedencia se reduce, y el endurecimiento ocurre como resultado de la deformación plástica, o por efecto del agrietamiento (Mecanismo de Agrietamiento Múltiple), o por la formación de fisuras (Mecanismo de Deformaciones Múltiple).

El agrietamiento múltiple es el método subyacente al aumento de la resistencia en los compuestos de HIPS (poliestireno de alto impacto), y se caracteriza por el blanqueamiento en las zonas sometidas a esfuerzos máximos; esto es debido a una ligera dispersión del material agrietado y el cedido por diferencias en su índice refractivo.

Los efectos de los mecanismos de aumento de resistencia por cedencia al cortante son no son fáciles de identificar dado que no ocurren mínimas variaciones en el volumen específico, más aún cuando la separación de los dos mecanismos no siempre es fácil, pero hay evidencia que sugiere los efectos sinérgicos existen entre ellos. Experiencias han demostrado que la acelerada cedencia por cortante es un elemento importante que impacta en la resistencia a la fractura de termoplásticos como el ABS y el PVC flexible.

Cedencia en polímeros semi-cristalinos

Gran parte de lo anteriormente establecido está relacionado con materiales vítreos o amorfos cuyas estructuras muestran poco o nulo ordenamiento molecular. A pesar que el nivel de análisis que se ha alcanzado sobre los mecanismos de cedencia en plásticos semi-cristalinos no es muy avanzado; esto indudablemente puede ser atribuido al hecho de los materiales plásticos cristalizan de maneras diversas, y en diferentes extensiones. Consecuentemente, en ocasiones los plásticos responden a un esfuerzo aplicado de una forma dominada por las características de la fase amorfa.

Grado de Cristalinidad

La importancia de cualquier mecanismo de deformación cristalina aumenta con el grado de cristalinidad. Además si la fase amorfa se encuentra en estado plastificado ($T > T_g$), la latícea cristalina representa el principal elemento restrictivo en la microestructura.

Orientación cristalina y textura

La estructura de las laminillas cristalinas consiste de cadenas plegadas cuyo eje es perpendicular al plano de las laminillas. En los enlaces covalentes para permanecer sin romperse bajo un esfuerzo aplicado debe ocurrir un mecanismo de deslizamiento cristalino como el deslizamiento de los planos paralelos respecto al eje de las cadenas, progresivamente una mayor deformación de este tipo resulta en la formación de cadenas cristalinas extendidas (Fig. 2.8).

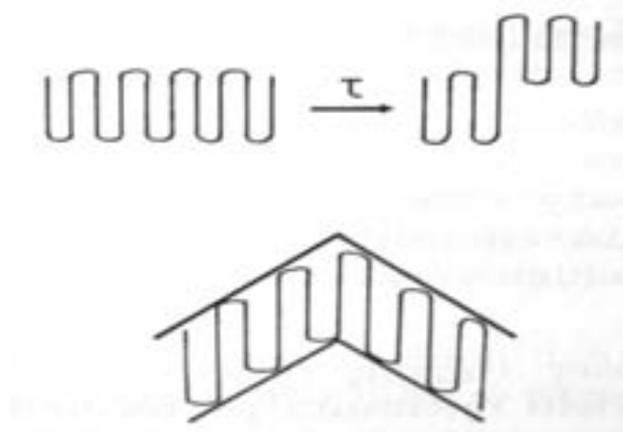


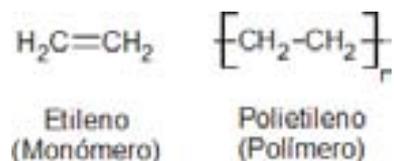
Figura 2.8. Deslizamiento cristalino: un ejemplo de deformación en plásticos semi-cristalinos.

2.5. Materiales para la experimentación de este trabajo

Polietileno

El polietileno (PE) es un material termoplástico blanquecino, de transparente a translúcido. Las secciones gruesas son translúcidas y tienen una apariencia de cera. Mediante el uso de colorantes pueden obtenerse una gran variedad de productos coloreados.

Por la polimerización de etileno pueden obtenerse productos con propiedades físicas variadas. Estos productos tienen en común la estructura química fundamental $(-CH_2-CH_2-)_n$, y en general tienen propiedades químicas de un alcano de peso molecular elevado. Este tipo de polímero se creó para usarlo como aislamiento eléctrico, pero después ha encontrado muchas aplicaciones en otros campos, especialmente como película y para envases.



En general hay dos tipos de polietileno:

- De baja densidad (LDPE)
- De alta densidad (HDPE).

El de baja densidad tiene una estructura de cadena enramada, mientras que el polietileno de alta densidad tiene esencialmente una estructura de cadena recta.

El polietileno de baja densidad fue producido comercialmente por primera vez en el Reino Unido en 1939 mediante reactores autoclave (o tubular) necesitando presiones de 100 Mpa y una temperatura de unos 300°C. El polietileno de alta densidad fue producido comercialmente por primera vez en 1956-1959 mediante los procesos de Philips y Ziegler utilizando un catalizador especial. En estos procesos la presión y temperatura para la reacción de conversión del etileno en polietileno fueron considerablemente más bajas. Por ejemplo, el proceso Philips opera de 100 a 150 °C y 2 a 4 MPa de presión.

Sobre 1976 se desarrolló un nuevo proceso simplificado a baja presión para la producción de polietileno, el cual utiliza una presión de 0.7 a 2 Mpa y una temperatura de unos 100 °C. El polietileno producido puede describirse como un polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) y tiene una estructura de cadena lineal con ramificaciones laterales cortas, inclinadas.

Ficha técnica

Durante el desarrollo de este trabajo se utilizó polietileno de alta densidad de grado extrusión soplado, PADMEX 55035 de PEMEX Petroquímica.

Índice de Fluidez: 0.35 g / 10min

Densidad: 0.956 g/cm³

Copolímero grado soplado bimodal, con una distribución de peso molecular ancha. Ofrece excelente rigidez, procesabilidad, y resistencia al impacto; así como buena resistencia al agrietamiento por esfuerzo ambiental (ESCR).

Contiene aditivos antioxidantes y lubricantes.

Aplicaciones: manufactura de botellas plásticas para conservar productos químicos y de limpieza. Además de la fabricación de tuberías para drenaje y ductos no presurizados.

Tabla 2.4. Ficha técnica del material PADMEX 55035 de PEMEX.

Parámetro	Unidad	Método de Prueba	Valor típico (Cumplimento FDA y EEC)
Índice de Fluidez	g/10min	ASTM – D 1238	0.35
Densidad	g/cm ³	ASTM – D1505	0.956
Propiedades de la Placa			
Resistencia a la Tensión (cedencia)	MPa	ASTM – D638	34.3
Resistencia a la Tensión (ruptura)	MPa	ASTM – D638	15
Elongación a la Ruptura	%	ASTM – D638	>500
Impacto Izod Método A	J/m	ASTM – D256	125
Módulo de Flexión	MPa	ASTM – D790	50.4
Módulo de Young	MPa	ASTM – D790	27.9
Resistencia Ambiental (ESCR) F ₅₀ condición C	h	ASTM – D1693	>200
Dureza Shore	Tipo D	ASTM – D1706	62
Temperatura de Reblandecimiento Vicat	°C	ASTM – D1525	125
Temperatura de Fusión	°C	ASTM – E794	130

Condiciones: Temperatura de inyección: 160 – 185°C en perfil recto o descendente.
Temperatura del cabezal: 175 – 195°C.

Las propiedades de las resinas de polietileno se deben principalmente, sino exclusivamente a tres propiedades moleculares básicas: densidad, peso molecular promedio y distribución del peso molecular. Estas propiedades básicas a su vez dependen del tamaño, estructura y uniformidad de la molécula de polietileno. Algunas de las propiedades que hacen del polietileno una materia prima tan conveniente para miles de artículos manufacturados son, entre otras, poco peso, flexibilidad, tenacidad, alta resistencia química y propiedades eléctricas sobresalientes.

Propiedades del polietileno

El polietileno de alto peso molecular es un sólido blanco y translúcido. En secciones delgadas es casi del todo transparente. A las temperaturas ordinarias es tenaz y flexible, y tiene una superficie relativamente blanda que puede rayarse con la uña. A medida que aumenta la temperatura, el sólido va haciéndose más blando y finalmente se funde a unos 110°C, transformándose en un líquido transparente. Si se reduce la temperatura por debajo de la normal, el sólido se hace más duro y más rígido, y se alcanza una temperatura a la cual una muestra no puede doblarse sin romperse.

El movimiento del polietileno en su estado de plastificación es no newtoniano. La velocidad disminuye a medida que aumenta la presión y con ésta la velocidad de paso. Por la sensibilidad de la viscosidad de la masa fundida al peso molecular, y en virtud de que el polietileno se maneja normalmente en estado fundido en operaciones de extrusión, los diferentes polímeros del comercio se caracterizan por la viscosidad del producto fundido.

En el intervalo 20000-30000 del peso molecular, un aumento de 10% del peso molecular dobla aproximadamente la viscosidad del producto fundido.

La viscosidad del polietileno fundido disminuye a medida que aumenta la temperatura; se reduce aproximadamente a la mitad por un aumento de 25°C, en la temperatura.

Cuando fluye por un orificio, como durante la extrusión o el moldeo, existe una orientación apreciable de las moléculas, que pasan al estado no orientado si el material se mantiene en el estado líquido, pero permanecen orientadas en el sólido, como es normal en la fabricación, el material fundido se enfría rápidamente. El grado de esta orientación es una función de la longitud media de la cadena y del grado de ramificación.

Los polietilenos de alto peso molecular muestran más orientación que los materiales de peso molecular bajo, y la orientación disminuye a medida que sube la temperatura.

Polietileno sólido: En la tabla siguiente se muestran algunas de las propiedades típicas del polietileno sólido.

Propiedades físicas y mecánicas

Tabla 2.5. Tabla comparativa de las principales propiedades de algunos plásticos.

Propiedades	Nylotec®	Polycarbonato Lexan®	Poliestireno	Polietileno Alta Densidad	Polipropileno	Poliuretano
1-Resistencia a la tracción	1100 - 14000	8000 - 9500	1500 - 7000	3100 - 5500	4300 - 5500	175 - 10000
2-Elongación %	30 - 320	100 - 130	2 - 90	20 - 1300	200 - 700	100 - 1000
3-Resistencia a la compresión	-	12500	4000 - 9000	2700 - 3600	5500 - 8000	20000
4-Resistencia a la flexión	7000 - 17500	13500	3000 - 12000	-	6000 - 8000	700 - 4500
5-Dureza Rockwell	R95 - R120	M70 - 78 R115 - 125	M10 - 80 R30 - 100	D 60 - 70 shore	R8 - 1100	10A - 90D shore
6-Módulo de flexión	0.6 - 1.3	3.2 - 3.5	1.5 - 4.6	1.0 - 2.6	1.7 - 2.5	0.1 - 1.0
7-Módulo de tracción	-	3.0 - 3.5	1.5 - 5.0	0.6 - 1.8	1.60 - 2.25	1.10
8-Módulo de compresión	-	3.45	-	-	1.5 - 3.0	0.1 - 1.0
9-Peso específico	1.15 - 1.17	1.2	1.04 - 1.10	0.941 - 0.965	0.902 - 0.910	1.10 - 1.50
10-Conductividad térmica	-	4.6	1.3	11.0 - 12.4	2.8	5.0
11-Calor específico	-	0.28 - 0.30	0.32 - 0.35	0.55	0.46	0.42 - 0.44
12-Resistencia al calor continuo	85 - 130	121	60 - 79	121	107 - 127	88 - 107
13-Temperatura de distorsión 264 P.S.I. 66 P.S.I.	93 - 218 204 - 218	129 - 140 132 - 143	90 máx 82 - 104	43 - 54 60 - 88	52 - 60 93 - 121	-
14-Resistencia específica	-	2.1 x 10E11	> 10E16	> 10E16	> 10E16	2x10E11 - 10E13
15-Resistencia dieléctrica de ruptura	300 - 400	380	300 - 600	450 - 500	500 - 660	300 - 500
16-Constante dieléctrica 60 ciclos	3.7	2.97 - 3.17	2.45 - 4.75	2.30 - 2.35	2.2 - 2.6	4.0 - 7.5
17-Resistencia arco voltaico	-	10 - 120	20 - 140	-	136 - 185	0.1 - 0.6
18-Absorción de agua (24 hs. 1/8" esp.)	0.6 - 1.2	0.15 - 0.18	0.05 - 0.6	< 0.01	< 0.01 - 0.03	0.1 - 0.2
19-Efecto de los rayos solares	(e)	(g)	(i)	(k)	(k)	Ninguna o leve amarillamiento
20-Resistencia a los ácidos leves	Buena	Atacado	Atacado	Excelente	Excelente	Razonable
21-Resistencia a los ácidos fuertes	Atacado	Levemente atacado	Atacado por ácidos oxidantes	(a)	(a)	Levemente atacado
22-Resistencia a las bases débiles	Buena	Razonable	Atacado	Excelente	Excelente	Razonable
23-Resistencia a bases fuertes	Buena	Atacado	Atacado	Excelente	Muy buena	Levemente atacado
24-Resistencia a solventes orgánicos	(f)	(h)	(j)	(d)	(d)	razonable
25-Pérdida por abrasión	-	-	325	29	-	3

(a) Atacado solamente por alta concentración de ácidos oxidantes.
 (b) Atacado por NH3
 (c) Soluble en acetona, ésteres, aromatizantes e hidrocarburos
 (d) resiste a varios solventes a temperaturas < 80 °C
 (e) Los Nylons se tornan quebradizos después de una prolongada exposición a la luz del sol. Consulte sobre nylon negro para mayor resistencia
 (f) Resistente a los solventes comunes, más disueltos por fenoles y ácido fórmico
 (g) Sufre pequeño cambio de color, se torna levemente quebradizo
 (h) Resiste a las parafinas, soluble en aromáticos e hidrocarburos clorados
 (i) Pequeña pérdida de resistencia. Levemente amarillento
 (j) Soluble en aromáticos e hidrocarburos clorados a 60 - 93 °C
 (k) Se torna fisurado. se recomienda el uso de material negro.
 (l) Resiste a alcoholes, hidrocarburos, asfálticos, óleos, es soluble o altera su volumen con acetonas, ésteres e hidrocarburos aromáticos.

Estas propiedades se refieren a un producto con peso molecular aproximado de 25000g/mol. Algunas de las propiedades son relativamente insensibles al peso molecular, entre ellas la densidad, el punto de fusión, el calor específico, la dureza y el módulo de Young; otras, como la resistencia a la tracción, la resistencia al choque, la resistencia al desgarramiento, el alargamiento en la rotura por tracción y la flexibilidad a temperaturas bajas, son sensibles al peso molecular. La elección del peso molecular necesario para diferentes usos significa, en general, una transacción entre las propiedades mecánicas mejoradas del material de alto peso molecular y la mayor facilidad para fabricar artículos con el material de peso molecular más bajo.

Tabla 2.6. Propiedades dependientes del peso molecular.

Propiedad = f(peso molecular)	Propiedad NO es f(peso molecular)
Resistencia a la tracción	Densidad
Resistencia al choque	Punto de fusión
Resistencia al desgarramiento	Calor específico
Alargamiento en la rotura por tracción	Dureza
Flexibilidad a bajas Temp.	Módulo de Young

La tensión en el punto de ruptura depende del peso molecular; pero para un material con peso molecular de 25.000 puede ser el doble de la tensión en el punto cedente. La forma de la curva general de esfuerzo-deformación depende de la temperatura y de la rapidez de aplicación del esfuerzo. A medida que aumenta la temperatura, baja el punto cedente; mientras que un aumento en la rapidez con que aplica la tracción da como resultado un aumento del punto cedente y de la resistencia final, y también en la perfección de la orientación del ejemplar estirado en frío. A medida que se reduce la temperatura por debajo de las temperaturas ordinarias, se reduce el alargamiento en la ruptura y se alcanza una temperatura en la cual no se produce estirado en frío, rompiéndose el ejemplar bruscamente con sólo un alargamiento de 10%. Esta temperatura es aproximadamente aquella en que un ejemplar no puede ser doblado más que en un grado muy limitado sin que se rompa como si fuera un material quebradizo.

Una propiedad bastante extraordinaria del polietileno de peso molecular inferior a 20.000 es su sensibilidad al agrietamiento cuando se somete a tensiones en contacto con ciertos líquidos, en especial líquidos orgánicos polares. Los rasgos moleculares que rigen esta propiedad son semejantes a los que regulan la flexibilidad a baja temperatura, y si es necesaria la resistencia a esta forma de ataque, debe usarse polietileno de alto peso molecular.

Todas las propiedades mecánicas del polietileno son sensibles a la historia térmica del ejemplar. Si el material se enfría rápidamente desde el estado fundido, el sólido tiene densidad y cristalinidad menores; por consiguiente es más blando y más flexible y, por lo menos al principio, es más resistente al agrietamiento a bajas temperaturas y al agrietamiento en presencia de líquidos orgánicos. Por otro lado, es probable que contenga más tensiones internas. El enfriamiento lento partiendo

del estado fundido o el recocido de la muestra, por ejemplo, por tratamiento en agua hirviendo, da un producto más cristalino, más duro y algo más quebradizo; pero el sólido puede estar sometido a menos tensiones y es menos probable que se produzcan cambios lentos en las dimensiones al elevarse después la temperatura.

El polietileno sólido sufre deslizamiento en frío, como sucede a muchos otros polímeros; pero en virtud de su naturaleza cristalina, este corrimiento es muy pequeño a temperaturas ordinarias, salvo bajo cargas que se aproximan al punto de cedencia. Sin embargo, a temperaturas más altas, el corrimiento en frío es apreciable. Cuando se somete una muestra a tracción, esfuerzo cortante o compresión, al principio se deforma rápidamente; pero la rapidez con que varían las dimensiones disminuye a medida que pasa el tiempo; por lo menos durante un cierto tiempo, la deformación es aproximadamente una función lineal del logaritmo del tiempo de aplicación. A temperaturas más altas y con tensiones mayores se produce una deformación permanente de la muestra.

Capítulo 3

Planteamiento del problema y su solución

Esta tesis inició con la puesta en marcha del extrusor simple que se puede ver en su estado original en la figura 3.1, aquí se pueden observar las condiciones estéticas en las que llegó a las instalaciones de los talleres de Ingeniería Mecánica. El extrusor marca NIETO llegó al Laboratorio de Procesamiento de Plásticos de la Facultad de Ingeniería con partes oxidadas, elementos mecánicos desgastados y partes eléctricas sin funcionamiento, la máquina aunque estéticamente no lucía bien no mostraba señales de un mal uso.

Después de la puesta en marcha del equipo se continuó con el desarrollo del diseño de un dado para la extrusión de perfil tubular a fin de obtener un producto final útil.



Figura 3.1. Imagen del extrusor marca NIETO al momento de llegar al Laboratorio de Procesamiento de Plásticos de la FI.

3.1. Puesta en marcha del extrusor

Los trabajos de rehabilitación de la máquina iniciaron con la limpieza de tierra, óxido y grasa que cubrían a la máquina utilizando cepillos de alambre, brochas, estopa y thinner. Algunas de las piezas con mucho óxido como las bridas que sujetan los dados, las resistencias eléctricas hubo que limpiarlas además con fibra de alambre y lijarlas. Para su puesta en marcha el extrusor se dividió en los siguientes sistemas: Equipo eléctrico, extrusor y transmisión motriz.

Equipo eléctrico

Se inspeccionó visualmente el estado de las conexiones en el tablero principal encontrándose todas en aparente buen estado. A continuación se conectó el cable de alimentación de corriente trifásica para energizar todo el equipo y probar los diferentes dispositivos eléctricos del equipo como switches, contactores, resistencias, las tomas de alimentación para el motor y para el transductor que mide la presión en la zona de dosificación del cañón. No recibían alimentación dos resistencias del cañón, por lo que se probaron las resistencias por separado a fin de aislar el problema; siendo los controladores de temperatura los afectados. Para lo anterior se reemplazaron éstos por nuevos con sus respectivos termopares con lo cual el sistema calefactor quedo completamente restaurado.

Extrusor

Con el fin de extraer el husillo del cañón y limpiar ambos, se conectaron todas las resistencias en serie con una alimentación de 220v. Afortunadamente el cañón tenía material ceroso en su interior que ayudo a prevenir el deterioro del equipo. El material se fundió y se pudo retirar la placa rompedora y finalmente con ayuda de tela de asbesto y equipo de trabajo para altas temperaturas se extrajo el husillo para su inmediata limpieza con fibra de alambre. Cabe notar que la limpieza fue mínima debido a que ambos componentes se encontraba en buen estado.

Transmisión motriz

El extrusor utiliza un motor trifásico que conecta una caja reductora mediante dos bandas y sus respectivas poleas; la caja reductora hace girar la flecha principal del husillo.

Se reviso todo el mecanismo de transmisión, se quitó el tapón del depósito y se descubrieron todos los rodamientos de los engranes y la flechas de la caja reductora con el fin de limpiar el depósito de aceite y engrasar los rodamientos. El depósito se limpio con thinner para extraer todos los residuos del aceite

degradado y rebabas generadas por el desgaste de los engranes. Una vez limpio el depósito y engrasados los rodamientos se hicieron juntas de sellado a la medida para todas las tapas de los rodamientos y para la brida que une al reductor con el cañón, éstas juntas se sellaron utilizando silicón automotriz para evitar cualquier fuga, además el tapón principal del depósito se selló utilizando cinta de Teflón. Cuando todo el depósito se selló; se ajustaron todos los pernos de sujeción y se vació el aceite nuevo en el depósito.

Por último se ensambló el husillo nuevamente y la máquina quedó lista y a la espera de un dado nuevo.

3.2. Variables controlables del proceso

Para proceder a determinar el diseño del dado, se estudió el proceso de extrusión, encontrándose una infinidad de variables por controlar que se complican o facilitan dependiendo del material que se esté procesando. En general se tienen variables y parámetros fijos, que dependen de la máquina y las variables o parámetros que se deben fijar de acuerdo al producto deseado.

Parámetros Fijos (parámetros que dependen del extrusor)

- Ángulo de los hilos del husillo: $\phi = 17^\circ$
- Altura de los hilos del husillo: $d = 7.85\text{mm}$
- Longitud del cañón: $l = 1071\text{mm}$
- Temperaturas máximas posibles en las resistencias: $\sim 500^\circ\text{C}$

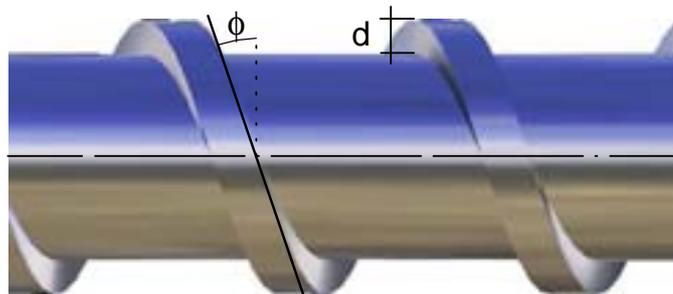


Figura 3.2. Esquema que muestra la medición del ángulo de los hilos en un husillo y la profundidad del canal del husillo (ésta última varía en cada zona del husillo y en la práctica se maneja el valor de H que es la profundidad del canal medida desde la pared del cañón hasta la pared del husillo).

Parámetros variables (parámetros que dependen del material a procesar y del producto deseado).

- Temperatura en el dado

- Temperatura en las diferentes zonas del cañón
- Revoluciones del husillo
- Enfriamiento del material extrudido

El establecimiento correcto de los parámetros involucrados se refleja en un producto de mayor o menor calidad y en las propiedades finales del material extrudido.

Partes comunes de un extrusor simple

La división más común para extrusores de un sólo husillo consiste en 4 zonas, desde la alimentación del material hasta la salida por el dado.

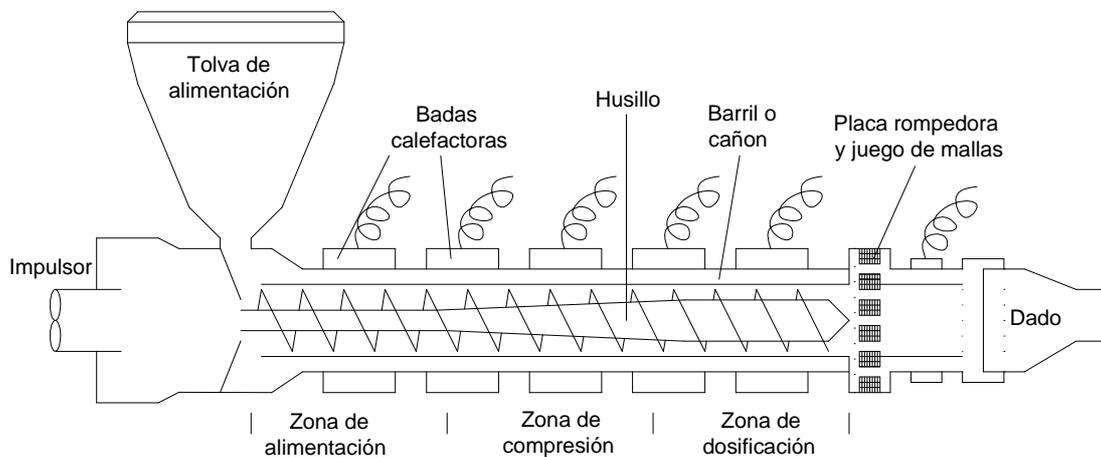


Figura 3.3. Esquema de un extrusor simple que muestra sus diferentes componentes.

El material que entra en un extremo del sistema y es alimentado por la tolva llega a la zona de alimentación dentro del cañón donde el canal de alimentación tiene su máxima profundidad, dado que su finalidad es transportar los pellets sólidos y calientes hacia la zona de compresión; el calentamiento del material, se lleva a cabo por efecto de las resistencias o bandas calefactoras y por la fricción generada entre el material y el husillo a la vez que es transportado por el husillo que gira generalmente a bajas revoluciones. Conforme el material avanza aumenta el esfuerzo cortante en el material y las paredes del cañón; llegando a la zona de compresión, el canal de alimentación reduce su profundidad lo que provoca que el material se comprima sumado a un aumento de la fricción y una mayor temperatura en esta zona, el material termina por fundirse para entrar ahora en la zona de dosificación que tiene todavía una temperatura mayor que en las zonas anteriores y el canal de alimentación tiene aquí su mínima profundidad. En esta zona el material debe estar completamente plastificado para que pueda fluir sin problemas a través de la placa rompedora y las mayas hasta llegar a su salida por el dado.

3.3. Piezas del extrusor NIETO

A continuación se detallan las características de cada uno de los componentes involucrados en el extrusor con el fin de identificar todas las partes, y en particular las que se relacionan con el diseño del dado.

Motor

Motor trifásico marca ASEA
Tipo MBT 215T (132M)-4
Potencia: 10 Hp
Frecuencia: 60 Hz
Velocidad máxima de 1735 rpm
Aislamiento de clase B
Temperatura ambiente máxima de 40 °C
Voltaje de operación 220 / 440 V



Figura 3.4. Motor del extrusor.

Reductor de velocidad

Reductor de velocidad CEA tipo 2520D de engranes helicoidales.
Entrada máxima 1750 rpm
Relación 14 – 1
Potencia máxima a la entrada de 24 HP



Figura 3.5. Reductor de velocidad.

Poleas

Transmisión de poleas de reducción de velocidad para doble banda:

Relaciones de diámetros:
400 x 170mm
400 x 140mm
400 x 110mm



Figura 3.6. Reductor de velocidad.

Cañón (o barril)

Diámetro interno de 51mm
Diámetro externo de 90mm

Longitud de 1071mm
Relación (L/D) = 21



Figura 3.8. Perspectivas de husillo dentro del cañón y la brida que sujeta al dado.

Husillo

Husillo universal (también conocido como husillo para polietileno) con ángulo cuadrado de aproximadamente 17° . Aunque en realidad, el hilo de la cuerda del husillo no mantiene un paso ni un ángulo constante como se puede ver en los recuadros de la figura 3.7.

Longitud: 1067mm

Diámetro de 49.7mm

Profundidad de canal: 7.85mm

Ancho del filete: ~ 7.5 mm

Paso variable: 34.15 - 43.95mm

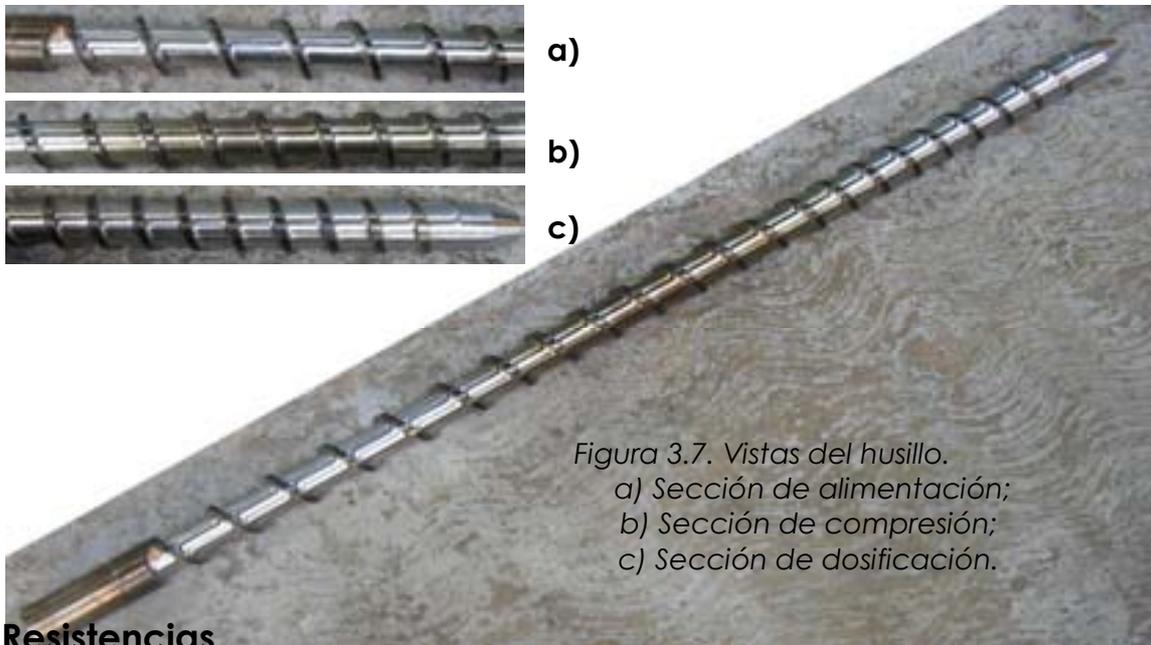


Figura 3.7. Vistas del husillo.
a) Sección de alimentación;
b) Sección de compresión;
c) Sección de dosificación.

Resistencias

Se utilizan resistencias de banda para la calefacción del extrusor. Cada zona del cañón (alimentación, compresión y dosificación), tienen tres resistencias

Diseño y manufactura de un dado para extrusión de perfil tubular plástico de sección circular

conectadas en paralelo. Al final del cañón, la brida porta-dado tiene una resistencia más. Y finalmente el dado utiliza una resistencia también.

Cañón: 9 resistencias de \varnothing 90mm x 84mm de ancho, 200v y 700W c/u.

Brida: 1 resistencia de \varnothing 230mm x 35mm, 220v y 700w.

Dado: 1 resistencia \varnothing 90mm x 65mm, 220v y 550w



Figura 3.9. Resistencias de una de las tres secciones del cañón conectadas en paralelo.

Panel de control

El tablero principal es donde se encuentran los controles temperatura de las resistencias, y los amperímetros que registran cuanta corriente consumen. Además ahí se encuentra el switch principal del motor.



Figura 3.10. Tablero principal.

Termopares

Controles de temperatura o pirómetros. Estos dispositivos contralan la temperatura a fin de que permanezca estable durante la operación del extrusor.

Pirómetros WEST 800
Específicos para termopar tipo J
Rango de operación: 50 – 400 °C



Figura 3.11. Pirómetro.

Amperímetros

El tablero principal cuenta con cinco amperímetros analógicos que registran la corriente con la que opera cada resistencia; y tiene uno más que registra la corriente en demandada por el motor.

Amperímetros de las resistencias
Rango de operación: 0 – 20 A
Amperímetros del motor
Rango de operación: 0 – 100 A



Figura 3.12. Amperímetro analógico.

Control de la presión

Durante el proceso de extrusión se generan presiones muy altas, principalmente en la zona de dosificación para lo cual se cuenta con un manómetro especial que está en contacto con el plástico fundido al final del cañón. Es importante conocer la presión porque de lo contrario ésta puede sobrepasar los niveles permisibles por el equipo o por los dados.

Medidor de presión Dynisco
PG441R-5M-6"/0-U
Diseño mecánico
Rango de operación: 0 – 5000psi



Figura 3.13. Manómetro para medir presión de plásticos fundidos.

Termopares

Un termopar es un dispositivo formado por la unión de dos metales distintos que produce un voltaje (efecto Seebeck), que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado “punto caliente” o de medida y el otro denominado “punto frío” o unión fría o de referencia.

Los termopares que utilizados por el equipo son del tipo J y tienen un rango de operación de -40°C a $+750^{\circ}\text{C}$ y una sensibilidad de $\sim 52 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ que son valores suficientes una operación óptima.



Figura 3.14. Termopar tipo J.

Dado

El dado es la herramienta principal dentro del proceso de extrusión pero hasta este momento el equipo no cuenta con dado alguno por lo que en la figura 3.15 se presenta un modelo de CAD meramente ilustrativo.



Figura 3.15. Diseño del dado modelado en CAD.

3.4. Diseño del dado de extrusión

La función de un dado de extrusión es darle forma al material suministrado por el husillo, de acuerdo a la sección transversal de la cavidad del mismo. Por lo tanto, el dado es un canal cuyo perfil cambia, desde el orificio del extrusor, hasta un orificio que produce la forma requerida. Con objeto de predecir el comportamiento de un termoplástico fundido en un canal de este tipo, se necesita conocer la viscosidad del material fundido en el margen requerido de velocidad, de esfuerzo cortante y temperatura así como poder relacionar esta viscosidad con el flujo de material fundido bajo presión a través de las diferentes secciones de las que se compone el canal. Después, puesto que las caídas de presión son aditivas, se puede calcular la caída de presión total y la descarga a través de todo el dado.

Para poder solucionar el problema de la puesta en marcha de la máquina, se recurrió a la búsqueda bibliográfica y técnica para el diseño del dado. Pensando en plantear una configuración geométrica de fácil alcance para la realización de las prácticas para los alumnos que cursan las correspondientes asignaturas de manufactura y/o conformado de materiales. Se encontró que realizar una sección transversal hueca podría ilustrar el control del espesor del producto terminado. Por tanto, los dados típicos de extrusión son los siguientes.

Dados típicos de extrusión

Los dados se pueden unir al extrusor en tres formas diferentes dependiendo de los requerimientos del proceso. Estos tres sistemas son: paso directo, cabeza cruzada y cabeza descentrada, dependiendo de la dirección de extrusión resultante y de la descarga relativa a la dirección de alimentación de material fundido desde el extrusor.

Los dados de paso directo son aquellos cuyos ejes están alineados con la dirección del suministro de material. Es necesario indicar que esto no significa por fuerza que se encuentren directamente alineados con el eje de la máquina, ya que en algunos extrusores un dado de paso directo se encuentra unido a un canal curvo de alimentación para cambiar la dirección de descarga.

Los dados de paso directo normalmente se usan para la extrusión de tubo, barra, perfiles, lámina y por medio de un conductor de alimentación curvo se usan para película plana y tubular. Una característica predominante que distingue a los sistemas de paso directo es que en la producción de extrusiones tubulares es esencial tener un soporte de araña (estrella) para el mandril; es decir, anillo periférico que sostiene al mandril y que a la vez funciona como distribuidor de flujo antes del paso hacia la boquilla.

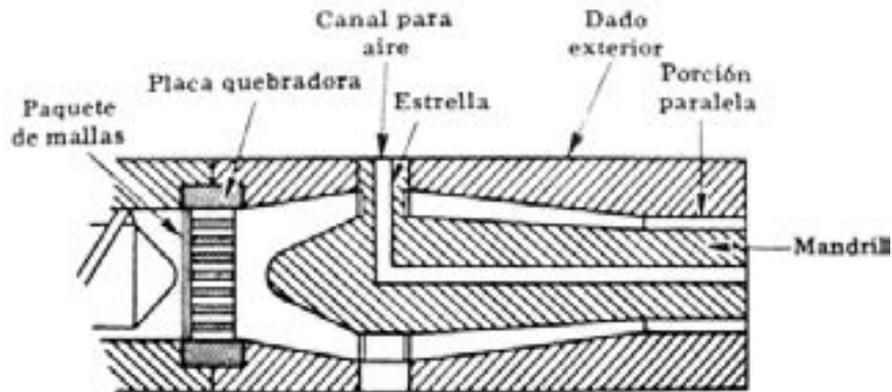


Figura 3.16. Diagrama de un dado típico para tubo. [7]

Los dados de cabeza cruzada (Fig. 3.17) tienen sus ejes en un ángulo de 90° con relación al suministro de material, se usan generalmente para la producción de cables y alambres aislados o en otros procesos en donde es necesario introducir un filamento continuo u otro miembro para ser cubierto por plástico al pasar por el mandrill del dado. Una ventaja sobresaliente de los montajes es que por este medio es posible tener fácil acceso al extremo de entrada del mandrill del dado, de tal manera que cualquier manipulación, calentamiento, enfriamiento o cualquier otra regulación de este miembro se efectúa fácilmente. Otra ventaja es que debido al uso de la alimentación lateral no hay necesidad de un montaje del mandrill con soporte de araña en la producción de extrusiones huecas, de tal manera que se evita el problema de líneas de memoria.

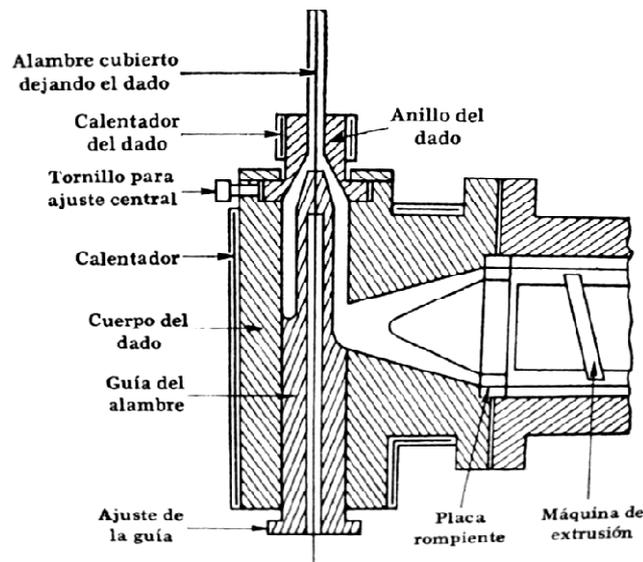


Figura 3.17. Diagrama de una cabeza cruzada para recubrimiento de alambre. [7]

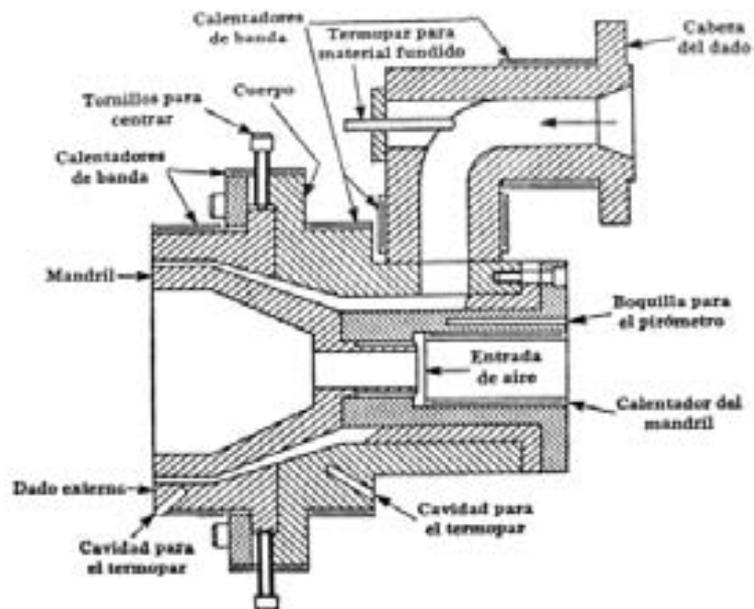


Figura 3.18. Ilustración de un dado descentrado. [7]

Las cabezas descentradas (Fig. 3.18) se han desarrollado a partir de las cabezas cruzadas para combinar las ventajas de esta forma de alimentación lateral con las del sistema de paso directo. En este arreglo el material cambia de dirección dos veces, en un intento para compensar, en lo posible, la falta de balance que resulta de un solo cambio de dirección como ocurre en la cabeza cruzada normal. En esta forma, el dado de extrusión normalmente, se encuentra en línea con la máquina aunque no es esencial. Los dados descentrados son populares en la producción de tubo, en donde la falta de un soporte de araña y la facilidad para regular la temperatura del mandril mejoran mucho la calidad del producto.

3.5. Reglas generales para el diseño de dados de extrusión [1]

Los siguientes principios, encontrados en la literatura, se tomarán en cuenta durante el diseño del dado:

- Un dado debe consistir del menor número de piezas posible, para minimizar los tiempos necesarios para su ensamblaje y limpieza. En su conexión se debe tener cuidado en el centrado de todas las piezas a conectarse entre sí.
- Un número pequeño de piezas individuales también significa un número reducido de uniones en el cuerpo del dado a lo largo de la región del canal principal. No sólo existe la posibilidad de fugas de material si no sella bien, sino que también existe el riesgo de que el material se degrade en esas zonas. Por esto es que las uniones o juntas deben ser las mínimas

posibles. Estas juntas deben situarse donde se tengan secciones transversales relativamente simples para facilitar el mantenimiento.

- Las superficies que funcionan como sellos, ya que no se pueden evitar; deben ser planas y pequeñas para asegurar una distribución uniforme de las fuerzas sellantes sobre toda la superficie. En este punto debe de chequearse la presión.

Para conseguir una mejor distribución de la carga, el orificio del dado debe sujetarse por varios tornillos.

- Las dimensiones del cuerpo del dado deben adecuarse para mantener las deformaciones por presión dentro de límites justificables.
- Debe tenerse en consideración la expansión térmica cuando diferentes piezas individuales del dado, tienen diferentes temperaturas.

Cuando se establece la configuración del canal de flujo en el dado, se debe poner atención en los siguientes puntos:

- Cuando sea posible, el material fundido debe alimentar el dado de manera centrada.
- No deben de existir puntos muertos o esquinas en el canal del dado. Esto significa que se deben evitar filos, transiciones en la sección transversal o cambios de flujo.
- Zonas con secciones transversales grandes, como es el caso de zonas donde el tiempo de residencia es largo debido a velocidades del flujo bajas, provocan la degradación de algunos compuestos o materiales. Para estos materiales, el principio de un volumen mínimo por el canal de flujo debe de observarse.
- Las líneas de flujo siempre provocan baja calidad en los productos extrudidos por lo que deben evitarse o disminuirse.
- La superficie del canal del dado debe ser pulida o rectificada y si es necesario debe de cromarse. El cromado reduce la tendencia del flujo a adherirse a las paredes del canal con lo cual también se reduce el tiempo de residencia del material dentro del dado. El recubrimiento de cromo se desgasta con el uso por lo que debe de ser renovada después de cierto periodo de operación.

Materiales para dados de extrusión

Los materiales para dados de extrusión tienen que cumplir con los siguientes requerimientos:

- Tienen que ser fácilmente maquinados (por corte o por erosión)

- Resistentes a la presión, la temperatura y el desgaste
- Tener suficiente resistencia y tenacidad
- Suficiente dureza superficial
- Pueden ser fácilmente pulidos para conseguir una superficie sin porosidades
- Responder adecuadamente a un simple tratamiento térmico
- Tener una mínima tendencia a distorsiones y cambios en las dimensiones durante un tratamiento térmico
- Ser resistente a la corrosión (ataques químicos)
- Ofrecer posibilidades para tratamientos superficiales (cromado, nitrurado)
- Tener una buena conductividad térmica
- Estar libre de esfuerzos residuales

Además de algunos pocos y ocasionales materiales no ferrosos, los siguientes aceros son mayormente utilizados en la manufactura de dados para extrusión:

- Aceros endurecidos superficialmente
- Aceros nitrurados
- Aceros completamente endurecidos
- Aceros templados o tratados térmicamente
- Aceros resistentes a la corrosión.

Recubrimientos para dados de extrusión

Adicionalmente al nitrurado, los siguientes métodos también son utilizados para mejorar las propiedades anticorrosivas y para disminuir el desgaste en dados de extrusión de plásticos.

- Cromado (gruesas capas de recubrimiento de cromo)
- Niquelado (recubrimientos de níquel o de aleaciones con alto contenido de níquel)
- Recubrimientos de carburo de titanio
- Insertos apropiados

3.6. Requerimientos y especificaciones

Requerimientos

- El dado debe producir un perfil tubular circular
- Se desea obtener un perfil tubular semejante en dimensiones a un popote a una manguera de aire comprimido.
- El dado tendrá una salida con un espesor constante.

- Debe ser fácil de manufacturar en máquinas-herramienta convencionales.
- Debe de tener una larga vida útil.
- Debe de requerir mínimo mantenimiento.
- Deseable que pueda procesar diversidad de materiales plásticos.
- Deseable poder usar diferentes boquillas con un mismo soporte sujeto a la brida del extrusor.
- El dado no debe sufrir alta corrosión.
- El material con que se fabricará el dado debe soportar fatiga térmica y tener buena resistencia a un choque térmico.

Especificaciones

- El dado debe de sujetarse al extrusor al ensamblarse dentro de una brida con una ranura de 100mm de diámetro por 17mm de profundidad por lo cual, además el cuerpo del dado debe de medir como máximo 90 mm de diámetro.
- El espesor del perfil en la boquilla del dado será de 0.5 [mm].
- El dado usará una resistencia existente de 65mm de ancho y 90mm de diámetro de 500W.
- El dado debe resistir una presión promedio de 3000 [lb_r] (20.7 [MPa]).
- El dado será diseñado para procesar polietileno de alta densidad.
- El material a usar será acero H13 para evitar recubrimientos.

En este capítulo se presentó el desarrollo de las tareas que se realizaron para el reacondicionamiento del extrusor. Una vez restaurado el extrusor y después de analizar las capacidades del equipo y las necesidades para la fabricación de un nuevo herramental se fijaron los requerimientos y las especificaciones anteriormente enunciados. Con base en la teoría presentada en los capítulos precedentes; se procederá en el siguiente capítulo a desarrollar el proceso de diseño de un dado para extrudir un perfil tubular.

Capítulo 4

Diseño y fabricación del dado de extrusión

En la última sección del capítulo anterior se definieron algunos requerimientos y especificaciones que delimitan algunas características con las que debe cumplir el diseño del herramental.

Teniendo presente que no se requiere fabricar un dado para alta producción sino uno para fines demostrativos del proceso de extrusión. El dado será diseñado para producir un perfil tubular de 6.5mm de diámetro exterior con 0.5mm de espesor.

A continuación se muestran algunas propuestas para el diseño del dado y se comentan sus ventajas y desventajas.

Condiciones invariables

Diámetro externo del dado: 90mm

Dimensiones de la sección de sujeción con la brida: $\varnothing 100 \times 20mm$ pero adicionalmente se requieren 20mm de la sección con diámetro de 90mm, para sujeción.

El dado debe de tener una longitud mínima de 40mm desde la zona de mayor diámetro sólo para su sujeción.

Dimensión del diámetro del canal de flujo a la entrada del material: 50 – 51mm. Esta dimensión se limita a estas dimensiones debido a que el equipo utiliza una placa rompedora para conectar al dado con el extrusor.

4.1. Análisis de propuestas

Propuesta 1

Este diseño sigue las recomendaciones indicadas en la referencia [1]. Ahí se recomienda, según Michaeli Walter que el mandril tenga ángulos de entre 17 y 20° en la zona de convergencia del flujo (después del soporte), y una alimentación de material libre, sin obstáculos que aumenten el tiempo de residencia del material.

En la figura 4.1 se observan los dibujos de un diseño con las características recomendadas y algunos puntos en contra de este diseño son la longitud del mandril y consecuentemente las dimensiones del dado, lo que significa la necesidad de mayor material; mayor peso del dado; se requiere de resistencias de mayor potencia para poder calentarlo y pernos de sujeción más largos que incrementan el costo del mismo.

El mandril es largo y utiliza un soporte con cuatro brazos que ayuda a que el flujo de material fundido sea constante y en caso de que se generen líneas de flujo, éstas sean mínimas. Adicionalmente la sujeción del dado con el extrusor se realiza mediante una brida que lo sujeta por la parte de mayor diámetro y que cubriría casi en su totalidad al soporte del dado (pieza en color más claro, Fig. 4.1). La brida utiliza una resistencia para calentarla pero esto no asegura que el material en la zona de sujeción tenga la temperatura suficiente para mantenerse plastificado. Por lo que este diseño no muestra ser del todo funcional.

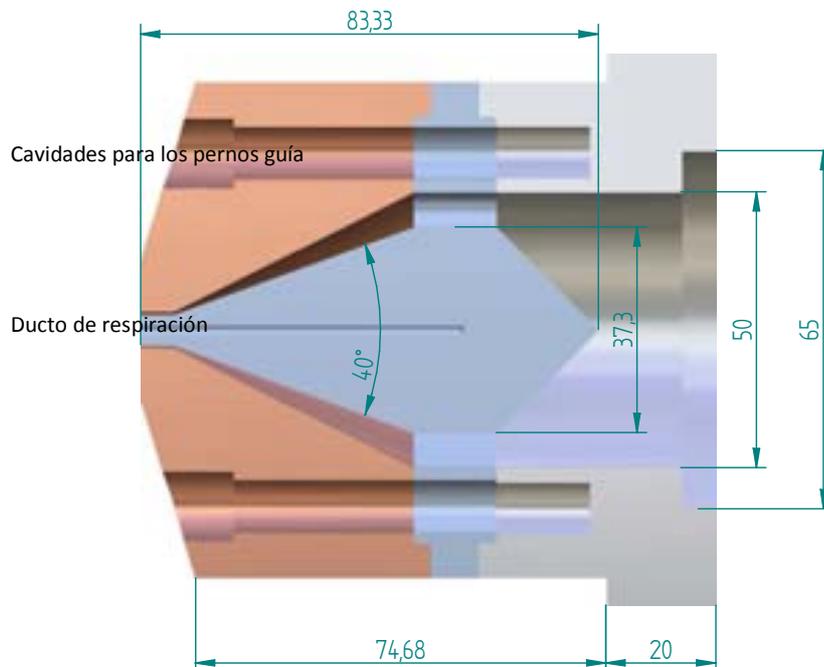


Figura 4.1. Diseño del dado de la primer propuesta.



Figura 4.2. Mandril propuesto para el dado que utiliza un soporte conocido como “de brazos de araña” con cuatro brazos.

Propuesta 2

Esta segunda propuesta tiene variantes como la longitud del soporte que es mayor, con lo que una resistencia colocada sobre el dado puede mantener la temperatura necesaria para mantener el material plastificado y teniendo esto en mente se propone un soporte del mandril con barrenos en lugar de utilizar sólo cuatro brazos de soporte (Fig. 4.4), esto se propone debido a que el proceso de manufactura se facilita. En general este diseño sigue las recomendaciones antes mencionadas, pero requiere de más material puesto que las piezas son relativamente largas lo que se traduce en un mayor costo (Fig. 4.3).

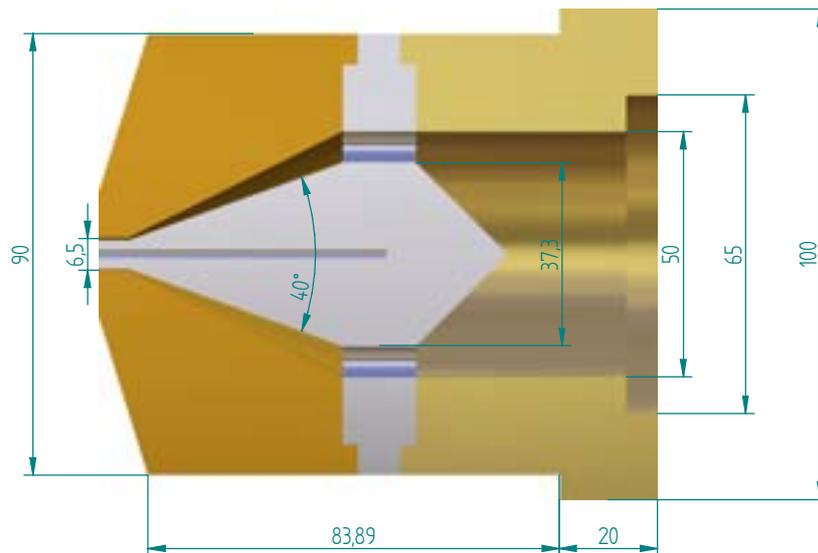


Figura 4.3. Vista de sección longitudinal del perfil del dado ahora propuesto.

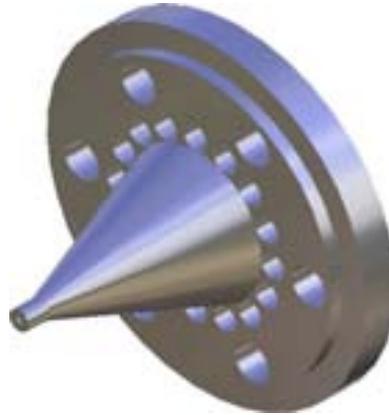


Figura 4.4. Vista en isométrico del mandril con un soporte con barrenos.

Propuesta 3

Este diseño utiliza un mandril con un ángulo a la salida más abierto que los diseños anteriores y es más compacto además de que también utiliza un soporte de brazos de araña (Fig. 4.6). En general este diseño es bueno y mejoraría incrementando la longitud del soporte para incluir un termopozo y una resistencia adecuada para controlar la temperatura (Fig.4.5).

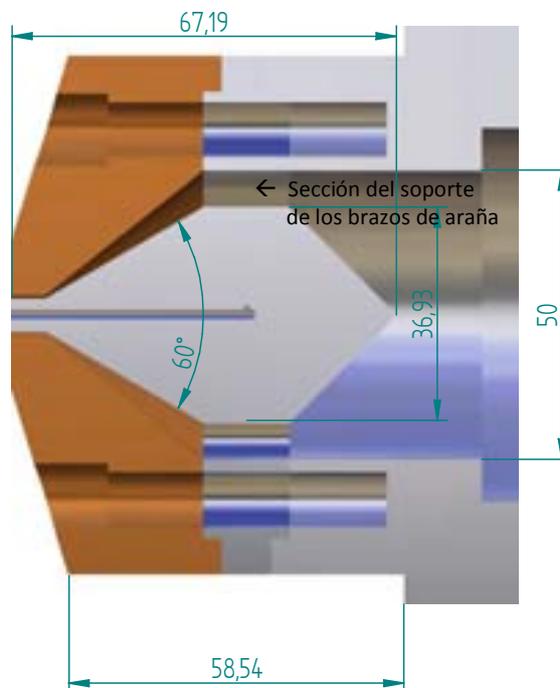


Figura 4.5. Vista seccionada del perfil del dado.



Figura 4.6. Mandril semejante al de la propuesta 1 pero con un ángulo a la salida más abierto.

Antes de realizar cualquier propuesta se analizaron los diferentes materiales que podrían ser utilizados para la manufactura del herramental y si ésta podría realizarse con las máquinas-herramienta con que se cuenta. Los talleres de la Facultad cuentan con tornos y fresadoras tanto convencionales como de control numérico; hay cepillos, esmeriles, taladros de banco y una electroerosionadora.

Aunque lo ideal sería utilizar máquinas de control numérico, por la precisión que estas representan. Específicamente el torno no se encontró en condiciones de poder maquinar piezas de las dimensiones que se necesitan porque los sistemas de sujeción así no lo permitían; aun cuando las piezas no son muy grandes, el chuck del torno está maltratado y desbalanceado con lo que toda precisión se pierde.

Se tomó desde este punto la decisión de trabajar las piezas en máquinas convencionales. Ahora en estos tornos se observó que la carrera del carro diagonal de los tornos era corta por lo que la manufactura de un dado con mandril largo quedaba un poco restringida.

También se revisó la viabilidad para realizar un tratamiento térmico en los Laboratorios de Metalografía y en los de Tratamientos Superficiales de la Facultad pero las condiciones de los equipos y los controles de proceso necesarios no cumplían con lo requerido.

Propuesta 4

Este diseño se realizó pensando en la manufactura del dado y su realización dentro de los talleres de la Facultad.

Diseño y manufactura de un dado para extrusión de perfil tubular plástico de sección circular

El diseño presentado tiene un canal de flujo cónico para que el espesor tenga espacio suficiente para poder localizar un termopozo y la longitud total del dado sea suficiente para utilizar una resistencia de 65mm de ancho además de que la zona del mandril y la de la boquilla son compactas debido a que el mandril tiene unos diámetros reducidos. La conicidad del canal de flujo en el soporte del dado aumenta la velocidad del material. El soporte del mandril se hace por el material restante entre 15 barrenos cónicos lo que ayuda a mantener un flujo constante y sólo queda en el mandril un espacio mayor en el soporte debido a que es necesario hacer un barreno desde la periferia exterior hasta el centro del torpedo para conectar con otro barreno desde el centro del mandril en la salida del material hasta conectar con el barreno radial. Estos barrenos funcionan para crear un conducto que alimenta aire mientras el perfil plástico es extrudido; es necesario que fluya aire porque de otra manera el perfil colapsa y no se conformaría un tubo como tal.

La figura 4.7 muestra la propuesta de dado y se puede observar como todo el canal de flujo es cónico lo que mejora el paso de material manteniendo un flujo laminar y sin obstáculos importantes que aumenten el tiempo de residencia. Este diseño también está pensado para poder utilizar otros mandriles y/o boquillas para fabricar diferentes perfiles y por eso éste, utiliza ocho pernos de sujeción en lugar de los seis que se mostraban en las anteriores propuestas.

Las tres piezas están diseñadas para ensamblar de manera fácil con un centrado sin problemas.

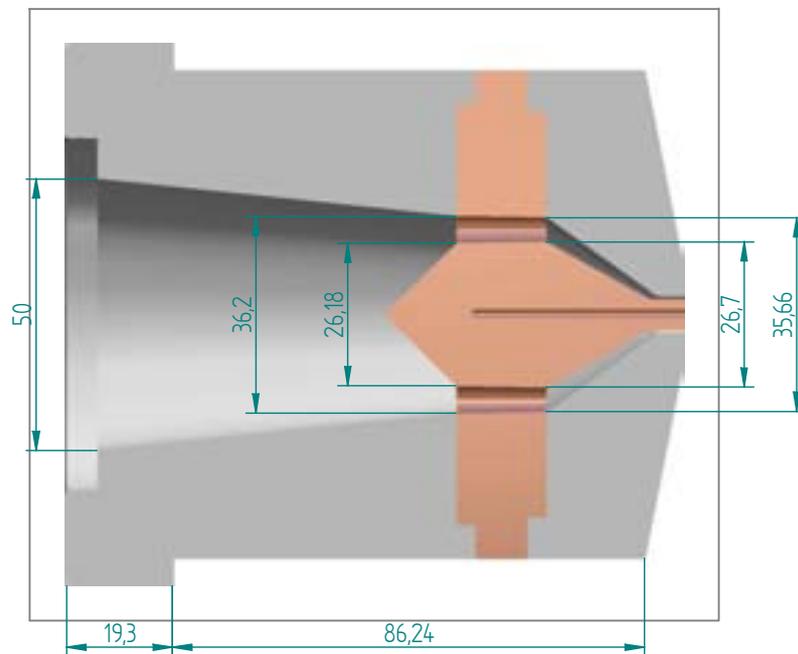


Figura 4.7. Vista longitudinal seccionada del diseño de dado propuesto.

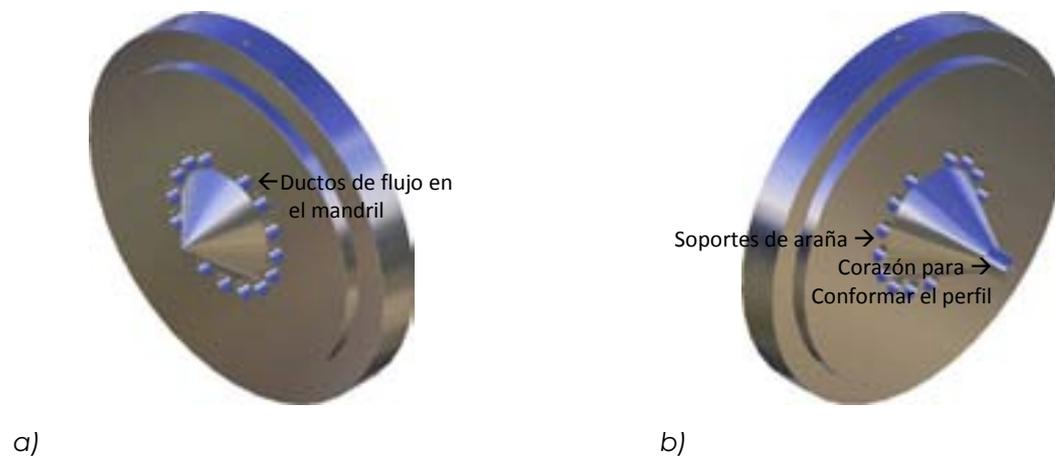


Figura 4.8. Esta es un modelo en CAD del dado correspondiente a la cuarta propuesta y aquí se utiliza una serie de barrenos cónicos. En a) se muestra la cara en contacto con el soporte del dado; y en b), se observa la sección cilíndrica que funciona de corazón para conformar el perfil tubular.

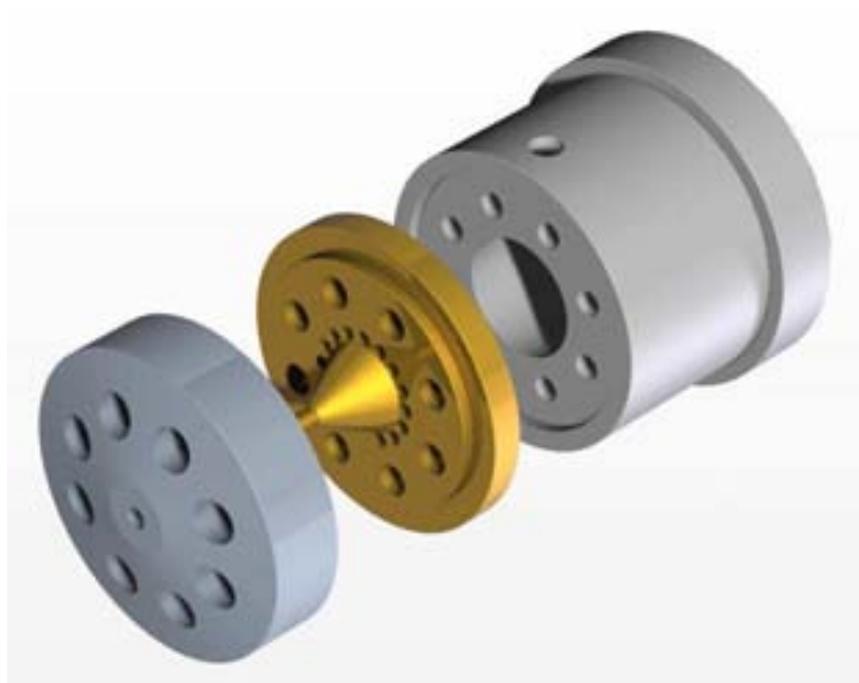


Figura 4.9. Modelo generado en CAD de la última propuesta del dado para la extrusión de un perfil tubular plástico. De izquierda a derecha, las piezas que lo componen son: boquilla, mandril y soporte.

4.2. Diseño del dado

El diseño de dados de extrusión, se basa en el cálculo de las fuerzas y deformaciones que se presentan durante la operación del dado, y es importante por dos razones: primera, asumir que el dado no va a ser dañado durante su operación; segunda, ver que el canal de distribución particularmente en dados difusores o con mandriles mantenga su geometría según el diseño reológico sin variaciones durante su operación.

Las aplicaciones importantes del diseño mecánico del dado son:

- el diseño de los pernos que mantiene unido el dado y las superficies coincidentes entre las diferentes partes del mismo con respecto a la presión interna.
- el diseño de las paredes con una deformación permisible debida a la presión interna
- y el diseño del mecanismo de ajuste de la geometría del dado en la región final.

El diseño mecánico siempre se relaciona al diseño reológico. Principalmente, en el diseño reológico se define la geometría del canal de flujo, después la distribución de presiones tiene que ser estimada conservativamente mediante el cálculo del flujo para el dado dentro del intervalo operativo esperado, con el material de máxima viscosidad, a la mínima temperatura y con la descarga máxima de material. Con esto se conocen las presiones isotrópicas y los esfuerzos cortantes.

Las fuerzas actuantes pueden ser calculadas a partir de los esfuerzos cortantes en las paredes del canal de flujo y las áreas de las respectivas secciones transversales del canal de flujo. El peso del dado también tiene que ser considerado en el diseño de dados medianos y grandes.

Este diseño corresponde al diseño de un dado de extrusión con canales axialmente simétricos y con una alimentación centrada, un esquema del canal de flujo se muestra en la figura 4.9, éste es un canal de flujo simple. El canal completo puede consistir de cinco secciones. El mandril es soportado por el material entre los barrenos de flujo que sirven de soporte como placa perforada (con un número de barrenos n) en el segmento *III*. El mandril es hecho en una sola pieza y se sujeta al mandril por pernos (de número m).

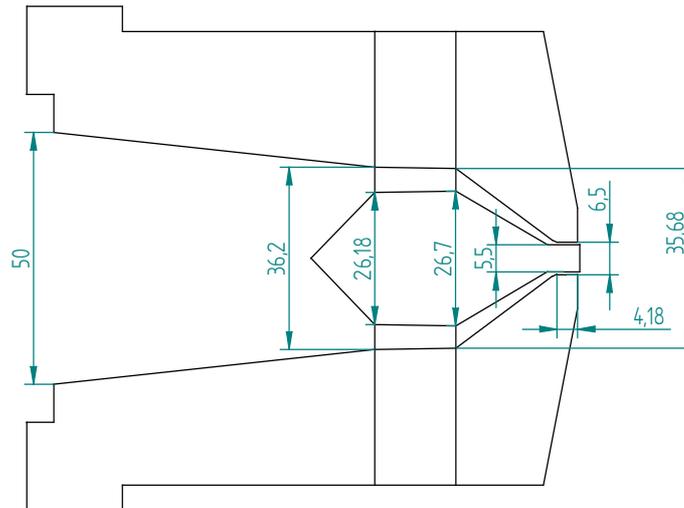


Figura 4.10. Boceto del canal de flujo en el corte transversal del diseño de un dado.

En la figura 4.10 se muestra el corte transversal de la propuesta de diseño; ahí se observa el canal de flujo y se diferencian las piezas que lo componen (soporte, mandril y boquilla); adicionalmente se muestran las respectivas dimensiones de los diámetros en las diferentes secciones.

El análisis mecánico comienza con la recolección de datos; es necesario conocer las capacidades del equipo para tener una referencia a la hora de decidir que materiales se pueden procesar; y dispuestos a manejar un material en especial se deben de conocer los valores de los parámetros para su procesamiento.

Este dado será diseñado para procesar *Polietileno de alta densidad PX 56035* de PEMEX. Este material es de grado extrusión lo que significa que sus características como el índice de fluidez y los valores de viscosidad que se pueden presentar son ideales para este proceso.

Parámetros de proceso para el dado diseñado

El material se procesa con un perfil de temperaturas ascendente:

Tabla 4.1. Temperaturas para procesar el material PX 56035.

Temperatura en las diferentes zonas del cañón [°C] (Temperaturas establecidas bajo pruebas de laboratorio)			
Alimentación	Compresión	Dosificación	Dado
110	140	170	170

En la zona de dosificación y en la zona del dado, la temperatura es la misma porque el husillo con el que se cuenta es uno para procesamiento de polietileno (ver capítulo 2 de esta tesis); lo que sumado a una temperatura adecuada asegura que el material se encuentra completamente en estado plastificado a su salida y entonces la temperatura en la zona del dado es la misma que en la zona de dosificación para mantener el material en éste estado y sea fácilmente procesado.

El extrusor operará a la mínima velocidad de giro, (velocidad del husillo) que es de 38 *RPM*, debido al tamaño del perfil que se produce.

En un extrusor se puede variar la presión del dado utilizando mallas de alambre de menor o mayor fineza (hilos por pulgada, Fig. 4.11). Las mallas se colocan antes de la placa rompedora, se ajustan en una ranura especialmente dispuesta en la placa; se pueden utilizar juegos de varias mallas, una fina y otra gruesa o sólo una y en algunos casos ninguna y también en casos especiales se puede omitir el uso de una placa rompedora aunque esto no es recomendable porque ésta evita que pasen elementos extraños como piedras o pellets de material que aun no han plastificado, pero la principal tarea de la placa rompedora es que elimina la memoria de giro del plástico.



Figura 4.11. a) La imagen muestra la muesca o hendidura que sirve de porta-mallas en la placa rompedora; b) aquí se muestra un ejemplo del tipo de mallas que son utilizadas.

Punto de operación del proceso

Es necesario conocer el gasto máximo que el equipo puede entregar así como la presión máxima que se puede general debida a la operación del mismo. Esto se puede conocer con las siguientes ecuaciones; se calcula el flujo para el caso de una descarga libre de material; y se calcula la presión para cuando el caudal es nulo.

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2}\pi^2 D^2 NH \sen \phi \cos \phi \quad (4.01)$$

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{6\pi DLN\eta}{H^2 \tan \phi} \quad (4.02)$$

Así entonces, considerando los parámetros del extrusor se tiene:

$$H = 7.85mm, \quad D = 51mm, \quad \phi = 17^\circ, \quad N = 38RPM, \quad L = 1067mm$$

$$Q_{\max} = \frac{1}{2}\pi^2(0.051m)^2(38RPM)\left(\frac{2\pi rad}{1RPM}\right)\left(\frac{1min}{60seg}\right)(0.00785m) \sin(17^\circ) \cos(17^\circ)$$

$$= 1.121 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

Ahora para calcular la presión es necesario conocer el valor de la viscosidad del polietileno de alta densidad y a partir de tablas de viscosidad, se tiene el valor siguiente para una temperatura de procesamiento de 170°C: $\eta = 150poises$.

entonces de (4.02), se tiene

$$P_{\max} = \frac{6\pi(0.052m)(1.067m)(38RPM)\left(\frac{2\pi rad}{1RPM}\right)\left(\frac{1min}{60seg}\right)(150Pa\cdot s)}{(0.00785m)^2 \tan(17^\circ)}$$

$$= 32.49MPa$$

Es importante notar que estos valores tanto de flujo volumétrico o caudal, como de presión dependen de varios parámetros y algunos de los más importantes son la velocidad con la que gira el husillo; y la viscosidad. Mientras que la velocidad la controlamos directamente a través de la velocidad del motor, la viscosidad la controlamos indirectamente a través de la temperatura. Con una mayor velocidad aumentamos el gasto, pero también se aumenta la presión que debe de soportar el cañón. Esta presión se podría reducir aumentando la temperatura del material disminuyendo la viscosidad pero se corre el riesgo de que se degrade.

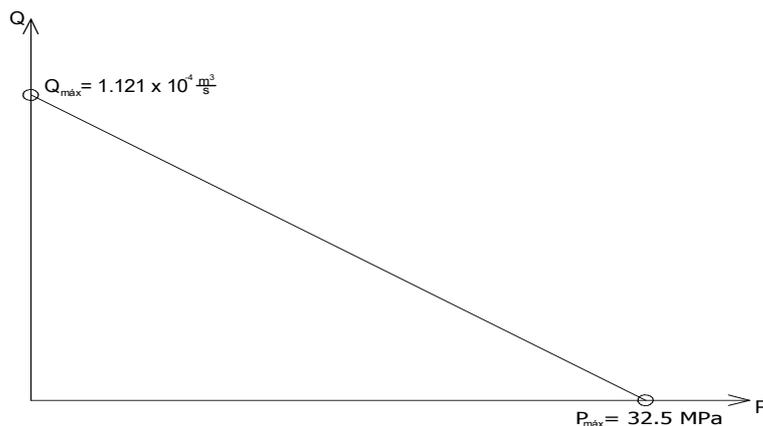


Figura 4.12. La gráfica muestra la línea de operación que se dibuja conectando los puntos de máximo caudal y de máxima presión sobre los respectivos ejes coordenados. Todos los puntos de operación quedan sobre esta línea con una relación entre presión y caudal.

El equipo de monitoreo de presión en el extrusor tienen un intervalo de operación de 0 a 5 000 lb (0 – 34.51MPa); considerando el valor para la máxima presión; es fácil ver que éste, para las condiciones dadas es todavía medible en el extrusor.

La presión máxima calculada es fácilmente soportada casi por cualquier acero (el módulo de elasticidad de la mayoría de los aceros oscila entre 190 – 210GPa), por lo que indirectamente se tiene un gran factor de seguridad y se puede asegurar que el dado no fallará y menos aún si se emplea un material para trabajo en caliente o resistente a la fatiga térmica. La parte que se vuelve crítica y que sí es importante calcular son las características y el número de los pernos que mantendrán sujetas las piezas del dado (soporte, mandril y boquilla).

Además, para el procesamiento del material plástico es importante no sobrepasar los niveles de presión máxima porque esto genera un aumento de la temperatura lo que induciría una probable degradación del material. Para evitar que la presión llegue a los niveles máximos se empleará un factor de seguridad referido al plástico como:

$$\text{Factor de Seguridad}_{\text{plástico}} = \frac{\text{Presión permisible}}{\text{Presión de operación}}$$

La presión máxima antes indicada es específica para este material con sus respectivas condiciones de temperatura antes mencionadas, ya que se involucra a la viscosidad, de ésta forma ésta es la *presión permisible* referida al material y la *presión de operación* será una fracción de la máxima.

Dado que el área transversal del perfil es muy pequeña si se utiliza una baja presión el perfil tendría una alta velocidad a la salida. Además el dado en proceso se desea para fines demostrativos y no para producción por lo cual es preferible que el perfil sea extrudido a una velocidad no muy alta y eso se logra aumentando la presión de extrusión (aumentando el caudal de presión).

Teniendo presente lo anterior, para este diseño se utilizará un factor de seguridad referente al material de 1.25.

De esta manera:

$$\text{presión permisible} = 32.5\text{MPa}$$

$$\begin{aligned}\text{presión de operación} &= \frac{32.5\text{MPa}}{1.25} \\ &= 26\text{MPa}\end{aligned}$$

Ahora se conocen los valores de la presión de operación y de la viscosidad y utilizando la ecuación (1.14) mostrada en el Capítulo I de esta tesis se calcula el caudal teórico total en el dado queda como sigue:

Diseño y manufactura de un dado para extrusión de perfil tubular plástico de sección circular

$$Q = \frac{1}{2}\pi^2(0.051m)^2(38RPM)\left(\frac{2\pi rad}{1RPM}\right)\left(\frac{1min}{60seg}\right)(0.00785m)\sin(17^\circ)\cos(17^\circ) - \frac{\pi(0.051m)(0.00785m)^3\sin^2(17^\circ)}{12(1.067m)}\left(\frac{32.5 \times 10^6 Pa}{150Pa \cdot s}\right)$$

$$Q = (1.121 \times 10^{-4} - 8.968 \times 10^{-5}) \frac{m^3}{s}$$

$$= 2.24 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

$$= 1345.25 \frac{cm^3}{min}$$

Como puede observarse, este flujo volumétrico es muy grande puesto que la apertura de la boquilla es muy pequeña. Otra forma de calcular el mismo caudal es mediante la siguiente ecuación que queda en función de la diferencia de presión Δp , la viscosidad η , y K_B que es un factor geométrico dependiente de la boquilla:

$$Q = K_B \left(\frac{\Delta p}{\eta} \right) \quad (4.03)$$

$$K_B = \frac{\pi R_0^4}{8L} \left[1 - R^4 - \frac{(1-R^2)^2}{\ln(1/R)} \right] \quad ; \quad R = \frac{R_i}{R_o} \quad (4.04)$$

Donde: R_i = radio anular interior
 R_o = radio anular exterior
 L = longitud de la boquilla

Si se considera el flujo volumétrico igual al calculado previamente, se puede conocer el valor de K_B despejando a partir de la ecuación (4.03) para después conocer la longitud necesaria del canal de la boquilla considerando que se desea un perfil tubular con diámetro mayor de 6.5mm y uno menor de 5.5mm:

$$\begin{aligned} K_B &= \frac{Q \cdot \eta}{\Delta p} \\ &= \frac{2.24 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} \cdot 150 Pa \cdot s}{26 \times 10^6 Pa} \\ &= 1.29 \times 10^{-10} m^3 \end{aligned}$$

Y si ahora se despeja a L de la ecuación (4.04):

$$L = \frac{\pi R_0^4}{8K_B} \left[1 - R^4 - \frac{(1-R^2)^2}{\ln(1/R)} \right] \quad ; \quad R = \frac{R_i}{R_o}$$

Considerando los siguientes valores:

$$\begin{aligned} R_i &= 0.00275 \text{ m} \\ R_o &= 0.00325 \text{ m} \end{aligned}$$

$$R = \frac{0.00275\text{m}}{0.00325\text{m}} = 0.84615$$

$$L = \frac{\pi(0.00325\text{m})^4}{8(1.29 \times 10^{-10}\text{m}^3)} \left[1 - (0.84615)^4 - \frac{(1-(0.84615)^2)^2}{\ln(1/0.84615)} \right]$$
$$= 0.001518\text{m}$$

Este valor de L es muy pequeño y según la teoría, es suficiente para conformar el perfil pero por razones prácticas de manufactura se trabajará con una longitud de boquilla mayor.

Debido a que el comportamiento del material puede cambiar de acuerdo a los diferentes proveedores, podemos decir que este cálculo es una representación general del polietileno de alta densidad. Además, si en el futuro se cambiara de material, y debido a que los materiales plásticos se expanden con gran facilidad cuando se encuentran a elevadas temperaturas, el dado se fabricará con una longitud de boquilla mayor; esto además servirá para reducir el caudal y lograr una mejor observación del proceso durante futuras prácticas de laboratorio además de que la velocidad de extrusión y el espesor del perfil se pueden variar con el uso de un jalador.

En la figura 4.10 se muestra un esquema de una propuesta de dado en la que ya se marcaba un canal con 4.18 mm de longitud, dimensión que se ajusta a las reducidas dimensiones del diseño pero que en seguida se muestra teóricamente que esta longitud aporta un flujo volumétrico cercano a los $500 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$; dicha cantidad es relativamente fácil de manejar y aún así es un valor atractivo si es que se deseara una producción moderada.

Entonces considerando la longitud del canal mostrado en la figura 4.10:

$$K_B = \frac{\pi(0.00325\text{m})^4}{8(0.00418\text{m})} \left[1 - (0.84615)^4 - \frac{(1-(0.84615)^2)^2}{\ln(1/0.84615)} \right]$$
$$= 4.67 \times 10^{-11} \text{m}^3$$

Y el flujo volumétrico esperado es:

$$Q = 4.67 \times 10^{-11} \text{m}^3 \left(\frac{26 \times 10^6 \text{Pa}}{150 \text{Pa}\cdot\text{s}} \right)$$
$$= 8.11 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$
$$= 486.4 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

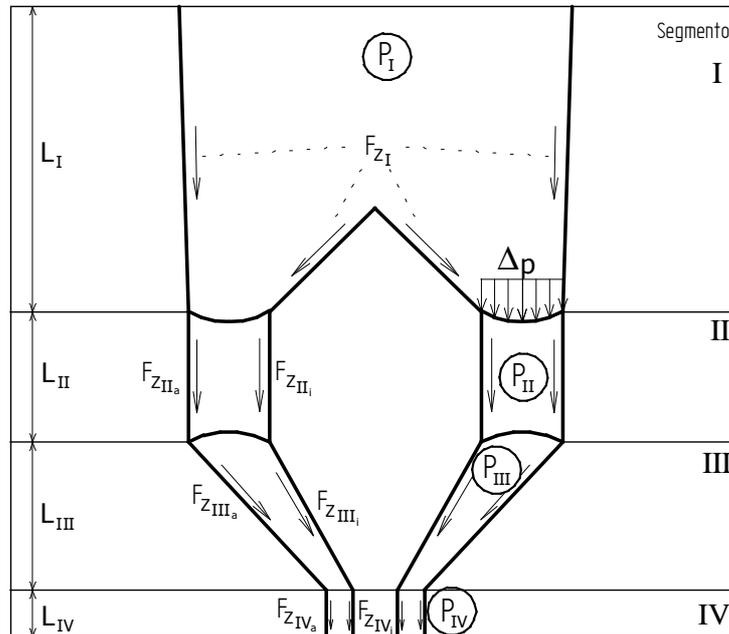


Figura 4.13. Fuerzas actuando en el canal de flujo de un dado centrado similar al propuesto.

Ya se ha identificado la diferencia de presiones de operación (26 MPa) que será utilizada durante los cálculos siguientes para conocer las fuerzas y los esfuerzos actuantes sobre las paredes de las diferentes secciones de todo el canal de flujo dentro del dado.

El dado en estudio es pequeño y fácilmente soportado por la brida del extrusor por lo cual su peso no es de consideración y no es necesario considerar la fuerza gravitacional F_g debida al propio peso.

Con los cálculos obtenidos, se procederá a hacer un análisis de fuerzas que interactúan con el dado a diseñar, tomando como referencia el dibujo mostrado en la figura 4.13. Además se muestra un esquema de las diferentes secciones que existen a lo largo del canal de flujo de un dado de alimentación centrada y con boquilla anular. Este esquema se muestra como una referencia y no es un boceto del canal del dado en estudio.

Segmento I

En muchos dados se utiliza un segmento con diámetro constante, pero en este dado la sección del Segmento I es cónica; esta modificación tiene el objetivo de mantener una presión relativamente constante y alimentar de manera directa al mandril.

También ésta modificación supone la posible utilización de diferentes mandriles y/o boquillas además que se facilita la manufactura.

Casos:

1. Fuerzas en las paredes del canal de flujo debidas a la Viscosidad

El esfuerzo cortante τ_W actúa en las paredes del canal, tal que:

$$\tau_W = \frac{\Delta p}{2L} R \rightarrow \tau_{W_I} = \frac{\Delta p_I}{2L_I} R_{i_I} \quad (4.05)$$

$$F_Z = \tau_W \cdot A \quad (A = 2\pi R_I L_I) \quad (4.06)$$

$$F_{Z_I} = \Delta p_I \pi R_{i_I}^2 \quad (4.07)$$

$$\Delta p = \frac{8\eta QL}{\pi R^4} \quad (4.08)$$

Considerando los siguientes datos: $Q = 8.11 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}$, $\eta = 150 Pa \cdot s$,
 $L = 0.065m$.

Para $R = 0.025m$ (a la entrada del canal),

$$\Delta p = \frac{8 \cdot (150 Pa \cdot s) \cdot \left(8.11 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}\right) \cdot 0.065m}{\pi (0.025m)^4}$$
$$= 515.47 Pa$$

Para $R = 0.0181m$ (a la salida del canal),

$$\Delta p = \frac{8 \cdot (150 Pa \cdot s) \cdot \left(8.11 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}\right) \cdot 0.065m}{\pi (0.0181m)^4}$$
$$= 1876.08 Pa$$

Tomando el promedio de la diferencia de presiones y de radios para las dos diferentes secciones, dado que no se puede calcular directamente este valor, tenemos:

$$\Delta p_I = 1195.78 Pa$$

$$R_{i_I} = 0.02155m$$

$$\tau_{W_I} = \frac{1195.78 Pa}{2(0.065m)} 0.02155m$$
$$= 198.223 Pa$$

Para el cálculo de la fuerza se puede utilizar la siguiente ecuación ya establecida para secciones cónicas donde p_E es la presión a la entrada del canal; p_A es la presión al final del mismo; R_E y R_A son los radios en la entrada y en la salida del canal respectivamente.

$$F_p = \pi p_E (R_A^2 - R_E^2) + \frac{2}{3} \frac{\pi (p_E - p_A)}{R_A - R_E} (R_A^3 - R_E^3) \quad (4.09)$$

A la entrada del canal la presión es de 26 MPa y $\Delta p_I = 1195.78 \text{ Pa}$, entonces:

$$R_E = 0.025 \text{ m}$$

$$R_A = 0.0181 \text{ m}$$

$$p_E = 26 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$p_A = 25.9 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$F_i =$$

$$\pi (26 \times 10^6 \text{ Pa}) [(0.0181 \text{ m})^2 - (0.025)^2] + \frac{2}{3} \frac{\pi (26 \times 10^6 \text{ Pa} - 25.9 \times 10^6 \text{ Pa})}{0.0181 \text{ m} - 0.025 \text{ m}} [(0.0181 \text{ m})^3 - (0.025)^3]$$

$$F_i = 7.037 \text{ N}$$

Los cálculos anteriores en la práctica pueden ser omitidos ya que el valor de la diferencia de presiones es muy pequeño por lo cual podría considerarse casi cero lo que significaría un esfuerzo cortante y una fuerza iniciales iguales a cero.

2. Descarga bajo Presión Interna p_i :

El Segmento I (Fig. 4.13) representa un cilindro circular de paredes con espesor grande el cual es abierto durante su operación debido a las presiones internas con una magnitud f_i dada por la fórmula general (4.10). (Fig. 4.15):

$$f_i = \frac{p_i R_i}{E} \left(\frac{R_a^2 + R_i^2}{R_a^2 - R_i^2} + \mu \right) \quad (4.10)$$

μ es la relación de Poisson ($m = \frac{1}{\mu}$), para acero $\mu = 0.33$.

Los siguientes cálculos se hacen suponiendo que se utilizará acero H13; que es un acero para herramienta especial para trabajar a elevadas temperaturas lo que es especialmente necesario en un dado para extrusión de plásticos porque su operación normal se realiza a temperaturas entre 125 y 250°C . Sin embargo esta no es la única razón sino que este material tiene una alta resistencia a choques térmicos y a la fatiga térmica lo que también es muy importante porque su operación se realizará en intervalos cortos de tiempo cuando se impartan prácticas de

laboratorio lo que podría significar poner a calentar y enfriar varias veces el dado en un solo día y aproximadamente 4 horas continuas de operación cuando mucho.

El acero H13 tiene un módulo de elasticidad aproximadamente de $E = 200GPa$.

En este caso R_i es el radio del canal de flujo y R_a es el radio exterior del dado. Es importante mencionar que al seleccionar las dimensiones del dado, se deben hacer todos los esfuerzos para mantener f_i por debajo de 0.05mm.

$R_i = 0.0181m$ y $R_a = 0.045m$, de aquí:

$$f_i = \frac{26 \times 10^6 Pa \cdot 0.0181m}{200 \times 10^9} \left(\frac{(0.045m)^2 + (0.0181m)^2}{(0.045m)^2 - (0.0181m)^2} + 0.33 \right)$$
$$= 4 \times 10^{-6}m$$

El esfuerzo máximo aparece en el interior de las paredes del canal de flujo. La siguiente ecuación considera un estado biaxial de esfuerzos $c \cong$ *circunferencial*, $r \cong$ *radial*)

$$\epsilon_c = \frac{1}{E}(\sigma_c - \mu\sigma_r) = \frac{f_i}{R_i} \quad (4.11)$$

De acuerdo con J. Fehling;

$$\sigma_{c_{max}} = p_i \frac{R_a^2 + R_i^2}{R_a^2 - R_i^2} \quad (4.12)$$
$$= 26MPa \times \left(\frac{(0.045m)^2 + (0.0181m)^2}{(0.045m)^2 - (0.0181m)^2} \right)$$
$$= 36.06MPa$$

$$\sigma_{r_{max}} = -p_i \quad (4.13)$$
$$= -26MPa$$

Finalmente la deformación biaxial, considerando para el acero, $\mu \approx 0.33$, queda como sigue:

$$\epsilon_c = \frac{1}{200 \times 10^9 Pa} (36.06 \times 10^6 Pa - (0.33 \cdot -26 \times 10^6 Pa))$$

$$\epsilon_c = 0.000137$$

Con estos resultados se puede concluir que el acero H13 puede soportar sin ninguna complicación los esfuerzos y las deformaciones producidas por el flujo al pasar por el interior del canal de flujo.

La figura 4.14 muestra una vista posterior del mandril; tiene 15 barrenos con 5.01mm de diámetro. En la misma imagen se puede observar que habría espacio suficiente para un barreno más pero debido a que se tiene un barreno radial justo en esa sección, esto no es posible. Este barreno radial va desde la periferia del dado hasta su centro donde se conecta con otro barreno perpendicular al primero hasta el extremo que forma parte de la boquilla y funciona como canal de ventilación o respiradero, necesario para que el perfil tubular jale aire mientras es extrudido y no se colapse.

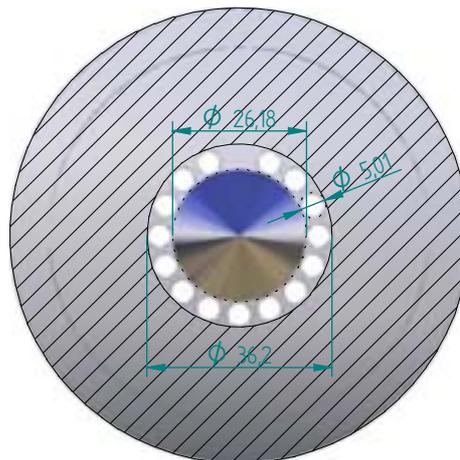


Figura 4.14. Esta imagen muestra la sección libre del mandril por donde pasará el material plastificado. La sección mostrada con líneas inclinadas estará en contacto con el soporte del dado.

Segmento IV (Fig. 4.13)

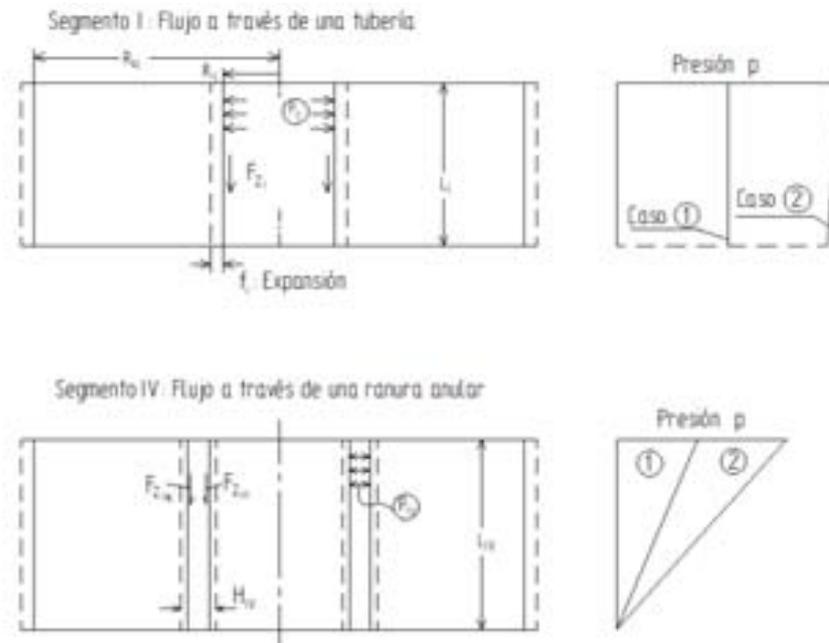


Figura 4.15. Fuerzas actuando en un flujo a través de un tubo y a través de un canal anular.

1. Fuerzas viscosas en las paredes del canal de flujo. Como la altura del canal H_{IV} es pequeña comparada con R_{IV} , se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$\tau_W = \frac{\Delta p}{2L} H \rightarrow \tau_{WIV} = \frac{\Delta p_{IV}}{2L_{IV}} H_{IV} \quad (4.14)$$

En este caso la diferencia de presiones se calcula para una ranura anular de sección constante (considerando valores representativos para un material pseudo plástico).

$$\Delta p = \frac{12\eta QL}{\pi DH^4} \quad (4.15)$$

Donde L es la longitud del canal; H es el espesor del perfil; D es el diámetro promedio del perfil, Q es el flujo volumétrico o caudal volumétrico; y η es la viscosidad promedio.

Considerando los siguientes datos: $Q = 8.11 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}$, $\eta = 150 Pa \cdot s$, $L_{IV} = 0.00418m$, $H_{IV} = 0.0005m$ y $D = 0.006m$:

$$\Delta p_{IV} = \frac{12 \cdot (150 Pa \cdot s) \cdot (8.11 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}) \cdot (0.00418m)}{\pi \cdot (0.006m) \cdot (0.0005m)^3}$$

$$\Delta p_{IV} = 25.89 \times 10^6 Pa$$

$$\tau_{W_{IV}} = \frac{25.89 \times 10^6 Pa}{2(0.00418m)} (0.0005m)$$

$$= 1.548 \times 10^6 Pa$$

con $A_{IV} = \pi(R_{a_{IV}} + R_{i_{IV}})L_{IV}$, se tiene que $F_{Z_{IVa}}$ y $F_{Z_{IVi}}$ están dadas por

$$F_{Z_{IVa}} \approx F_{Z_{IVi}} = \tau_{W_{IV}} A_{IV} = \frac{\pi \Delta p_{IV}}{2} H_{IV} (R_{a_{IV}} + R_{i_{IV}}) \quad (4.16)$$

$$R_{a_{IV}} = 0.00325m \text{ y } R_{i_{IV}} = 0.0025m$$

entonces:

$$F_{Z_{IVa}} \approx F_{Z_{IVi}} = 1.548 \times 10^6 Pa \cdot (0.0005m)(0.00325m + 0.0025m)$$

$$= 4.45N$$

2. Debe notarse que el mandril en la sección de la boquilla es además comprimido radialmente por las presiones internas. Para poder calcular esta deformación es necesario considerar una condición de esfuerzos multiaxial en la circunferencia del mandril, tanto en la dirección radial como en la axial; similar a los cálculos para el Segmento I.

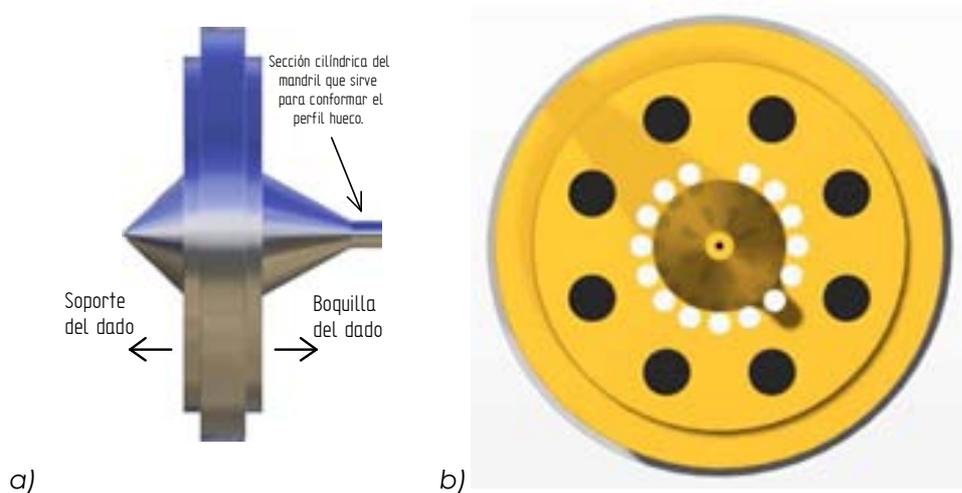


Figura 4.16. a) Vista lateral del mandril. Aquí se muestra el corazón que conforma el perfil tubular; b) Vista frontal del mandril. Se observa el barreno centrado del ducto de respiración.

El cilindro del mandril justo en la sección de la boquilla se encuentra bajo una presión externa p_a . Para calcular los diferentes esfuerzos se utilizan las siguientes ecuaciones en donde R_a y R_i son los radios exterior e interior del

cilindro del mandril. Pero para el caso del cálculo de los esfuerzos en la boquilla, R_a y R_i son los radios externo e interno de la misma; r es el radio promedio de la ranura de la boquilla.

$$\sigma_c = -p_a \frac{R_a^2 + \frac{R_a^2 R_i^2}{r^2}}{R_a^2 - R_i^2} \quad (4.17)$$

$$\sigma_r = -p_a \frac{R_a^2 \frac{R_a^2 R_i^2}{r^2}}{R_a^2 - R_i^2} \quad (4.18)$$

$$\sigma_a = -p_a \frac{R_a^2}{R_a^2 - R_i^2} \quad (4.19)$$

El subíndice c significa, circunferencial; r , radial y a significa, *axial*;

Adicionalmente las deformaciones que generan los anteriores esfuerzos se calculan utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\epsilon_c = \frac{1}{E} (\sigma_c - \mu(\sigma_r + \sigma_a)) \quad (4.20)$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \mu(\sigma_c + \sigma_a)) \quad (4.21)$$

$$\epsilon_a = \frac{1}{E} (\sigma_a - \mu(\sigma_c + \sigma_r)) \quad (4.22)$$

Ya que $\Delta p_{IV} = 25.89 MPa$ y dado que la presión al final de esta sección no es otra que la presión atmosférica, lo que significa una presión manométrica igual a cero. La presión al entrar en esta sección es

$$p_a = 25.89 MPa.$$

Analizando el cilindro del mandril que sirve de corazón durante el conformado del tubo se tienen los siguientes valores:

$$R_a = 0.00275m, R_i = 0.000794m \text{ y } r = 0.003m:$$

$$\sigma_c = -25.89 \times 10^6 Pa \left(\frac{0.00275m^2 + \frac{0.00275m^2 \cdot 0.000794m^2}{0.003m^2}}{0.00275m^2 - 0.000794m^2} \right)$$

$$= -30.22 \times 10^6 Pa$$

$$\sigma_r = -25.89 \times 10^6 Pa \left(\frac{0.00275m^2 - \frac{0.00275m^2 \cdot 0.000794m^2}{0.003m^2}}{0.00275m^2 - 0.000794m^2} \right)$$

$$\sigma_r = -26.27 \times 10^6 Pa$$

$$\begin{aligned}\sigma_a &= -25.89 \times 10^6 Pa \left(\frac{0.00275m^2}{0.00275m^2 - 0.000794m^2} \right) \\ &= -28.25 \times 10^6 Pa\end{aligned}$$

Las deformaciones respectivas para los esfuerzos dados en esta sección son:

$$\begin{aligned}\epsilon_c &= \frac{1}{200 \times 10^9 Pa} \left(-30.22 \times 10^6 Pa - 0.033 \cdot (-26.27 \times 10^6 Pa + (-28.25 \times 10^6 Pa)) \right) \\ &= -0.00061\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\epsilon_r &= \frac{1}{200 \times 10^9 Pa} \left(-26.27 \times 10^6 Pa - 0.033 \cdot (-30.22 \times 10^6 Pa + (-28.25 \times 10^6 Pa)) \right) \\ &= -0.000035\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\epsilon_a &= \frac{1}{200 \times 10^9 Pa} \left(-28.25 \times 10^6 Pa - 0.033 \cdot (-30.22 \times 10^6 Pa + (-26.27 \times 10^6 Pa)) \right) \\ &= -0.000048\end{aligned}$$

Ahora analizando el comportamiento de los esfuerzos en las paredes de la boquilla. Aquí se tienen los siguientes valores: $R_a = 0.045m$, $R_i = 0.00325m$ y $r = 0.003m$:

$$\begin{aligned}\sigma_c &= -25.89 \times 10^6 Pa \left(\frac{0.045m^2 + \frac{0.045m^2 \cdot 0.00325m^2}{0.003m^2}}{0.045m^2 - 0.00325m^2} \right) \\ &= -56.56 \times 10^6 Pa\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_r &= -25.89 \times 10^6 Pa \left(\frac{0.045m^2 - \frac{0.045m^2 \cdot 0.00325m^2}{0.003m^2}}{0.045m^2 - 0.00325m^2} \right) \\ &= -45.18 \times 10^6 Pa\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_a &= -25.89 \times 10^6 Pa \left(\frac{0.045m^2}{0.045m^2 - 0.00325m^2} \right) \\ &= -26.02 \times 10^6 Pa\end{aligned}$$

Igual que en la sección anterior, las deformaciones que se presentan son:

$$\begin{aligned}\epsilon_c &= \frac{1}{200 \times 10^9 Pa} \left(-56.56 \times 10^6 Pa - 0.033 \cdot (-45.18 \times 10^6 Pa + (-26.02 \times 10^6 Pa)) \right) \\ &= -0.000165\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\epsilon_r &= \frac{1}{200 \times 10^9 Pa} \left(-45.18 \times 10^6 Pa - 0.033 \cdot (-56.56 \times 10^6 Pa + (-26.02 \times 10^6 Pa)) \right) \\ &= -0.00009\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\epsilon_a &= \frac{1}{200 \times 10^9 Pa} \left(-26.02 \times 10^6 Pa - 0.033 \cdot (-56.56 \times 10^6 Pa + (-45.18 \times 10^6 Pa)) \right) \\ &= -0.000038\end{aligned}$$

Observando los valores obtenidos para las deformaciones en las diferentes secciones de la boquilla, tanto para el segmento del mandril como para la boquilla como tal, es fácil ver que estas deformaciones no son de consideración aún cuando aparentemente los valores calculados de los esfuerzos son grandes.

Durante los cálculos se debe notar que p_{iIV} actúa como una presión externa ($\rightarrow p_a$) sobre el mandril. La deformación de la parte exterior del dado y la deformación de la parte interior finalmente sirven para obtener la deformación total.

Segmento II (Fig. 4.13)

Para esta región del dado, las fuerzas viscosas efectivas así como la descarga radial bajo presiones internas pueden ser calculadas como en el Segmento IV. Si sólo hay algunos brazos del soporte del mandril, estos pueden ser descartados.

El correcto dimensionamiento de los brazos que soportan el mandril, es particularmente importante en esta región del dado. La figura 4.13 muestra las fuerzas actuando sobre el mandril. Éstas pueden combinarse en una fuerza resultante F_{res} . Si el número de brazos en el soporte es n , entonces cada brazo debe de absorber la fuerza F :

$$F = \frac{F_{res}}{n} \tag{4.23}$$

Si la caída de presión en la región del soporte del mandril y además el área proyectada de los brazos de soporte es grande, esto significa un mayor esfuerzo sobre los brazos además de posibles deformaciones por esfuerzos cortantes y por cedencia del material.

A pesar de que casi como una regla, la caída de presión en la región de soporte del mandril es pequeña y *por lo general puede no considerarse*.

Segmento III (Fig. 4.13)

Casos:

1. Fuerzas compresivas axiales

Como resultado de la presión del material plastificado, las fuerzas de compresión actúan en la dirección axial sobre la punta del soporte del mandril (difusor del mandril) y es opuesta a la dirección de extrusión; pero también hay fuerzas que actúan sobre el otro extremo del mandril donde converge el flujo después de haber pasado por los canales del mandril, sólo que al tratarse de un canal anular se tienen fuerzas en la misma dirección de extrusión sobre el Área 1 y otra opuesta a la dirección de extrusión en el Área 2.

Segmento III: Flujo en una ranura anular convergente

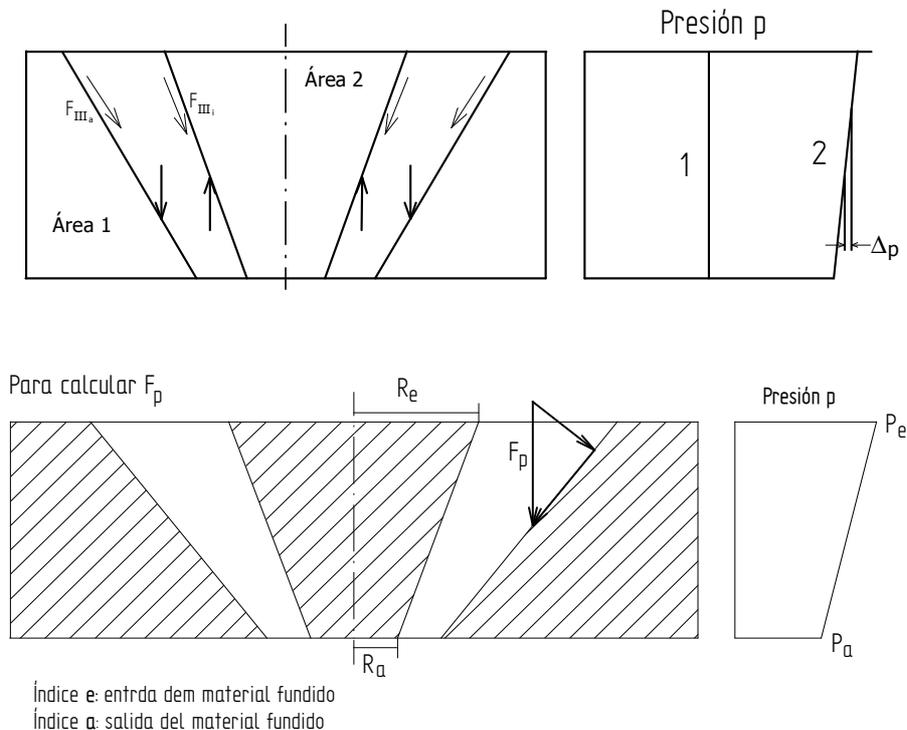


Figura 4.17. Fuerzas actuantes en un flujo dentro de una ranura anular con un diámetro variable.

Considerando que en el Segmento II la diferencia de presiones es mínima y por ello puede ser despreciada; $p_E = p_I = 26MPa$; y ya que previamente se calculó la diferencia de presiones en el Segmento IV, se conoce la presión a la salida de éste Segmento III, siendo $p_A = p_{IV} = 25.89MPa$.

Primero la fuerza en el difusor del dado que como se observa en la figura 4.14, tiene un diámetro de $26.18mm$, y se calcula según la ecuación siguiente:

$$\begin{aligned} F_{p_{IIIa}} &= p_{III} \pi R_{i_{III}}^2 & (4.24) \\ &= 26 \times 10^6 Pa \cdot \pi [(0.01309m)^2] \\ &= 13996N \end{aligned}$$

Para el Área 1:

$$\begin{aligned} F_{p_{IIIa}} &= p_{III} \pi (R_{a_{III}}^2 - R_{i_{III}}^2) & (4.25) \\ F_{p_{IIIa}} &= 26 \times 10^6 Pa \cdot \pi [(0.01788m)^2 - (0.00325m)^2] \\ &= 25250N \end{aligned}$$

Para el Área 2:

$$\begin{aligned} F_{p_{IIIi}} &= 26 \times 10^6 Pa \cdot \pi [(0.01335m)^2 - (0.00275m)^2] \\ &= 13939N \end{aligned}$$

La fuerza total sobre el mandril es la suma de las fuerzas $F_{p_{IIIa}}$, $F_{p_{IIIa}}$ y $F_{p_{IIIi}}$ considerando como sentido positivo el que tiene el flujo; por lo tanto:

$$\begin{aligned} F_{p_{III}} &= F_{p_{IIIa}} + F_{p_{IIIa}} - F_{p_{IIIi}} \\ &= 13996N + 25250N - 13939N \\ &= 25306N \end{aligned}$$

Esta fuerza finalmente es la que actúa sobre la pared de la boquilla y es para la cual se debe de calcular el número de pernos que sujetarán los componentes del dado. Es relativamente baja y fácilmente soportable casi por cualquier tornillo o perno. Ya que el dado es pequeño se ha decidido usar tornillos estándar de $5/16"$ de diámetro que por lo general pueden soportar sin problemas de esfuerzos de tensión de $100MPa$ o más.

Utilizando la ecuación (4.23) se calcula la fuerza que debe de soportar cada perno, considerando que se utilizarán 8 pernos para un fácil centrado ($n = 8$):

$$F = \frac{25306 N}{8}$$

= 3163.32N es la fuerza que debe soportar cada perno

$$\sigma_{perno} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área transversal}}$$

Para un perno de 5/16":

$$\sigma_{perno} = \frac{3163.32N}{\frac{1}{4}\pi(0.00793m)^2}$$

$$= 63.92MPa$$

Un tornillo estructural soporta esfuerzos de tracción entre los 60 – 100[Ksi] (460 – 690MPa) aproximadamente [17]. De acuerdo con lo anterior es fácil notar que cada tornillo mucho más de lo que realmente está soportando.

$$F.S._{pernos} = \frac{460MPa}{63.92MPa}$$

$$= 7.19$$

Éste cálculo del esfuerzo que debe soportar cada perno hace ver que un tornillo del diámetro seleccionado puede ser utilizado siendo el esfuerzo requerido menor al que un tornillo puede soportar.

Por último la fuerza que ha de soportar cada brazo del soporte del mandril también se calcula con la ecuación (4.23). Teniendo en cuenta que el diseño del mandril tiene brazos manufacturados indirectamente al barrenar el mandril 15 conductos por donde pasará el material fundido. En este caso la fuerza resultante que se ha de distribuir entre los brazos es de 13996N.

$$F = \frac{13996N}{15}$$

$$= 933.067N$$

El área transversal de cada brazo del soporte de araña es de 10.97[mm²], está es el área con la que choca el material al pasar por el mandril. Sabiendo esto es posible calcular el esfuerzo cortante que debe soportar cada brazo, y queda como sigue:

$$\begin{aligned}\tau_{brazo} &= \frac{933.067N}{10.97 \times 10^{-6} m^2} \\ &= 85.01 MPa\end{aligned}$$

Suponiendo que el material del dado tiene una resistencia a la tracción de $896 MPa$ a una temperatura de $316^\circ C$ (temperatura a la que difícilmente se llegará durante la operación del dado)[16]. Además considerando que el esfuerzo provocado es en cortante, la resistencia se ve disminuida casi hasta en un 50% de la resistencia a tracción [10], por lo cual el factor de seguridad para los brazos del soporte es el siguiente:

$$\begin{aligned}F.S._{brazos} &= \frac{448 MPa}{85.01 MPa} \\ &= 5.26\end{aligned}$$

Todos los cálculos precedentes validan la propuesta de diseño y su canal de flujo. En el capítulo siguiente se presentan los resultados obtenidos de este trabajo; el modelado de las piezas, la manufactura, la puesta en marcha y las pruebas del dado diseñado

Capítulo 5

Resultados

En anterior capítulo se analizaron las características mecánicas del diseño propuesto respecto a la geometría tanto del canal de flujo como del dimensionamiento exterior del dado a fin de tener certeza sobre la respuesta a los esfuerzos que debe de soportar el material durante su funcionamiento.

5.1. Modelado

Los valores obtenidos del análisis mecánico validan la geometría del diseño propuesto por lo que un segundo paso en la etapa de diseño se modeló completamente el dado. Esto se realizó utilizando el software de CAD, Solid Edge® V.20 en una plataforma Windows Vista ®. Se utilizó este paquete por la facilidad de trabajo y porque sólo se realizaría el modelado de las piezas y el dibujo de planos para su posterior manufactura, no hubo necesidad de sistemas más complejos.



Figura 5.1. Vista en isométrico del ensamblaje generado en Solid Edge.

Como primer resultado, a continuación se presentan algunas imágenes de los modelos CAD referentes a los componentes del dado.

Componentes del dado

Soporte

El soporte es la pieza que se ensambla directamente con el extrusor mediante una placa rompedora y es sujetado por una brida misma que ya es parte del ensamble del cañón del extrusor.

En la imagen de la figura 5.2 se observa el soporte modelado; sobre la superficie de esta pieza se encuentra un pozo, que no es más que un barreno de poca profundidad en donde se enrosca un sujetador para colocar un termopar. Esta cavidad comúnmente se conoce como termopozo y por lo general se utilizan barrenos con cuerda métrica de 10mm diámetro y paso de 1mm. Los parámetros de la cuerda son un estándar por lo cual se conservarán y se hará la manufactura según estos.



Figura 5.2. Soporte del dado.

El canal de flujo en el soporte, como ya se había comentado en el capítulo anterior es cónico y el acabado superficial de éste debe ser pulido para evitar en lo posible que el material fundido disminuya su velocidad de flujo evitando de ésta manera que el material tenga el menor tiempo de residencia dentro de esta parte.



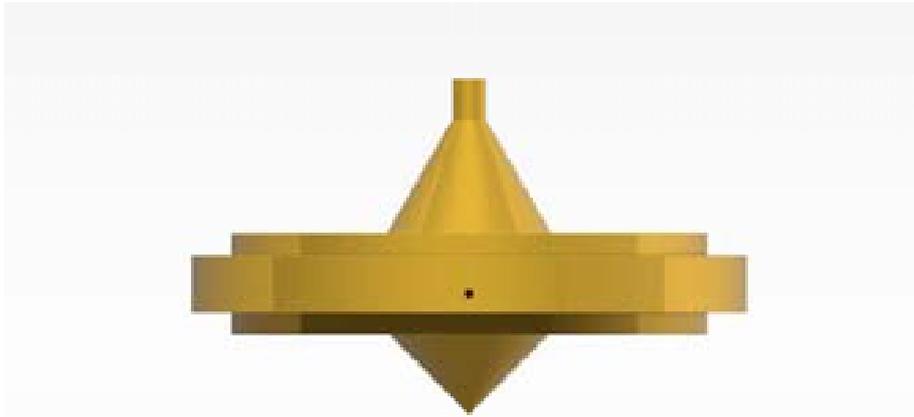
Figura 5.3. Vista posterior del soporte del dado.

En la figura 5.3 hay una vista posterior del dado en la que se puede ver una ranura circular que sirve para ensamblar la placa rompedora. Esta ranura debe ser ajustada a las dimensiones de la placa rompedora para evitar que el material fundido pueda salir durante la operación del equipo.

Como se puede ver en la figura 5.2, sobre la cara frontal del soporte hay ocho barrenos roscados en donde se alojan los ocho pernos que sujetan a las tres piezas del dado. También en el capítulo anterior se analizó el número necesario de pernos y aunque ocho son más de los necesarios se utilizarán éstos para facilitar el centrado durante su manufactura y ensamble y como factor de seguridad.

Mandril

El mandril es un componente fundamental para la extrusión de un perfil hueco. En la figura 5.4 se muestran algunas vistas del mismo. En la imagen a), el cono inferior es el distribuidor de flujo que sirve para repartir el flujo proveniente del canal del soporte hacia los conductos del mandril. El cono superior ayudado de la conicidad de la boquilla sirve para hacer que el flujo saliente de los conductos del mandril converja en uno solo que será el que conforme el perfil tubular.



a)



b)

Figura 5.4. a) Aquí se observa el mandril desde una vista lateral; b) vista en perspectiva del mandril, se puede observar el canal de respiración que va desde la periferia exterior hasta la punta en el centro del cilindro superior.

Además de los conductos de flujo en el mandril, existen ocho barrenos de mayor diámetro que funcionan como guías para los pernos de sujeción.

En la imagen b) se observa el respiradero; en la parte inferior derecha de la misma imagen se puede ver un pequeño barreno sobre la circunferencia exterior de la pieza, esa es la entrada de aire del conducto que termina en el centro del cilindro-corazón del mandril (se observa en la parte superior de la pieza en la imagen). Es necesario este conducto porque mientras se extrude el perfil, el interior de éste va succionando aire para evitar que se colapse.

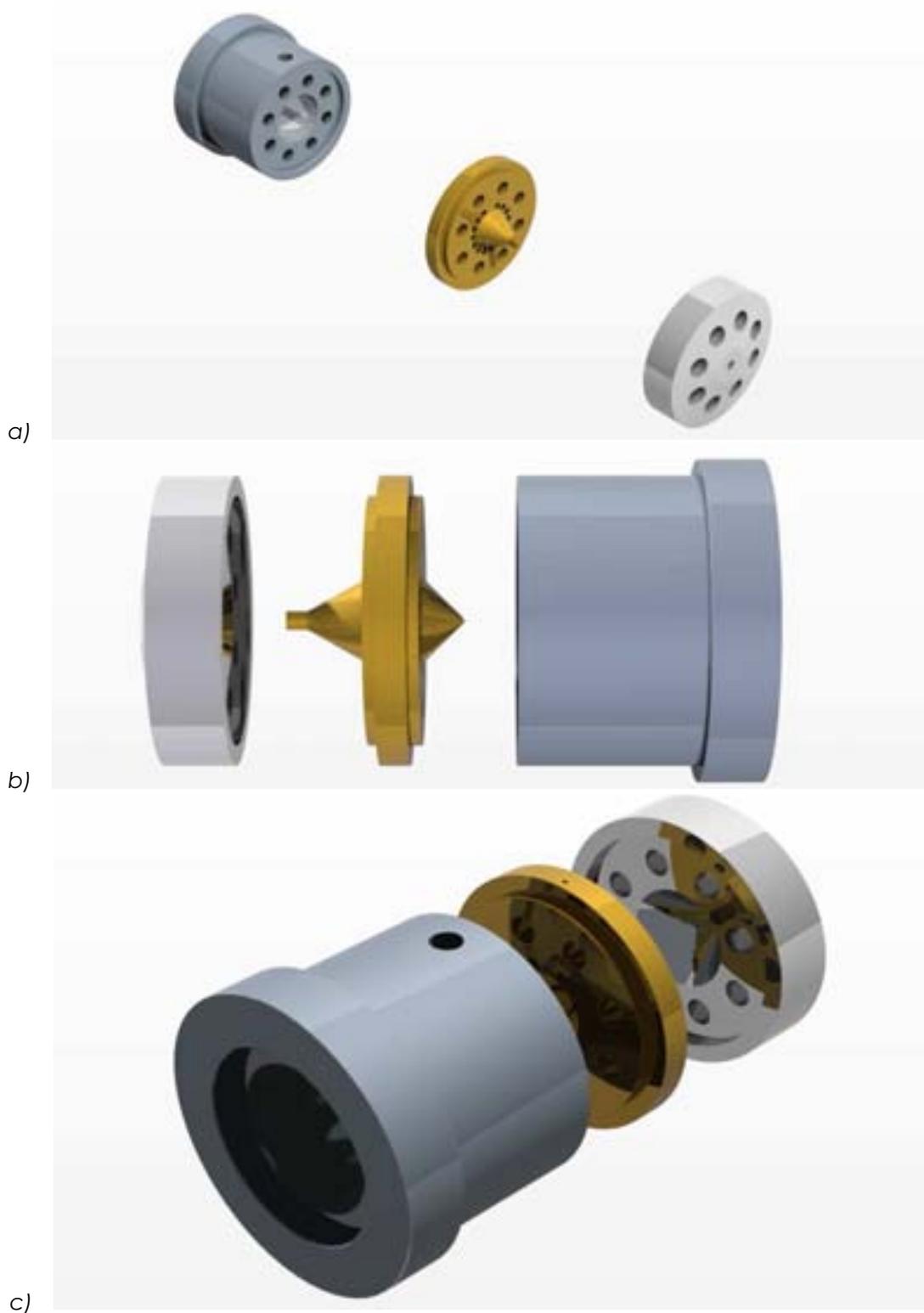


Figura 5.5. a), b), c) son imágenes en explosivo de los componentes del dado (soporte, mandril y boquilla) en su posición de ensamble.

Planos

El fin de modelar las piezas utilizando un sistema CAD fue la consecuente facilidad para dibujar los planos para manufactura. Esto se hizo con el módulo de "Drafting" de Solid Edge®.

Por facilidad en el manejo de los mismos, se decidió manejar planos en tamaño carta. En realidad no es un tamaño de hoja común para planos pero si es muy cómodo para manejarlos durante los procesos de manufactura y poder llevarlos como hojas de trabajo ya que sólo hay que fabricar tres piezas. Los planos se muestran en el apéndice de esta tesis.

5.2. Manufactura

Con los planos recién obtenidos y revisados se podía iniciar la manufactura de las piezas partiendo de un redondo de acero H13 de 4" de diámetro por 35 cm de largo. Sabiendo que éste acero cumple con las características de trabajo en caliente que un proceso como es el de extrusión requieren.

Antes de iniciar cualquier proceso se hicieron las rutas de trabajo que se seguirían para cada componente. Observando la geometría de las piezas del dado, sería necesario el uso de las siguientes maquinas-herramienta:

- Sierra de banda
- Torno
- Fresadora
- Taladro de banco

Rutas de trabajo

Soporte

- Corte de material necesario con sierra de banda
- Montura y balanceo en torno
- Desbaste a diámetro de sujeción del dado
- Refrentado
- Barrenado interno pasado hasta 1"
- Desbaste a diámetro de acople c/ placa rompedora
- Desbaste de la conicidad
- Rotación de la pieza
- Desbaste a diámetro del cuerpo del dado
- Desbaste a la longitud total del soporte

- Refrentado
- Desbaste a diámetro de acople c/ mandril
- Rotación de la pieza
- Pulido del canal de flujo

- Montura sobre plato giratorio en fresadora
- Barrenado de los orificios p/ pernos
- Creación de roscas
- Montura en prensa de fresadora
- Barrenado de termopozo
- Machueleado de termopozo

Mandril

- Corte de material necesario con sierra de banda

- Montura y balanceo en torno
- Desbaste a diámetro del cuerpo del dado
- Refrentado
- Desbaste a diámetro de acople c/ el soporte
- Desbaste de la sección de acople
- Desbaste al diámetro mayor del distribuidor
- Creación de la conicidad del distribuidor
- Rotación de la pieza
- Desbaste al ancho del mandril
- Desbaste a la sección y diámetro de la sección de acople c/ boquilla
- Desbaste al diámetro mayor del cono de convergencia
- Creación del cono de convergencia
- Montura sobre plato giratorio en fresadora
- Barrenado para pernos guía
- Barrenado de ductos de flujo
- Rimado de ductos de flujo
- Barrenado de ducto de respiración
- Pulido de conicidades en torno

Boquilla

- Corte de material necesario con sierra de banda

- Montura y balanceo en torno
- Desbaste a diámetro del cuerpo del dado

- Desbaste de sección de acople con el mandril
- Barrenado de boquilla
- Creación de conicidad convergente
- Pulido de conicidad
- Rotación de la pieza
- Desbaste a tamaño de la pieza
- Creación de conicidad exterior
- Montura sobre plato giratorio en fresadora
- Barrenado de guías para pernos
- Barrenado de cajas para cabezas de tornillos

Conjunto

- Ensamble de las tres piezas con pernos
- Montura en torno
- Pasada de acabado y ajuste del dado
- Pulido exterior

La manufactura se realizó en el mismo orden en que se muestran las rutas de trabajo.

Para todos los trabajos de desbaste y acabado de las tres piezas del dado se utilizaron buriles derechos de 1/4" con pastillas de carburo de tungsteno afilados para desbaste. Aunque el acero estaba recocido y en realidad no era forzoso el uso de este tipo de herramienta se utilizó por su menor desgaste de filo (comparado con buriles de acero para herramienta). Sólo en algunos casos en los que se necesitó un filo muy especial como para crear "esquinas" o ángulos rectos internos se utilizaron buriles de acero para herramienta.

Primero se manufacturó el soporte que es la base del dado, el torno utilizado era uno convencional cuyos carros longitudinal y transversal eran automáticos lo que facilitó las operaciones de cilindrado y refrentado pero su carro diagonal se operaba de manera manual y dado que el cono del canal de flujo en el soporte es muy largo para el recorrido del carro diagonal del torno, esta fue la sección más complicada de manufacturar. Primero se barreno el centro hasta un diámetro de una pulgada que era el de la broca disponible y se continuó con la creación de la conicidad utilizando un porta-herramientas para interiores además de que los buriles utilizados para esto eran más pequeños y de acero para herramientas lo que representó una manufactura más lenta por un mayor desgaste de los filos y el corto recorrido del carro diagonal.

Después del torneado la pieza se colocó sobre el plato giratorio en la fresadora marca Arboga para barrenar y crear las roscas para los pernos de sujeción. En este caso el procedimiento fue colocar el soporte sobre un chuck en el plato giratorio y verificar que la base del soporte estuviera perpendicular al husillo

utilizando un comparador de aguja, hecho esto se colocó una broca y se barreno; después de cada barreno se colocó el machuelo en el husillo se iniciaba el machueleado; esto se hizo así para asegurar la correcta dirección y centrado de las cuerdas pero el machueleado completo se terminó manualmente. La última operación en la fresadora para el soporte fue el barreno para el termopozo y el inicio de la rosca con el machuelo métrico que al igual que las otras roscas se terminó manualmente.

Los últimos pasos de la manufactura se realizaron al terminar las otras piezas.

El mandril fue la pieza más compleja y de mayor tiempo en manufacturar por los grandes desbastes que requería más que por la precisión que requería. Se siguió la ruta de trabajo así que después de los desbastes y pasadas de semi-acabado se lijó el mandril en el torno con el fin de pulirlo, luego utilizando una broca extra-larga montada en un broquero sobre la bancada del torno se barreno una parte del ducto de respiración en el mandril. Después el mandril se montó en el plato giratorio de la fresadora para hacer los barrenos de los pernos guía y para los conductos de flujo que son todos paralelos; hecho esto se crearon las conicidades de los conductos de flujo utilizando una rima cónica y finalmente reacomodando la pieza en la prensa de la fresadora se barrenó la sección del conducto de respiración radial.

La boquilla fue la pieza más sencilla de manufacturar porque no representaba geometrías complicadas. Al igual que las otras piezas, se corto el material necesario en la sierra de banda y después se montó en el torno para los desbastes necesarios, se creó la sección de acople con el mandril y las conicidades del conducto de flujo y el exterior, se dieron las pasadas de acabado, lijado y pulido. Realizado esto se montó también esta pieza sobre el plato giratorio y se hicieron los barrenos para los pernos guía y las cajas para las cabezas de los tornillos utilizando un cortador vertical de $\frac{1}{2}$ ".

Por último se ensamblaron las tres piezas y se montó todo el conjunto en el torno para una última pasada de ajuste y un pulido final.

A continuación se presentan algunas de las consideraciones y parámetros de maquinado utilizados durante la manufactura.

Sierra de banda

Aproximadamente cada corte en la sierra de banda tardó una hora, lo que es no es mucho considerando que se trabaja con una barra sólida de 4" de diámetro de acero para herramienta.

Trabajo en torno

Desbaste:

Diseño y manufactura de un dado para extrusión de perfil tubular plástico de sección circular

- 540 RPM
- Hasta 0.5 mm de corte (20 milésimas de pulgada), con buriles de carburo
- Hasta 0.25 mm de corte con buriles de acero para herramienta
- Hasta 30 mm por minuto de velocidad de avance

Acabado:

- 540 RPM
- Hasta 5 milésimas de pulgada de corte
- Hasta 10 mm por minuto de avance

Trabajo en fresadora

- 440 RPM para todas las operaciones

Para hacer todos los barrenados, rimados y las cajas para las cabezas de tornillos se utilizó una fresadora en lugar de utilizar un taladro de banco porque era más fácil controlar la velocidad del husillo además de que el plato giratorio sólo se ajustaba en la mesa de la fresadora.

Este primer segmento de material se monta en un chuck universal sobre uno de los tornos convencionales que se encuentran en los talleres de manufactura. El material se centro y se balanceo, se monto la herramienta a utilizar que fue un buril derecho de un ¼" con pastilla de carburo de tungsteno afilado para desbaste y se inició la manufactura del soporte.

Durante todos los procesos de arranque se viruta se utilizó refrigerante soluble en agua para evitar el pronto desgaste de las herramientas y retardar en lo posible la necesidad de afilados.



Figura 5.6. A la izquierda se muestra una rima usada para crear conicidades en el mandril; junto a la rima y en la parte inferior de la imagen se muestran buriles redondos utilizados

Diseño y manufactura de un dado para extrusión de perfil tubular plástico de sección circular

para interiores; las demás herramientas son buriles cuadrados utilizados en torno tanto para maquinados en interiores como para exteriores..

Toda la manufactura del dado incluyendo cortes, desbastes y demás procesos llevados a cabo para el terminado del dado tomaron aproximadamente 50 horas.

Cortes de material	3 horas
Soporte	16 horas
Mandril	20 horas
Boquilla	9 horas
Ensamble y pulido	2 horas
Horas totales de trabajo	50 horas

En las páginas siguientes se muestran algunas imágenes tomadas durante la manufactura.



Figura 5.7. Cortes previos al inicio de los maquinados. Cada corte tardó aproximadamente 1 hora.



Figura 5.8. Proceso de desbaste en torno utilizando buriles con inserto de carburo de tungsteno. La pieza que se muestra es el soporte en su primera etapa de desbaste.



Figura 5.9. Tres componentes del dado terminados. En el soporte se puede observar la diferencia en el acabado superficial entre el canal de flujo y la cara que estará en contacto con el mandril.



Figura 5.10. Finalmente el dado ensamblado mediante los ocho pernos y con el sujetador de termopar ya instalado.

5.3. Instalación del dado

Una vez fabricado el dado en su totalidad, se procedió al montaje y sujeción en el extrusor para su puesta en marcha.

El dado se montó en la brida del extrusor y se ensambló con la placa rompedora que finalmente es la que crea la unión entre el cañón del extrusor y el dado ya que la brida es sólo para mantener sujeta esta unión.

Diseño y manufactura de un dado para extrusión de perfil tubular plástico de sección circular

En la figura 5.11 se observa cómo fue montado el dado sobre la brida y también se puede ver la placa rompedora que es una placa perforada localizada al final del cañón en la otra placa de la brida.

Después de que se instaló el dado, se monto una resistencia de banda que rodea el cuerpo del dado. El cañón tiene varias resistencias a lo largo de su longitud, la brida tiene una resistencia mas y finalmente el dado lleva una más para mantener el flujo del material y también para controlar el acabado superficial del perfil extrudido. En la figura 5.12 se ve la instalación completa del dado incluyendo las resistencias montadas y conectadas así como el termopar tipo J colocado dentro del termopozo.



Figura 5.11. Montaje del dado en la brida del extrusor.



Figura 5.12. Dado montado en la máquina

5.4. Pruebas y experimentación

Con el dado instalado en el extrusor comenzaron a realizarse las primeras pruebas de la manera que sigue:

Polietileno de alta densidad grado inyección (índice de fluidez 0.5)

Al momento de realizar las primeras pruebas no se contaba con el material para el que se había diseñado el dado o por lo menos no se trató de un material especial para extrusión. El material disponible era Polietileno de alta densidad de PEMEX (PADMEX 65050). Este material especial para inyección. La principal diferencia entre los materiales para inyección y los de grado extrusión es su relativa menor viscosidad lo de otra manera se puede verificar en las hojas técnicas con un mayor índice de fluidez.

Este material se vació en la tolva del extrusor y se inicio el proceso utilizando un perfil de temperaturas ascendente como en el mostrado en la tabla 5.1

Tabla 5.1. Perfil de temperaturas de operación para polietileno de inyección.

Zonas (°C)			
Alimentación	Compresión	Dosificación	Dado
100	170	200	200

El material se procesó a temperaturas altas puesto que así lo indicaba en su hoja técnica; sin embargo esas temperaturas son elevadas para un proceso de extrusión.

Los primeros perfiles extrudidos se obtuvieron con temperaturas menores a las mostradas en la tabla 5.1. Pero los resultados no fueron buenos, el material no fluye fácilmente y se adhiere a las paredes de la boquilla lo que genera un estancamiento momentáneo y el perfil va saliendo muy lentamente de la boquilla y puesto que el material al salir de la boquilla se expande, el diámetro del perfil es mayor al de la boquilla, por otra parte el que el perfil sea extrudido poco a poco provoca la formación de estrías y un pésimo acabado superficial.

Un resultado importante que se observó fue que aún cuando el material no tenía las características de uno para extrusión. No se generaron líneas de flujo y al doblar un segmento de tubo, se quebraba sin mostrar segmentación lo que significa que la boquilla lograba volver a unir completamente los flujos provenientes del mandril.



Figura 5.13. Primeros perfiles extrudidos de polietileno de alta densidad grado inyección.



Figura 5.14. Estos son los perfiles que se pudieron obtener de polietileno de alta densidad para inyección.

En la figura 5.14 se observan, a la izquierda, los primeros perfiles con un mal acabado superficial y mayor espesor de pared. Del centro hacia la derecha se encuentran perfiles que tienen un buen acabado superficial pero ya que el material fluía rápidamente y puesto que se enfriaba al aire, el perfil se torcía, además de que no se contaba con el jalador correspondiente ni la tina de enfriamiento.

Polietileno de baja densidad grado inyección (índice de fluidez 10)

Este material es uno de los más comunes en el proceso de inyección y eso se debe a su alto índice de fluidez lo que significa una baja viscosidad. Pero en el proceso de extrusión lo que se necesita es una alta viscosidad para lograr que el perfil sea extrudido correctamente.

Tabla 5.2. Perfil de temperaturas de operación para polietileno.

Zonas (°C)			
Alimentación	Compresión	Dosificación	Dado
80	130	180	180

La prueba de este material tuvo mayor complejidad porque los parámetros recomendados para el proceso de inyección no generan los mismos resultados en extrusión. Lo más difícil fue ajustar el perfil de temperaturas para que el material no se degradara por temperaturas elevadas y por mayor tiempo de residencia ya que el husillo giraba lentamente en comparación a las revoluciones manejadas en inyección y a la vez para que el material fluyera cuando se bajaban las temperaturas.

Una vez controlados los parámetros se observó que los mejores resultados obtenidos correspondían a un perfil que salía a una alta velocidad pero que apenas conformaba una circunferencia. El extrudido obtenido con el perfil de temperaturas mostrado en la tabla 5.2, salía muy caliente y el tubo tendía a colapsarse por un deficiente enfriamiento. Aunque el perfil salía rápidamente, el material se adhería a la boquilla provocando estrías y un mal acabado superficial. En una mejora de los parámetros se lograron evitar las estrías sin embargo ahora se generaron líneas de flujo algo que ya no se pudo evitar de ninguna manera.

El perfil extrudido de este material presentaba fragilidad al tacto, dado que el perfil es un poco flexible pero al llegar a quebrarse las líneas de flujo se separan lo que indica que en este caso los flujos provenientes del mandril no consiguieron convertirse en uno solo.

En la imagen a) de la figura 5.15 se pueden observar estrías desvanecidas que se ven como grumos, y también se puede ver líneas de flujo. En la imagen b) ya sólo hay líneas de flujo que no se pudieron evitar en este material

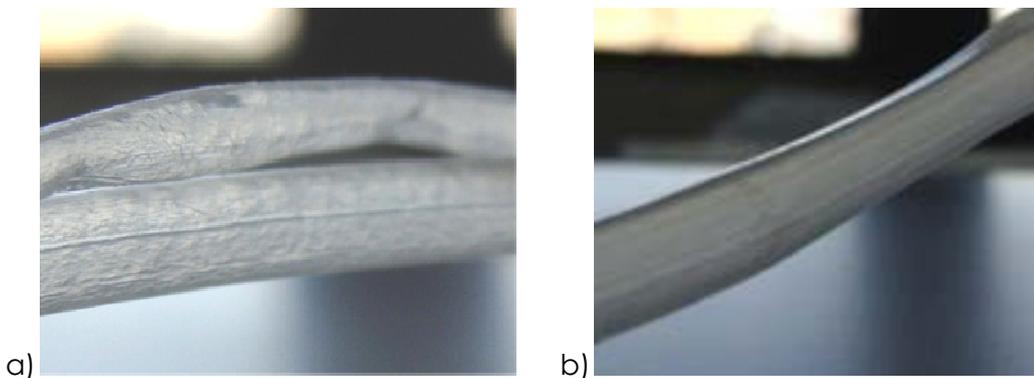


Figura 5.15. a) Perfil de polipropileno con estrías y líneas de flujo; b) perfil sólo con líneas de flujo.

En realidad este material no se comportó muy bien en el proceso de extrusión aunque no se esperaba mucho dado su grado de inyección.

Polietileno de alta densidad grado extrusión (índice de fluidez 0.35)

Finalmente se realizaron pruebas con el material para el cual fue diseñado el dado. Se trata del polietileno de alta densidad PADMEX 56035 de PEMEX. Este material es especial para el proceso de extrusión ya que tiene un menor índice de fluidez y se procesa a menores temperaturas que las usuales en el proceso de inyección. Algo importante es el menor índice de fluidez que se refiere a una mayor viscosidad.

El perfil de temperaturas usado en esta prueba es el mostrado en la Tabla 5.3. Este perfil fue el que produjo los mejores resultados y es el mismo que se planteo usar desde el diseño en el capítulo anterior.

Tabla 5.3. Perfil de temperaturas de operación para polietileno.

Zonas (°C)			
Alimentación	Compresión	Dosificación	Dado
110	140	170	170

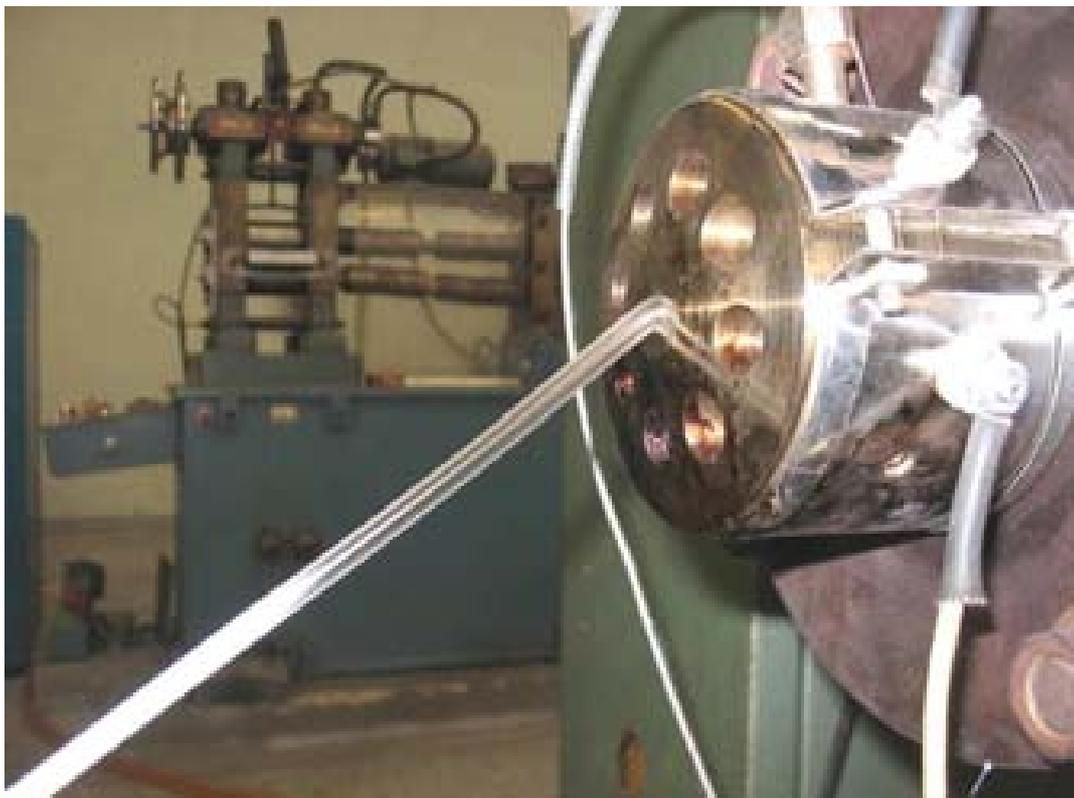


Figura 5.16. Extrusión de polietileno de alta densidad grado extrusión.

En la figura 5.16 se puede ver el perfil al momento de extrudir. Este material se pudo procesar con gran facilidad y sin un hinchamiento como sucedió con los materiales de grado inyección además de que el enfriamiento es mucho más rápido que los otros materiales. Aún cuando no se cuenta hasta el momento con una tina de enfriamiento, necesaria para una línea de extrusión este perfil mantuvo un espesor casi constante y nunca se produjeron estrías ni líneas de flujo.



Figura 5.17. Perfiles extrudidos de diferentes espesores, todos de polietileno de alta densidad y de grado extrusión.

En la figura 5.17 se observan tres perfiles tubulares de diferentes diámetros y espesores. El de mayor diámetro es aproximadamente el de la boquilla. Estos perfiles al ser extrudidos fueron jalados manualmente lo que no es especialmente recomendable porque no se consigue obtener un diámetro y espesor constantes al no poder controlar la velocidad de jalado. Aun cuando no se tiene el control para mantener un perfil constante, este material se mostró noble y fue fácilmente procesado consiguiendo un buen acabado estético y mecánico. No se produjeron estrías ni líneas de flujo visibles y al doblar o quebrar estos perfiles no muestran grietas o fisuras que revelen líneas de flujo no visibles lo que significa que los flujos provenientes del mandril sí alcanzan a converger extrudiendo un perfil de calidad.

Finalmente el último resultado a comprobar era el flujo volumétrico del extrusor para este material. El flujo volumétrico teórico calculado (mostrado en el capítulo anterior) fue de $486.4 \frac{cm^3}{min}$ y el experimental resultó ser de $504 \frac{cm^3}{min}$, lo que da una diferencia de error de:

$$\%error_Q = \left| \frac{\left(486.4 \frac{cm^3}{min} - 504 \frac{cm^3}{min}\right)}{486.4 \frac{cm^3}{min}} \right| \times 100\%$$

$$\%error_Q = 4.23\%$$

Diseño y manufactura de un dado para extrusión de perfil tubular plástico de sección circular

Lo que muestra un correcto diseño y lo bien que se comportó el material.

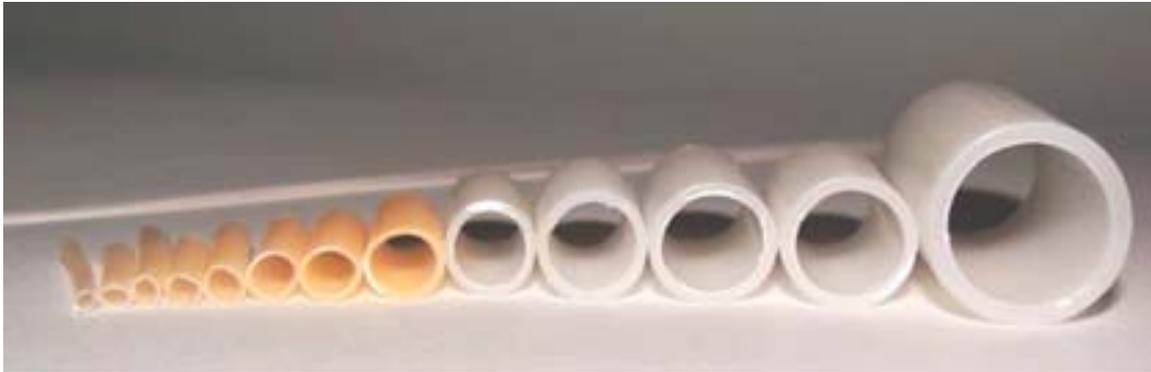


Figura 5.18. Tubos de diferentes diámetros y espesores extrudidos por el dado diseñado.

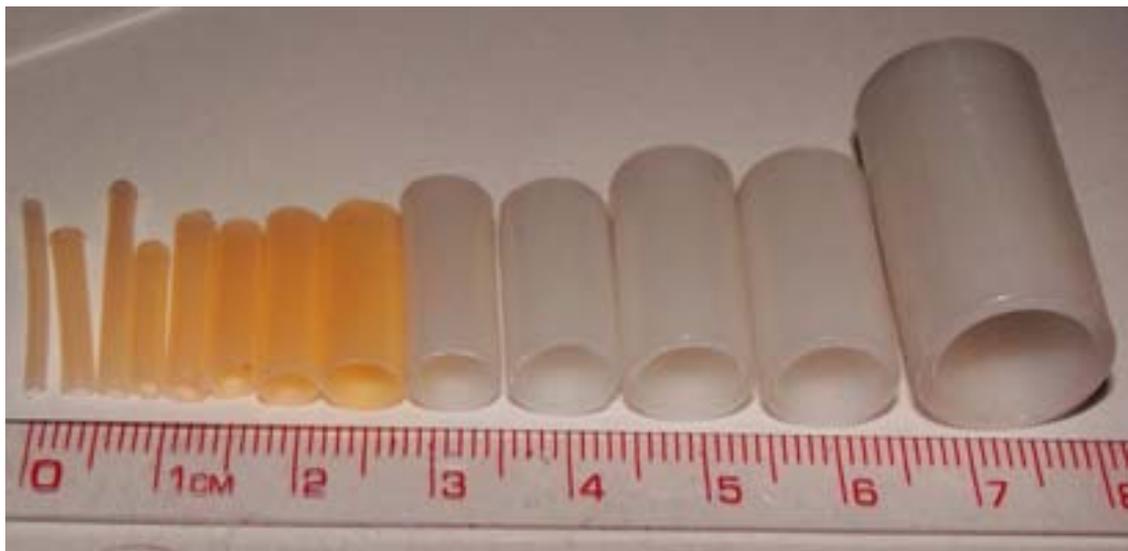


Figura 5.19. En esta imagen se puede ver una escala en centímetros que puede dar una mejor idea de las dimensiones reales de los perfiles.

Conclusiones

- Previo al diseño del dado se cumplió el primer objetivo que era rehabilitar el extrusor. Lo que se logró realizando labores de mantenimiento general todos los sistemas (eléctrico, motriz, etc.).
- Con la base teórica que se tenía, y considerando el material de grado extrusión, el flujo másico resultante tanto de los cálculos obtenidos como del análisis experimental fue similar con un factor de error del 4.23%.
- La diversidad de materiales probados, de acuerdo a su índice de fluidez, mostró la importancia de este parámetro para su procesamiento, ya que el proceso de extrusión maneja altas viscosidades directamente relacionadas con la temperatura del material.
- Respecto al proceso de fabricación de las piezas, la precisión y el acabado superficial son importantes debido a posibles fugas del material y posible degradación debida a rugosidades y por falta de flujo libre. En este mismo aspecto, la precisión alcanzada para las piezas se vio limitada porque algunos pasos de la manufactura como lo fue el pulido de superficies se realizó manualmente.
- Ya que el material extrudido no presentaba formas de degradación, estrías y/o líneas de flujo a simple vista, se puede decir que el diseño del dado fue el adecuado.
- A manera experimental, se fueron encontrando las temperaturas adecuadas para obtener la viscosidad necesaria que corroborara los cálculos teóricos y así determinar los parámetros generales del proceso como son revoluciones de husillo, las temperaturas y la presión de extrusión.

Aportaciones futuras

El dado es el componente principal dentro del proceso de extrusión de plásticos. Sin embargo para conseguir una línea completa de extrusión dentro del Laboratorio de Procesamiento de Plásticos todavía es necesario contar con un calibrador, un jalador y una tina de enfriamiento.

Algunas propuestas para proyectos futuros, posiblemente para tesis son:

1. Diseño y manufactura de un jalador que sirva para poder conseguir un perfil de diámetro y espesores uniformes.
2. Diseño y manufactura de una tina de enfriamiento para conseguir junto con el jalador una mayor uniformidad del perfil extrudido además de que la velocidad con la que se extrude puede ser aumentada.
3. Diseño y manufactura de un calibrador. Este componente se diseña para un perfil en específico, en este caso para obtener un perfil de diámetro constante.

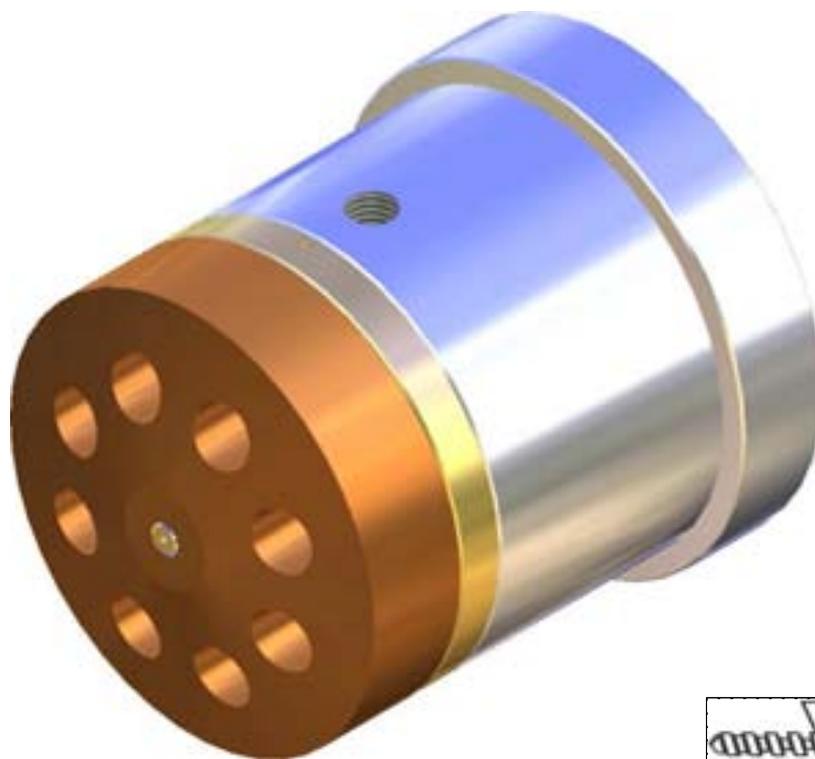
De la misma manera es necesaria

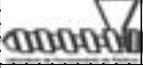
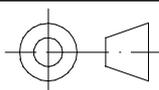
Adicionalmente a los trabajos pendientes. El diseño del dado ofrece la posibilidad de utilizar el soporte recién manufacturado con diferentes boquillas o mandriles compatibles. Esto significa que no es necesario construir nuevos dados completos sino sólo nuevas boquillas o mandriles.

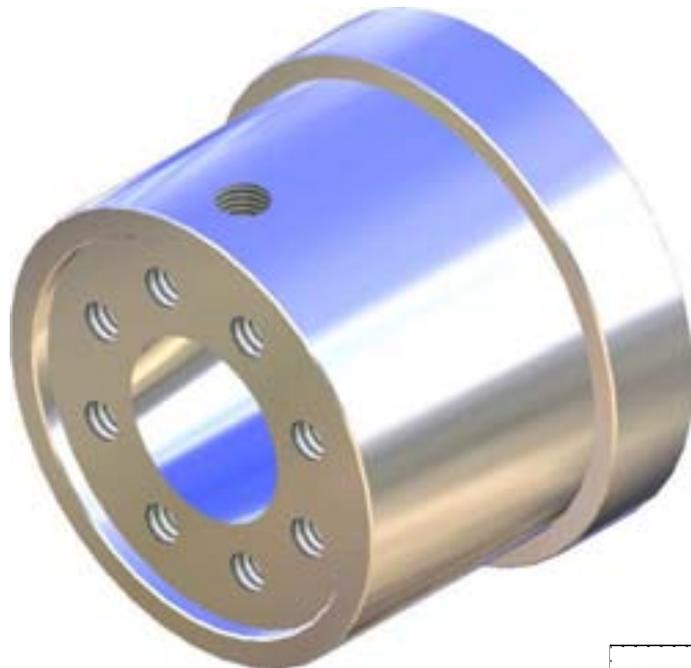
Apéndice

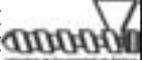
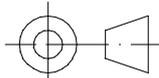
Planos del dado

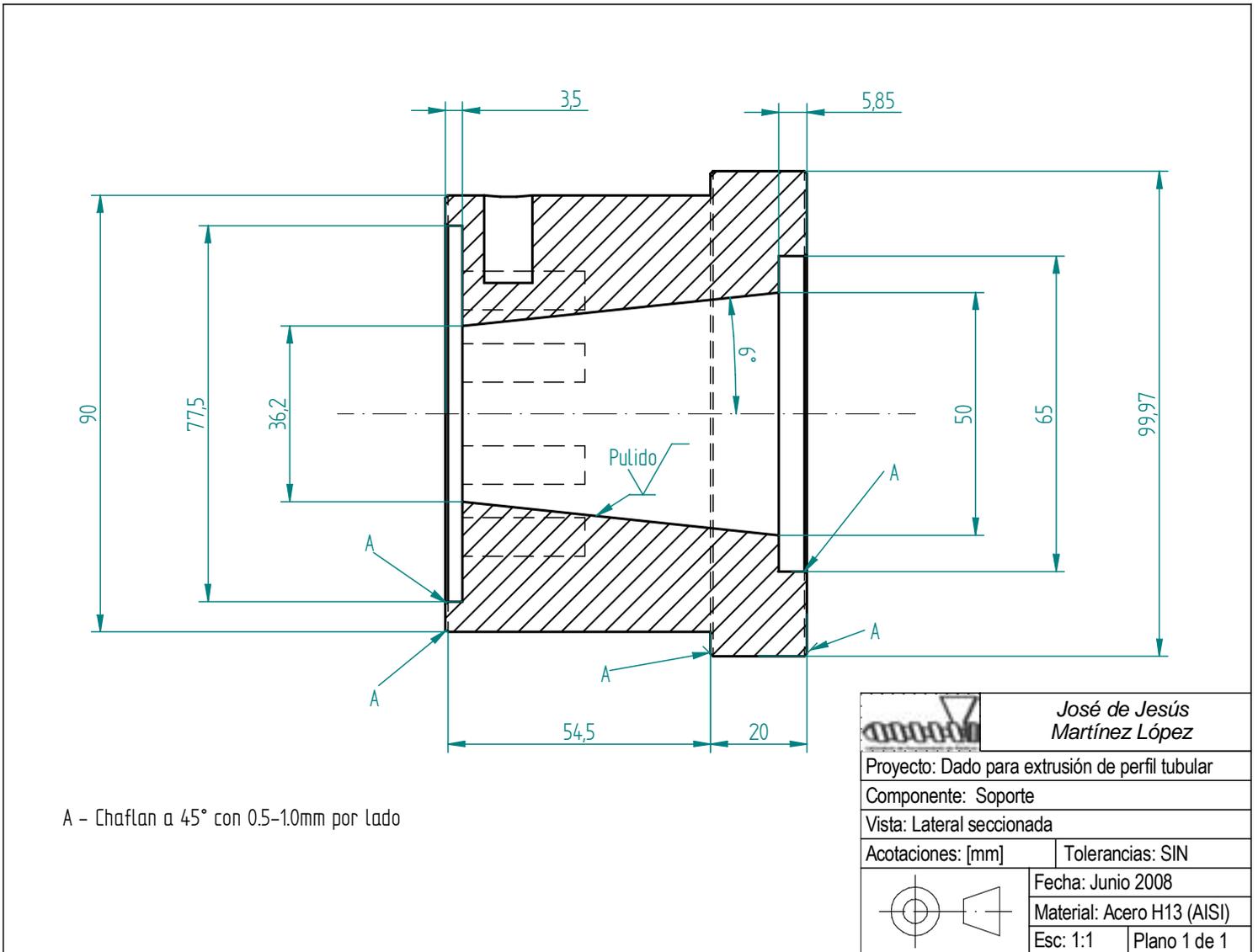
Soporte	.	.	.	.	.	.	.	.	.	117
Mandril	.	.	.	.	.	.	.	.	.	121
Boquilla	.	.	.	.	.	.	.	.	.	127
Ficha técnica de los materiales de experimentación	.	.	.	.	.	.	.	.	.	130

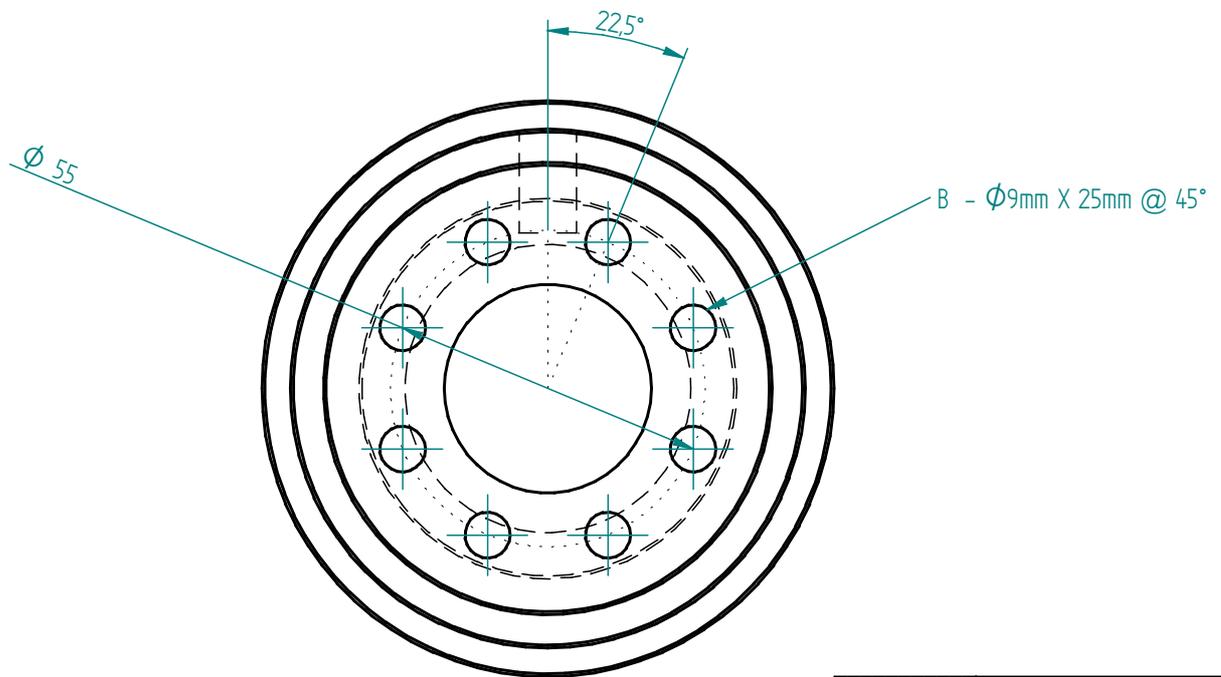


	José de Jesús Martínez López
Proyecto: Dado para extrusión de perfil tubular	
Componente: Ensamble	
Vista: Isométrico	
Acotaciones: [mm]	Tolerancias: SIN
	Fecha: Junio 2008
	Material: Acero H13 (AISI)
	Esc: 1:1mm Plano 1 de 1



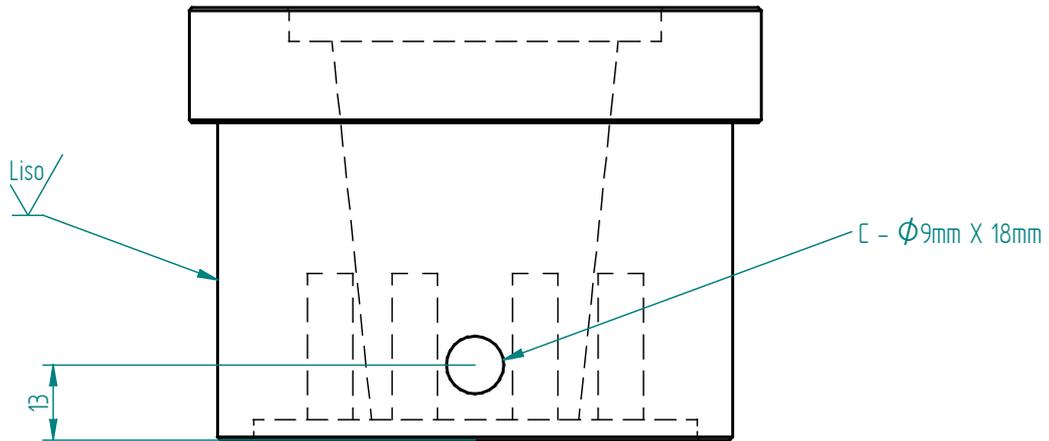
	<i>José de Jesús Martínez López</i>	
Proyecto: Dado para extrusión de perfil tubular		
Componente: Soporte		
Vista: Isométrico		
Acotaciones: [mm]		Tolerancias: SIN
		Fecha: Junio 2008
		Material: Acero H13 (AISI)
		Esc: 1:1 | Plano 1 de 1





B - Arreglo de 8 barrenos a 45° de $\phi 9\text{mm}$ X 25mm para roscas 3/8" NF 24

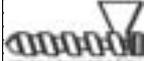
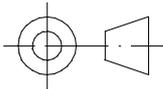
		José de Jesús Martínez López	
Proyecto: Dado para extrusión de perfil tubular			
Componente: Soporte			
Vista: Lateral frontal (hacia el mandril)			
Acotaciones: [mm]		Tolerancias: SIN	
		Fecha: Junio 2008	
		Material: Acero H13 (AISI)	
Esc: 1:1		Plano 1 de 1	

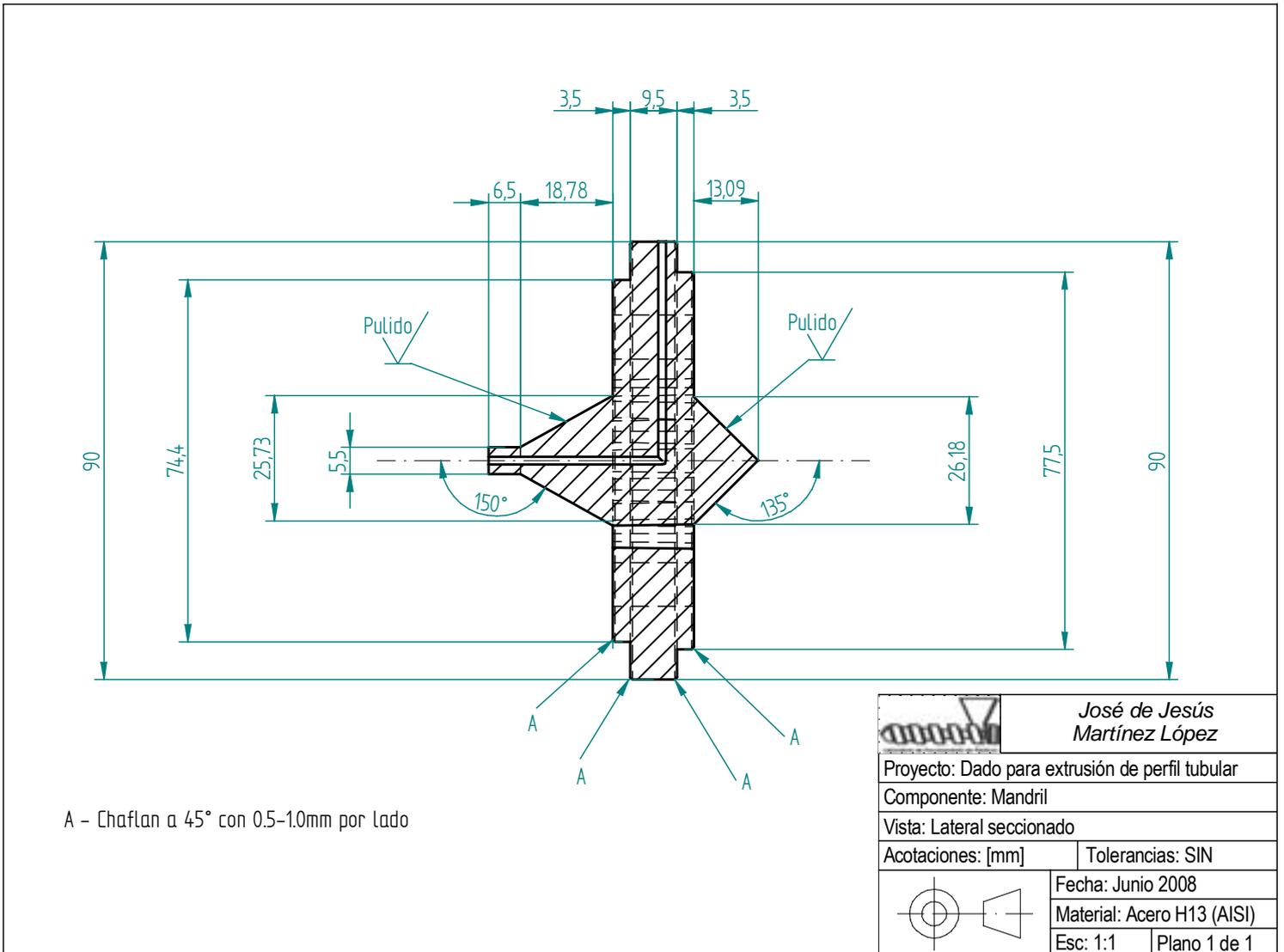


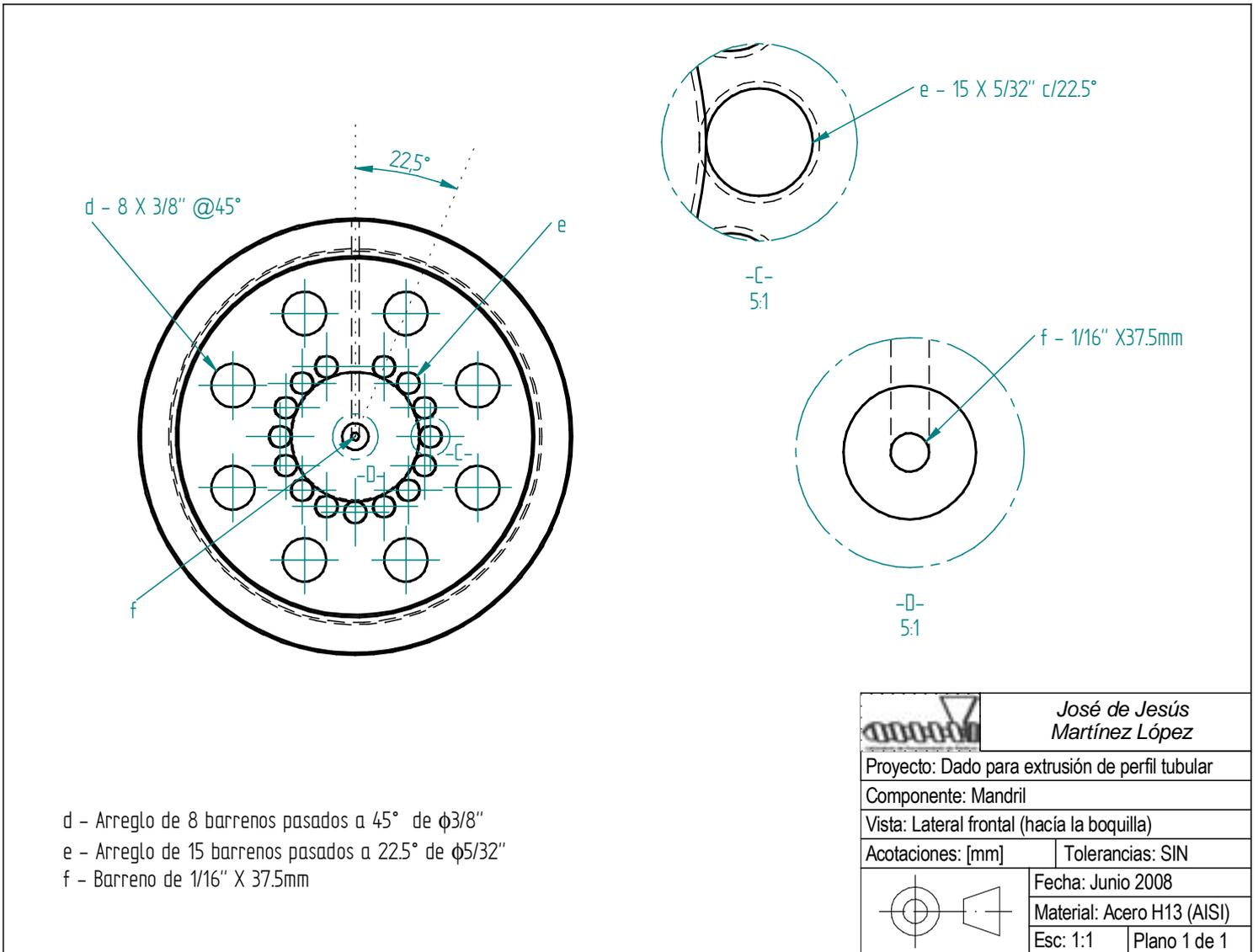
C - Barreno para termopozo. $\phi 9\text{mm}$ X 18mm para rosca M01 X 10

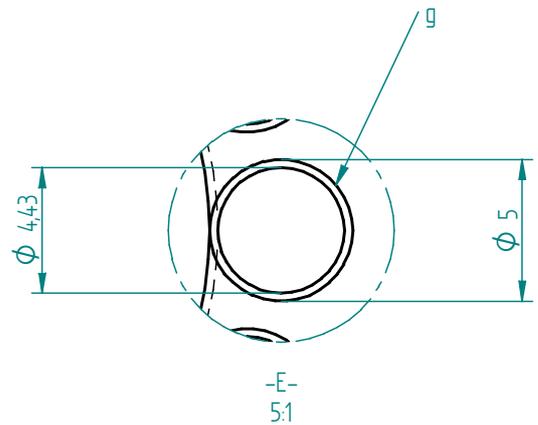
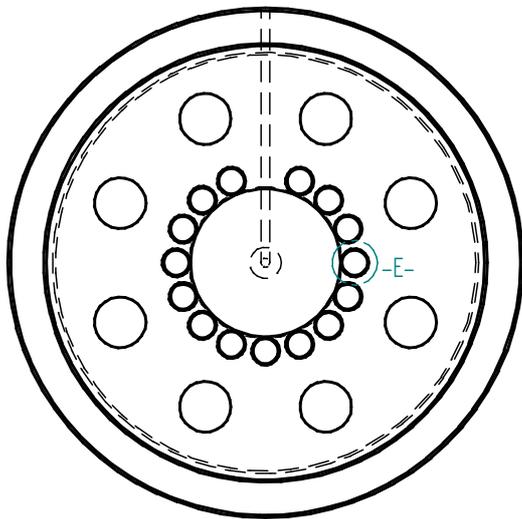
		José de Jesús Martínez López	
Proyecto: Dado para extrusión de perfil tubular			
Componente: Soporte			
Vista: Lateral superior			
Acotaciones: [mm]		Tolerancias: SIN	
		Fecha: Junio 2008	
		Material: Acero H13 (AISI)	
Esc: 1:1		Plano 1 de 1	



	<i>José de Jesús Martínez López</i>	
Proyecto: Dado para extrusión de perfil tubular		
Componente: Mandril		
Vista: Isométricos		
Acotaciones: [mm]		Tolerancias: SIN
		Fecha: Junio 2008
		Material: Acero H13 (AISI)
		Esc: 1:1 Plano 1 de 1

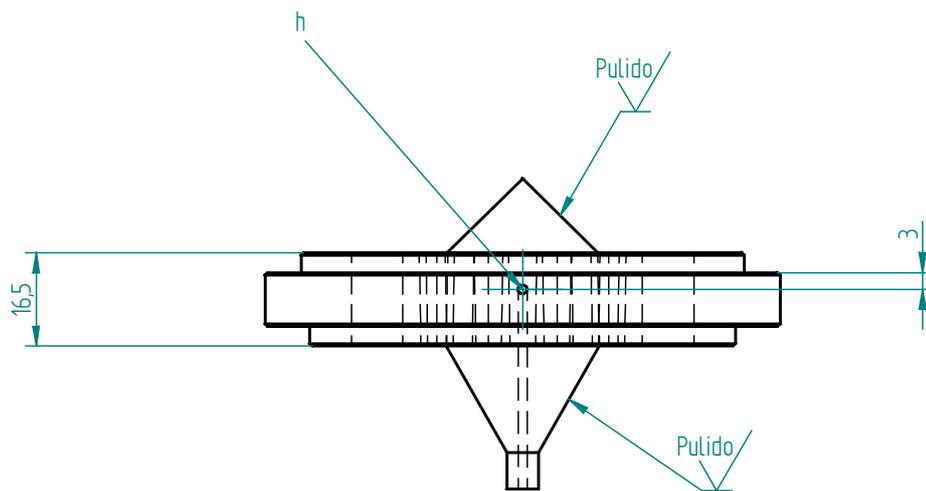






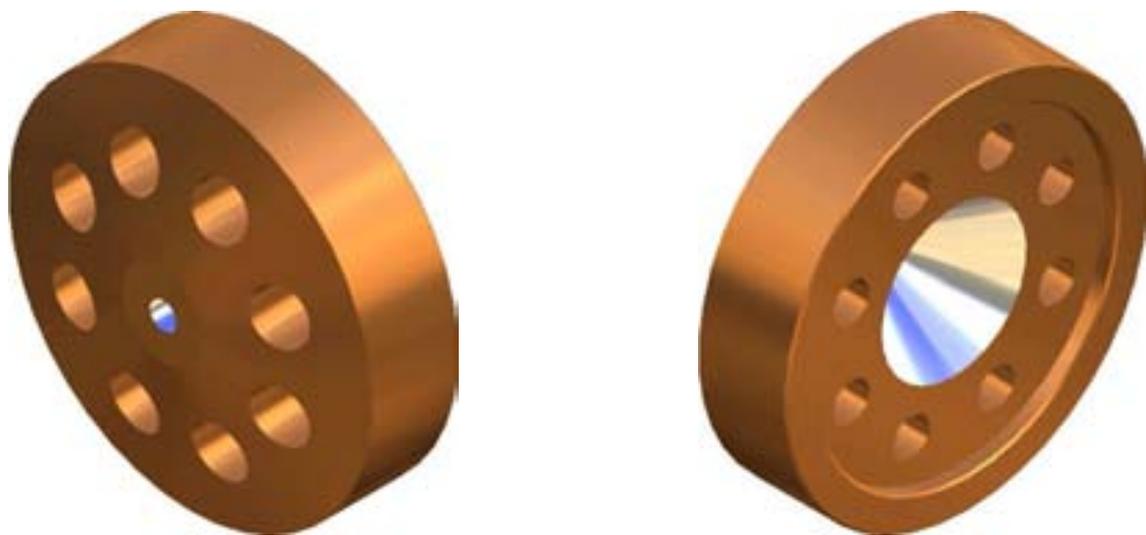
g - Rimado de los 15 barrenos de 5/32" a las dimensiones mostradas en -E- mediante el uso de una RIMA Cónica al 2%.

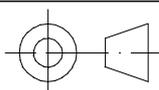
		José de Jesús Martínez López	
Proyecto: Dado para extrusión de perfil tubular			
Componente: Mandril			
Vista: Lateral posterior (hacia el soporte)			
Acotaciones: [mm]		Tolerancias: SIN	
		Fecha: Junio 2008	
		Material: Acero H13 (AISI)	
		Esc: 1:1	Plano 1 de 1

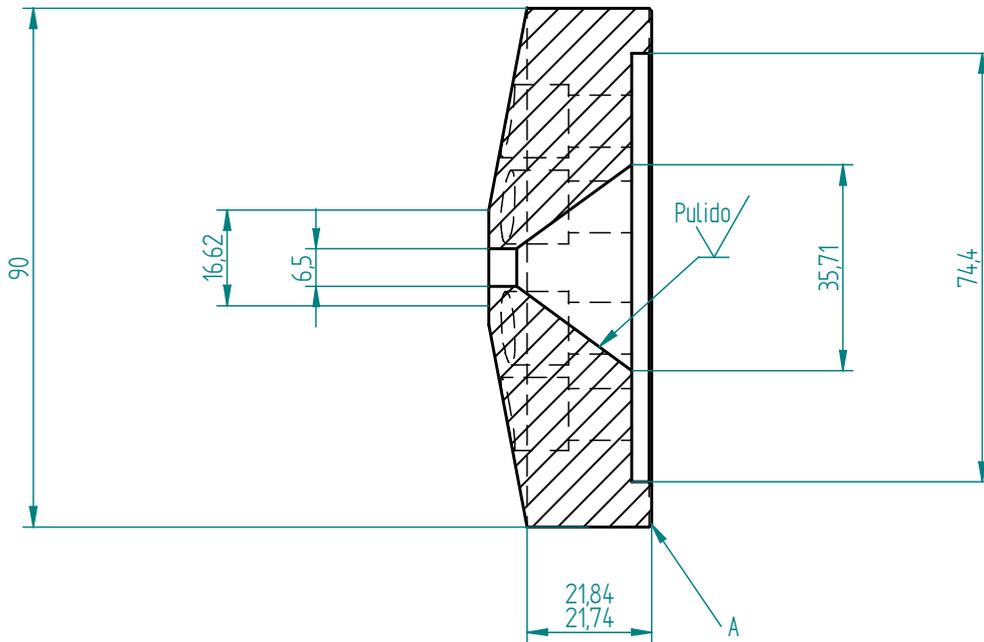


h - Barrenode $\phi 1/16'' \times 45\text{mm}$.

		José de Jesús Martínez López	
Proyecto: Dado para extrusión de perfil tubular			
Componente: Mandril			
Vista: Lateral superior			
Acotaciones: [mm]		Tolerancias: SIN	
		Fecha: Junio 2008	
		Material: Acero H13 (AISI)	
		Esc: 1:1	Plano 1 de 1



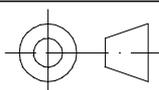
	<i>José de Jesús Martínez López</i>	
Proyecto: Dado para extrusión de perfil tubular		
Componente: Boquilla		
Vista: Isométricos		
Acotaciones: [mm]		Tolerancias: SIN
		Fecha: Junio 2008
		Material: Acero H13 (AISI)
		Esc: 1:1 Plano 1 de 1



A - Chaflan a 45° con 0.5-1.0mm por lado

		José de Jesús Martínez López	
Proyecto: Dado para extrusión de perfil tubular			
Componente: Boquilla			
Vista: Lateral seccionado			
Acotaciones: [mm]		Tolerancias: SIN	
		Fecha: Junio 2008	
		Material: Acero H13 (AISI)	
		Esc: 1:1	Plano 1 de 1



	<i>José de Jesús Martínez López</i>	
Proyecto: Dado para extrusión de perfil tubular		
Vista: Explosivo isométrico		
Componente: Ensamble		
Acotaciones: [mm]		Tolerancias: SIN
		Fecha: Junio 2008
		Material: Acero H13 (AISI)
		Esc: 1:1 | Plano 1 de 1



PADMEX 56035

ALTA DENSIDAD

Índice de Fluidex: 0.35 g/10min Densidad: 0.956 g/cm³

Características

Copolímero grado soplado bimodal, con una distribución de peso molecular ancha. Ofrece excelente rigidez, procesabilidad, y resistencia al impacto, así como buena resistencia al agrietamiento por esfuerzo ambiental (ESCR). Contiene aditivo antioxidante y lubricante.

Aplicaciones:

- * Botellas para conservar productos químicos y de limpieza.
- * Tubería para drenaje y ductos no presurizados

**Cumplimiento FDA y EEC

Parámetro	Unidad	Método de Prueba	Valor Típico **
Índice de fluidex	g/10 min.	ASTM D - 1238	0.35
Densidad	g/cm ³	ASTM D - 1505	0.956
Propiedades de la Placa *			
Resistencia a la Tensión (cedencia)	MPa	ASTM D - 638	34.3
Resistencia a la Tensión (ruptura)	MPa	ASTM D - 638	15
Elongación a la ruptura	%	ASTM D - 638	> 500
Impacto Izod	J/m	ASTM D - 256	125
Módulo de Flexión	MPa	ASTM D - 790	50.4
Módulo de Young	MPa	ASTM D - 790	27.9
Resistencia Ambiental (ESCR) F ₅₀ condición C	h	ASTM D - 1693	> 200
Dureza Shore	Tipo D	ASTM D - 1708	62
Temperatura de Reblandecimiento Vicat	°C	ASTM D - 1525	125
Temperatura de Fusión	°C	ASTM E - 704	130

Condiciones

Temperatura: 160-185°C en perfil recto o descendente
 Temperatura del cabezal: 1175-195°C

Presentación

- * Saco de 25kg
- * Granel

Los valores típicos reportados son obtenidos en laboratorio bajo los métodos de prueba descritos. Estos parámetros y condiciones de procesamiento, deben utilizarse solo como referencia y no constituyen una garantía implícita o explícita para la aplicación propuesta.



PADMEX 65050

ALTA DENSIDAD

Índice de Fluidez 5.0 g/10min Densidad 0.9655 g/cm³

Características

Copolímero con una distribución de peso molecular angosta. Alta resistencia al impacto, excelente resistencia al medio ambiente y luz solar. Contiene aditivo antioxidante, lubricante y protector UV.

Aplicaciones:

- * Cajas multiusos
- * Línea hogar en recipientes grandes
- * Tarimas
- * Cubetas industriales
- * Piezas industriales
- * Cajas para transportación de envases con bebidas

**Cumplimiento FDA y EEC

Parámetro	Unidad	Método de Prueba	Valor Típico **
Índice de fluidez	g/10 min.	ASTM D - 1238	5.0
Densidad	g/cm ³	ASTM D - 1905	0.9655
Propiedades de la Placa *			
Resistencia a la Tensión (cedencia)	MPa	ASTM D - 638	30.4
Resistencia a la Tensión (ruptura)	MPa	ASTM D - 638	17.1
Impacto Izod Método A	J/m	ASTM D - 256	54
Módulo de Flexión	MPa	ASTM D - 790	80.2
Resistencia Ambiental (ESCR) F ₅₀ condición B	h	ASTM D - 1093	20
Dureza Shore	Tipo D	ASTM D - 1706	64
Temperatura de Reblandecimiento Vicat	°C	ASTM D - 1525	126
Distancia de Flujo en espal (SFD)	cm	ASTM D - 3123	62
Temperatura de Fusión	°C	ASTM E - 794	130

Condiciones

Temperatura de inyección: 210-250°C en perfil recto o descendente.

Presentación

- * Saco de 25kg.
- * Granel

Los valores típicos reportados son obtenidos en laboratorio bajo los métodos de prueba descritos. Estos parámetros y condiciones de procesamiento, deben utilizarse sólo como referencia y no constituyen una garantía implícita o explícita para la aplicación propuesta.

Referencias bibliográficas

- [1]. Michaeli Walter, Extrusion dies for plastics and rubber: Design and engineering computations, Editorial Hanser, 3ra edición 2003.
- [2]. Ramos de Valle Luís Francisco, Extrusión de Plásticos Principios Básicos. Editorial Limusa, 1ra edición, 2005..
- [3]. Enciclopedia del plástico. Instituto Mexicano del Plástico Industrial. Tomo 3. Edición 2000.
- [4]. Charles A. Harper, Modern plastics handbook. Editorial McGraw-Hill. 1ra edición 2004.
- [5]. Birley Arthur W., Haworth Barry, Batchelor Jim, Physics of Plastics Processing, Properties and Materials Engineering. Editorial HANSER Publishers 1992
- [6]. Morton D. H. – Jones, Procesamiento de plásticos. Editorial Limusa. 1ra Edición 1993.
- [7]. Fisher E. G., Extrusión de Plásticos. Compañía Editorial Continental S.A. 1970
- [8]. Hibbeler R.C., Mecánica de materiales. Editorial Pearson-Prentice Hall, 6ta edición.
- [9]. Ayala Ruiz Alvaro, Norma para dibujo mecánico e industrial. UNAM.
- [10]. S. L. Semiatin, ASM Handbook: Volume 14A: Metalworking: Bulk Forming
- [11]. <http://www.allianceplasticscorp.com/index.cfm?event=pageview&contentpieceid=1122&parentid=1325>
- [12]. <http://www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno>
- [13]. <http://news.thomasnet.com/news/software>

- [14]. <http://www.tormex.com/espanol/productos/estructurales.html>
- [15]. http://www.efunda.com/Materials/alloys/tool_steels/show_tool.cfm?ID=AlSi_H13&prop=all&Page_Title=AlSi%20H13
- [16]. <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=be4f89d3469b4b14b9acd99a247ada77>
- [17]. <http://www.boltscience.com/pages/fastexam.htm>
- [18]. <https://www.ptq.pemex.com/portal/Productos.aspx?IdMenu=2&IdsMenu=13&Pagina=Detalle&Ident=35&Producto=PADMEX%2065050&Familia=Proceso%20de%20Inyecci%C3%B3n&TP=P>
- [19]. <https://www.ptq.pemex.com/portal/Productos.aspx?IdMenu=2&IdsMenu=13&Pagina=Detalle&Ident=29&Producto=PADMEX%2056035&Familia=Proceso%20de%20Soplado&TP=P>

