

## TEMA 4. EXTRUSIÓN

1. INTRODUCCIÓN.....	103
2. COMPONENTES DE LA EXTRUSORA .....	107
2.1. El tornillo de extrusión .....	107
2.2. Cilindro .....	108
2.3. Garganta de alimentación .....	109
2.4. Tolva .....	110
2.5. Plato rompedor y filtros .....	111
2.6. Cabezal y Boquilla.....	112
3. ESPECIFICACIONES DE LA MÁQUINA .....	114
4. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA EXTRUSORA. ....	116
4.1 Transporte de sólidos (zona de alimentación) .....	116
4.1.1. Transporte de sólidos en la tolva.....	117
4.1.2. Transporte de sólidos en el cilindro .....	118
4.2. Fusión (zona de transición).....	122
4.3. Transporte del fundido (zona de dosificado) .....	126
4.4. Mezclado.....	134
4.4.1. Mezclador de agujas.....	134
4.4.2. Mezclador de anillo.....	135
4.4.3. Mezclador con filetes desiguales .....	135
4.4.4. Mezcladores con filetes secundarios.....	136
4.5. Desgasificado.....	136
4.6. Conformado .....	137
4.6.1. Tensionado .....	138
4.6.2. Relajación.....	138
4.6.3. Enfriamiento.....	139
5. MODELADO DE LA ZONA DE DOSIFICACIÓN .....	140
5.1 Obtención de las ecuaciones .....	140
5.1.1. Ecuaciones de velocidad .....	140
5.1.2. Cálculo del caudal.....	143
5.2. Influencia de variables .....	147
5.2.1. Efecto de las dimensiones del tornillo .....	147
5.2.2. Efecto de la viscosidad del polímero .....	149
5.2.3. Efecto de las condiciones de operación .....	149
5.2.4 Efecto de la restricción de la boquilla .....	150
6. LÍNEAS DE EXTRUSIÓN .....	154
6.1. Líneas de extrusión de tubos, tuberías y perfiles .....	156
6.2. Líneas de mezclado.....	157

6.3. Líneas de películas y láminas.....	158
6.3.1. Proceso con pila de rodillos.....	158
6.3.2. Proceso con sistema de rodillos fríos .....	160
6.3.3. Líneas de películas sopladas.....	161
6.3.4. Coextrusión .....	163
6.3.5. Recubrimientos.....	164
6.4. Líneas para la producción de fibras y filamentos.....	165
<b>BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA .....</b>	<b>167</b>

### **Resumen**

En este tema se profundiza en el procesado de termoplásticos mediante extrusión. En primer lugar se realiza una descripción general del proceso y se describen las principales partes de la máquina así como las especificaciones de diseño. En el tercer apartado se explican con detalle las diferentes funciones que puede realizar una extrusora (transporte de sólidos, fusión, transporte del fundido, mezclado, venteo y conformado). A continuación se propone un modelo simplificado pero de gran utilidad desde el punto de vista práctico, que relaciona el caudal de material extruido con las condiciones de operación, las características de diseño del tornillo y la boquilla, y la viscosidad del material extruido. Para finalizar se describen las principales líneas completas de extrusión que se encuentran en la industria.

## **1. INTRODUCCIÓN**

En una definición amplia el proceso de extrusión hace referencia a cualquier operación de transformación en la que un material fundido es forzado a atravesar una boquilla para producir un artículo de sección transversal constante y, en principio, longitud indefinida. Además de los plásticos, muchos otros materiales se procesan mediante extrusión, como los metales, cerámicas o alimentos, obteniéndose productos muy variados como son marcos de ventanas de aluminio o PVC, tuberías, pastas alimenticias, etc. Desde el punto de vista de los plásticos, la extrusión es claramente uno de los procesos más importantes de transformación. El proceso de extrusión de plásticos se lleva a cabo en máquinas denominadas extrusoras o extrusores. Aunque existen extrusoras de diversos tipos, las más utilizadas son las de tornillo o de husillo simple, por lo que haremos referencia a ellas continuamente.

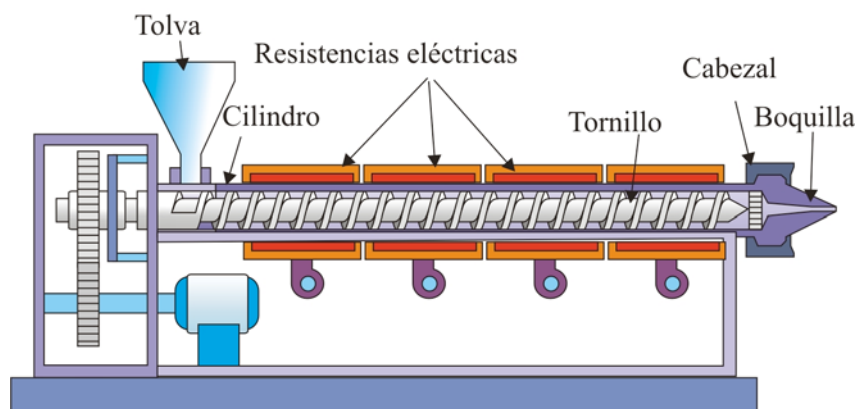
En el proceso de extrusión, por lo general, el polímero se alimenta en forma sólida y sale de la extrusora en estado fundido. En algunas ocasiones el polímero se puede alimentar fundido, procedente de un reactor. En este caso la extrusora actúa como una bomba, proporcionando la presión necesaria para hacer pasar al polímero a través de la boquilla. En otras ocasiones se extruyen los materiales sólidos, como es el caso del procesado de fibras en el que se requieren elevadas orientaciones en el material.

Para el caso más corriente de la extrusión de un polímero inicialmente sólido que funde en el proceso, la extrusora, y en concreto una de husillo único, puede realizar seis funciones principales:

- Transporte del material sólido hacia la zona de fusión
- Fusión o plastificación del material
- Transporte o bombeo y presurización del fundido
- Mezclado
- Desgasificado
- Conformado

Debe tenerse en cuenta que no todas las funciones anteriores tienen lugar necesariamente durante la operación de todas y cada una de las extrusoras. Por ejemplo, el desgasificado o venteo únicamente se produce en las máquinas preparadas para ello. Por otra parte, el conformado no tiene porque ser definitivo; en muchas ocasiones el producto obtenido adquiere su forma final en un proceso secundario puesto que las extrusoras se emplean con frecuencia para mezclar los componentes de formulaciones que se procesarán posteriormente mediante otras técnicas o bien para obtener preformas que serán procesadas mediante soplado o termoconformado.

De acuerdo con las misiones que debe cumplir, una extrusora debe disponer de un sistema de alimentación del material, un sistema de fusión-plastificación del mismo, el sistema de bombeo y presurización, que habitualmente generará también un efecto de mezclado y finalmente, el dispositivo para dar lugar al conformado del material fundido. La figura 4.1 muestra, como ejemplo, una representación esquemática de una extrusora típica de husillo único.



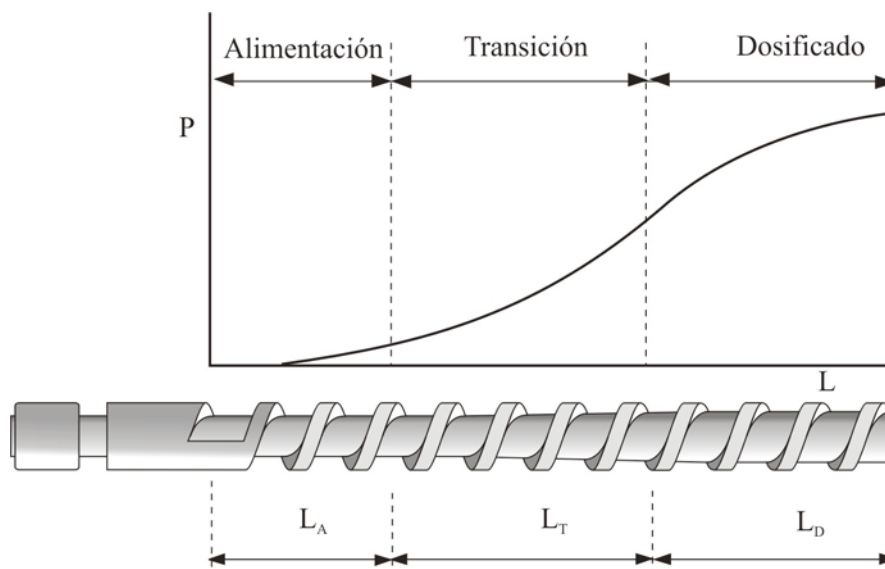
**Figura 4.1.** Representación esquemática de una extrusora de husillo sencillo.

Como puede apreciarse el sistema de alimentación más habitual es una tolva, en la que el material a procesar se alimenta en forma de polvo o granza. El dispositivo de fusión-plastificación, bombeo y mezclado está constituido por un tornillo de Arquímedes que gira en el interior de un cilindro calentado, generalmente mediante resistencias eléctricas. En la parte del cilindro más

alejada de la tolva de alimentación se acopla un cabezal cuya boquilla de salida tiene el diseño adecuado para que tenga lugar el conformado del producto. La parte esencial de la máquina es el sistema cilindro-tornillo que, como consecuencia del giro, compacta el alimento sólido, da lugar a la fusión del material y lo transporta hacia la boquilla de conformado, produciendo al mismo tiempo la presurización y el mezclado del material.

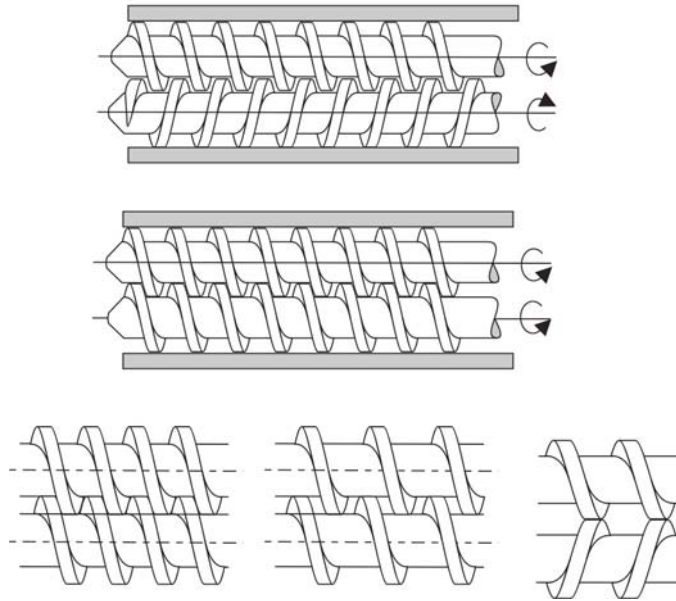
Todas las extrusoras se consideran divididas en tres zonas que se pueden apreciar en la figura 4.2, junto con la evolución de la presión a lo largo de la extrusora. La zona de alimentación es la más cercana a la tolva, en la cual la profundidad del canal del tornillo es máxima. Tiene como objetivo principal compactar el alimento en una forma sólida densa y transportarlo hacia la siguiente zona a una velocidad adecuada. La zona de transición o compresión es la zona intermedia en la cual la profundidad del canal disminuye de modo más o menos gradual. Conforme el material sólido va compactándose en esta zona el aire que pudiera quedar atrapado escapa del material vía la tolva de alimentación. En la zona de transición, además, tiene lugar la fusión del material. La zona de dosificado se sitúa al final, en la parte más cercana a la boquilla y tiene una profundidad de canal muy pequeña y constante. En esta zona el material fundido es homogeneizado y presurizado para forzarlo a atravesar a presión la boquilla de conformado.

Hay que tener presente que esta asignación de funciones a cada una de las zonas de la extrusora no es estricta; por ejemplo, el transporte, presurización y homogeneización se producen a lo largo de toda la extrusora. Las extrusoras actuales pueden operar entre 10 y 500 rpm y según su tamaño, pueden proporcionar caudales de 2000 kg/h de material.



**Figura 4.2.** Zonas de una extrusora y evolución de la presión a lo largo de las mismas.

Existen otros tipos de extrusoras como son las extrusoras multitornillo que, como su nombre indica, poseen más de un tornillo. Entre éstas las más importantes son las de dos tornillos, dentro de las cuales existe gran variedad dependiendo de si los tornillos tienen giro contrario (lo más corriente ya que generan mayor fuerza de cizalla) o paralelo, y del grado de interpenetración entre los mismos. En la figura 4.3 se muestran algunas variantes posibles. Las extrusoras de dos tornillos presentan posibilidades que a menudo superan en gran medida a las de un solo tornillo. Entre las ventajas que presentan se incluye una buena capacidad de mezclado y desgasificación, y un buen control del tiempo de residencia y de su distribución. Algunas desventajas de estas extrusoras son su precio, superior al de las de tornillo único y el hecho de que sus prestaciones son difíciles de predecir.

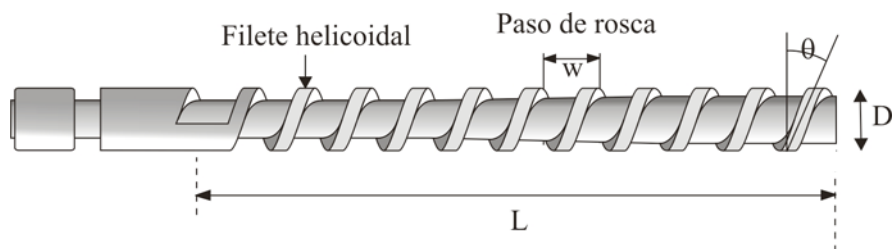


**Figura 4.3.** Disposición posible de los husillos en las extrusoras de doble husillo; giro contrario y giro en paralelo; diferentes grados de interpenetración de los tornillos.

## 2. COMPONENTES DE LA EXTRUSORA

### 2.1. EL TORNILLO DE EXTRUSIÓN

El tornillo o husillo consiste en un cilindro largo rodeado por un filete helicoidal (figura 4.4). El tornillo es una de las partes más importantes ya que contribuye a realizar las funciones de transportar, calentar, fundir y mezclar el material. La estabilidad del proceso y la calidad del producto que se obtiene dependen en gran medida del diseño del tornillo. Los parámetros más importantes en el diseño del tornillo son su longitud ( $L$ ), diámetro ( $D$ ), el ángulo del filete ( $\theta$ ) y el paso de rosca ( $w$ ).



**Figura 4.4.** Tornillo de una extrusora.

El material se va presurizando a medida que avanza por el tornillo, comenzando con presión atmosférica en la tolva y aumentando hasta la salida por la boquilla. La sección de paso del tornillo no es constante, si no que es mayor en la zona de alimentación (mayor profundidad de canal). Normalmente el tornillo no viene acompañado de ningún sistema de calentamiento o enfriamiento, aunque en algunos casos se emplean tornillos huecos por los que se hace circular un fluido refrigerante o calefactor.

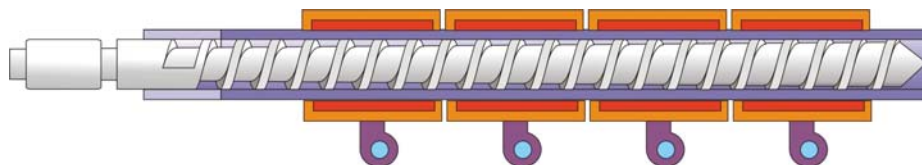
Los materiales termoplásticos que se usan en el proceso de extrusión difieren notablemente entre sí. La elasticidad, calor específico, coeficiente de fricción, temperatura de fusión, viscosidad del fundido, etc., cubren un amplio rango de valores, y puesto que todas estas propiedades tienen su importancia en el momento de diseñar el tornillo, es lógico que sea necesario utilizar diferentes tipos de tornillos para trabajar adecuadamente cada material. En la práctica es muy raro que un tornillo determinado sea adecuado para trabajar con materiales muy diversos; de hecho, cada tornillo se diseña o elige para trabajar con una determinada combinación boquilla/material.

## 2.2. CILINDRO

El cilindro de calefacción alberga en su interior al tornillo como se muestra en la figura 4.5. La superficie del cilindro debe ser muy rugosa para aumentar las fuerzas de cizalla que soportará el material y permitir así que éste fluya a lo largo de la extrusora. Para evitar la corrosión y el desgaste mecánico, el cilindro suele construirse de aceros muy resistentes y en algunos casos viene equipado con un revestimiento bimetalico que le confiere una



elevada resistencia, en la mayoría de los casos superior a la del tornillo, ya que éste es mucho más fácil de reemplazar.



**Figura 4.5.** Sistema cilindro de calefacción-tornillos

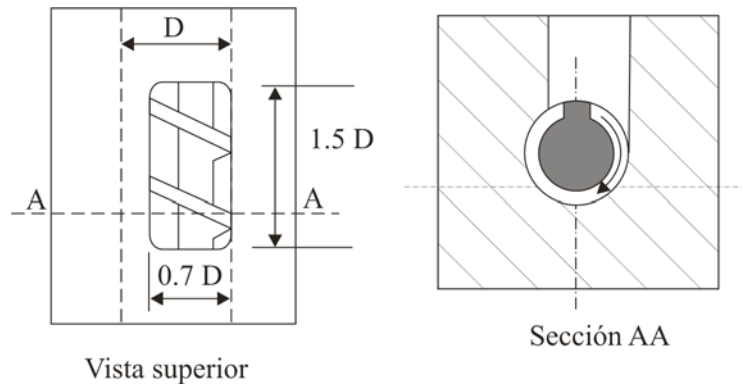
El cilindro por lo general posee sistemas de transferencia de calor. El calentamiento se puede realizar mediante resistencias eléctricas circulares localizadas en toda su longitud como se muestra en la figura 4.5, y también, aunque es menos usual, mediante radiación o encamisado con fluidos refrigerantes o calefactores. El cilindro suele dividirse en varias zonas de calefacción, al menos tres, con control independiente en cada una de ellas, lo que permite conseguir un gradiente de temperatura razonable desde la tolva hasta la boquilla.

El cilindro debe enfriarse si como consecuencia de la generación interna de calor originada por la cizalla a la que se somete al plástico se rebasa la temperatura nominal del proceso (lo que ocurre normalmente). El enfriamiento en la menor parte de las ocasiones se hace con líquidos, ya que aunque tengan una mayor capacidad para eliminar calor que el aire, la temperatura es más difícil de controlar. Normalmente se usan soplantes como las representadas en la figura 4.5. Hay que tener en cuenta que los sensores de control de temperatura quedan situados en el cilindro, por lo que la temperatura del material será siempre superior a la que indican los controles.

### 2.3. GARGANTA DE ALIMENTACIÓN

El cilindro puede estar construido en dos partes, la primera se sitúa debajo de la tolva y se denomina garganta de alimentación. Suele estar provista de un sistema de refrigeración para mantener la temperatura de esta zona lo suficientemente baja para que las partículas de granza no se adhieran a las paredes internas de la extrusora.

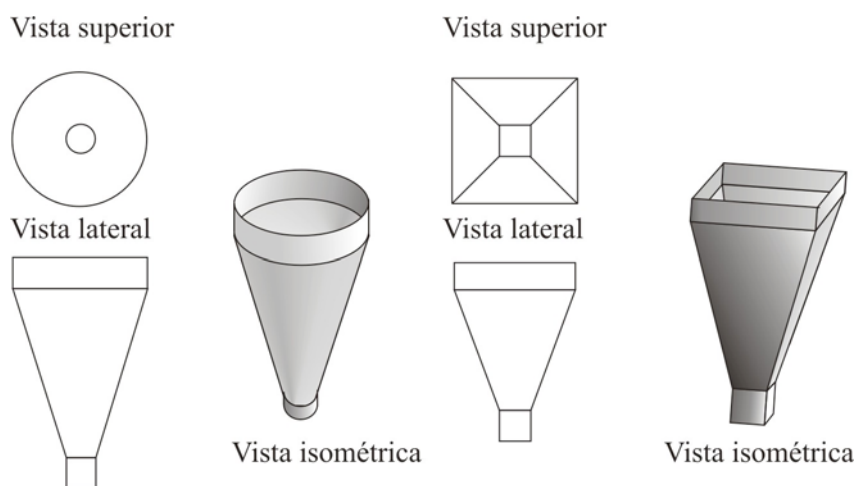
La garganta de alimentación está conectada con la tolva a través de la boquilla de entrada o de alimentación. Esta boquilla suele tener una longitud de 1.5 veces el diámetro del cilindro y una anchura de 0.7 veces el mismo (figura 4.6), y suele estar desplazada del eje del tornillo para facilitar la caída del material a la máquina.



**Figura 4.6.** Garganta de alimentación.

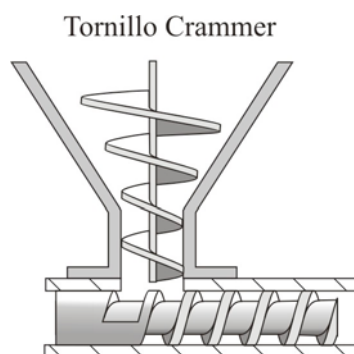
## 2.4. TOLVA

La tolva es el contenedor que se utiliza para introducir el material en la máquina. Tolva, garganta de alimentación y boquilla de entrada deben estar ensambladas perfectamente y diseñadas de manera que proporcionen un flujo constante de material. Esto se consigue más fácilmente con tolvas de sección circular, aunque son más caras y difíciles de construir que las de sección rectangular (ver figura 4.7). Se diseñan con un volumen que permita albergar material para 2 horas de trabajo.



**Figura 4.7.** Tipos de tolvas.

En ocasiones para asegurar el flujo constante del material se usan dispositivos de vibración, agitadores e incluso tornillos del tipo del que se muestra en la figura 4.8.



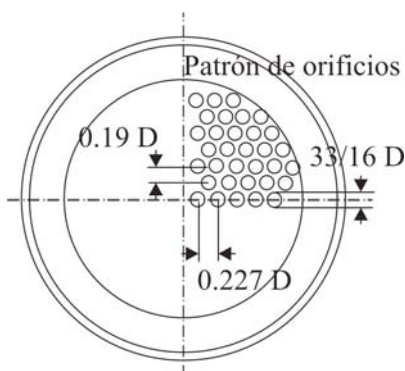
**Figura 4.8.** Ejemplo de un tornillo de alimentación.

## 2.5. PLATO ROMPEDOR Y FILTROS

El plato rompedor se encuentra al final del cilindro. Se trata de un disco delgado de metal con agujeros, como se muestra en la figura 4.9. El propósito del plato es servir de soporte a un paquete de filtros cuyo fin principal es atrapar los contaminantes para que no salgan con el producto extruído. Los

filtros además mejoran el mezclado y homogenizan el fundido. Los filtros van apilados delante del plato rompedor, primero se sitúan los de malla más ancha, reduciéndose el tamaño de malla progresivamente. Detrás se sitúa un último filtro también de malla ancha y finalmente el plato rompedor que soporta los filtros.

Conforme se ensucian las mallas es necesario sustituirlas para evitar una caída de presión excesiva y que disminuya la producción. Por ello, el diseño del plato debe ser tal que pueda ser reemplazado con facilidad.



**Figura 4.9.** Plato rompedor.

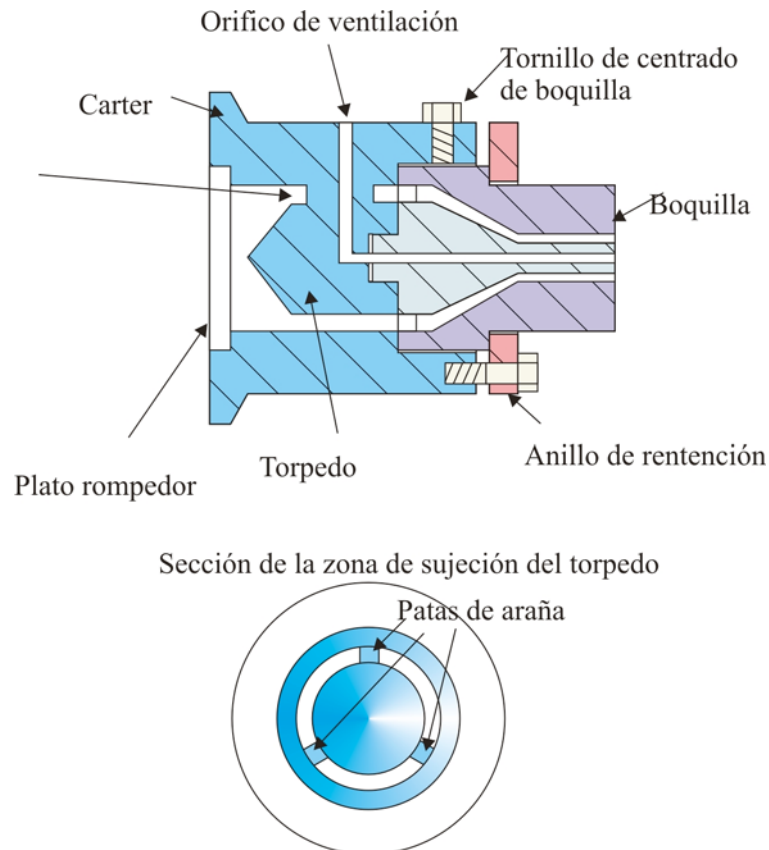
## 2.6. CABEZAL Y BOQUILLA

El cabezal es la pieza situada al final del cilindro, que se encuentra sujetando la boquilla y por lo general manteniendo el plato rompedor. Generalmente va atornillado al cilindro. El perfil interno del cabezal debe facilitar lo más posible el flujo del material hacia la boquilla. La figura 4.10 muestra un sistema cabezal-boquilla de forma anular. En la figura el material fluye del cilindro a la boquilla a través del torpedo, situado en el cabezal. La sección transversal de los soportes del torpedo se diseña para proporcionar el flujo de material a velocidad constante.

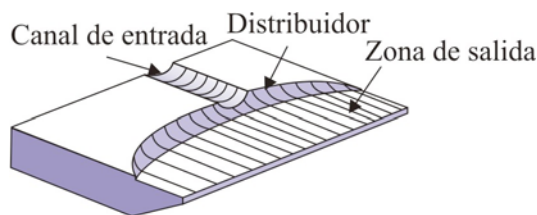
La función de la boquilla es la de moldear el plástico. Las boquillas se pueden clasificar por la forma del producto, teniendo así boquillas anulares como la mostrada en la figura 4.10 (por ejemplo, para la fabricación de

tuberías o recubrimientos de materiales cilíndricos), boquillas planas como la de la figura 4.11 (con las que se obtienen planchas y láminas), boquillas circulares (con las que se obtienen fibras y productos de forma cilíndrica), etc.

Se puede distinguir tres partes diferenciadas en todas las boquillas que se muestran en la figura 4.11 (corte de boquilla plana): la primera parte es el canal de entrada, luego el distribuidor y a continuación la zona de salida.



**Figura 4.10.** Boquilla anular y cabezal.



**Figura 4.11.** Partes diferenciadas en una boquilla de extrusión.

Las dimensiones de la boquilla no son exactamente las mismas que las del producto extruído. Hay varias razones para ello: la recogida del material, el enfriamiento y el fenómeno de relajación contribuyen a que el material cambie de tamaño e incluso de forma; todas ellas serán discutidas posteriormente.

Excepto para las boquillas circulares es prácticamente imposible fabricar una boquilla en la que la geometría del canal sea tal que la boquilla puede ser empleada para un número amplio de materiales y de condiciones de operación. En cualquier caso el diseño de la boquilla debería tener en cuenta en la medida de lo posible una serie de consideraciones como son emplear radios amplios en todas las esquinas, evitar canales estrechos o pequeños y partes profundas.

### 3. ESPECIFICACIONES DE LA MÁQUINA

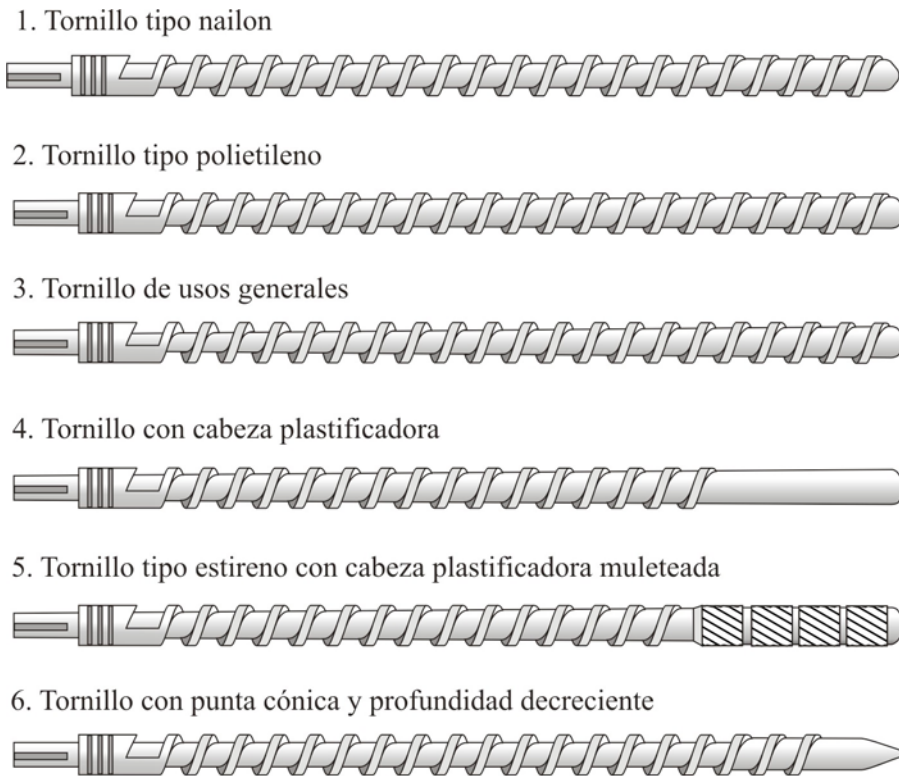
**Diámetro del cilindro (D):** Es representativo del tamaño de la extrusora y afecta en gran medida a la velocidad de flujo. Como deduciremos más adelante, el caudal de material que proporciona la extrusora es proporcional al cuadrado del diámetro del tornillo. La mayoría de las extrusoras tiene diámetros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

**Relación longitud/diámetro (L/D):** Para un diámetro de tornillo dado, la capacidad para fundir, mezclar y homogeneizar a una velocidad de giro del tornillo determinada aumenta al aumentar la longitud del tornillo, y por tanto la relación L/D. Sin embargo tornillos excesivamente largo son difíciles de construir y alinear dentro del cilindro, de modo que no resultan operativos. La

relación L/D típica para la extrusión de polímeros termoplásticos varía generalmente entre 20:1 y 30:1.

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

**Configuración del tornillo:** es un aspecto de gran importancia. La elección definitiva del número y del diseño geométrico de las zonas del tornillo es un proceso complejo. Esta decisión depende no solo del diseño de la boquilla y de las velocidades de flujo esperadas, sino también de las características de fusión del polímero, de su comportamiento reológico y de la velocidad del tornillo. Un tornillo simple, de tres zonas, se define usualmente según el número de vueltas de hélice en las zonas de alimentación, compresión y dosificado. Un ejemplo de diferentes configuraciones de tornillo se muestra en la figura 4.12.



**Figura 4.12.** Ejemplo de tornillos para diferentes fines.

#### **4. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA EXTRUSORA**

En este apartado se describen los mecanismos por los que tienen lugar las seis funciones que puede realizar una extrusora; transporte de sólidos, fusión, transporte del fundido, mezclado, desgasificado y conformado.

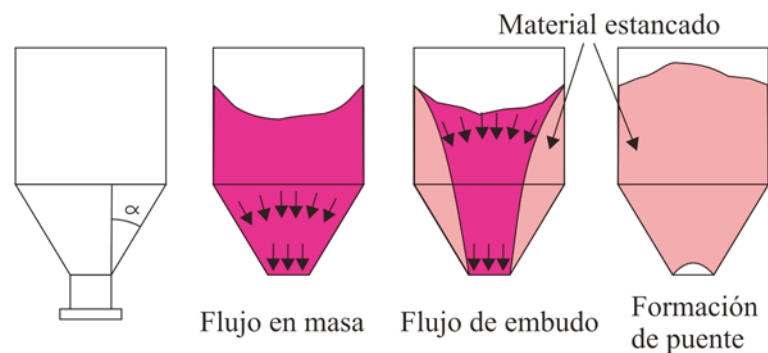
##### **4.1 TRANSPORTE DE SÓLIDOS (ZONA DE ALIMENTACIÓN)**

El material sólido que se alimenta a una extrusora, se transporta en dos regiones que estudiaremos separadamente: en la tolva de alimentación y en la propia extrusora.



#### 4.1.1. Transporte de sólidos en la tolva

El transporte de sólidos en la tolva es, en general, un flujo por gravedad de las partículas; el material se mueve hacia la parte inferior de la tolva por acción de su propio peso. Se puede dar un **flujo en masa** como se representa en la figura 4.13, en el que no hay regiones estancadas y todo el material se mueve hacia la salida, o bien **flujo tipo embudo** en el que el material más cercano a las paredes de la tolva queda estancado. Lógicamente el flujo en masa es preferido sobre el flujo tipo embudo. Algunos materiales que tienen un flujo muy deficiente en estado sólido pueden quedar atascados en la garganta de entrada a la extrusora, dando lugar a un problema denominado formación de “puente” o “arco”.



**Figura 4.13.** Flujo del material en una tolva de alimentación.

Tanto las características del material como el diseño de la tolva influyen sobre el transporte de sólidos en esta parte de la máquina. Es mejor una tolva con sección circular que una tolva con sección cuadrada o rectangular (figura 4.7), ya que la compresión a que está sometido el material será diferente en algunas zonas dependiendo de la forma de la tolva. Las tolvas de sección circular ejercen una compresión gradual sobre el material mientras que las de sección cuadrada ejercen una compresión poco uniforme, pudiendo provocar que el material se detenga. Además, pueden tomarse precauciones como añadir un sistema vibratorio que ayude a eliminar el puente formado o incorporar agitadores para evitar que el material se deposite y consolide (figura 4.8).

Las características del material que influyen en el transporte del sólido en la tolva, son:

- **Densidad aparente:** es la densidad del material incluyendo el aire que hay entre sus partículas. Lógicamente, la densidad aparente del material siempre será inferior a la densidad real. Si la densidad aparente del material es excesivamente baja (no superior al 20 o 30% de la densidad real), el material dará problemas de fluidez puesto que para obtener un determinado caudal se necesitará alimentar un gran volumen de material. Resulta más fácil manipular materiales con una densidad aparente que no sea demasiado baja (alrededor del 60% de la densidad real).

- **Compresibilidad:** es el aumento que se produce en la densidad aparente de un plástico al presionarlo. Interesan materiales con factor de compresibilidad bajo, es decir que sufran un cambio pequeño en su densidad aparente al aplicarles presión.

- **Coefficiente de fricción:** se puede distinguir entre el coeficiente de fricción interno, que es la fricción existente entre las propias partículas del polímero, y el coeficiente de fricción externo, que es la fricción existente entre las partículas del plástico y la superficie del cilindro con la que está en contacto el plástico. Para tener un flujo en la tolva adecuado, interesa que estos dos coeficientes sean bajos, para lo que en ocasiones es necesario el empleo de lubricantes.

- **Distribución del tamaño de partícula de la granza (DTP):** interesa que sea lo más uniforme posible, para evitar problemas de fluidez de la granza. Si el material presenta una DTP ancha, las partículas tenderán a empaquetarse, lo que dificultará el flujo de las mismas en la tolva.

En general el flujo de material por gravedad que la tolva puede proporcionar es superior al necesario para la extrusión salvo en los casos en los que se produzca puenteado.

#### ***4.1.2. Transporte de sólidos en el cilindro***

En cuanto al transporte de sólidos dentro de la extrusora, una vez que el material sólido cae al interior del canal de la extrusora, el mecanismo de

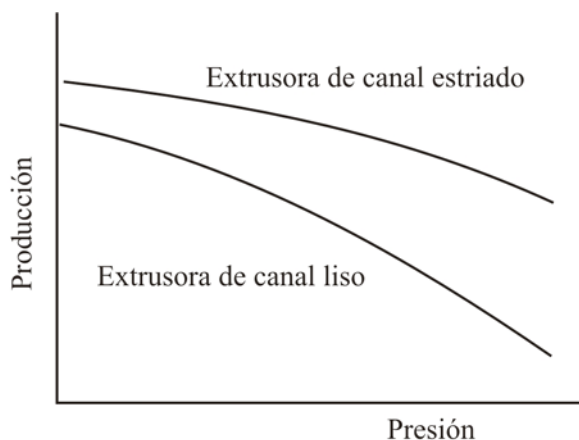
transporte deja de estar controlado por la gravedad y se transforma en un transporte inducido por arrastre. Este tipo de flujo tiene lugar debajo de la tolva a lo largo del tornillo en una distancia relativamente corta.

Una descripción cuantitativa del flujo del material sólido en la extrusora fue propuesta por Darnell y Mol en 1956 y la idea básica de su trabajo permanece aun hoy. Aquí se describirá de una forma cualitativa. Según estos autores hay dos fuerzas de fricción principales que actúan sobre la masa sólida: una en la superficie del cilindro y otra en la superficie del tornillo. La fuerza de fricción en la superficie del cilindro es la que genera el movimiento de la masa sólida hacia la salida de la extrusora, mientras que la fuerza de fricción en la superficie del tornillo es la fuerza retardante. El hecho de que la fuerza de fricción en la superficie del cilindro es la que genera el movimiento del sólido, que quizás es difícil de asumir intuitivamente, puede ser apreciado si se considera una situación extrema: Si la fuerza de fricción con la superficie del cilindro fuera cero y fuera alta con el tornillo, la masa sólida rotaría simplemente con el tornillo, y jamás se movería hacia adelante, de forma similar a como lo haría una tuerca sobre un tornillo que gira. Sin embargo si existe una fuerza de fricción suficientemente elevada con el cilindro y baja con el tornillo, en principio el material se moverá hacia adelante. De acuerdo con el modelo expuesto se puede mejorar el transporte de sólidos aumentando el coeficiente de fricción del material con el cilindro y disminuyéndolo con el tornillo.

Para aumentar el coeficiente de fricción con el cilindro podría disminuirse la temperatura del mismo o de la garganta de alimentación. Otra posibilidad consiste en utilizar cilindros con superficies rugosas, esto es, empleando cilindros estriados. Las ventajas de utilizar cilindros estriados en lugar de lisos son las siguientes:

- Para una misma caída de presión a lo largo de la máquina, el caudal obtenido con un cilindro estriado es mayor que el obtenido con uno liso. Esto se aprecia en la figura 4.14.

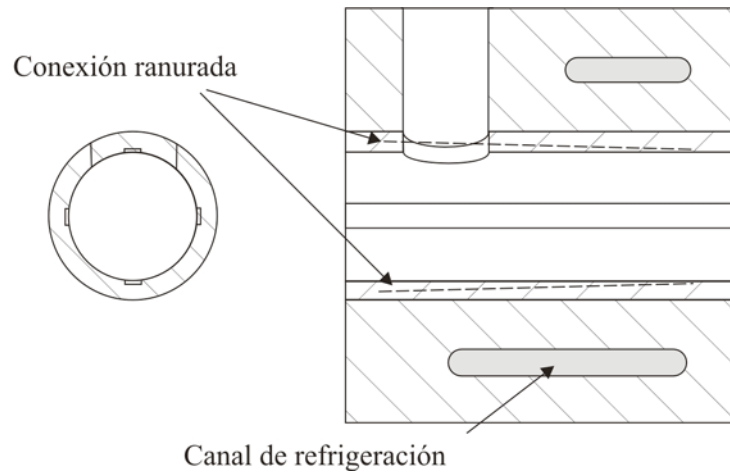
- Hay una mayor estabilidad en el caudal que proporciona el cilindro estriado, de modo que las oscilaciones de la presión a lo largo de la extrusora afectan más al caudal con el cilindro liso que con el estriado.



**Figura 4.14.** Representación del caudal de salida frente a la presión, para un cilindro liso y para uno estriado.

Los cilindros estriados permiten utilizar polímeros con pesos moleculares elevados y difíciles de transportar. Sin embargo, las fuerzas de cizalla que se generan en estos cilindros son mayores que las que se generan en los lisos, de modo que por una parte el consumo del motor será mayor, y por otra, se puede producir una fusión prematura del material, que al fundir se puede introducir en las estrías, obstruyéndolas y disminuyendo así la eficiencia del proceso. Además el material que queda atrapado en las estrías podría llegar a descomponerse. Los materiales empleados para la fabricación de estos cilindros deben ser muy resistentes y en consecuencia caros, pues deben estar diseñados para soportar las altas cizallas generadas.

Las estrías se pueden practicar directamente sobre el cilindro o sobre la garganta de alimentación, en aquellas extrusoras que dispongan de ésta. En cualquier caso se practican en la dirección axial y tienen una longitud de varios diámetros, como se puede observar en la figura 4.15.



**Figura 4.15.** Sección de una garganta de alimentación ranurada.

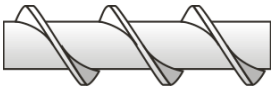
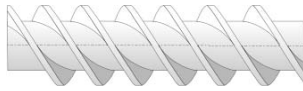
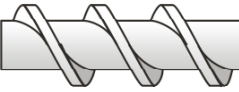



Otra forma de mejorar el transporte de sólidos inducido por arrastre es disminuir la fricción entre el tornillo y el material. Para conseguirlo se podría aumentar la temperatura del tornillo, si bien esto es poco frecuente pues la mayoría de los tornillos son macizos, como se comentó anteriormente. En ocasiones también se pueden utilizar tornillos con recubrimientos, generalmente de PTFE, con lo que además se consigue facilitar la limpieza de los mismos.

En cuanto al diseño del tornillo hay que tener en cuenta lo siguiente:

- El filete del tornillo debe ser simple, no doble. El filete doble produce una mayor fricción.
- El ángulo de los filetes ha de ser grande.
- El radio de los flancos del filete ha de ser lo más grandes posible.

En la tabla 4.1 se muestran dos tornillos, el de la izquierda es de diseño adecuado desde el punto de vista del flujo del material sólido, de acuerdo con lo que se acaba de comentar.

**Tabla 4.1.** Diseño del tornillo para reducir el coeficiente de fricción entre el material y el tornillo.

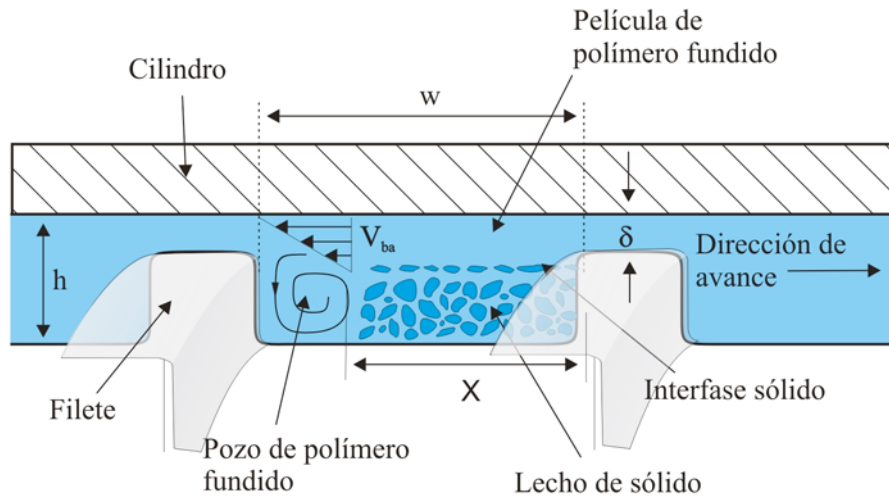
Características del tornillo	Diseño adecuado	Diseño defectuoso
Número de filetes	Sencillo 	Doble 
Ángulo del filete	Grande 	Pequeño 
Radio del flanco del filete	Grande 	Pequeño 

**4.2. FUSIÓN (ZONA DE TRANSICIÓN)**

La zona de transporte de sólidos finaliza cuando empieza a formarse una fina película de polímero fundido. La fusión se iniciará como consecuencia del calor conducido desde la superficie del cilindro y del generado por fricción a lo largo de las superficies del cilindro y del tornillo. En general se genera gran cantidad de calor por fricción, de modo que, en ocasiones, es incluso posible iniciar la fusión sin necesidad de aplicar calor externo.

En primer lugar aparecerá una fina capa de material fundido junto al cilindro, que irá creciendo hasta que su espesor se iguale con la tolerancia radial entre el cilindro y el filete del tornillo,  $\delta$ , mientras que el resto del material se encontrará formando un lecho sólido. Como consecuencia del movimiento del tornillo se creará un gradiente de velocidad en la película fundida situada entre la capa sólida y la superficie del cilindro. El polímero fundido en la película será barrido por el filete que avanza, separándose así

del cilindro. El polímero fundido se reunirá en una zona o pozo situado delante del filete que avanza en la parte posterior del canal. La figura 4.16 muestra un corte transversal de la zona de transición.

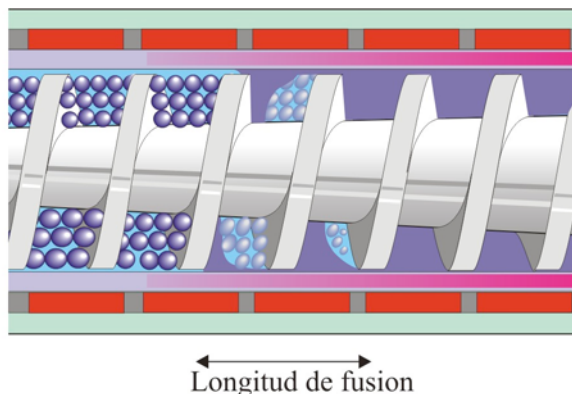


**Figura 4.16.** Corte transversal de la extrusora en la zona de transición.

A medida que se va acumulando más y más fundido en el pozo de polímero fundido, el tamaño del pozo aumenta, mientras que el ancho de la capa sólida irá disminuyendo. De esta forma se desarrolla una presión que empuja a la capa sólida y la sitúa en la parte anterior del canal. Por eso, a pesar de que casi toda la fusión ocurre en la superficie del cilindro, la altura de la capa sólida no disminuye, sino que disminuye su anchura, como se puede apreciar en la figura 4.17. En esta figura también se indica la **longitud de fusión** que es la longitud de tornillo desde que comienza la fusión hasta que ésta termina.

En una extrusora funcionando de forma adecuada la transmisión de calor está muy favorecida, debido a que continuamente tendremos una fina capa de material renovado en contacto con el cilindro. En general se puede despreciar la transmisión de calor entre el pozo fundido y la capa sólida. La existencia de la capa sólida explica también la eliminación del aire atrapado entre las partículas sólidas. A medida que la capa sólida es compactada y

comprimida por el pozo de fundido, el aire atrapado entre las partículas escapa hacia el exterior vía la tolva de alimentación.



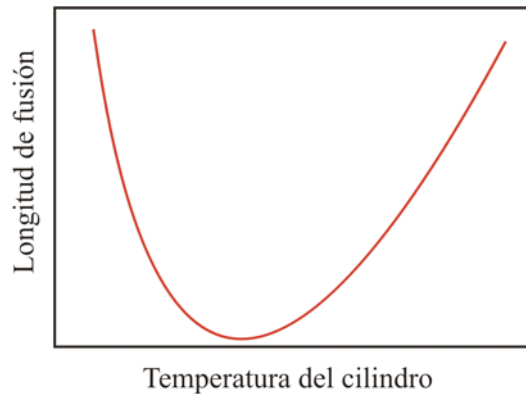
**Figura 4.17.** Ancho del pozo de fundido a lo largo de la zona de transición.

Como se ha visto el calor necesario puede ser suministrado bien por conducción desde la superficie caliente del cilindro, a través de la película fundida o bien por disipación viscosa (cizalla) debido a las fuertes cizallas a que está sometida la delgada película de fundido. La relación entre estas dos cantidades de calor depende de las condiciones de operación y del polímero utilizado. El flujo de calor por disipación viscosa está favorecido al aumentar la velocidad del tornillo. Sin embargo, en este caso la contribución de la transmisión de calor por conducción a la fusión se verá reducida puesto que aumentará el caudal, y por tanto disminuirá el tiempo de residencia del material en la extrusora.

Por otro lado, un aumento de la temperatura del cilindro implicará en principio un aumento del flujo de calor por conducción, y por tanto aumento de la velocidad de fusión, pero por otra parte al aumentar la temperatura disminuirá la viscosidad del material y, por tanto, la generación de calor por disipación viscosa, de modo que algunos polímeros cuya viscosidad es muy sensible a la temperatura podrían ver reducida la velocidad de fusión. Una situación general se muestra en la figura 4.18 donde se representa la longitud de fusión en función de la temperatura del cilindro para una velocidad del tornillo constante. De acuerdo con lo comentado la longitud de fusión

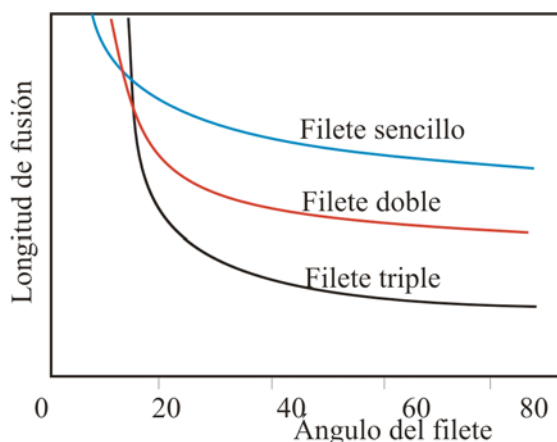


disminuye (por tanto aumenta la velocidad de fusión) al aumentar la temperatura del cilindro hasta un cierto punto en el que la longitud de fusión aumenta al disminuir la cantidad de calor generado por disipación viscosa.



**Figura 4.18.** Relación entre la longitud de fusión y la temperatura del cilindro para una velocidad del tornillo constante.

Además de las condiciones de operación, la configuración del tornillo afecta en gran medida a la velocidad de fusión y a la longitud de fusión. El ángulo del filete del tornillo puede tener un efecto considerable sobre la eficiencia de la fusión, como se muestra en la figura 4.19, donde se observa como la longitud de fusión disminuye al aumentar el ángulo del filete, especialmente para ángulos pequeños. La eficiencia sería máxima con un ángulo de  $90^\circ$ , sin embargo, en este caso no se produciría el avance del material a lo largo de la máquina. Por tanto hay que buscar ángulos que den una buena eficiencia para la fusión y un buen transporte del material. Normalmente se utilizan ángulos entre  $20^\circ$  y  $30^\circ$ . El empleo de tornillos con múltiples filetes también puede mejorar el proceso de fusión. Cuando el filete es múltiple la capa de fundido es más delgada que cuando el filete es simple. Sin embargo el transporte del material sólido empeora con los tornillos de múltiples filetes (como se vio en el apartado anterior sobre el transporte del sólido), por lo que estos tornillos sólo se emplean en el caso de que la velocidad de fusión sea el proceso controlante.



**Figura 4.19.** Efecto del ángulo de hélice y del número de filetes sobre la longitud de fusión.

Por otra parte, está comprobado que la holgura entre el filete del tornillo y el cilindro debe ser lo menor posible para que el proceso de fusión tenga lugar de forma adecuada. En cuanto a la profundidad del canal, como se ha visto, en la mayoría de los tornillos se produce una reducción gradual de su profundidad entre la zona de transporte de sólidos y la de dosificado del fundido, que viene fijada por la relación de compresión. En general la velocidad de fusión aumenta al disminuir la profundidad del canal, puesto que se produce una compresión del pozo de sólido hacia la capa de fundido, mejorando la transmisión de calor y aumentando la cizalla. Sin embargo, si la compresión tiene lugar muy rápidamente el pozo de sólido podría provocar un taponamiento de la extrusora.

#### 4.3. TRANSPORTE DEL FUNDIDO (ZONA DE DOSIFICADO)

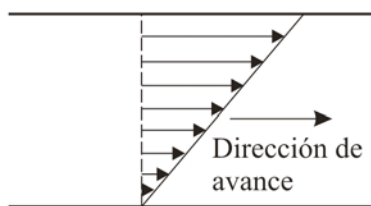
La zona de dosificado se inicia en el punto en que finaliza la fusión, es decir, en el punto en que todas las partículas de polímero han fundido. De hecho, la profundidad del canal es uniforme en la zona de dosificado, por lo que todo el lecho sólido debe haber desaparecido o en caso contrario el aire se eliminaría con mucha dificultad y podría quedar atrapado en el fundido. La zona de dosificado del fundido actúa como una simple bomba en la que el movimiento del material fundido hacia la salida de la extrusora se produce

como resultado del giro del tornillo y de la configuración helicoidal del mismo.

El estudio del movimiento de un material viscoso en el tornillo de una máquina de extrusión se simplifica considerando tres tipos distintos de flujo: el **flujo de arrastre o de fricción**,  $Q_D$ , que es debido a la fricción del material con el tornillo y con las paredes del cilindro, es el principal responsable del movimiento del material desde la tolva de alimentación hasta la boquilla; el **flujo de presión o de retroceso**,  $Q_P$ , opuesto al anterior y debido a la diferencia de presión entre la tolva y el cabezal de la máquina, presión esta última que es originada por la restricción que impone la boquilla o el plato rompedor. Finalmente, el **flujo de pérdida o de fugas**, que tiene lugar entre el cilindro y el filete del tornillo y es también opuesto al flujo de arrastre y originado por el gradiente de presión a lo largo del tornillo. La tolerancia radial de ajuste entre el tornillo y las paredes internas del cilindro es generalmente muy pequeña (del orden de 0,1 milímetros) y, por tanto, el flujo de pérdidas es mucho más pequeño que los dos mencionados anteriormente. El flujo total a lo largo del tornillo viene dado por la suma de los tres flujos anteriores:

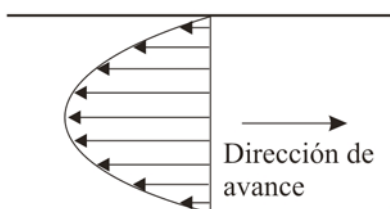
$$Q_{\text{total}} = Q_D + Q_P + Q_{\text{pérdida}}$$

Una representación esquemática de la distribución de velocidades para cada tipo de flujo viene dada por las figuras 4.20, 4.21 y 4.22. El flujo de arrastre tiene lugar debido a que el material fundido en el canal del tornillo se adhiere a las paredes internas del cilindro, que se mueven respecto al tornillo. Si solamente existiera el flujo de arrastre, el perfil de velocidades sería aproximadamente lineal (figura 4.20), y si la superficie en movimiento tuviera una velocidad  $V$ , la velocidad media de avance el material en el canal sería  $V/2$ .



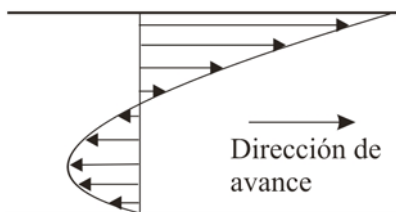
**Figura 4.20.** Perfil de velocidades originado por el flujo de arrastre.

El flujo de presión se debe, como ya se ha indicado, al gradiente de presión a lo largo del cilindro. La presión es mayor en el lado de la boquilla, y este gradiente de presión tiende a hacer que el material fluya hacia atrás a lo largo del canal del tornillo oponiéndose pues al flujo de arrastre y suponiendo un retroceso del material en el canal del tornillo. El perfil de velocidades debido a la existencia de un gradiente de presión es parabólico y se representa en la figura 4.21.



**Figura 4.21.** Perfil de velocidades debido al flujo de presión.

El flujo de pérdidas es mucho menor que los dos anteriores y no es preciso considerarlo. El flujo total a lo largo del canal del tornillo es el resultado del flujo de avance y del de presión y su perfil de velocidades puede determinarse sumando algebraicamente los dos. Se ha representado en la figura 4.22.

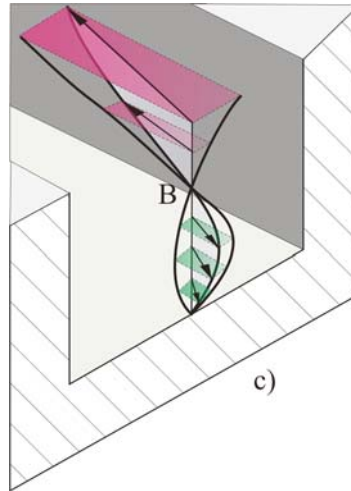


**Figura 4.22.** Perfil de velocidad del flujo total.

Para facilitar la visualización del movimiento del fluido dentro de la extrusora, supongamos que tenemos un canal desenrollado (tornillo) sobre el que se encuentra un plano (cilindro). El canal permanece quieto, mientras el plano se mueve sobre el canal con una velocidad tangencial  $V_b$ , cuyo vector no es paralelo a las paredes del canal, sino que se encuentra girado un ángulo  $\theta$ , que coincide con el ángulo de los filetes del tornillo. En consecuencia, en una extrusora trabajando en condiciones normales (esto es con una boquilla que provoca una caída de presión a lo largo de la extrusora) existirá un perfil de velocidades tal como el mostrado en la figura 4.22 tanto en la dirección axial del tornillo como en la transversal. Esto es, en ambas direcciones existirá flujo de arrastre y flujo de presión, éste último originado por la boquilla en el caso del flujo en la dirección axial del canal, Z, y por las paredes del filete en el caso del movimiento del material que se dirige hacia ellas, (dirección X). El flujo total será la suma del flujo en las direcciones X y Z.

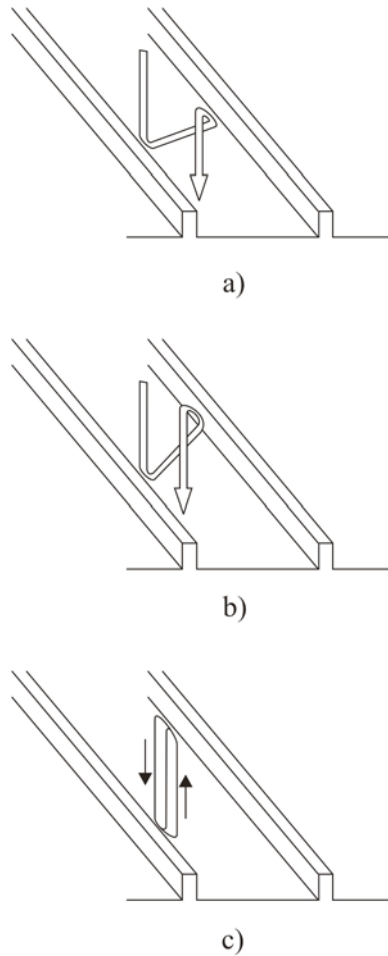
En la figura 4.23 se muestra la situación global que se presenta en el canal del tornillo. En esta figura se representa la dirección y el movimiento relativo del polímero a varias profundidades y en el centro del canal; en el esquema (a) la extrusora funciona a descarga abierta, es decir, el flujo no tiene ninguna restricción, pues no existe boquilla, válvulas, plato rompedor ni ningún otro elemento limitativo. En este caso el perfil de velocidades en la dirección Z será lineal, como el representado en la figura 4.20, mientras que el perfil en la dirección X será el representado en la figura 4.22. Los vectores componentes de la velocidad del polímero en el punto C, son CE en la dirección axial y CF en la dirección transversal, representando el vector resultante CD la velocidad del polímero en dicho punto C. Obsérvese que el material situado en la mitad superior (aproximadamente) del canal fluye hacia la derecha mientras que el material situado en el fondo del canal fluye hacia la izquierda. Excepto el pequeño flujo de material que escapa por encima del filete, todo el material avanza hacia la boquilla. En el esquema (b) de la figura 4.23, el flujo total de extrusión está limitado parcialmente por la presencia de una boquilla, que es la situación normal; en este caso el polímero que se encuentra en la parte superior del canal (punto C) se dirige hacia adelante y hacia la derecha, mientras que el que se encuentra en la parte inferior del





**Figura 4.23.** Movimiento global del polímero fundido en la sección de dosificación de la extrusora; a) descarga abierta, b) con una boquilla en condiciones normales, c) descarga cerrada.

La figura 4.24 muestra otra representación de lo que ocurre en las tres situaciones planteadas. Si para el caso normal (b), seguimos el movimiento de una porción de fluido que se encuentra cerca de la superficie del cilindro, éste avanzará a lo largo de esta superficie hasta que se encuentre con la pared del filete del tornillo. En este punto, el fluido girará hacia abajo, se deslizará por la pared del filete, y luego cruzará el canal del tornillo retrocediendo ligeramente, deslizándose por la base. Cuando el elemento llegue a la otra pared del filete del tornillo, girará hacia el cilindro, volviendo otra vez a realizar el mismo tipo de movimiento. Los casos a) y c), al igual que en la figura anterior, representan el movimiento del material en una extrusora trabajando a descarga abierta y descarga cerrada, respectivamente.

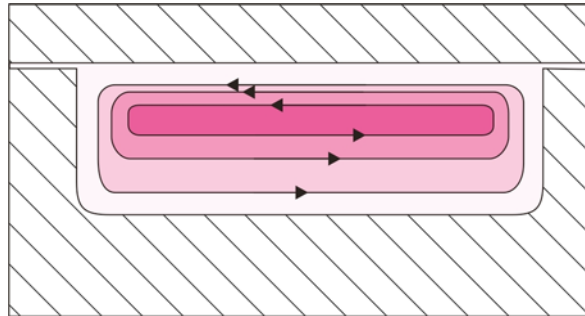


**Figura 4.24.** Movimiento del material dentro del canal de la extrusora trabajando; a) descarga abierta, b) con una boquilla y c) descarga cerrada.

De acuerdo con esto, en una extrusora funcionando en condiciones normales, una pequeña porción del material que se encuentra próximo al centro del canal no tiene componente de velocidad en la dirección transversal (en el punto D de la figura 4.23b), de modo que este material pasará rápidamente a lo largo de la extrusora, con un tiempo de residencia menor que el material que se encuentra próximo a las paredes del cilindro y del tornillo. El material que se encuentra, por ejemplo, cercano al punto E (figura 4.23b) sufrirá un movimiento de avance hacia la boquilla mucho mas lento. En la



figura 4.25 se observa un corte transversal del canal, donde la temperatura en las diferentes zonas del material se representa en diferentes colores.



**Figura 4.25.** Flujo de recirculación en el canal del tornillo.

La situación planteada provoca que la temperatura en diferentes zonas en un corte de la sección de una extrusora pueda variar sustancialmente. La medición de la temperatura en los canales del tornillo es complicada debido a la rotación del tornillo, si bien se puede predecir usando técnicas numéricas y las diferentes teorías de la extrusión. La temperatura más alta se encontrará en el centro del canal, donde el material está expuesto a mayores cizallas, mientras que en los alrededores se obtendrán temperaturas inferiores si el cilindro está enfriado, lo que suele ocurrir en la zona de dosificación. Las capas internas difícilmente llegan a alcanzar la superficie fría del cilindro y se encuentran aisladas por las capas externas. En consecuencia la diferencia de temperatura entre las diferentes capas puede alcanzar con facilidad los 60 °C. Si esta situación se mantiene hasta el final del tornillo, el fundido que sale por la boquilla no será homogéneo. Además, el grado de mezcla de las capas internas puede ser deficiente, al ser el tiempo de residencia menor que el del resto del material. Esto conlleva problemas no sólo en la boquilla, sino también distorsiones en el producto extruído. La forma más eficaz de evitarlo consiste en incorporar mezcladores en el diseño del tornillo. Además de homogeneizar la temperatura del material, los mezcladores también son importantes cuando se pretende mezclar diferentes tipos de plásticos o aditivos.

#### **4.4. MEZCLADO**

Para evitar problemas de falta de homogeneidad del material que llega a la boquilla se puede introducir una sección de mezclado. Esto es especialmente importante en las extrusoras grandes y en las que se emplean para fabricar láminas finas. El mezclado se conseguirá haciendo pasar al material por diferentes zonas que lo obliguen a reorientarse. Las secciones de mezclado son simplemente tramos del tornillo dentro de la zona de dosificado que tienen una configuración especial para este propósito.

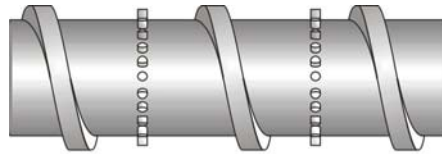
Las secciones de mezclado deben cumplir los siguientes requisitos:

- Provocar una caída de presión mínima de modo que la presencia de la zona de mezclado afecte lo menos posible al caudal de material extruído
- Evitar zonas muertas donde el material pudiera quedar estancado
- Barrer la superficie del cilindro completamente
- Ser fáciles de instalar, poner en marcha y limpiar
- Tener un precio razonable

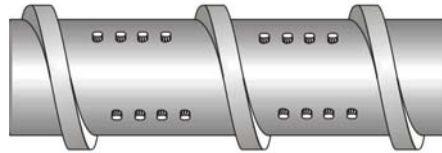
A continuación se muestran diferentes tipos de mezcladores.

##### ***4.4.1. Mezclador de agujas***

Consisten en una serie de “pins” o agujas que se encuentran sobre el tornillo, como se muestra en la figura 4.26. Estas agujas pueden tener numerosas formas y tamaños. Consiguen un nivel moderado de reorientación. Una contrapartida del empleo de estos sistemas es que suponen una restricción al flujo, y por tanto, reducen el caudal de salida de la extrusora, y además pueden crear volúmenes muertos donde se estanque el material. La principal ventaja es que son muy sencillos, económicos y fáciles de instalar.



Orientación perimetral

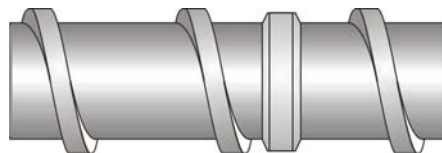


Orientación axial

**Figura 4.26.** Mezcladores de tipo aguja con orientación de las agujas perimetral y axial.

#### **4.4.2. Mezclador de anillo**

Consiste simplemente en un anillo situado sobre el tornillo que deja una sección de paso pequeña, como se ve en la figura 4.27. Todo el material debe fluir por este paso, con lo que es sometido a altas cizallas durante un periodo de tiempo corto. Estos mezcladores resultan efectivos y fáciles de construir, pero provocan una caída de presión relativamente alta y además no tienen capacidad de impulsar el material hacia adelante.

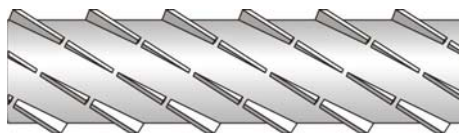


**Figura 4.27.** Mezclador de anillo.

#### **4.4.3. Mezclador con filetes desiguales**

Una sección de mezclado de este tipo es, por ejemplo, el mezclador “Saxton”, que aparece en la figura 4.28. En estos mezcladores la profundidad

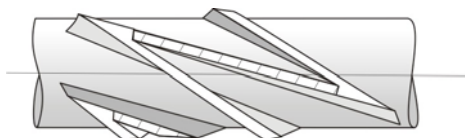
de los filetes es variable, con lo que se obliga a que el material se divida y reoriente continuamente, resultando en una buena capacidad de mezclado. Además la orientación de los filetes en este tipo de mezcladores ayuda al bombeo del material hacia adelante. De esta forma se obtiene buena capacidad de mezclado, pero sin detrimento de la capacidad de bombeo del tornillo.



**Figura 4.28.** Zona de mezclado con filetes desiguales tipo "Saxton".

#### **4.4.4. Mezcladores con filetes secundarios**

Estos mezcladores tienen unos filetes secundarios que actúan de barrera entre los filetes principales del tornillo. Los filetes secundarios tienen altura no uniforme, como se muestra en la figura 4.29 para un mezclador de tipo "Zorro". La altura no uniforme de los filetes obliga al material a pasar por una sección pequeña. Las caídas de presión no son tan grandes como en otros mezcladores, debido a que el ángulo de inclinación de los filetes secundarios favorece el bombeo del material.



**Figura 4.29.** Mezclador con filetes secundarios tipo "Zorro".

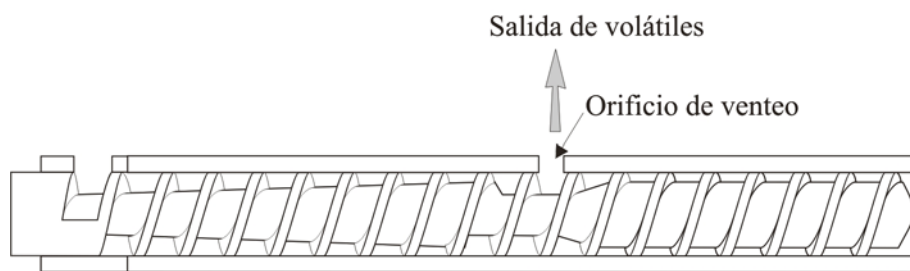
### **4.5. DESGASIFICADO**

El desgasificado es necesario sólo en los plásticos que retienen gran cantidad de componentes volátiles o en materiales muy higroscópicos, como es el caso de las poliamidas. También suele emplearse en las extrusoras que se emplean en líneas de mezclado. En los materiales que presentan humedades de equilibrio muy elevadas, es posible secarlos antes de introducirlos en la extrusora, si bien el proceso de secado es lento (puede durar entre 4 y 40

horas), por lo que se suelen desgasificar directamente en la extrusora, de forma mucho más rápida.

El desgasificado se produce a través de un orificio de venteo practicado sobre el cilindro. Las extrusoras con zona de desgasificado deben tener un diseño especial del tornillo, que asegure que la presión en esta zona coincida con la presión atmosférica, de forma que el material no tienda a escapar por el orificio de venteo. En estas extrusoras los gránulos de sólido atraviesan las zonas de alimentación y transición donde son aglomerados, transportados y fundidos. A continuación pasan a una zona de descompresión en la que los productos volátiles son evacuados a través del orificio de venteo. El material fundido y desgasificado se vuelve a comprimir en una nueva zona de transición, como se muestra en la figura 4.30.

Estos tornillos deben tener un diseño adecuado, de modo que la zona de eliminación de volátiles esté siempre parcialmente llena y el material no se salga por el orificio de venteo. Además, la capacidad de bombeo de la segunda sección del tornillo (tras el orificio de venteo) debe ser superior a la de la primera.



**Figura 4.30.** Extrusora con sección de desgasificado.

#### 4.6. CONFORMADO

El material toma la forma de la boquilla conforme sale por ésta. Es primordial que el material salga a velocidad uniforme, sin embargo, a veces esto no es fácil de conseguir, especialmente cuando se extruyen perfiles con secciones irregulares. Como ya hemos mencionado se producen cambios de tamaño y forma conforme el material sale por la boquilla. De hecho, las

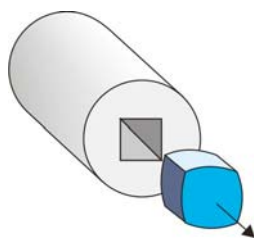
boquillas se fabrican con una forma y tamaño que compensen los cambios que se producen en el material, de modo que al final se obtenga un producto de las dimensiones requeridas. Para conseguirlo es necesario conocer muy bien cómo se comporta el material con el que se está trabajando. Hay tres factores principalmente que provocan cambios en el tamaño y forma del material: tensionado, relajación y enfriamiento.

#### **4.6.1. Tensionado**

Conforme el material sale de la extrusora es recogido por diferentes sistemas, que generalmente consisten en rodillos, que mantiene el material tenso. Esto hace que en la mayoría de los casos se reduzca un poco el tamaño del material, a veces de forma considerable. Además de los cambios de tamaño, los productos que no sean circulares pueden sufrir cambios de forma debido al estirado.

#### **4.6.2. Relajación**

El material dentro de la extrusora está sometido a grandes deformaciones y tensiones (esfuerzos normales) por lo que, debido a su naturaleza viscoelástica, se relaja conforme sale por la boquilla. La relajación provoca el hinchamiento del material, tanto más rápido cuanto mayor sea la temperatura, por lo que el cambio más pronunciado tiene lugar cuando el material sale de la extrusora, pero generalmente continúa durante las horas siguientes al conformado, y a veces dura incluso días. En la figura 4.31 se muestra el hinchamiento que sufriría un material extruído con sección cuadrada.

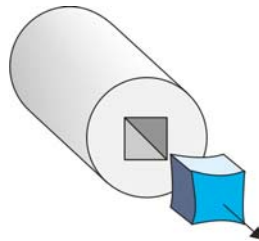


**Figura 4.31.** Hinchamiento debido a la relajación de un material de sección cuadrada.

Con una forma cuadrada de boquilla, la dilatación ocurre más en el centro de las caras que en las esquinas, esto es resultado de que los esfuerzos normales que se producen dentro del material serán mayores en la zona central. Si el producto extruído sufre tensiones no uniformes, la relajación puede conducir a una torcedura o combadura del mismo, especialmente en piezas que contengan partes gruesas y delgadas.

#### 4.6.3. Enfriamiento

El enfriamiento del material fundido produce su contracción, reduciéndose el tamaño y aumentando su densidad. Los plásticos semicristalinos se contraen más que los amorfos, ya que las regiones cristalinas tienen densidades mayores que las amorfas, y en cualquier caso, el método, velocidad y homogeneidad del enfriamiento condicionan la microestructura del material. La contracción que produce el enfriamiento normalmente no es uniforme, puesto que en partes gruesas puede haber una diferencia muy grande entre la velocidad a la que se enfrían las zonas externas y las más internas del material (la cristalinidad del interior de estas piezas será mayor), pudiendo aparecer zonas hundidas (rechupadas) al contraerse el interior de las piezas. En la figura 4.32 se muestra la contracción que sufriría una pieza de sección cuadrada debido a la diferente velocidad de enfriamiento entre las distintas partes.



**Figura 4.32.** Contracción debida al enfriamiento de un material de sección cuadrada.

## 5. MODELADO DE LA ZONA DE DOSIFICACIÓN

### 5.1 OBTENCIÓN DE LAS ECUACIONES

#### 5.1.1. Ecuaciones de velocidad

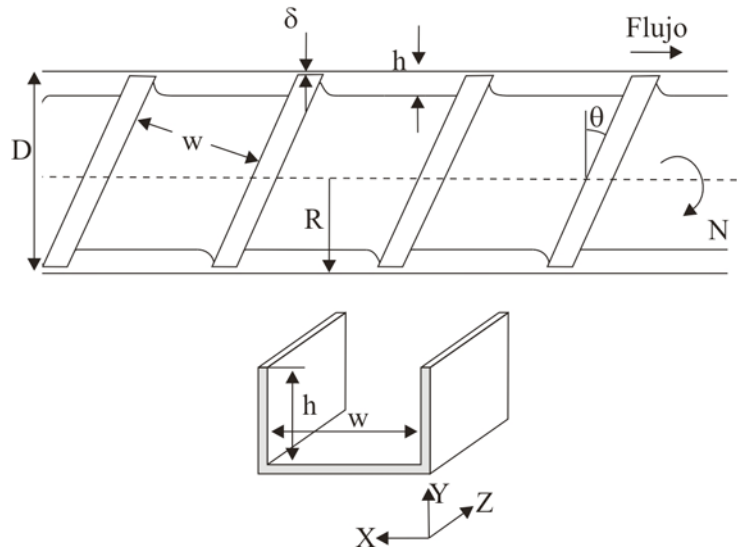
La zona de dosificado es la que ha sido analizada en mayor profundidad desde un punto de vista teórico. Los cálculos se simplifican mucho en esta zona respecto a las otras debido a que todo el material se encuentra en estado fundido y se puede considerar que es homogéneo. Con ciertas aproximaciones,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

Para hacer el estudio del movimiento del material en el canal del tornillo se realizan algunas suposiciones:

- El canal del tornillo se considera de sección rectangular
- El canal del tornillo se encuentra “desenrollado” y se escoge el sistema de coordenadas de la figura 4.33
- El cilindro es una superficie plana que se mueve sobre el canal del tornillo, arrastrando al material
- Se considera que el fundido tiene un comportamiento newtoniano
- Se considera que el fundido se comporta como un fluido incompresible
- Se supone que el proceso es continuo y que se ha alcanzado régimen estacionario

La notación que se va a emplear a lo largo del desarrollo del modelo teórico es la que se muestra en la figura 4.33.





**Figura 4.33.** Sistema de coordenada y nomenclatura.

donde:

$R$  = radio del tornillo

$D$  = diámetro del tornillo

$\theta$  = ángulo del filete del tornillo con la vertical

$w$  = ancho del canal

$h$  = profundidad del canal

$\delta$  = holgura entre el cilindro y el filete

$N$  = número de revoluciones a las que gira el tornillo

Hay dos tipos de flujo a lo largo del eje  $Z$  que han sido comentados anteriormente: el movimiento del material es debido en parte al flujo de fricción o flujo de arrastre provocado por el movimiento de la superficie del cilindro (siempre en dirección  $+Z$ , la dirección positiva  $+Z$  es considerada hacia la boquilla). Si hay un impedimento al flujo (una boquilla, una válvula, etc.) se crea un gradiente de presión en dirección  $Z$ . Esto causa un flujo en dirección negativa  $-Z$ , es el flujo de presión o flujo de retroceso.

El análisis del caudal en esta sección se basa en considerar el flujo newtoniano e isoterma de un fluido incompresible en un canal rectangular de

ancho  $w$  y altura  $h$ . Se desprecia  $\delta$  (holgura entre el tornillo y el cilindro) porque  $\delta \ll h$  y se supone que el flujo es uniforme. Realizando un balance de cantidad de movimiento sobre un sistema de este tipo se obtiene la siguiente expresión (ec. Navier-Stokes).

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

donde:

$dP/dZ$  = gradiente de presión a lo largo del canal.

$v$  = velocidad del fluido en el canal.

$\eta$  = viscosidad del fluido

La ecuación anterior se puede simplificar si se considera que  $w \gg h$ , de modo que  $\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \ll \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$ , lo que supone despreciar el efecto que puedan tener las paredes del canal en el flujo. Con esto, la ecuación del flujo se simplifica a:

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

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

La integración de la ecuación (2) proporciona:

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

Integrando nuevamente:

$$v = \frac{y^2}{2\eta} \left( \frac{dP}{dZ} \right) + C_1 y + C_2 \quad (3)$$

Teniendo en cuenta las condiciones límite: cuando  $y = 0$ , es decir, junto al tornillo  $v = 0$ . Sustituyendo esta condición en la ecuación (3), se obtiene  $C_2 = 0$ . Por otro lado, junto a la pared del cilindro donde  $y = h$ , la velocidad será  $v = V$ , velocidad lineal periférica del cilindro, con lo que resulta:

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

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

Y sustituyendo el valor de  $C_1$  y  $C_2$  en la expresión (3):

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

$$\boxed{v = \frac{V \cdot y}{h} + \frac{y(y-h)}{2\eta} \left( \frac{dP}{dZ} \right)} \quad (4)$$

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

### 5.1.2. Cálculo del caudal

El caudal de material extruído podrá calcularse como el producto de la velocidad del material por la sección del tornillo. Se puede partir de la ecuación (4), integrando el producto de la velocidad por el ancho del canal entre los límites  $y = 0$  e  $y = h$ .

$$Q = \int_0^h w \cdot v \cdot dy = \int_0^h \frac{wV_y}{h} dy + \int_0^h \frac{wy(y-h)}{2\eta} \left( \frac{dP}{dZ} \right) dy \quad (5)$$

de donde se obtiene:

$$Q = \frac{wVh}{2} - \frac{wh^3}{12\eta} \left( \frac{dP}{dZ} \right) \quad (6)$$

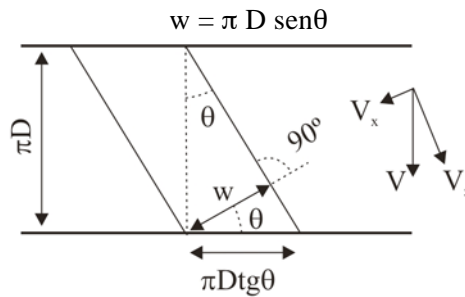
Igual que en el caso de la velocidad, el caudal también presenta dos términos. El primero representa al flujo de arrastre, y el segundo al flujo de presión:

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

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

Interesa ahora escribir la ecuación (6), que da el flujo de material a través del tornillo, en función de las dimensiones del tornillo, empleando la notación de la figura 4.33.

Si imaginamos el tornillo cortado a lo largo de una generatriz y desenrollado, despreciando el ancho del filete, tal como se representa en la figura 4.34 podemos escribir la siguiente ecuación:



**Figura 4.34.** Tornillo cortado a lo largo de su eje y desenrollado.

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

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

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

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

Sustituyendo los valores así hallados de  $w$  y  $V$  en el primer término de la ecuación (6) tenemos:

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

El segundo término de la ecuación (6) puede expresarse en función de las dimensiones del tornillo, teniendo en cuenta que si se desenrolla completamente el tornillo se puede escribir:

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

Donde  $L$  es la longitud del cilindro y  $Z$  la longitud total del canal del tornillo una vez desenrollado, a lo largo del cual existe un el gradiente de presión  $\left( \frac{dP}{dZ} \right)$ . De este modo se puede escribir el segundo término de la ecuación (6) como:

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

Si se considera que la caída de presión a lo largo del tornillo es constante y tomando incrementos  $\frac{dP}{dL} = \text{cte} = \frac{\Delta P}{L}$ , la ecuación (6) puede escribirse como sigue:

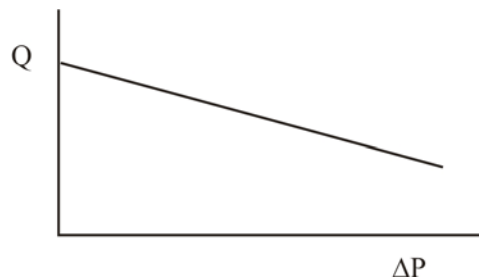
$$Q = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot (\sin\theta \cdot \cos\theta) \cdot h \cdot N}{2} - \frac{h^3 \cdot \pi \cdot D \cdot \sin^2\theta \cdot \Delta P}{12 \cdot \eta \cdot L} \quad (7)$$

que se puede escribir en la forma más general para un determinado tornillo:

$$Q = AN - B \frac{\Delta P}{\eta} \quad (8)$$

donde A y B son constantes del tornillo.

La ecuación (7) es una recta en una representación de Q frente a  $\Delta P$  y es conocida como ecuación característica del tornillo o recta operativa (figura 4.35), y tiene gran utilidad en la predicción del caudal de salida de una extrusora.



**Figura 4.35.** Recta operativa de un tornillo.

Cuando se trabaja en un proceso de extrusión interesa que el caudal de material extruído sea lo mayor posible, pero además, que la pendiente de la

recta operativa sea lo menor posible, de modo que pequeñas fluctuaciones en la presión impuesta por la boquilla no afecten demasiado al caudal de material extruído.

## 5.2. INFLUENCIA DE VARIABLES

El caudal extruído por un sistema tornillo-boquilla depende de diversas variables que se pueden agrupar del siguiente modo:

- Dimensiones del tornillo;  $D, L, h, \theta$
- Tipo de polímero;  $\eta$
- Condiciones del proceso;  $N, T$
- Restricción impuesta por la boquilla;  $\Delta P$

Veamos, de acuerdo con el modelo propuesto, el efecto que causa cada uno de estos parámetros.

### 5.2.1. Efecto de las dimensiones del tornillo

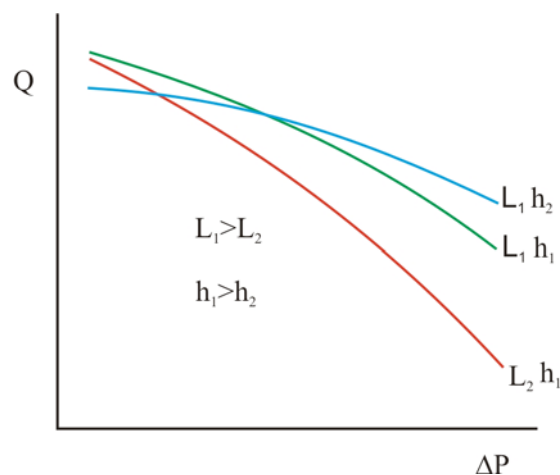
La longitud del tornillo no afecta al flujo de arrastre pero sí que afecta al flujo de presión. Si la zona de alimentación y transición lo permiten, un aumento en la longitud del tornillo conlleva una disminución del flujo de presión. El aumento de la longitud del tornillo se refleja en la representación de  $Q$  frente a  $\Delta P$  como una disminución en la pendiente de la línea operativas del tornillo, tal y como viene reflejado por la ecuación (7).

Otra variable que tiene gran importancia es la profundidad del canal,  $h$ . La profundidad del canal afecta tanto al flujo de arrastre como al de presión, de modo que un aumento de la profundidad del canal supone un aumento de ambos tipos de flujo. Sin embargo, el efecto de la profundidad del canal es mucho más pronunciado sobre el segundo que sobre el primero, puesto que este parámetro aparece elevado a la tercera potencia en el segundo término de la ecuación (7). Por tanto, con una pequeña disminución en  $h$  se produce una importante disminución de la pendiente en la línea característica del tornillo.

La figura 4.36 muestra el efecto de la profundidad del canal y de la longitud del tornillo sobre las rectas operativas de una extrusora.

La situación normal en un extrusor es que  $\Delta P > 0$ , ya que la presión a lo largo de la extrusora va aumentando entre la garganta de alimentación (presión atmosférica) y el estrechamiento que suponen el plato rompedor y la boquilla, de modo que según la ecuación (7) el caudal de retroceso se opone al de arrastre. El efecto de  $h$  y  $L$  que hemos comentado corresponde a esta situación normal. En los casos en los que  $\Delta P < 0$ , el caudal de retroceso va en la misma dirección que el de arrastre pudiendo interesar otros valores de  $h$  y  $L$ .

En general cuanto mayor sea el diámetro del tornillo mayor será el caudal de material que la máquina es capaz de extruir. El efecto de otras variables como el ángulo de los filetes,  $\theta$ , no es tan claro. Nos limitaremos a apuntar que en la práctica el ángulo usado generalmente varía entre 25 y 30°, aunque en algunos casos se utilizan valores tan bajos como 10°.



**Figura 4.36.** Efecto de la profundidad del canal y de la longitud del tornillo sobre las rectas operativas del tornillo.



### 5.2.2. Efecto de la viscosidad del polímero

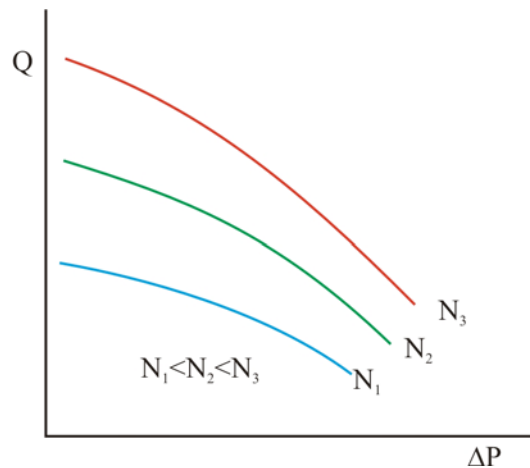
La ecuación (7) sugiere que un incremento en la viscosidad supone una disminución de la pendiente de las rectas. Sin embargo, una mayor viscosidad del polímero supone también un mayor consumo energético, por lo que en ocasiones resultante interesante utilizar materiales de baja viscosidad. La disminución en la viscosidad puede lograrse de varias formas:

- Aumentando la temperatura de la boquilla o el perfil de temperatura a lo largo del cilindro
- Utilizando un material de menor peso molecular
- Usando aditivos tales como lubricantes internos o plastificantes

Cualquiera de estas soluciones puede presentar inconvenientes, como un aumento de los precios, incremento del tiempo de enfriamiento, variación de las propiedades mecánicas del producto, entre otras.

### 5.2.3. Efecto de las condiciones de operación

Al aumentar el número de vueltas,  $N$ , aumenta el flujo de arrastre, pero de acuerdo con la ecuación (7) el flujo de retroceso no se ve afectado, por lo que se obtiene un mayor caudal. Así, para un mismo tornillo, al aumentar el número de vueltas se debería obtener un haz de rectas operativas paralelas con mayor ordenada en el origen, lo que implica que a mayor  $N$ , mayor caudal, independientemente de  $\Delta P$ . Sin embargo la experiencia demuestra que al aumentar el número de vueltas en realidad no se obtienen rectas paralelas, pues el polímero fundido es pseudoplástico, como vimos en temas anteriores. Así, al aumentar el número de vueltas, aumenta la cizalla sobre el material, por lo que disminuye su viscosidad, y en consecuencia aumenta el término  $Q_p$ , aumentando también la pendiente de las líneas operativas del tornillo, como se aprecia en la figura 4.37.



**Figura 4.37.** Líneas operativas del tornillo a diferente número de vueltas.

#### 5.2.4 Efecto de la restricción de la boquilla

El comportamiento global de la extrusora está determinado por la interacción entre el comportamiento de la boquilla y el del tornillo. La forma de la boquilla no puede ser cualquiera, pues lógicamente depende de las dimensiones del perfil que se desea obtener.

El flujo del material en la boquilla es debido exclusivamente a la diferencia de presión que se genera entre el punto por donde el material entra a la boquilla y la salida, donde la presión es la atmosférica. En la boquilla existe sólo flujo de presión en la dirección de salida del material, con un perfil de velocidades parabólico como el mostrado en la figura 4.21. Si la diferencia de presión entre los extremos de la boquilla fuese nula, no habría caudal de extrusión. En general la cantidad de material que fluye a través de una boquilla en la que hay una diferencia de presión  $\Delta P$  se calcula como:

$$Q = k \frac{\Delta P}{\eta} \quad (9)$$

donde  $k$  es una constante que depende del orificio de salida de la boquilla. Cuanto mayor sea el orificio de salida de la boquilla, mayor será el caudal

extruído para una  $\Delta P$  dada. A continuación se listan algunos valores de  $k$  para determinadas geometrías del orificio:

- Boquilla circular sencilla, de radio  $R$  y longitud  $L$

$$k = \frac{\pi R^4}{8L}$$

de modo que (9) se transforma en la ecuación de Hagen-Poiseuille.

- Boquilla plana, de profundidad  $h$ , anchura  $w$  y longitud  $L$  (obtención de láminas planas)

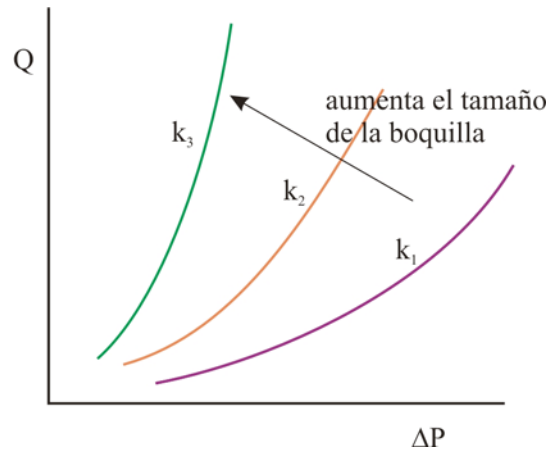
$$k = \frac{wh^3}{12L}$$

Con lo que la expresión (9) se convierte en el segundo término de la expresión (6).

- Boquilla anular, de diámetro interno  $R_o$ , diámetro externo  $R_i$  y longitud  $L$  (obtención de tubos)

$$k = \frac{\pi(R_o + R_i)(R_o - R_i)^3}{12L}$$

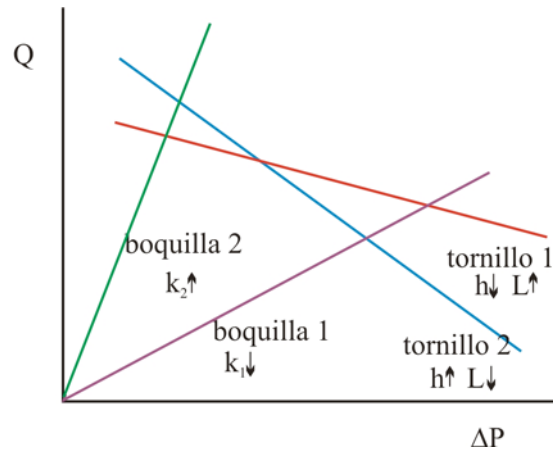
La representación de la ecuación (9) en un diagrama  $Q$  frente a  $\Delta P$  da una haz de rectas que pasan por el origen para distintos valores de  $k$ , es decir, para distintos tamaños y geometrías de la boquilla. Las rectas son conocidas como rectas operativas o líneas características de la boquilla. Esta representación se ilustra en la figura 4.38. Cada una de estas líneas representa el flujo de material a través de una boquilla particular.



**Figura 4.38.** Líneas características de la boquilla.

Al aumentar el tamaño del orificio, aumenta el valor de  $k$ , y por tanto la pendiente de la recta operativa de la boquilla. Para un  $\Delta P$  dado, a mayores dimensiones de la boquilla mayor caudal de material extruído. En la figura 4.38 las líneas experimentales de las boquillas no son totalmente rectas, sino que presentan una ligera curvatura y no pasan exactamente por el origen de coordenadas. Esta desviación es característica de los fluidos no newtonianos, como es el caso de los termoplásticos fundidos.

Si se superponen las operativas de la boquilla con las del tornillo se obtienen los puntos donde trabaja una extrusora determinada, que se conocen como puntos operativos, como se muestra en la figura 4.39.



**Figura 4.39.** Rectas operativas de un conjunto de boquillas y tornillos.

La recta característica del tornillo 1 en la figura 4.39 corresponde a un tornillo con una relación  $L/h$  mayor que en el caso de usar el tornillo 2, o lo que es igual, el tornillo 1 tiene un canal menos profundo y una mayor longitud que el tornillo 2 en la zona de dosificado, de modo que proporciona un caudal más estable y menos dependiente de  $\Delta P$ . Ambas rectas vienen referidas a igual número de revoluciones del tornillo. Los puntos operativos de un proceso determinado se corresponden en el diagrama anterior con la intersección de la recta operativa del tornillo y de la boquilla. Cuando se utiliza una boquilla de abertura grande, como el caso de  $k_2$ , el tornillo 2, de canal más profundo y más corto, presenta un punto de operación más alto, por lo que es capaz de extruir más caudal que el tornillo 1. Si tenemos una boquilla pequeña, como es el caso de  $k_1$ , es el tornillo 1, poco profundo y largo, el que consigue proporcionar una mayor presión en la boquilla y mayor cantidad de material extruído. Esto quiere decir que el tornillo 2 da menor rendimiento en material extruído cuando se usan boquillas pequeñas, pero dará mayor rendimiento en caso de usar boquillas suficientemente grandes. Como vemos, la elección del juego boquilla/tornillo para trabajar con un determinado material es muy importante. Diagramas del tipo de la figura 4.39 permiten predecir el tipo de tornillo más adecuado para usar con una boquilla determinada. Muchas veces el procesador se encuentra con una situación de compromiso en la que se necesita un tornillo que trabaje razonablemente bien con diferentes boquillas con un amplio margen de tamaños: en este caso, lo

mejor es adoptar un tornillo con relación L/h elevada, puesto que la pendiente de la línea característica del tornillo es menor.

En los puntos operativos se cumple que el caudal que pasa por el tornillo es el mismo que el caudal que pasa por la boquilla, por lo que igualando las ecuaciones (8) y (9) se obtenemos:

$$Q_{\text{tornillo}} = Q_{\text{boquilla}} \longrightarrow AN - B \frac{\Delta P}{\eta} = k \frac{\Delta P}{\eta}$$

de donde:

$$\frac{\Delta P}{\eta} = \frac{AN}{k + B} \quad (10)$$

A partir de la ecuación (10) se puede obtener las dimensiones del tornillo que proporcionan el máximo valor de A, es decir, el máximo rendimiento de la máquina de extrusión en lo que respecta a máximo caudal de material extruído para unas determinadas condiciones de trabajo (N) y un determinado material ( $\eta$ ).

## 6. LÍNEAS DE EXTRUSIÓN

Para fabricar un producto extruído, además de una extrusora se necesitan una serie de equipos auxiliares que en algunos casos son comunes a todas las líneas de extrusión y en otros son característicos de un producto concreto. En general todas las líneas constan de unidades de refrigeración, calibrado, tensionado y recogida y cortado.

Cuando el material fundido sale de la extrusora debe enfriarse inmediatamente para que conserve la forma y adquiera la rigidez necesaria. Para ello es necesario un **sistema de enfriamiento**. Sea cual sea el sistema escogido, el enfriamiento debe ser lo más uniforme posible a lo largo de la sección de la pieza, y en ocasiones también gradual, de modo que no existan gradientes de temperatura importantes entre puntos cercanos del material. En el caso de productos con forma anular y de láminas, el enfriamiento se suele

realizar en un tanque o artesa por la que circula agua, en ocasiones a diferente temperatura a lo largo del recorrido del material para lograr un enfriamiento gradual. En otros casos, como en la producción de películas sopladas, la refrigeración se consigue por medio de chorros de aire que circulan a pequeña velocidad para evitar posibles vibraciones de la película. En el caso de planchas, películas y recubrimientos es frecuente que la refrigeración se realice empleando rodillos metálicos fríos, por el interior de los cuales circula un fluido refrigerante. Estos rodillos además pueden realizar la función de imprimir el acabado superficial final a la pieza (pulido, mate, con dibujo) y de actuar de equipo de recogida.

Cuando la tolerancia de las dimensiones de las piezas es pequeña debe existir un **sistema de calibrado** que determine el espesor en el caso de piezas planas, o bien el diámetro interno y externo en el caso de secciones anulares, etc. Generalmente estas mediciones se realizan mediante equipos de ultrasonidos o láser. El sistema de calibrado, además, puede actuar sobre el motor de la máquina para modificar el caudal, o sobre los sistemas de enfriamiento (interno y externo en el caso de piezas anulares) o el de tensionado, de modo que se pueda compensar instantáneamente cualquier desviación en los estándares fijados para una pieza.

El **equipo de tensionado y recogida** determina la velocidad lineal a la que el material debe ser extruído. Hasta cierto punto el espesor o la forma del producto extruído depende de la relación entre el caudal de material extruído y la velocidad de recogida. El estiramiento o tensionado provocado por el equipo de recogida sirve en ocasiones para mejorar determinadas propiedades mecánicas del producto en la dirección del estirado (fibras). Por lo general, los sistemas de recogida son rodillos, bandas sin fin, cabrestantes, etc. Los rodillos de recogida se suelen construir de caucho o cualquier otro elastómero, estando a veces su superficie adaptada a la forma del material que se extruye. En otras ocasiones se emplean bandas de traccionado que proporcionan mayor superficie de agarre evitando que el extrudado resbale.

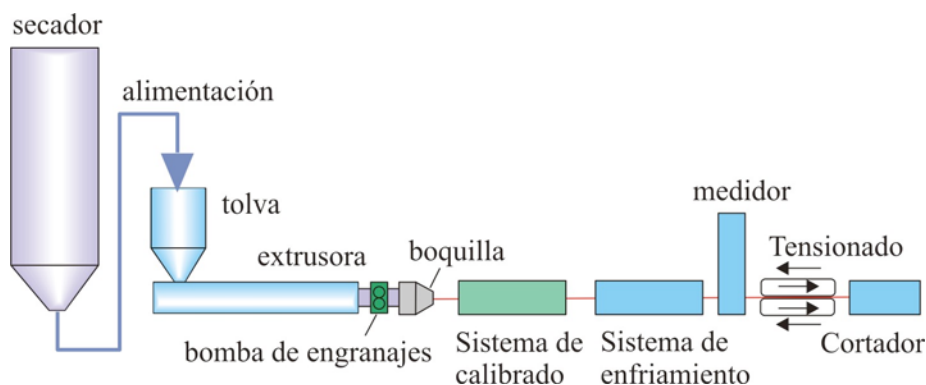
El **equipo de cortado** en longitudes consiste en cuchillas estacionarias si la velocidad de extrusión es suficientemente baja o el material es flexible, o

en cuchillas transportables, o en el caso de materiales suficientemente rígidos, de tipo guillotina. Es cada vez más frecuente el cortado por chorros de aire.

A continuación se describen las principales líneas de extrusión.

### 6.1. LÍNEAS DE EXTRUSIÓN DE TUBOS, TUBERÍAS Y PERFILES

En la figura 4.40 se pueden observar los principales componentes de una línea de extrusión de tubos (diámetro inferior a 10 mm) y tuberías (diámetro mayor). Estas líneas consisten en una extrusora, una boquilla anular, un sistema de calibrado y uno de enfriamiento, una zona de tensionado y un cortador. La bomba de engranajes antes de la boquilla puede estar o no dependiendo de la precisión de la extrusión, al igual que el secador que alimenta a la tolva. Por lo general, el sistema de calibrado se encuentra inmediatamente después de la boquilla y puede ser de calibrado del diámetro externo o interno. En el sistema de calibrado externo se aplica aire a presión que se introduce por el interior de la boquilla (figura 4.10) o vacío desde el exterior para forzar a que el material tome la forma de un tubo externo. En el sistema de calibrado interno la boquilla tiene un mandril que se prolonga fuera de la máquina fijando el diámetro interno deseado. El diámetro de la pared se controla normalmente con un láser calibrador.



**Figura 4.40.** Línea de extrusión de tubos.

Para la extrusión de tubos y tuberías se emplean básicamente PVC y poliolefinas como HDPE, PP y LDPE, generalmente para la obtención de



conducciones para agua y alcantarillado, así como para gases y líquidos a presión. Estos materiales ofrecen unas excelentes características en largos periodos de tiempo, con poco desgaste y con un precio relativamente bajo. PB, XLPE y CPVC son utilizados para aplicaciones a presión con elevadas temperaturas, como calentadores domésticos.

La velocidad de producción está limitada por lo general por la velocidad a la que el material puede ser enfriado, que básicamente depende del diámetro y del espesor de pared de la pieza. Por ejemplo, para tubos de diámetro de 2.5 mm y 0.4 mm de espesor de pared la velocidad de extrusión puede ser de  $4 \text{ ms}^{-1}$ , mientras que para tuberías de 1 m de diámetro externo y 60 mm de espesor de pared una velocidad de producción típica podría ser de  $3 \text{ mh}^{-1}$ .

Muchas líneas de extrusión se utilizan para la producción de perfiles. Las líneas de perfiles tienen muchas formas y tamaños, pero en general son muy similares a las líneas para tubos y tuberías, cambiando lógicamente la forma de la boquilla y la posibilidad de emplear aire interno a presión para controlar el tamaño.

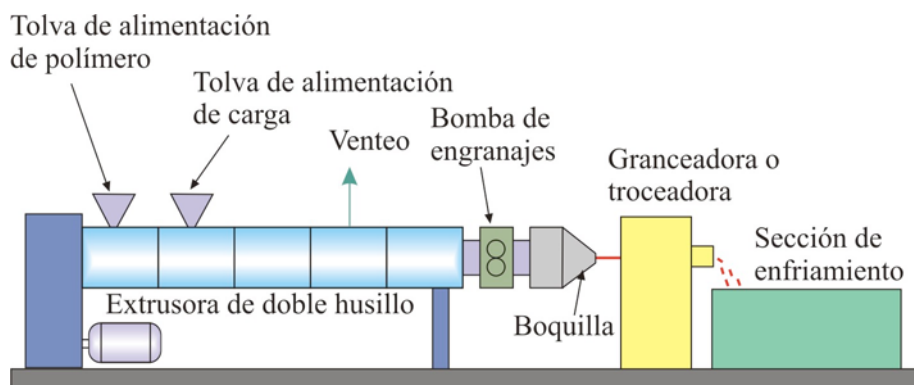
En las líneas de extrusión de perfiles por lo general se procesan PVC para canalizaciones, irrigación, guías para cortinas, cubiertas protectoras, etc, y PVC con modificadores de impacto para perfiles de ventanas y puertas. PC y PMMA se emplean para aplicaciones transparentes en edificación, construcción y alumbrado. El PC se prefiere cuando la duración y la dureza son importantes. Para aplicaciones como empaquetados y precintados flexibles se emplea PVC plastificado.

## **6.2. LÍNEAS DE MEZCLADO**

La mayoría de los plásticos necesitan una etapa previa de mezclado antes del procesado. En ocasiones se requiere sólo de un mezclado extensivo, donde los componentes de la formulación se mezclan superficialmente, y se realiza en mezcladoras rápidas, y en otras es necesario un mezclado intensivo de los diferentes componentes de una formulación, y se suele llevar a cabo en

extrusoras. En algunos casos son necesarios ambos, el mezclado extensivo previo al intensivo.

En las líneas de mezclado es frecuente el empleo de extrusoras de doble husillo. La configuración de la línea está determinada, entre otras cosas, por el tipo de aditivos a combinar en la extrusión. Estas líneas suelen tener a la salida de la extrusora troceadoras o granceadoras que permiten producir la granza formulada, como muestra la figura 4.41. Cuando se ha de mezclar con el polímero aditivos o rellenos abrasivos, el polímero se suele añadir en la primera tolva de alimentación y el relleno se añade cuando el plástico ha fundido, con lo que se reduce el desgaste de la extrusora causado por el relleno. Con grandes cantidades de relleno, a menudo el fundido tiene gran cantidad de aire por lo que la extrusora debe tener una zona de venteo, como se aprecia en la figura 4.41.



**Figura 4.41.** Línea típica de mezclado.

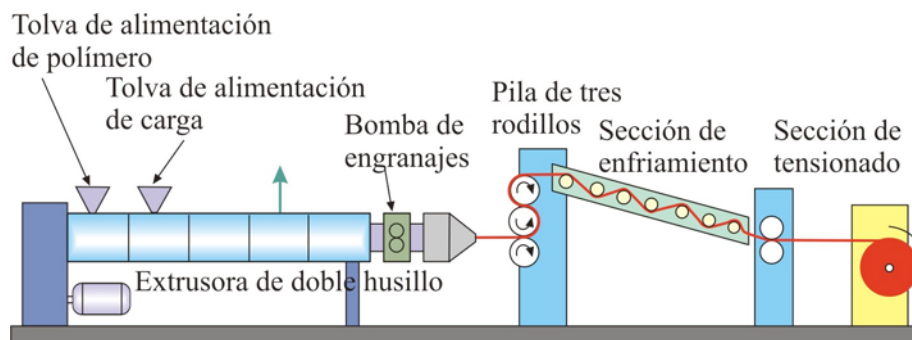
### 6.3. LÍNEAS DE PELÍCULAS Y LÁMINAS

#### 6.3.1. Proceso con pila de rodillos

La diferencia entre las películas y las láminas es su grosor, considerándose láminas si tienen un grosor superior a 2 mm y películas si éste es inferior. A pesar de que suele hacerse diferenciación, las líneas para películas y láminas son muy similares.

El proceso de pila de rodillos que se muestra en la figura 4.42 se emplea para la fabricación de láminas que pueden llegar a tener hasta 30 m de ancho. En el caso de láminas tan anchas el control de la temperatura en la boquilla debe ser muy preciso, y por lo general la temperatura se mantiene más alta en los extremos que en el centro de la lámina para evitar que se deforme. Los principales componentes de una línea de este tipo son: la extrusora, la pila de rodillos, la sección de enfriamiento, generalmente formada por una serie de rodillos, la sección de tensionado y el recogedor (figura 4.42). La pila de rodillos se usa para ejercer presión sobre la lámina, corrigiendo posibles variaciones de espesor, y para determinar la textura de la misma. Si se requiere una superficie lisa, se usan rodillos pulidos y si se necesitan texturas se utilizan rodillos con el dibujo adecuado. La textura del rodillo es el negativo de la textura requerida en la hoja. Es posible producir una hoja con una textura por una cara y lisa por la otra.

La figura 4.42 muestra una lámina de plástico recorriendo el rodillo central y realizando una trayectoria en forma de S alrededor del rodillo central y dirigiéndose luego hacia arriba. La pila de rodillos en otras ocasiones se dispone de forma que el recorrido es hacia abajo.



**Figura 4.42.** Proceso con pila de rodillos para la fabricación de láminas.

Por el interior de los rodillos normalmente se hace circular un fluido que controla la temperatura del proceso en esta zona. También es posible controlar la temperatura de cada rodillo por separado según interese. La sección de enfriamiento consiste en un conjunto de rodillos puestos en serie donde la lámina pasa por debajo y por encima alternativamente, haciéndose

circular aire forzado o incluso agua pulverizada por el exterior. Al final de la sección de enfriamiento se encuentran los rodillos de tensionado, que son rodillos de caucho que estiran la lámina desde la pila de rodillos para mantener una cierta tensión. Después de los rodillos de tensionado, la hoja se lleva al recogedor, o en caso de láminas rígidas se cortan en la longitud deseada y se apilan.

### **6.3.2. *Proceso con sistema de rodillos fríos***

Las películas (con espesor inferior a 2 mm) se producen con frecuencia en líneas de rodillos fríos. Los principales componentes de estas líneas son la extrusora, la boquilla, la unidad de tratamiento superficial y el recogedor, además de un amplio sistema de rodillos. En este caso el esquema del proceso es muy similar al mostrado en la figura 4.42, aunque el sistema de rodillos puede llegar a ser mucho más complejo. Otra diferencia es que la película es expulsada hacia abajo sobre los rodillos fríos. El contacto inicial entre la película y los rodillos fríos se establece mediante el uso de cuchillas de aire, las cuales producen una corriente de aire a gran velocidad a través del ancho del rodillo enfriado, empujando la película contra la superficie del rodillo. A continuación la película se dirige a una unidad de calibrado donde se determina su espesor. Tras la unidad de calibrado, la película puede pasar, si así lo requiere por una unidad de tratamiento superficial. Habitualmente, esto se realiza para mejorar la adhesión, por ejemplo, para una impresión posterior u operación de laminado. Después la película se envía a la unidad de recogida. Del mismo modo que con la extrusión de láminas, puede utilizarse distintos tipos de recogedores, según el producto que se desee obtener.

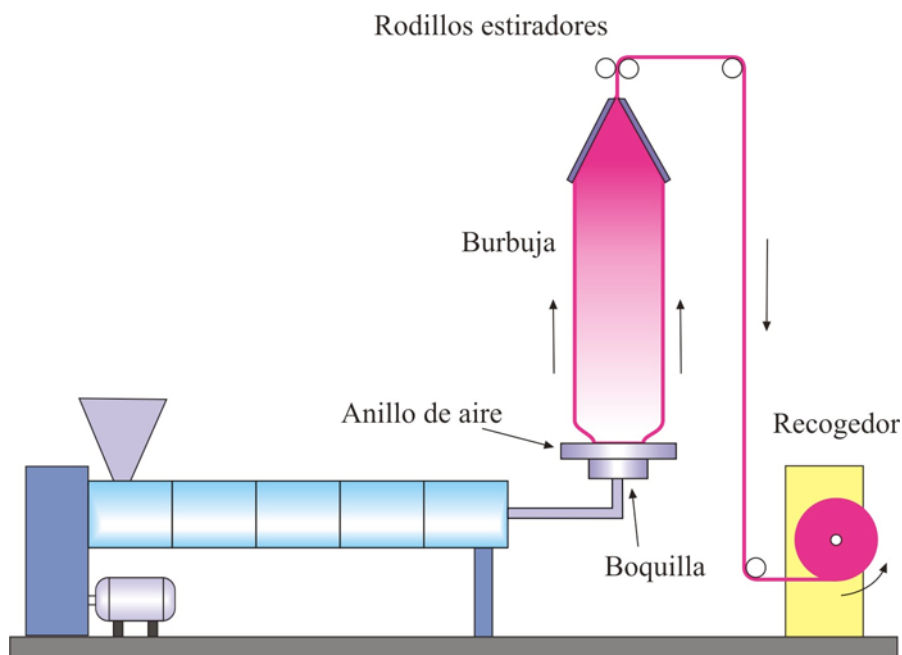
Mediante este proceso se pueden obtener productos que son prácticamente transparentes, aun en el caso de emplear materiales cristalinos, gracias al rápido enfriamiento que se produce en los rodillos conforme el material sale de la máquina. El proceso de rodillos fríos se emplea para la fabricación de películas de plásticos de PVC que se usan extensamente en la industria de la construcción. También se emplea para unir espumas de PS, HIPS y ABS con otros plásticos amorfos como PVC, PC, PMMA, PET y más

recientemente con otras combinaciones de plásticos en multicapa que se usan en termoconformado.

### **6.3.3. Líneas de películas sopladas**

Este proceso es el más común para la obtención de películas, y generalmente se emplea para fabricar bolsas de plástico a partir de HDPE y LDPE, y en ocasiones también de PVC, PP, PA, entre otros. En estas líneas la extrusora está equipada con una boquilla anular, dirigida habitualmente hacia arriba, como se muestra en la figura 4.43. Por el interior de la boquilla se inyecta aire que queda confinado en el interior del material que sale por la boquilla y que es contenido, como si de una gran burbuja se tratara, por un par de rodillos situados en la parte superior. La boquilla dispone de unos orificios que permiten la circulación de aire por el exterior para enfriar el material. El cociente entre el diámetro de la burbuja y el diámetro de la boquilla se llama proporción de explosión y suele estar en el intervalo de 2.0 a 2.5.

En algunos casos el material se expande hasta tres veces su diámetro original, y a la vez es estirado por los rodillos que se encuentran en la parte superior, de modo que se orienta biaxialmente. El material sale de la boquilla en estado fundido, pero conforme asciende se enfría, gracias a la corriente de aire que circula por el exterior de la burbuja, de modo que solidifica, “congelando” la orientación en las dos direcciones, axial y longitudinal. El punto de solidificación se suele apreciar fácilmente debido a la pérdida de transparencia del material al pasar del estado amorfo al cristalino o semicristalino. A este proceso se le conoce como “estabilización de la burbuja”. La orientación biaxial confiere muy buenas propiedades mecánicas si se comparan con las obtenidas en el proceso de rodillos fríos donde sólo existe orientación en una dirección.



**Figura 4.43.** Línea de extrusión de película soplada.

Si se mira detenidamente el proceso resulta extraño, en principio, que mientras que el material permanece en estado fundido la burbuja no se rompa (se trata de un material fundido, fluyendo en una capa muy delgada, y sobre el que se aplican grandes esfuerzos). La respuesta está en el tipo de esfuerzos al que el fundido es sometido. Hasta ahora hemos hablado de esfuerzos en cizalla, ante los cuales la mayoría de los plásticos se comportan reduciendo su viscosidad (psuedoplásticos). En este caso los esfuerzos que actúan sobre el material son perpendiculares (de tracción) al material. Ante un esfuerzo de este tipo los polímeros desarrollan una viscosidad que suele ser 3 veces superior a su valor cuando el esfuerzo es aplicado tangencialmente y que se conoce como viscosidad extensional. La viscosidad extensional además se mantiene constante para la mayoría de los polímeros al aumentar el esfuerzo de tracción aplicado. A este comportamiento se le conoce como Troutoniano, y sería el equivalente al comportamiento Newtoniano en el caso de esfuerzos en cizalla. En algunos casos como ocurre con el polietileno, que generalmente se emplea en estos procesos, la viscosidad aumenta al aumentar el esfuerzo de tracción aplicado, con lo que si en alguna zona la capa de material es más

fina, el esfuerzo (fuerza/sección) será mayor, por lo que la viscosidad del material en esa zona aumentará, contribuyendo a la estabilización de la burbuja.

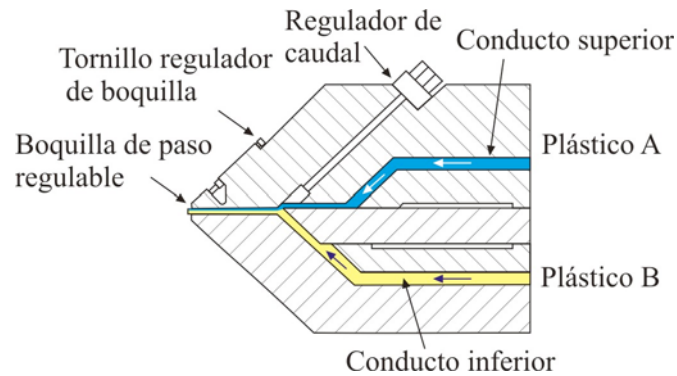
#### **6.3.4. Coextrusión**

Los requerimientos de muchos productos, particularmente en aplicaciones para envases, son tales que no se puede utilizar un único plástico, si no que tienen que ser combinados dos o más materiales. Esto ocurre cuando el producto obtenido debe presentar buenas propiedades barrera (permeación a gases), resistencia química, una determinada apariencia, etc. Existe un grupo de técnicas de combinación de diferentes materiales; las más frecuentes son coextrusión, recubrimiento y laminado. La coextrusión consiste en combinar dos o más plásticos haciéndolos pasar por una boquilla de extrusión. Cada material se procesa en una extrusora diferente, compartiendo todas las extrusoras la misma boquilla.

Hay dos sistemas de boquillas diferentes, el sistema de alimentación en bloque y el sistema de multiconducto. En el sistema de alimentación en bloque los diferentes plásticos se combinan en un módulo de alimentación en bloque, y después se introducen en una boquilla simple de extrusión (con una única entrada y salida). La ventaja del sistema de la alimentación en bloque es que es simple y barato. El principal inconveniente es que las propiedades de flujo de los diferentes plásticos deben ser bastante parecidas para evitar la distorsión de la interfase. En el sistema multiconducto cada plástico tiene su propia entrada y conductos en la boquilla, de forma que las diferentes corrientes de fluido fundido se combinan justo antes de la salida de la boquilla, con lo que la distorsión en la interfase será menor. La ventaja del sistema multiconducto es que se puede combinar plásticos con diferentes propiedades de flujo. Las desventajas son que el diseño de la boquilla es más complejo y más caro que en el sistema anterior.

La figura 4.44 muestra una boquilla para coextrusión. Esta boquilla tiene dos entradas, dos conductos, y una salida simple (boquilla

multiconducto). Estas boquillas llevan a una serie de dispositivos que permiten regular el flujo de cada material.



**Figura 4.44.** Ejemplo de una boquilla de multiconducto.

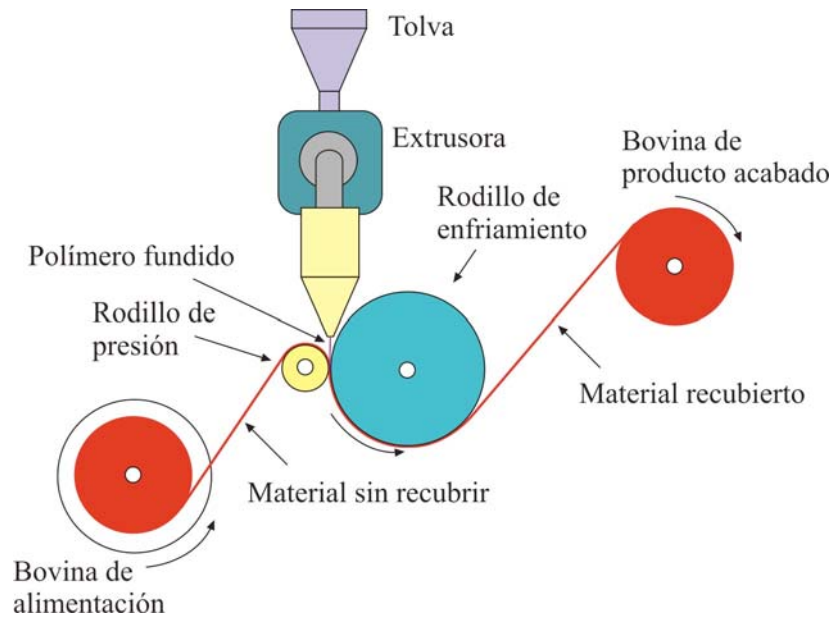
Si la coextrusión se compara con el laminado se consigue una muy buena adhesión de los materiales, al unirse cuando se encuentran fundidos, y además se evita que pueda quedar aire atrapado entre las láminas.

#### **6.3.5. Recubrimientos**

En este tipo de extrusión, una capa fundida de plástico se combina con otro sustrato sólido. El sustrato puede ser papel, cartón, lámina de aluminio, película de plástico o tela; o puede ser también un producto multicapa. La figura 4.45 muestra un esquema de este sistema.

Este tipo de procesos se emplea para recubrimiento de madera, aluminio, acero, papel, cartón y los plásticos más habituales empleados son PVC plastificado y PE.

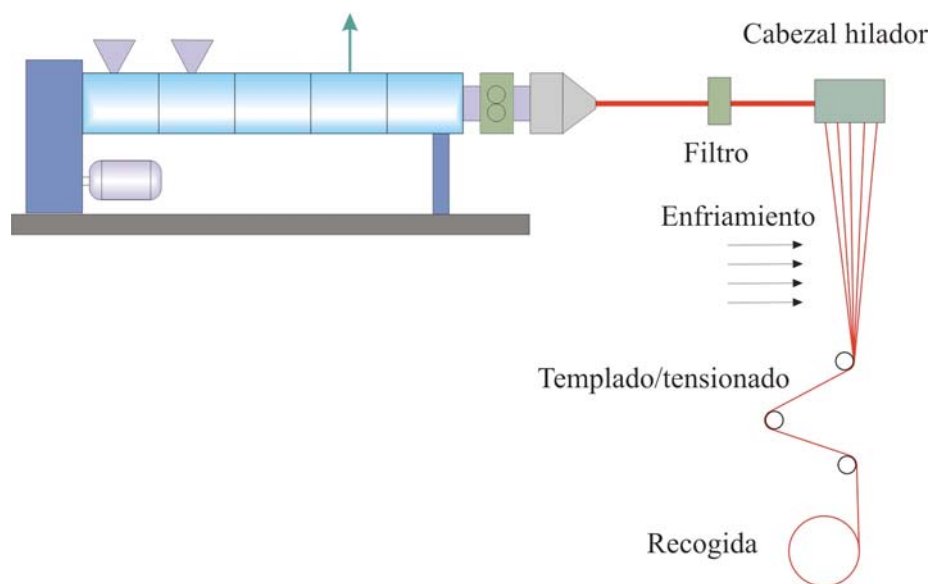




**Figura 4.45.** Esquema de un proceso de extrusión de recubrimientos.

#### 6.4. LÍNEAS PARA LA PRODUCCIÓN DE FIBRAS Y FILAMENTOS

Las fibras y filamentos se fabrican por lo general de PA, PP y poliésteres, que se emplean para la producción de ropa y tejidos, raquetas de tenis, hilos de pescar, fibras para refuerzo de otros materiales, etc. Las líneas para obtener las fibras y filamentos, constan de una extrusora que alimenta a un distribuidor que obliga al material a pasar a través de una serie de boquillas con finos agujeros (cabezal hilador en la figura 4.46). El sistema precisa de una bomba dentada para asegurar un buen control del caudal. Conforme los hilos de material fundido salen por la boquilla quedan pendiendo hacia abajo, pasan por una cámara donde la temperatura del aire está controlada para enfriar el material y son recogidos por rodillos, generalmente a velocidades muy elevadas, entre 4000 y 6000 m/min), lo que produce una elevada orientación en el material. En ocasiones es necesaria una etapa de templado del material, que mejorará las propiedades mecánicas del mismo.



**Figura 4.46.** Línea de extrusión de filamentos.

## **BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA**

*C. Rauwendal, "Understanding Extrusion", Hanser Publishers, Munich, 1998.*

*Ramón Anguita, "Extrusión de Plásticos" H. Blume Ediciones, Madrid, 1977.*

*Arthur N. Wilkinson and Anthony J. Ryan, "Polymer Processing and Structure Development", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1998.*

*D. H. Morton-Jones, "Polymer Processing", Chapman & Hall, Londres, 1991.*

*Dominick Rosato, "Plastics Processing Data Handbook, 2nd ed., Chapman & Hall, London, 1997.*

*James L. White "Twin Screw Extrusion" Technology and Principles", Hanser, Munich, 1991*

*R.J. Crawford, Plastics Engineering, 3rd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 1998.*

*F. Hensen, "Plastics Extrusion Technology", 2nd ed. Hanser, Munich, 1997*

*Tim A. Osswald, "Polymer Processing Fundamentals", Hanser Publishers, Munich, 1998.*