

I N T E C



## **Notas**

# **PROCESAMIENTO DE POLIMEROS**

**Mario G. Chiovetta**

**Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química**

**INTEC**

**U.N.L. - CONICET**

**Güemes 3450**

**3000 Santa Fe, Argentina**

**2013**

## INDICE

|        |   |    |
|--------|---|----|
|        | Título  | 1  |
|        | INDICE  | 2  |
| I      | INTRODUCCION  | 3  |
| I.1    | Definición: Procesamiento de polímeros                      | 5  |
| I.2    | Clasificación de las operaciones de conversión de polímeros | 7  |
| I.3    | Fuerzas y deformaciones                                     | 7  |
| II     | PANORAMA GENERAL DE LOS PROCESOS                            | 10 |
| II.1   | EXTRUSION   | 10 |
| II.1.1 | Extrusoras de un solo tornillo                              | 13 |
| II.1.2 | Extrusoras de tornillo doble                                | 15 |
| II.1.3 | Flujo a través de la extrusora                              | 17 |
| II.1.4 | Soplado de películas  | 18 |
| II.1.5 | Extrusión de películas planas                               | 20 |
| II.1.6 | Otras extrusiones   | 21 |
|        | Tubos y caños   | 21 |
|        | Alambres y cables recubiertos                               | 21 |
|        | Perfiles  | 22 |
|        | Fibras  | 23 |
| II.2   | CALANDRADO  | 25 |
| II.3   | MOLDEO DE INYECCION   | 28 |
| II.4   | MOLDEO POR SOPLADO  | 35 |
| II.5   | MOLDEO POR COMPRESION                                       | 38 |
| II.6   | TERMOFORMADO  | 39 |
| II.7   | MOLDEO POR ROTACION   | 42 |

APENDICE

## I INTRODUCCIÓN

Las presentes notas corresponden a la Sección **Procesamiento de Polímeros** del curso sobre materiales poliméricos de la carrera de Ingeniería de Materiales de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Litoral. El énfasis en estas notas está puesto en la interpretación de los fenómenos físicos y en algunos casos químicos, que acompañan el procesamiento de los polímeros, con el necesario complemento de una cuantificación de los procesos con la intención ingenieril de modelarlos integralmente. En todos los casos, se dará particular importancia a las aplicaciones comerciales de los procedimientos y sistemas a analizar.

Haciendo algo de historia, los seres humanos han empleado materiales poliméricos naturales, tales como madera, cuero o lana, desde su aparición sobre la superficie de la tierra. Desde este comienzo, una de las preocupaciones fue la transformación desde la manera en que estos materiales aparecían (y aparecen) en su forma natural hasta la forma en que eran (y son) más útiles al ser humano. Esta transformación representa el origen del concepto de lo que implica el procesamiento de polímeros.

El rápido crecimiento de la industria de polímeros comenzó muy poco tiempo antes del inicio de la Segunda Guerra Mundial, con el desarrollo de polímeros:

de Acrílico (PA, PMMA),  
Poliestireno (PS),  
Poliámidas (Nylon) y  
Poliuretanos (PU),

con la subsiguiente introducción de:

Polietileno (PE),  
Polipropileno (PP), y  
Polietilentereftalato (PP)

en las décadas de 1940 y 1950.

Mientras que en total alrededor de 1 (un) millón de toneladas de polímeros fueron producidas en 1945, ya para 1981 la producción volumétrica de estos materiales superaba la del acero, y la diferencia solamente ha ido aumentando desde entonces.

Desde el inicio de su empleo, los materiales poliméricos sintéticos raramente han sido usados tal como se obtienen del proceso de manufactura.

En gran parte de los casos son formulados en composiciones con otros materiales - típicamente por mezclado mecánico o por mezcla en el estado fundido- para producir “pellets” (gránulos), o polvos, o “flakes” (copos). A su vez, todos estos son en general procesados para **adquirir la forma** (conformados) a través de otras operaciones. Estos compuestos son genéricamente denominados *plásticos*, derivado del giro griego que significa deformable, adaptable.

A título de ejemplo, en la Figura 1 se incluye un conjunto de datos recientes de la comercialización, solamente de los termoplásticos, producidos en los E.E.U.U. de América, en el cual puede observarse la importancia de los materiales por la cuantía de sus consumos:



Figura 1

En la Tabla 1 se indican los valores promedio de consumo por habitante en todo el mundo:

**CONSUMOS ANUALES PER CAPITA  
 TERMOPLASTICOS, 2006**

| País      | Kg/año-habitante |
|-----------|------------------|
| USA       | > 80             |
| Japón     | > 65             |
| Alemania  | 54               |
| España    | 36               |
| Argentina | 29               |
| Brasil    | 24               |

Tabla 1

Los polímeros sintéticos pueden ser clasificados en dos grandes categorías: **termoplásticos** (con mucho, los de mayor producción), los cuales pueden ser fundidos, solidificados y vueltos a fundir repetidamente si esto es necesario, y **termosets** que son endurecidos vía entrecruzamiento de sus cadenas (formación de redes tridimensionales permanentes) y que NO pueden ser ablandados para reprocesarlos. Entre los termoplásticos se encuentran el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS), el policloruro de vinilo (PVC), el policarbonato (PC), el polimetilmetacrilato (PMMA), el polietilentereftalato (PET) y las poliamidas (PA). Típicos termosets son la bakelita, los polímeros de epoxi y los poliuretanos.

Desde el punto de vista comercial, los termoplásticos son clasificados de acuerdo a su performance en “*commodities*” (genéricamente de baja performance, tales como el PE, el PP, el PS y el PVC), “*engineering*” (con aplicaciones especiales, tales como el PC, las PA y el PET) o “*advanced*” (de alta performance, como el polifenileno-sulfuro [PPS], o el polietil-eter-eter-cetona [PEEK]).

Actualmente, aproximadamente el 86% del volumen total de termoplásticos producidos corresponde a *commodities*, el 12% a *engineering* y solamente el 2% a *advanced*. Si bien es cierto que estos últimos poseen mayor precio unitario, aún así la abrumadora mayoría en la elaboración de *commodities* las sitúa en primer plano en cuanto a su importancia relativa.

En este punto, es adecuado resaltar que estos volúmenes muy importantes de materiales poliméricos deben pasar por distintas etapas para transformarse en productos finales que son los realmente empleados en la sociedad. De esas etapas se ocupa el procesamiento.

### **I.1 Definición: Procesamiento de polímeros**

*Es una rama especial de la ingeniería que se ocupa de las operaciones realizadas sobre los materiales o sistemas poliméricos para incrementar su utilidad.*

Estas operaciones producen uno o más de los siguientes efectos:

- \* *Flujo*
- \* *Cambio permanente de las propiedades físicas*
- \* *Reacción química* (excluidas las de manufactura de los polímeros involucrados)

Esta definición es la más general de todas y prioriza, como criterio de conceptualización, la caracterización de la evaluación de los cambios a través del impacto de sus beneficios antes que el análisis de la mecánica de la transformación.

Ejemplos típicos de procesamiento de polímeros son:

a) Moldeo por inyección (injection molding):

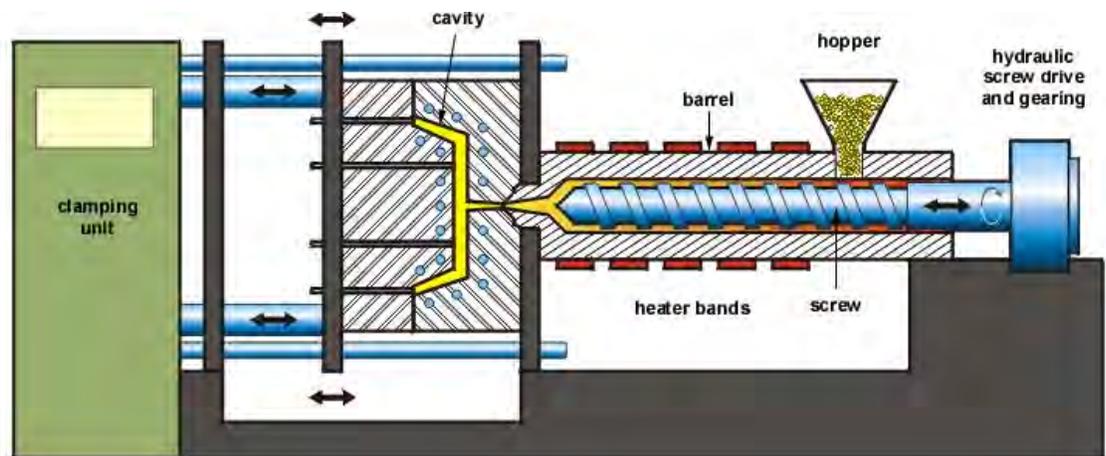


Figura 2

b) Calandrado (calendering)

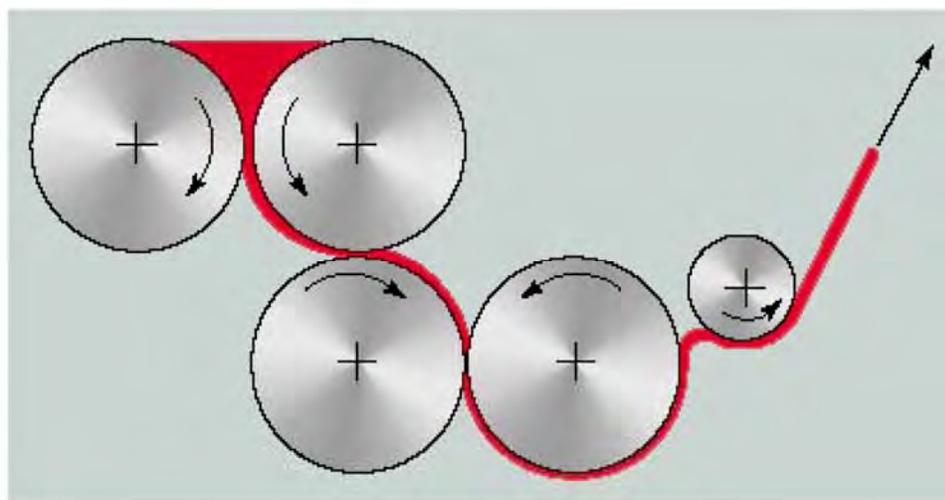


Figura 3

## I.2 Clasificación de las operaciones de conversión de polímeros

Un método común de clasificación de las operaciones de conversión de materiales poliméricos se basa en las funciones involucradas y agrupa dichas operaciones en tres grandes grupos (McKelvey, 1982):

- a) Operaciones de conformado, incluyendo moldeo, extrusión y calandrado
- b) Operaciones de enlazado, incluyendo sellado por calor, laminado y recubrimiento
- c) Operaciones de modificación, incluyendo mezclado.

## I.3 Fuerzas y deformaciones

Las características de los productos finales para uso construidos con materiales poliméricos se cuantifican, entre otras cosas, a través de las propiedades mecánicas típicas. Los plásticos clasificados como *commodities* poseen baja fortaleza (*strength*) y rigidez, cuando se los compara con metales o cerámicos, y tienden a exhibir “*creep*” o deformación (gradual, permanente y continua de un cuerpo producida por la aplicación de calor o tensión). Además, poseen limitaciones prácticas en cuanto a las temperaturas máximas a las que se los puede emplear como sólidos (la mayoría se funde entre los 100°C y los 250°C).

Un parámetro muy representativo de las propiedades mecánicas es el módulo de tensión (*tensile modulus*, o módulo de Young), cociente entre la tensión aplicada y la deformación que produce. Conceptualmente, el módulo es el parámetro que emplea la mecánica de sólidos para medir la rigidez de un material elástico isotrópico. La definición está dada por la Ecuación 1:

$$E = \frac{\textit{tensile stress}}{\textit{tensile strain}} = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F / A_0}{\Delta L / L_0}, \quad (1)$$

en la que

$E$  es el módulo de Young (modulo de elasticidad)

$F$  es la fuerza aplicada sobre el sólido

$A_0$  es el área transversal original del objeto

$\Delta L$  es el cambio en la longitud del cuerpo, y

$L_0$  es la longitud original del cuerpo.

La ecuación (1) refleja el hecho de que el módulo establece la relación entre la tensión uniaxial aplicada y la deformación relativa uniaxial que produce. Dado que la definición establece condiciones de elasticidad (deformación sin ruptura) el módulo vale en el tramo elástico de comportamiento del material siguiendo la Ley de Hooke.

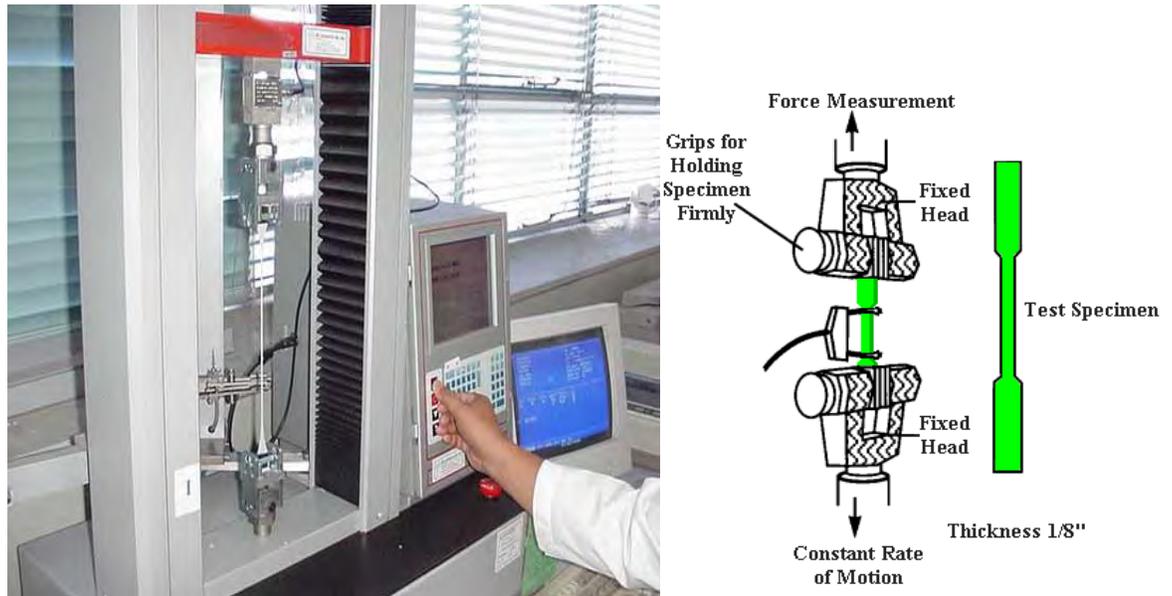


Figura 4

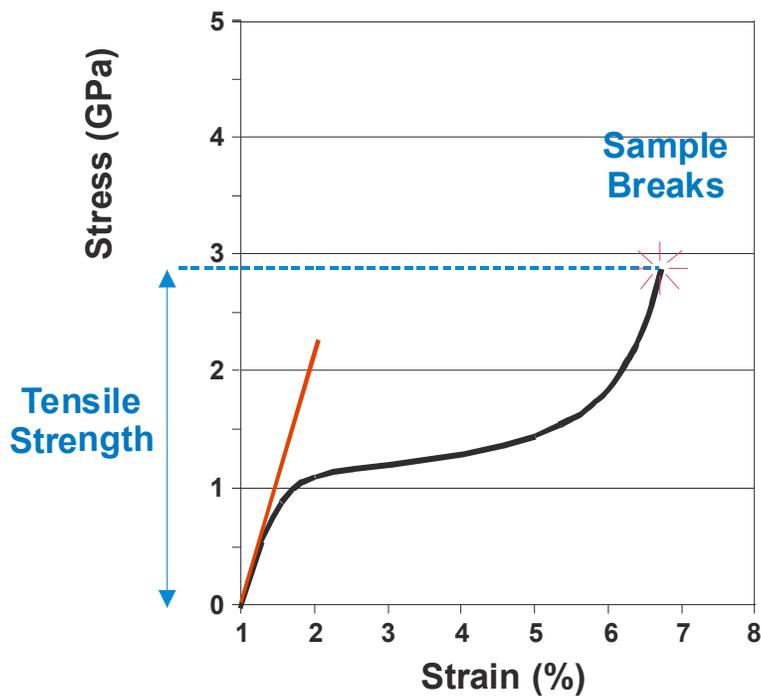


Figura 5

El módulo se determina experimentalmente a través de la pendiente de la curva tensión/deformación clásica obtenida en un ensayo del material. La Figura 4 muestra una fotografía del dispositivo, y la Figura 5 las curvas resultantes del ensayo (la **pendiente de la línea roja** es el valor del módulo). Para tener idea de sus valores, un módulo típico es del orden de 1 GPa para un termoplástico, mientras que lo es del orden de 210 para un acero. La tabla siguiente compara valores del módulo para diferentes materiales.

| Material   | GPa      |
|--|----------|
| Rubber (small strain)                                | 0.01-0.1 |
| PTFE (Teflon)  | 0.5      |
| Low density polyethylene                             | 0.2      |
| HDPE   | 0.8      |
| Polypropylene  | 1.5      |
| Polyethylene terephthalate                           | 2        |
| Polystyrene  | 3        |
| Nylon  | 2        |
| High-strength concrete                               | 30       |
| Magnesium metal (Mg)                                 | 45       |
| Aluminium  | 69       |
| Glass  | 50       |
| Kevlar   | 71       |
| Brass and bronze                                     | 100      |
| Titanium (Ti)  | 95       |
| Titanium alloys                                      | 105      |
| Copper (Cu)  | 117      |
| Glass fiber reinforced plastic (70/30 by weight)     | 40       |
| Carbon fiber reinforced plastic (50/50 fibre/matrix) | 125      |
| Steel  | 200      |
| Tungsten (W)   | 400      |
| Silicon carbide (SiC)                                | 450      |
| Single-walled carbon nanotube                        | 1000     |
| Diamond  | 1220     |

Otra comparación interesante es la de los valores de la fortaleza a la tensión (*tensile strength*) en el punto de ruptura, y de cuanto significa este punto en términos de deformación relativa porcentual:

| Material              | Tensile Strength (MPa) | % Elongation-to-Break | Young's Modulus (GPa) |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Stainless Steel Balls | 2                      | Very small            | 200                   |
| Nitrile Rubber Sheet  | 20 - 30                | 250 - 500             | Very low              |
| Nylon                 | 50                     | 150                   | 2                     |

## II PANORAMA GENERAL DE LOS PROCESOS

### II.1 EXTRUSION

La extrusión es un elemento común a buena parte de las operaciones que configuran el procesamiento de un material polimérico.

Un típico esquema de una extrusora se muestra en la Figura 6.

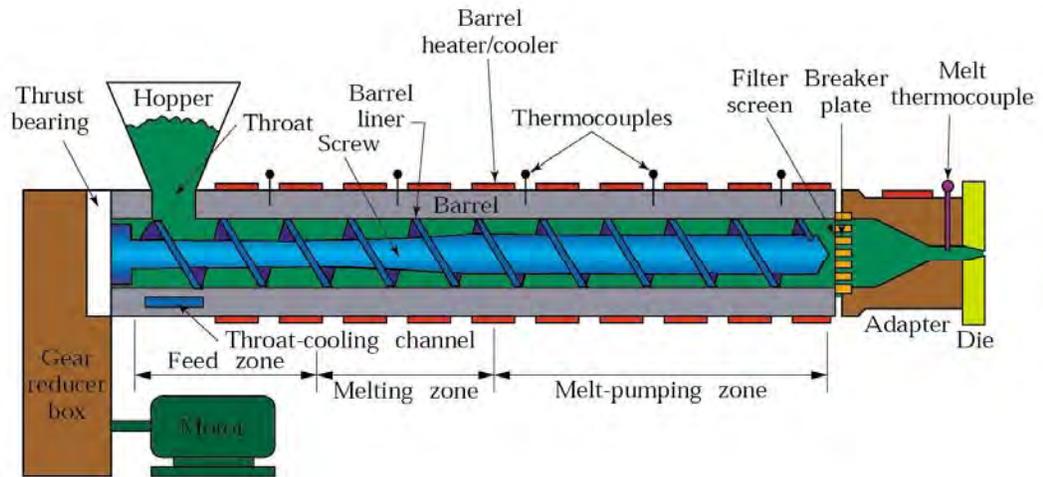


Figura 6

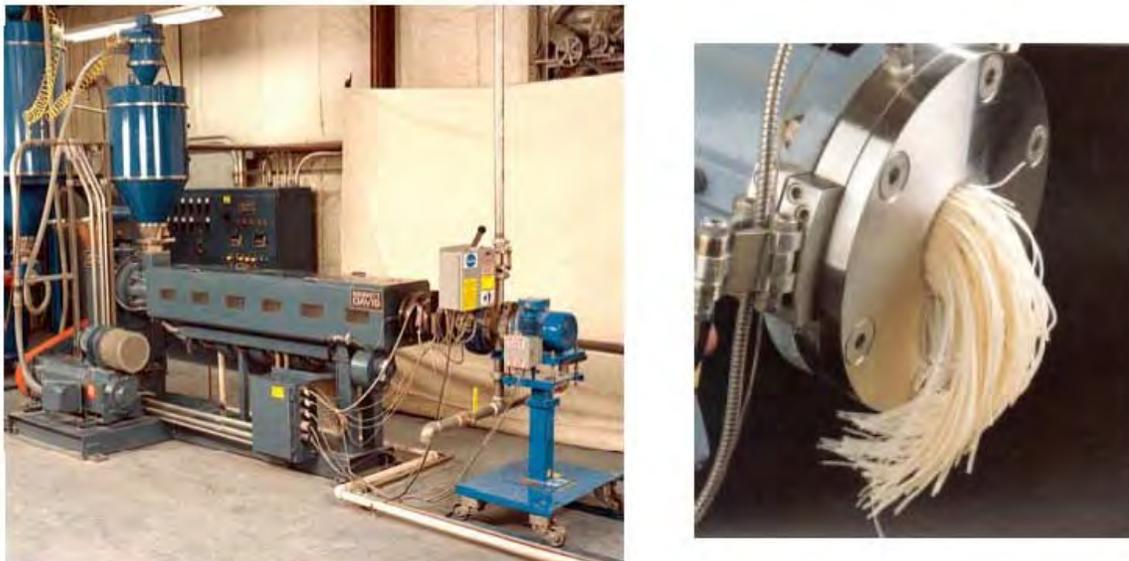


Figura 7

Las fotografías de una unidad típica se incluyen en la Figura 7.

La mayoría de los materiales poliméricos son procesados en una extrusora por lo menos dos (2) veces durante su vida útil. La primera vez, a través de un cabezal de generación de “pellets” a la salida del reactor; las veces posteriores para formulación y definición de su forma final.

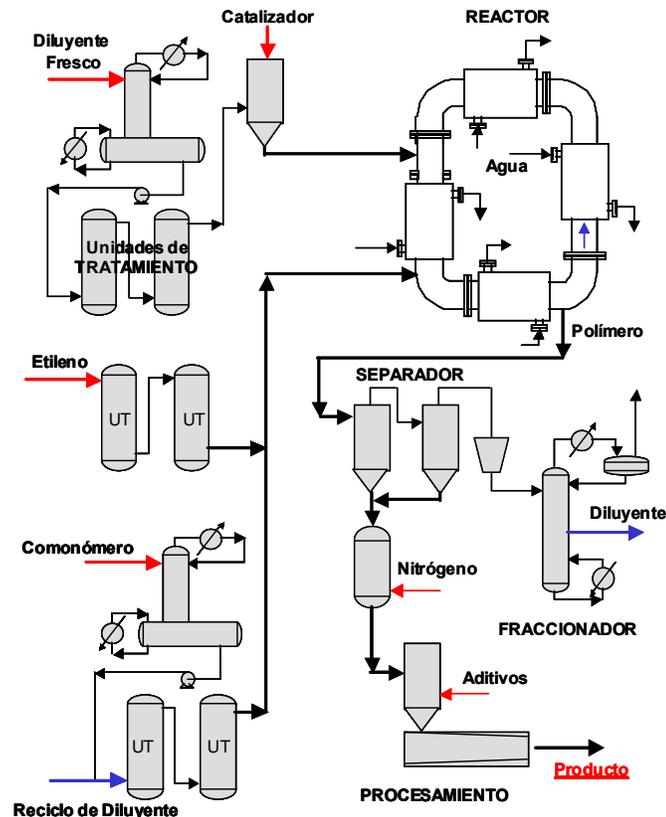


Figura 8

Veamos cuando aparece la extrusión por primera vez en la vida de un polímero, con qué motivo y en qué lugar de la planta, para poder comenzar a entender su función.

Tomemos el caso de la producción de polietileno en un reactor de lazo cerrado en proceso catalítico con presencia de solventes, tal como se esquematiza en la Figura 8

El esquema corresponde a una planta de producción continua de varios grados de polietileno (PE) mediante la síntesis con catalizadores heterogéneos del tipo Phillips, con sitios activos de Cromo y soportados sobre sílice. La producción anual de una planta de este tipo es del orden de las 200.000 toneladas de PE. El medio líquido en el que se produce la polimerización es brindado por un “loop” de diluyente (“carrier”) como el normal-hexano, que contiene el reactivo (etileno) disuelto y las partículas de polímero sólido producido en suspensión. La planta cuenta con una sección de re-distilación del diluyente y con secciones de tratamiento de etileno

(monómero) y los comonómeros que se adicionan (propileno, n-hexeno, etc.). En todos los casos las unidades de tratamiento retiene el oxígeno y el agua, que son venenos para los catalizadores empleados. En el reactor se ponen en contacto el monómero (y los co-monómeros, si los hay) con el catalizador y se sintetiza el polímero.

Aguas abajo del reactor se ubica la sección de purificación (eliminación de diluyente, secado) que culmina en una **extrusora**, tal como se muestra en la Figura 9.

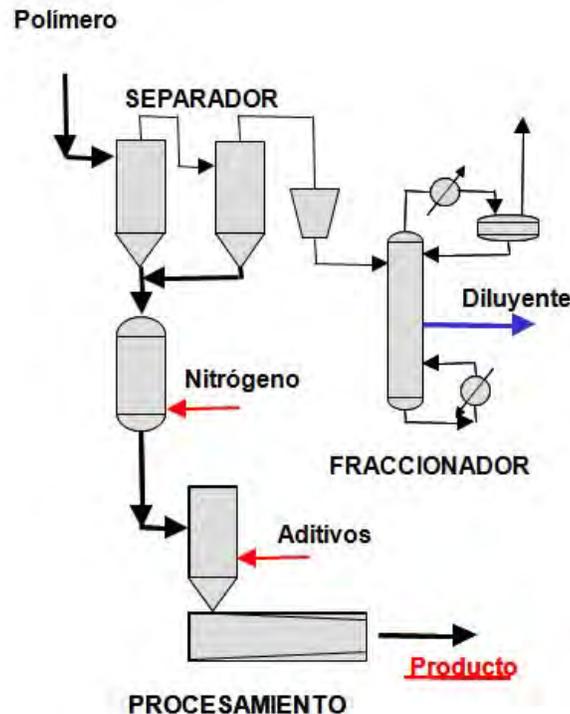


Figura 9

La extrusora es empleada en esta sección para volatilizar los restos de diluyente y reactivos, y para agregar los aditivos básicos que se incorporan a la resina para su protección desde la salida de la planta de síntesis.

**En términos sencillos, las extrusoras de tornillo son bombas para polímeros, capaces de fundir el material con los que son alimentados, a través de 1 ó 2 tornillos de Arquímedes girando dentro de un cañón (o carcasa ó barril) calefaccionada.**

### II.1.1 Extrusoras de un solo tornillo

La extrusora de un tornillo (SSE) es el caballo de batalla de la industria plástica y es el esquematizado y fotografiado en las Figuras 6 y 7 más arriba. La figura 10 indica la geometría y las dimensiones fundamentales de sus partes principales (canal, filete o *flight*, y núcleo).

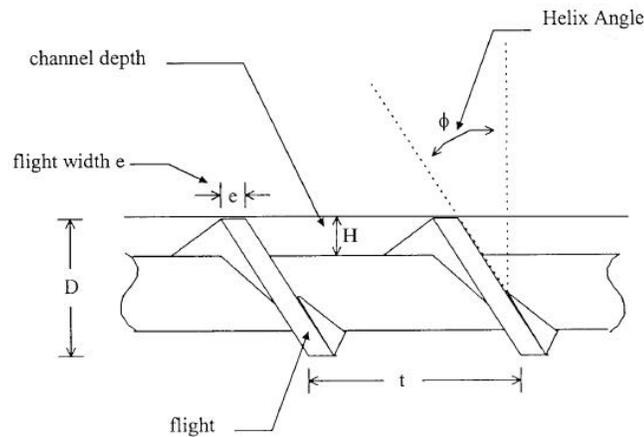


Figura 10

La resina polimérica en la forma de polvo, copos o gránulos (“*pellets*”) desde una tolva (“*hopper*”) son alimentados al espacio hueco entre el tornillo y el cañón. La profundidad del canal en el alma del tornillo está diseñado de mayor a menor en la dirección del flujo para tener en cuenta a) el cambio de densidad que acompaña el cambio desde las partículas sólidas al polímero fundido, y b) el desarrollo de presiones dentro de la extrusora.

Las SSE normalmente tiene diámetros entre 25 y 250 mm, y relaciones longitud/diámetro de entre 20 y 36. Las velocidades de rotación se ubican entre las 20 y las 150 revoluciones por minuto.

Un SSE de 60 mm de diámetro puede procesar hasta 200 kg/h. de resina, mientras que una de 150 mm puede alcanzar los 1.000 kg/h.

En la primera zona de la extrusora (*conveying ó feed zone*) las partículas sólidas de polímero son compactadas en el canal alrededor del tornillo por la acción rotatoria de éste para formar un lecho sólido. La función principal de esta zona es la eliminación de huecos entre las partículas libremente ubicadas en la tolva (aumento de la densidad aparente)

La segunda zona (de fusión o plastificación), los calefactores de el cañón producen la formación de una delgada película de polímero fundido entre el lecho sólido y la pared del cañón. Esta capa fundida está sujeta a intensos esfuerzos de corte en el estrecho espacio y debido a la extremadamente alta viscosidad del polímero fundido se producen altas velocidades de disipación

viscosa. El calor así generado funde el lecho sólido en una distancia corta desde el inicio de la fusión, tal como se ilustra en la Figura 11.

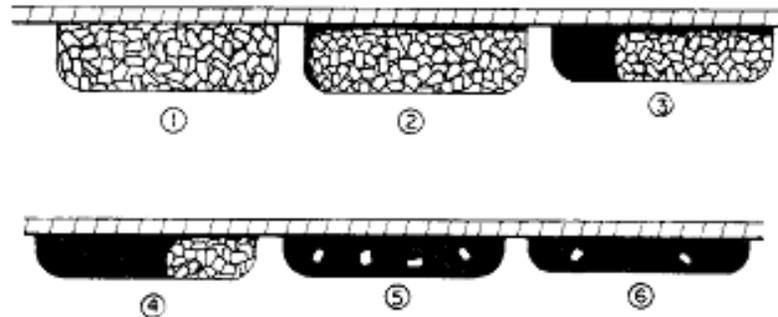


Figura 11

Finalmente, en la tercera zona (de dosificación o bombeo) el polímero fundido y más estable entre las ahora estrechas paredes entre el alma del tornillo y el cañón fluye a presión, para finalmente alcanzar y atravesar el cabezal al extremo de la máquina.

El aumento de presión debido a fuerzas de fricción ha sido objeto de múltiples esquemas de modelado matemático, todos sobre la base de la consideración simultánea de los balances de fuerzas y de momento angular (torque).

Para que el lecho se desplace hacia adelante (desde la tolva al cabezal) en la extrusora, es necesario que el coeficiente de fricción sea mayor sobre el cañón que sobre el tornillo. Por esta razón, los tornillos son maquinados hasta grados importantes de pulido sobre su superficie. Por el contrario, las paredes del cañón lo son menos, y a veces, hasta intencionalmente transformadas en rugosas, como en el caso de los cañones estriados.

De la experiencia industrial, se desprende que la buena práctica de uso de un SSE requiere que el flujo de producto fundido se ubique entre 0,75 y 1,25 de su capacidad de flujo de arrastre (*drag-flow capacity*)  $M_D$  definida por:

$$M_D = \rho_M Q_D = \frac{1}{2} \rho_M \pi^2 D^2 H_M N \sin \phi \cos \phi \quad (2)$$

en la cual  $Q_D$  es el flujo volumétrico,  $\rho_M$  la densidad del polímero fundido,  $D$  el diámetro exterior del tornillo,  $H_M$  la profundidad del canal en las sección de dosificación,  $N$  la velocidad de rotación del tornillo y  $\phi$  el ángulo de la hélice en el canal del tornillo (frecuentemente  $17,66^\circ$ ).

La potencia provista por la acción rotativa del tornillo se emplea en: a) calentar el polímero desde la temperatura ambiente de ingreso en la tolva hasta la temperatura de extrusión, b) en fundir el polímero, y c) en bombearlo a través del cabezal.

Habitualmente, la calefacción desde el cañón provee menos del 25% del calor total requerido por el calentamiento, la fusión y el bombeo del polímero (a + b + c).

$$P_0 = \rho_M Q C_p (T_{out} - T_{in}) + \rho_M Q H_f + \Delta P Q \quad (3)$$

En esta ecuación  $P_0$  es la potencia,  $C_p$  es la capacidad calorífica del polímero,  $T$  es la temperatura,  $\Delta P$  es la variación de presión, y  $H_f$  el calor de fusión (despreciable para polímeros 100% amorfos como el PS y el PMMA, y de hasta 300 kJ/kg para algunos grados de HDPE). Las extrusoras tienen relativamente baja eficiencia de bombeo, cuando se las compara con otros dispositivos de movimiento de fluidos, con el sumando  $\Delta P Q$  demandando usualmente del orden del 10% de la  $P_0$  total.

Con la ayuda de la Ecuación 2, es fácil estimar que para un polímero típico, la extrusión de un flujo másico de 400 kg/h demandará una potencia del orden de los 120 kW. Si bien altos en sí mismos, los costos de procesamiento para termoplásticos son sensiblemente inferiores a los de los metales. La regla del pulgar indica que los costos de procesamiento de los plásticos son del orden del costo de la materia prima.

### II.1.2 Extrusoras de tornillo doble

Las extrusoras de tornillo doble o *twin-screw extruders* (TSE) son equipos con dos tornillos del mismo diámetro, los cuales giran, uno al lado del otro y a la misma velocidad de rotación, dentro del cañón único. El uso de los TSEs se ha incrementado en años recientes por su eficiencia de mezclado en procesos tales como mezclado y formulación de termoplásticos con aditivos, devolatilización y extrusión reactiva. Ofrecen mayor control sobre la distribución de tiempos de residencia y el mezclado que un SSE, y además tienen capacidades superiores de

transferencia de calor y materia. La mayor desventaja de un TSE cuando se lo compara con un SSE es su significativamente mayor costo de inversión.

Hay tres fundamentalmente tres tipos de extrusoras TSE de acuerdo al giro y disposición de sus tornillos, tal como se indica en la Figura 12:

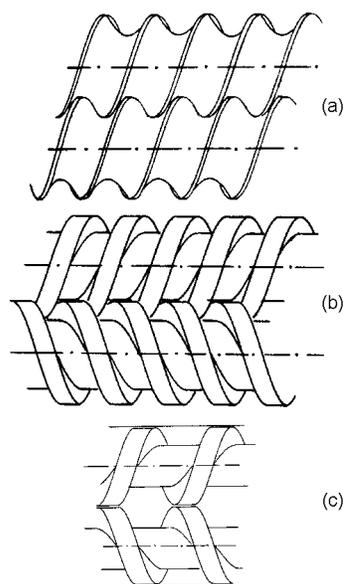


Figura 12

- a) co-rotacionales entrelazados (*co-rotating intermeshing*) en los cuales los dos tornillos rotan en igual sentido y con sus hélices entrelazadas (el vuelo de una hélice ingresa en el espacio hueco del paso de la del otro tornillo)
- b) contra-rotacionales entrelazados (*counter-rotating intermeshing*) en los cuales los dos tornillos rotan en sentidos opuestos y con sus hélices entrelazadas.
- c) contra-rotacionales no entrelazados (*counter-rotating non-intermeshing*) en los cuales los dos tornillos rotan en sentidos opuestos y sus hélices no se entrelazan.

Las TSE del tipo (a) son las más comúnmente empleadas, y tienen la particularidad de que son autolimpiantes. Producen una distribución de tiempos de residencia más angosta (mejor mezclado) que las SSE y por esta razón son particularmente atractivas para materiales muy sensibles a la temperatura y al efecto de corte, porque no se generan puntos muertos en los que el material pueda acumularse y degradarse durante el tiempo en el que permanecen en la extrusora.

Equipos TSE grandes pueden tener velocidades de rotación de cada tornillo del orden de las 1.200 r.p.m. con una producción de más de 10 toneladas por hora.

### II.1.3 Flujo a través de la extrusora

Una vez que se ha recorrido el camino descrito, esto es, que el polímero ha sido fundido, mezclado y presurizado en las distintas secciones de la extrusora, es bombeado a través de una **boquilla** para el conformado continuo, luego de enfriado y solidificado, de un producto final.

Las formas mas comunes de boquillas para procesado son:

- a) planas
- b) anulares
- c) con un dado perfil

A través de ellas se extrudan distintos productos:

- 1 caños y tubos,
- 2 botellas plásticas,
- 3 películas y planos (hojas) plásticas,
- 4 bosas y contenedores,
- 5 recubrimientos para papel y películas varias,
- 6 fibras y filamentos,
- 7 cintas, y
- 8 perfilería (marcos para ventanas, burletes y sellamientos varios, etc.)

La extrusión de polímeros a través de boquillas guarda cierta similitud con la extrusión de metales en caliente, si bien tiene importantes diferencias con ésta. En la de metales, la masa fundida es empujada mediante un pistón (*ram*), mientras que en la de polímeros la alimentación fluye en forma continua provista por el giro del tornillo de la extrusora.

En la extrusión de metales calientes las temperaturas en las boquillas van desde 340°C para magnesio hasta 1.325°C para el acero. Las correspondientes presiones van desde 35 MPa hasta por encima de 700 MPa, respectivamente. En la extrusión de polímeros, en las boquillas raramente se superan los 350 °C y los 50 MPa.

En las boquillas, el polímero fundido experimenta flujo reptante (*creeping flow*) con números de Reynolds muy bajos, típicamente inferiores a  $10^4$ , debido a sus viscosidades extremadamente altas. En la comparación con los metales, esta es una gran diferencia: un metal fundido tiene viscosidades similares a las del agua a temperatura ambiente (1 cp), mientras que en un polímero fundido es del orden de  $10^6$  veces más alta.

La forma simplificada de la ecuación de la conservación de cantidad de movimiento (Navier-Stokes) usada para modelar estos flujos refleja el balance entre las fuerzas viscosas y de presión:

$$-\nabla P + \nabla \cdot \tau = 0 \quad (4)$$

En la que  $P$  es la presión y  $\tau$  el tensor de tensiones. Muchas ecuaciones constitutivas se han escrito para relacionar la tensión y la velocidad de deformación en flujos poliméricos, siendo uno de los más simples el modelo de ley de potencia:

$$\eta = m \dot{\gamma}^{n-1} \quad (5)$$

$$\tau_{xy} = \eta \dot{\gamma}$$

Con  $\eta$  la viscosidad,  $\tau_{xy}$  la tensión de corte,  $\dot{\gamma}$  (con el punto arriba) la velocidad de corte y  $m$  y  $n$  los parámetros del modelo.

#### II.1.4 Soplado de películas

La extrusión seguida de soplado (Figura 13) es uno de los más importantes procesos para la producción de películas finas, particularmente de polietileno.



Figura 13

El polímero fundido es extrudado a través de una boquilla anular, generalmente construida como un mandril espiralado, en la forma de un tubo móvil de paredes delgadas que es dirigido axialmente a la vez que expandido radialmente. En la casi totalidad de los casos la burbuja de film es formada verticalmente hacia arriba, para usar la homogeneidad del campo gravitatorio en la conformación del espesor.

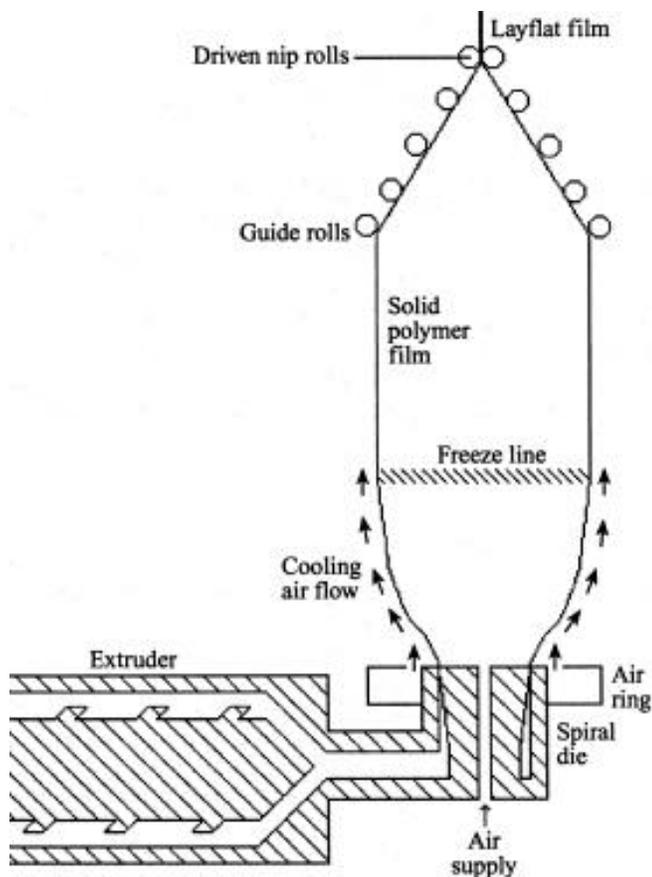


Figura 14

El aire es insuflado por la parte inferior del conducto central de la boquilla, en los casos más elaborado previamente acondicionado térmicamente y en su contenido de humedad. Una segunda corriente de aire de alta velocidad es distribuida sobre la superficie externa de la burbuja que se desplaza, para controlar tanto su expansión como fundamentalmente su temperatura, mediante el enfriamiento del polímero fundido y posterior solidificación del film (Figura 14).

El máximo diámetro de la burbuja es habitualmente entre 1,2 y 4 veces del diámetro del mandril. En la parte superior del recorrido, primeramente la burbuja es obligada a estrecharse ordenadamente mediante rodillos guías, y luego aplastada por dos rodillos que, además, ejercen la tracción que desplaza en forma continua la película.

La co-extrusión (extrusión simultánea de varias capas, hasta 11) es posible con esquemas similares, si bien las boquillas son significativamente más complejas, ya que es necesario un conjunto de mandriles concéntricos y más de una extrusora para lograrlo.

### II.1.5 Extrusión de películas planas

En general se denomina película, a un producto más delgado que 0.25 mm, y hojas a otros planos con espesores superiores a este.

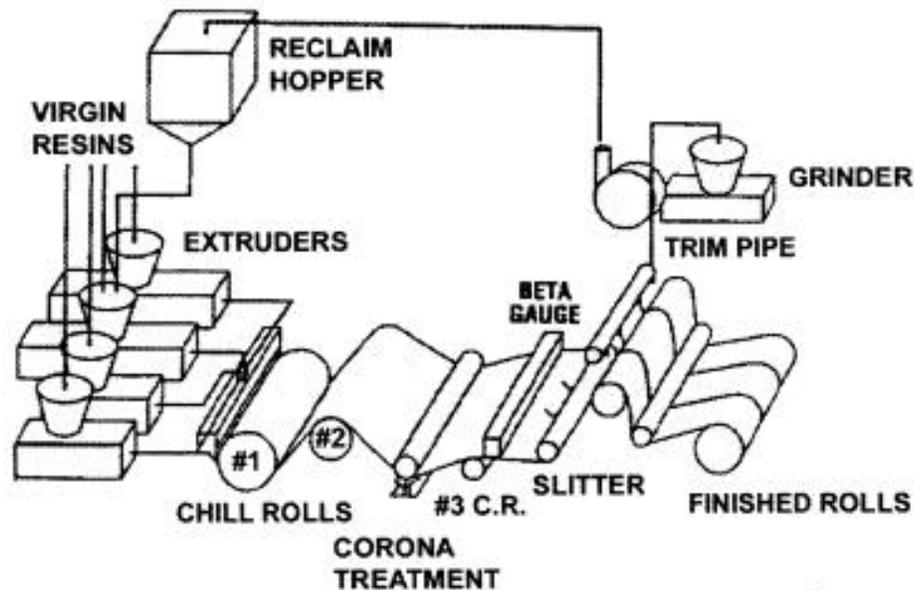
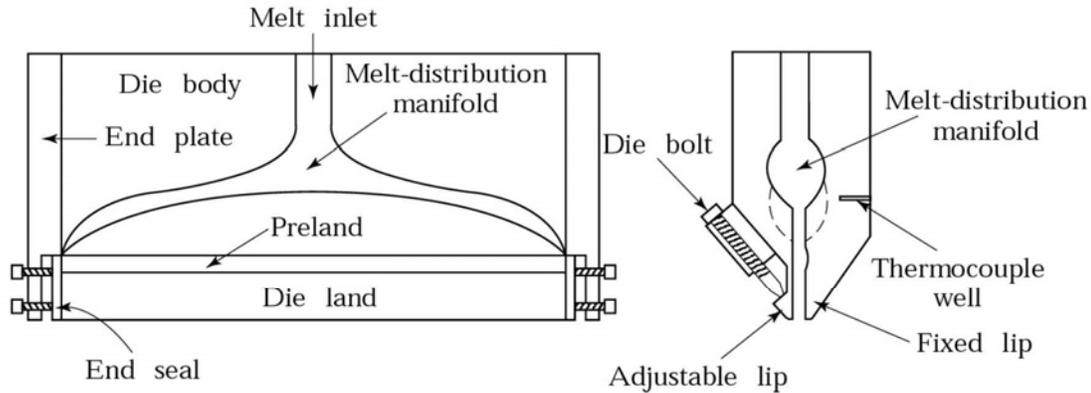


Figura 15

La producción con materiales poliméricos de películas y hojas planas y de piezas vaciadas en moldes abiertos involucra la extrusión y posterior flujo del polímero fundido a través de una boquilla plana de gran ancho (hasta 10 metros), el pasaje posterior sobre y entre un conjunto de rodillos refrigerados los que enfrían rápidamente (*quench*) la masa polimérica y la solidifican, tal como se indica en la Figura 15. Este proceso es empleado tanto para la producción de planos con tolerancias muy ajustadas, y para los flujos de resinas de baja viscosidad.

La mayoría de las boquillas planas tiene una sección tipo “T” o tipo percha, y están conectados vía un *manifold* que distribuye el flujo de polímero fundido a lo ancho de la boquilla

desde una o más extrusoras. El polímero, aguas abajo, siguen un recorrido entre cilindros refrigerados y con tensores. En muchos casos, se co-extrudan varias capas simultáneamente con esquemas multi- o mono-manifold con varias extrusoras en todos los casos.



## Coat-hanger die

Figura 16

En la extrusión de películas la velocidad de corte en los labios de la boquilla son usualmente del orden de  $10^3 \text{ s}^{-1}$ . Cuando la tensión de corte en la pared excede un dado valor (usualmente del orden de 0.1 MPa sin aditivos, 0.3 MPa con aditivos) la superficie del extrudado pierde brillo con la aparición del efecto *piel de tiburón*. Este no es sino la aparición de lomadas perpendiculares a la dirección del flujo y visibles al ojo humano.

### II.1.6 Otras extrusiones

Tubos y caños: su extrusión se realiza bombeando polímero fundido a través de una boquilla anular, luego de la cual el producto extrudado, mientras es traccionado, pasa por un dispositivo al vacío (“*sizer*”) en el cual adquiere sus dimensiones finales. Después, es sumergido en líquidos refrigerantes (agua o aceites) y a veces rociado con ellos. Tuberías de hasta 2 metros de diámetro son construidas con este procedimiento. En el otro extremo se fabrican tubos de, por ejemplo, desde 10 mm de diámetro hacia abajo hasta menos de 1 mm.

Alambres y cables recubiertos: en el proceso de recubrimiento, individualmente o en arreglos ensamblados son traccionados a muy altas velocidades a través de una boquilla de cruceta

(*crosshead die*) alimentada con el polímero fundido desde la extrusora en un dirección formando un ángulo de 90° con la dirección del movimiento del alambre (Figura 17).

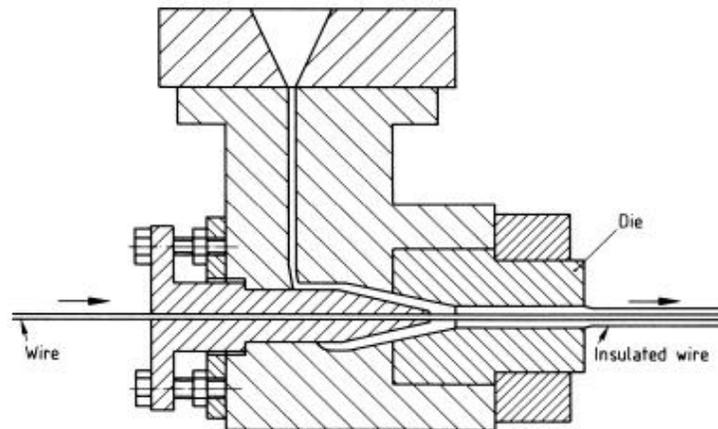


Figura 17

En los procesos a alta presión, el polímero fundido entra en contacto con el cable o alambre antes de abandonar la boquilla (ejemplo: aislaciones de cables individuales). En los de baja presión, el polímero se encuentra con el material a recubrir después de salir de la boquilla (procedimiento empleado, por ejemplo, para recubrir haces de cables).

Los procesos de recubrimiento de cables tienen asociadas muy altas tensiones de corte (hasta  $10^6 \text{ s}^{-1}$ ) y se emplean resinas con muy alta viscosidad.

Perfiles: se denomina extrusión de perfiles a la operación de conformado de piezas poliméricas de sección transversal constante, tanto en su forma como en sus dimensiones. Estas piezas incluyen desde formas simples hasta perfiles muy complejos con múltiples cámaras y protuberancias, tales como el burlete triple de un vehículo de alta gama. Los ejemplos son variados: marcos para cuadros, piezas para automóviles, perfilería de ventanas, burletes, etc.).



Figura 18

Una típica línea de producción de perfiles extrudados es similar en sus elementos a las ya vistas para otros productos, con una extrusora bombeando el polímero fundido a través de una boquilla para perfiles, seguido de un tanque de calibración y estabilización, por las enfriadoras de rigor, un traccionador y una unidad de corte de las piezas a la longitud especificada.

Las limitaciones típicas en la extrusión de perfiles viene dadas por la posible aparición de la piel de tiburón (como en los planos delgados vistos más arriba) cuando se trata de productos muy finos obtenidos de polímeros fundidos con muy alta viscosidad, o bien por la imposibilidad de enfriar adecuadamente productos de pared muy gruesa.

La extrusión de polímeros en la forma de caños y perfiles (Figura 18) es similar a la extrusión en caliente de metales para producir formas huecas y perfiles (de aluminio, por ejemplo).

Fibras: (*melt spinning*): en este proceso, el polímero fundido en la extrusora fluye a través de múltiples capilares en un cabezal denominado *spinnerette* que puede llegar a tener hasta 100 de estos conductos (Figura 19).

El polímero fundido es bombeado mediante una bomba de engranajes para asegurar el control de la presión y la dosificación y antes de la boquilla es filtrado para evitar materiales extraños que puedan ocluir los capilares en el *spinnerette*.

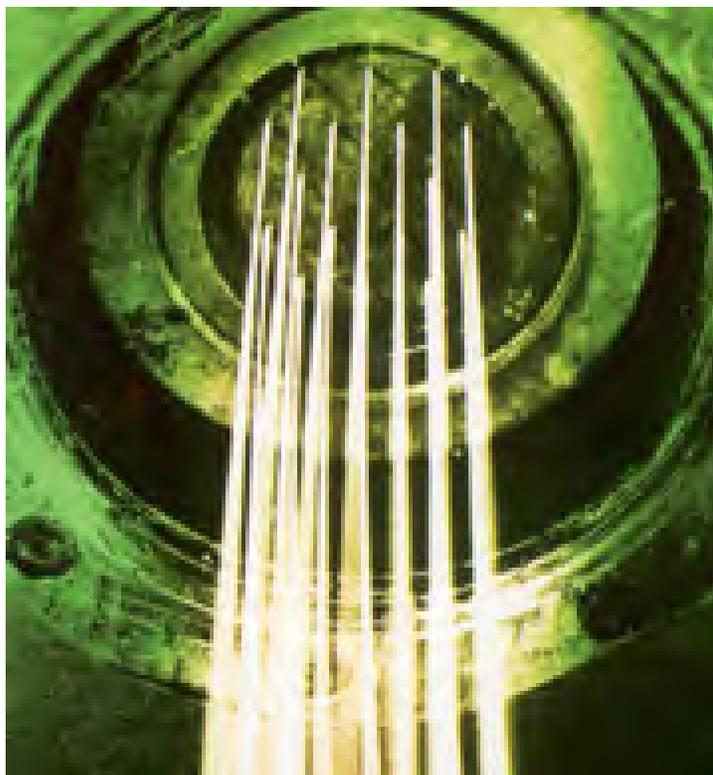


Figura 19

A la salida de los capilares los filamentos son enfriados empleando aire frío en varias etapas y, cuando corresponde, se les aplica un recubrimiento de terminación. El esquema se incluye en la Figura 20.

Un rodillo tractor precedido por uno o más rodillos guía (o un juego de rodillo capaces de trenzar las fibras) produce el efector de tirar el conjunto de fibras, y permite empacarlos en una bobina u ovillo.

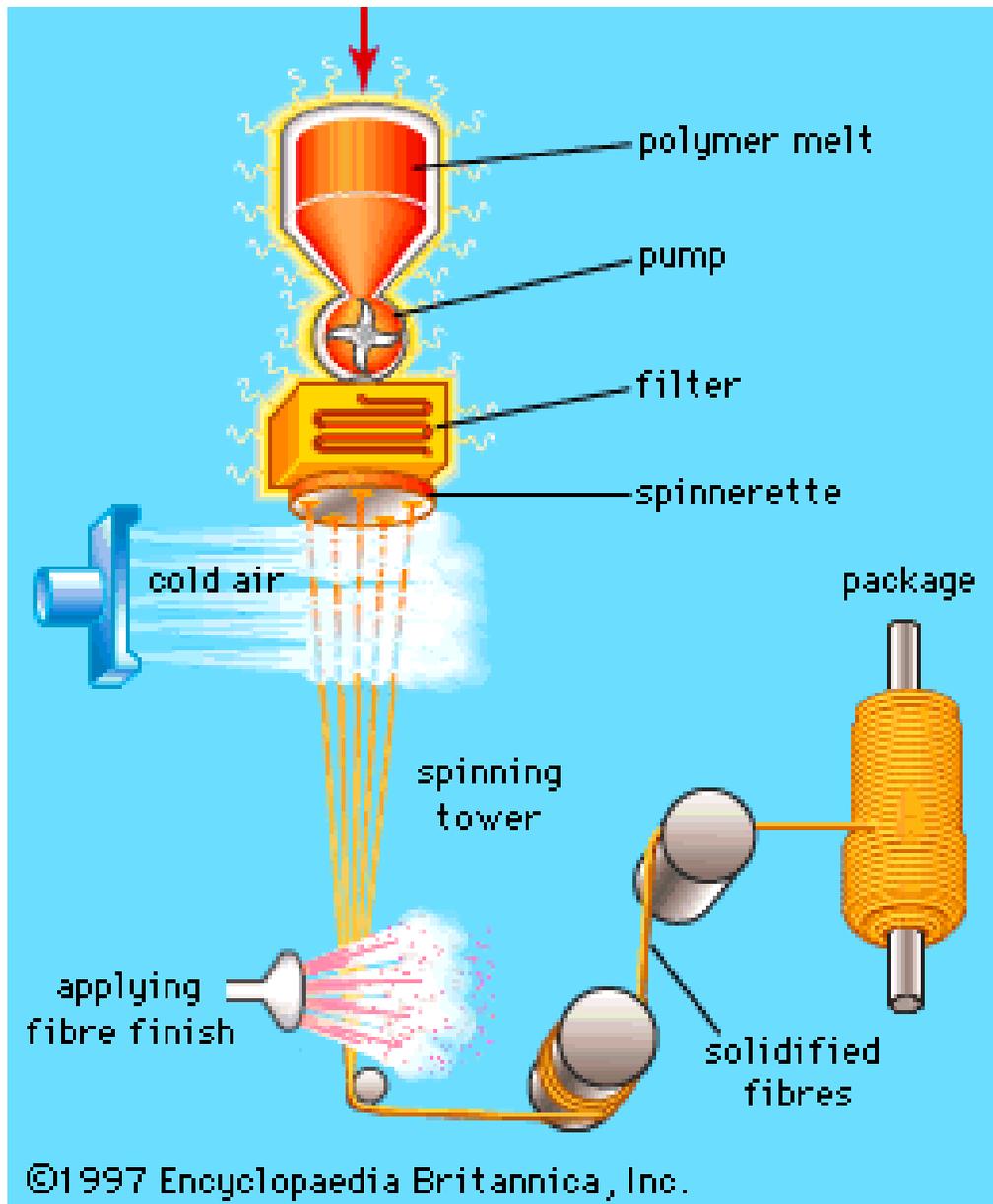


Figura 20

## II.2 CALANDRADO

El calandrado de termoplásticos es un proceso destinado a la operación continua de hojas o película de espesor uniforme mediante la operación de estrujado (“*squeezing*”) del material fundido entre un par de rodillos calefaccionados, tal como se ilustra en la figura 21.

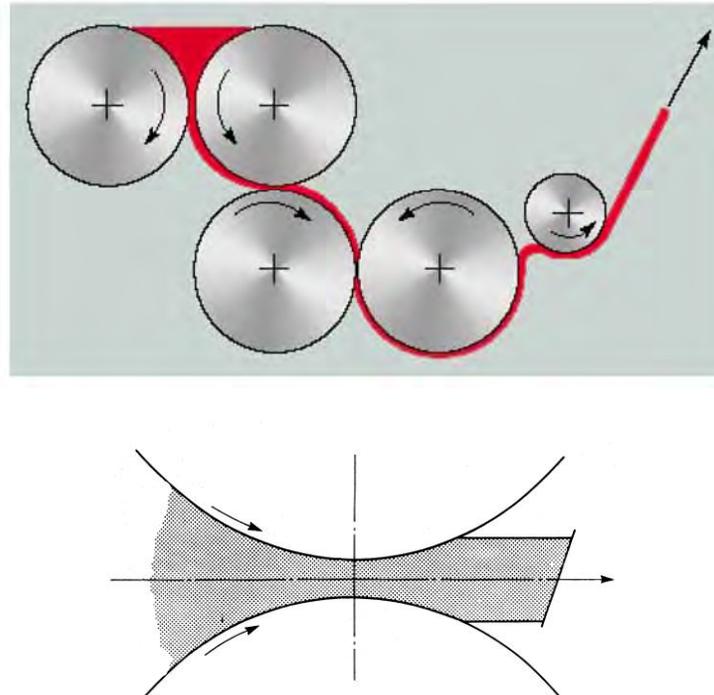


Figura 21

El termoplástico más frecuentemente calandrado es el policloruro de vinilo (PVC) para producir un rango de productos que va desde recubrimientos para paredes y telas para tapicería hasta cubiertas de fondo (recubrimiento interior) para reservorios y mantas para agricultura.

Las instalaciones para calandrado requieren grandes inversiones iniciales en bienes de capital (equipamiento). La extrusión directa de películas y hojas es competitiva frente al (más económica que él) calandrado porque el costo de una extrusora, si bien alto, es muy inferior al de una calandradora. Por el contrario, la alta calidad y uniformidad del producto obtenido por calandrado al par que los enormes volúmenes que puede ser procesados en poco tiempo, hacen de este proceso el requerido en aplicaciones como las indicadas. Una característica a tener en cuenta en calandrado es el hecho de que, debido a las enormes fuerzas desarrolladas durante la operación en el hueco entre los rodillos, esto tiende a torcerse, lo que puede resultar en desviaciones indeseadas en el espesor del producto. Rodillos tipo corona (con mayor diámetro en el centro) suelen ser empleados para compensar las desviaciones por doblado.

Comparando con otros procesos para diferentes materiales, el calandrado es similar al laminado en caliente de “plates” en la industria del acero y es además usado intensamente en la industria del papel.

En la secuencia inicial del proceso, el material polimérico fundido es alimentado a los cilindros de calandrado directamente desde la extrusora o a través de una mezcladora Banbury. Dado que este último dispositivo es una pieza importante dentro de las máquinas de procesamiento de materiales poliméricos, se incluye a continuación una descripción somera del equipo y de sus principales características operativas (Figura 22).

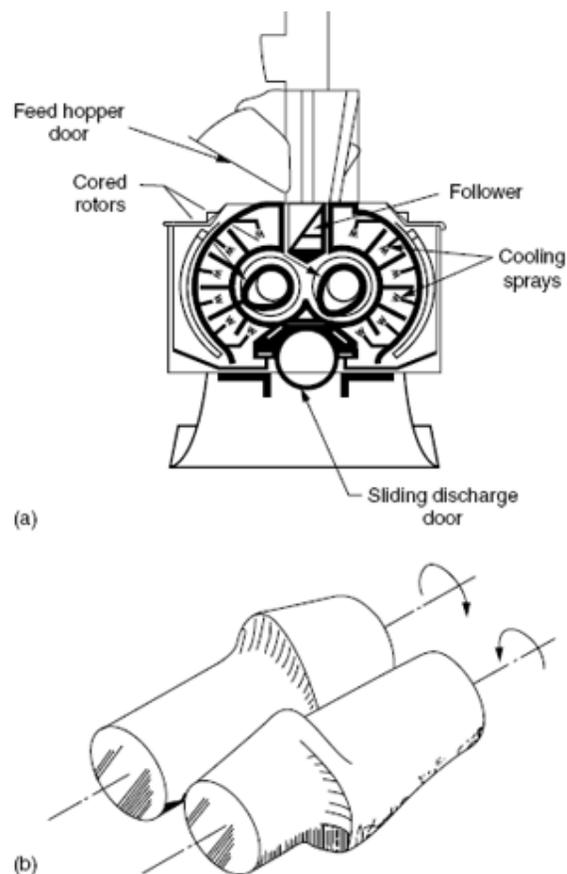


Figura 22

La mezcladora es un dispositivo de importantes dimensiones y potencias en el cual una cámara interior, abierta y cerrada alternativamente, que contiene el material a mezclar y los rotors que producen la mezcla. La cámara tiene la forma determinada por dos cilindros horizontales paralelos que se intersectan (Figura 22-a). Coaxialmente, los rotors con sección en forma de pera giran en sentidos de rotación opuestos para producir los efectos de corte que producen el mezclado (Figura 22-b).

El ingreso se produce desde una tolva (*feed hopper*) de generosas dimensiones para agilizar la alimentación, y operada neumáticamente. Desde la tolva, el material es llevado a presión por un pistón (*follower*) cuya superficie inferior tiene la forma exacta de la parte superior de la cámara bi-cilíndrica para transformarse en parte de su pared cuando la cámara se cierra (recorrido inferior del pistón). Igualmente, la parte de descarga reproduce la parte inferior de la cámara. Tanto el pistón de ingreso como la abertura de salida son accionados alternativamente (operación semi-batch). La cámara de mezclado es refrigerada exteriormente por camisas agua con recorrido laberíntico del fluido, para eliminar el alto calor generado por la fricción producida por los efectos de corte. La fotografía en la Figura 23 da una idea de la magnitud de las partes de la mezcladora.



Figura 23

Los rotores son construidos de aceros de alta Resistencia y torneado mediante sistemas CAD-CAM que garantizan la alta precisión en su forma necesaria para su encastramiento mutuo. Este es imprescindible para el buen funcionamiento del dispositivo en su conjunto por cuanto el mezclado se produce por dos motivos fundamentales: a) los esfuerzos de corte a los que es sometido el

material polimérico entre los dos rotores; b) los esfuerzos de corte producidos sobre el material ubicado en el volumen entre los rotores y la pared de la cámara.

Los rotores tiene sección en forma de pera, pero además tienen una proyección de espiral en la dirección del eje longitudinal del rotor (Figura 22 b). Este complejo diseño, además de esfuerzos de corte introduce sobre el material efectos adicionales de doblado y “barajado” entre láminas de material polimérico.

El arreglo helicoidal de la voluta a lo largo del rotor produce un efecto adicional de movimiento longitudinal impartiendo desplazamiento a la masa en la dirección del eje de los cilindros, acrecentando el mezclado.

La potencia habitual de un Banbury es del orden de los 500 HP.

### II.3 MOLDEO DE INYECCION

El moldeo de inyección es un proceso cíclico de dos etapas:

1) generación del estado fundido del material polimérico a través de una extrusora de tornillo rotatorio (SSE o TSE) o de una inyectora de presión; y

2) llenado posterior de un molde con el polímero fundido mediante la impulsión hacia adelante empleando un tornillo pistón recíprocante (*reciprocating screw*) seguido de una corta etapa de empaclado (*packing stage*) necesaria para incluir un adicional de material polimérico en el molde para compensar el encogimiento que se produce dentro de este por enfriamiento y posterior solidificación.

El material polimérico es mantenido bajo presión en el molde mientras se enfria, y el tiempo suficiente para que se alcance un grado de solidificación en la pieza siendo ésta dimensionalmente estable y apta para ser eyectada del molde.

Como en comparaciones anteriores, este proceso es parecido a los procesos de fabricación de piezas de metal por fundición y vertido en moldes a presión. En estos procesos, el metal fundido es mantenido en moldes a presión hasta que se llenen todos los huecos y el metal se enfrie y solidifique.

En la figura 24 se reproduce la fotografía de la inyectora y su cámara de moldeo. La longitud de la máquina en la Figura es del orden de los 4 metros.

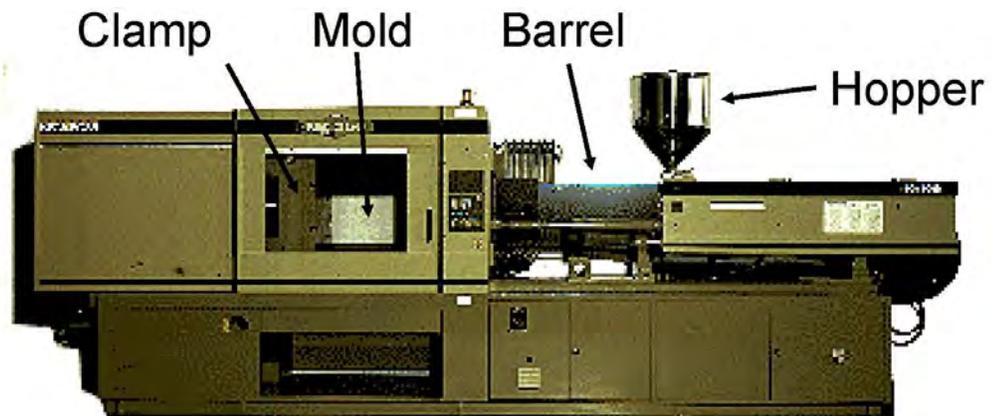


Figura 24

La Figura 25 contiene la fotografía de una máquina de mayor porte. El “*footprint*” del dispositivo en la figura es del orden de los 20 m<sup>2</sup>.

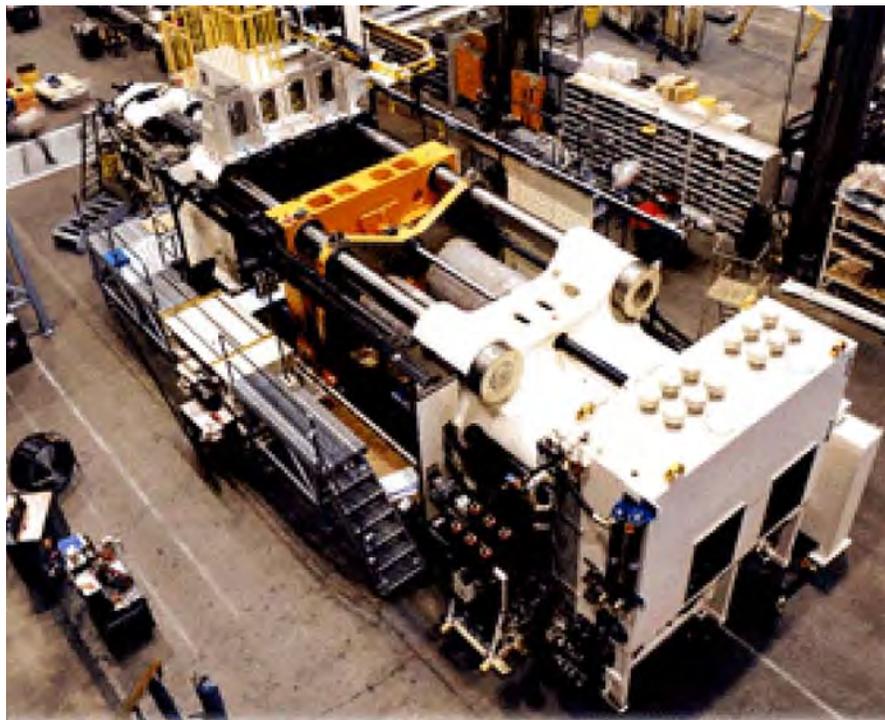


Figura 25

Una vez impulsada por el tornillo alternativo que culmina en una tobera, la masa de polímero fundido pasa a través de un orificio (*sprue*) de ingreso al molde y se distribuye entre

varios canales cada uno alimentado una de las múltiples cavidades dentro del molde a través de una puerta (*gate*), según el esquema en la Figura 26.

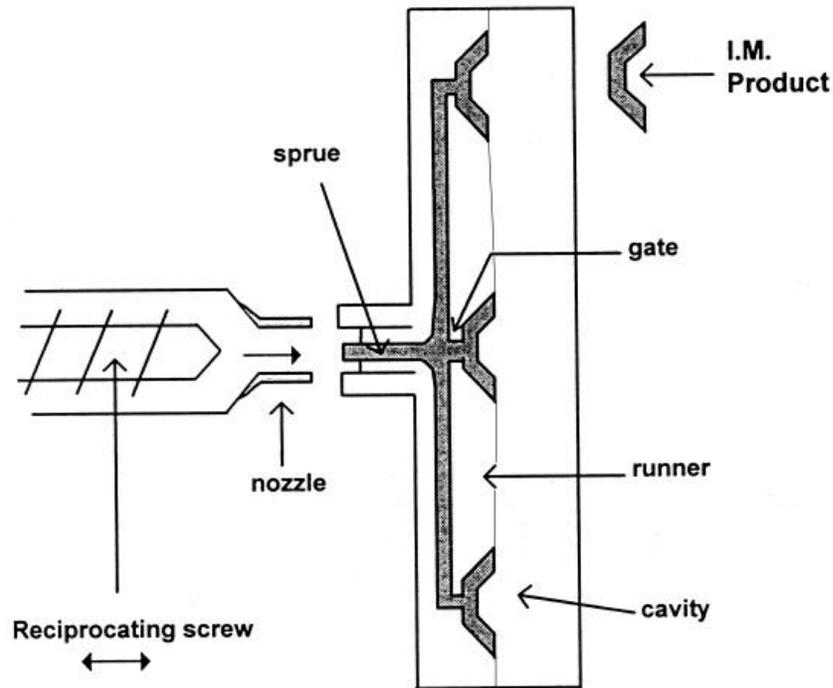


Figura 26

En general, la operación de moldeo implica el llenado simultáneo de múltiples cavidades dentro de un mismo molde (hasta del orden de 100) que producen, cada una, una pieza por ciclo, entendiéndose por tal la secuencia completa de pasos de llenado, empaclado (incluyendo correcciones de volumen por encogimiento), enfriamiento, consolidación de las piezas y eyección de las mismas fuera del molde.

Los ciclos duran desde pocos segundos hasta varios minutos.

Los productos elaborados incluyen quillas de botes, sillas de jardín, y piezas de artefactos para el hogar, perillas para equipos de radio, tapas para botellas, entre otras cosas.

En el moldeo de inyección, se producen muy altas velocidades de corte, usualmente hasta  $10^4 \text{ s}^{-1}$ . Por esto, así como para limitar incrementos de temperatura por disipación viscosa y para facilitar un llenado fácil de los moldes, se emplean grados de termoplásticos de baja viscosidad.

En la Figura 27 se puede observar un esquema con las partes más importantes de un sistema de moldeo de inyección; en ella se distinguen las zonas de inyección del dispositivo de fijación del molde denominado de abrazaderas (*clamping*).

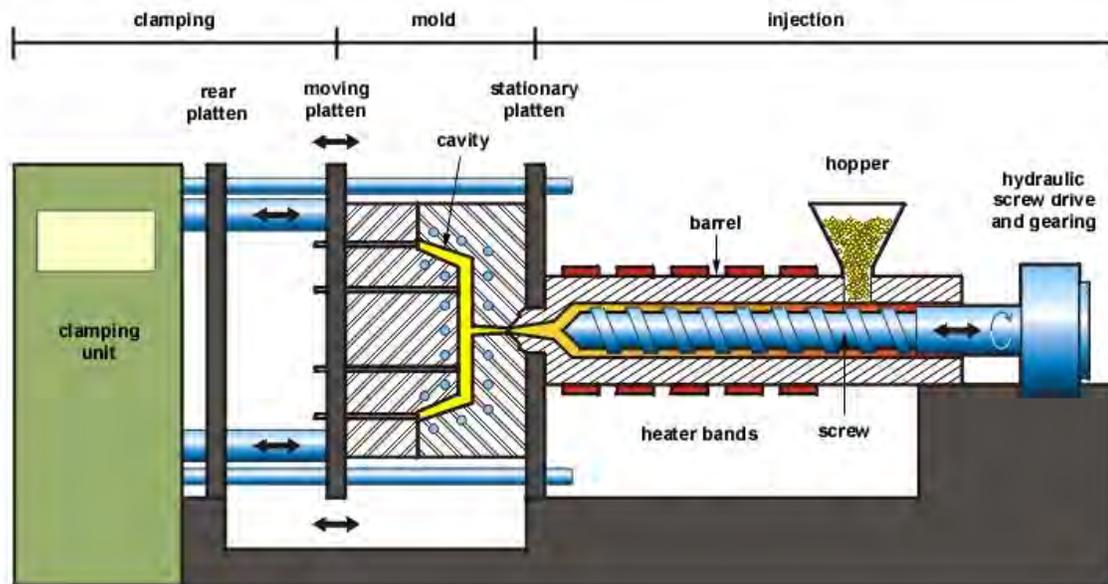


Figura 27

Las máquinas se clasifican por el tamaño de sus sistemas de abrazaderas, los cuales además pueden ser eléctricos, hidráulicos o puramente mecánicos, diseñados en todos los casos para mantener el molde cerrado con fuerza suficiente para resistir la presión de inyección.

El peso de las máquinas usualmente varía entre las 5 toneladas, para disparos de aproximadamente 10 gramos de material polimérico, hasta equipos del orden de 5.000 toneladas de peso para disparos de más de 50 kilos. Se denomina disparo a la cantidad total de material polimérico bombeada dentro del molde durante un ciclo, incluyendo la suma de la ubicada en el hueco de ingreso, en los canales y en las cavidades del molde. Naturalmente, hay equipos especiales con pesos de más de 10.000 toneladas capaces de inyectar disparos de más de 100 kilogramos. En la Figura 28 se muestran distintos tipos de molde.



Figura 28

Mientras que, en la Figura 29, se indica en un esquema los más importantes elementos componentes de un molde.

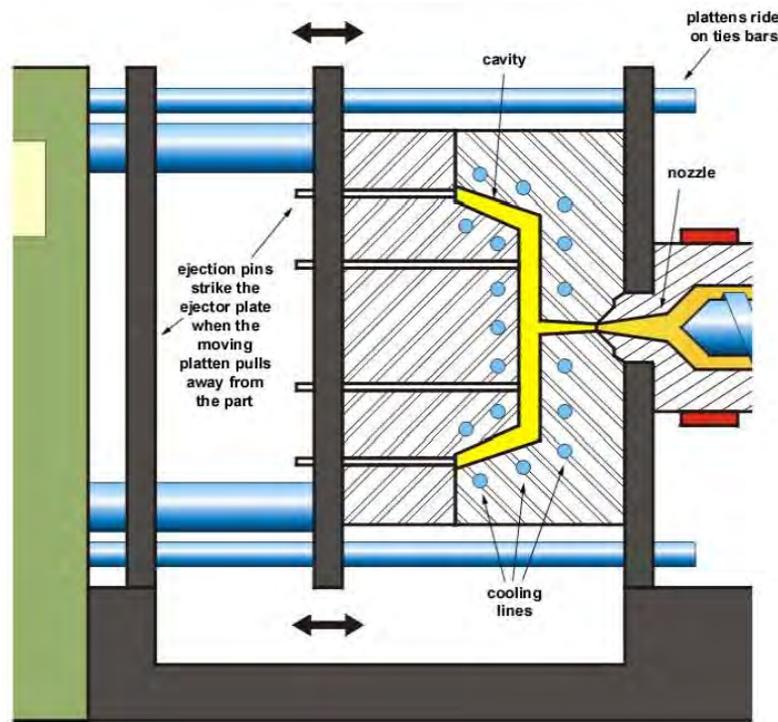


Figura 29

El llenado de los moldes está caracterizado por el efecto fuente, en el cual elementos del fluido de material polimérico fundido sufren complejos efectos de corte y estiramiento mientras se desplazan con el frente de llenado del material polimérico y se mueven llenando el espacio hacia las paredes frías.

Esta combinación de corte y estiramiento es determinante del ordenamiento de las moléculas, definiendo el nivel de orientación del polímero en las partes de la pieza. Mientras que la orientación molecular es instrumental en la extrusión para mejorar las propiedades mecánicas, en el moldeo por inyección en general es una molestia. Además, la orientación molecular es aún más notoria durante la etapa de empaclado.

Las tensiones producidas durante el enfriamiento de las piezas, pueden producir distorsiones en las piezas, especialmente si la inyección se realiza a elevadas temperaturas.

En la Figura 30 es posible observar las líneas de flujo y la deformación de los elementos de flujo en el efecto fuente.

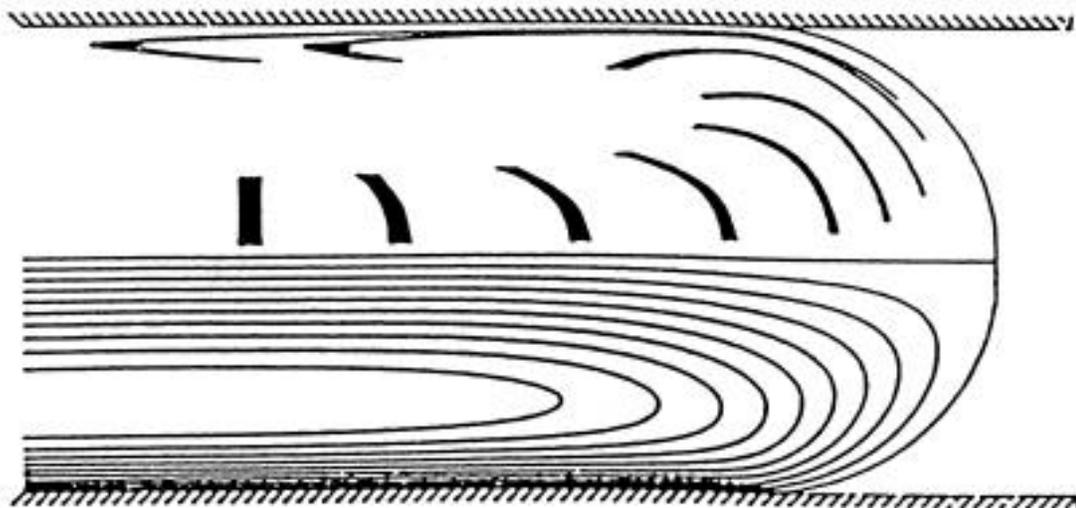


Figura 30

Procesos de micromoldeo, en los cuales los disparos son inferiores a 1 gramo, está hallando cada vez más uso en aplicaciones biomédicas y nanotecnológicas.

Los moldes son extremadamente caros, por lo cual es prácticamente imprescindible el empleo de modelos matemáticos para su diseño de modo de minimizar procedimientos de prueba y error. Los efectos más complejos para modelar son los de encogimiento y distorsión.

El encogimiento (la diferencia de tamaño entre el molde y la pieza enfriada y solidificada, causada mayoritariamente por el cambio de densidad mientras la pieza se enfría) alcanza entre el 1% al 4% en volumen (esto es alto) para polímeros cristalinos como la poliamida (PA) el Nylon, el PET, el HDPE y el PP. Polímeros esencialmente amorfos como el PS y PMMA y PC tiene menores problemas con el encogimiento, que solamente alcanza entre el 0,3% y el 0,7%.

La distorsión es debida también a los cambios de densidad del polímero durante el proceso y por los efectos de orientación molecular que las altas tensiones de corte traen aparejadas.

Un caso particular de moldeo por inyección es el que corresponde al de Moldeo Por Inyección Reactiva (RIM) en el cual se inyectan al menos dos fluidos con relativamente baja viscosidad, que devienen reactivos entre sí al ponerse en contacto dentro del molde.

Una de las ventajas de este proceso es que, por emplearse fluidos de baja viscosidad, las presiones involucradas pueden ser bajas. La desventaja es que, en muchos casos, se trata de sustancias con mayor volatilidad y/o toxicidad, sin que esto sea una regla.

En general, el uso de procedimientos RIM es común en la producción de partes para las empresas de producción de automóviles (paragolpes, tableros integrales, entre otras), si bien compiten cabeza a cabeza con los esquemas de moldeo por inyección tradicional.

En la Figura 31 se muestra el esquema del dispositivo.

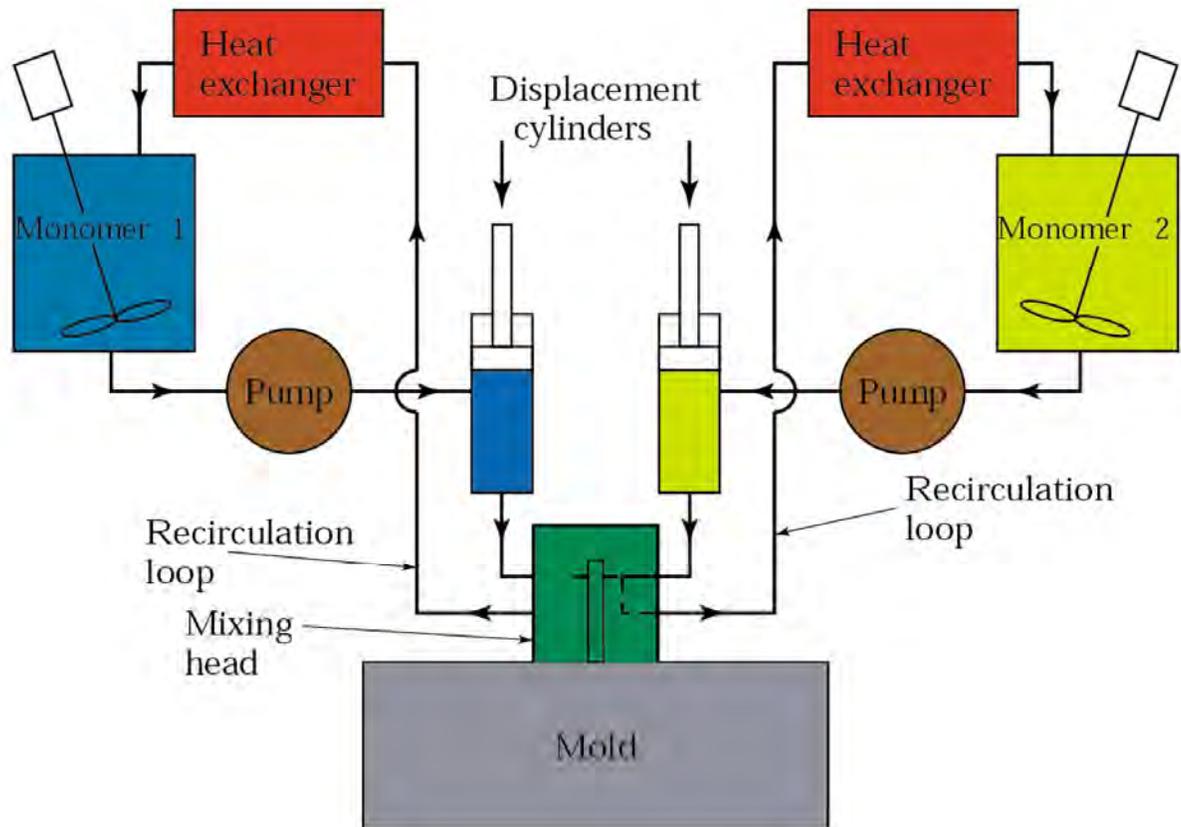


Figura 31

## II.4 MOLDEO POR SOPLADO

El moldeo por soplado es el proceso mediante el cual las piezas o artículos son conformados por inflado desde una masa de polímero fundido hasta que ésta llena la cavidad de un molde con la forma y las dimensiones deseadas. Las botellas plásticas para gaseosas y otros líquidos alimenticios tales como jugos y aceites, son creados por moldeo por soplado.

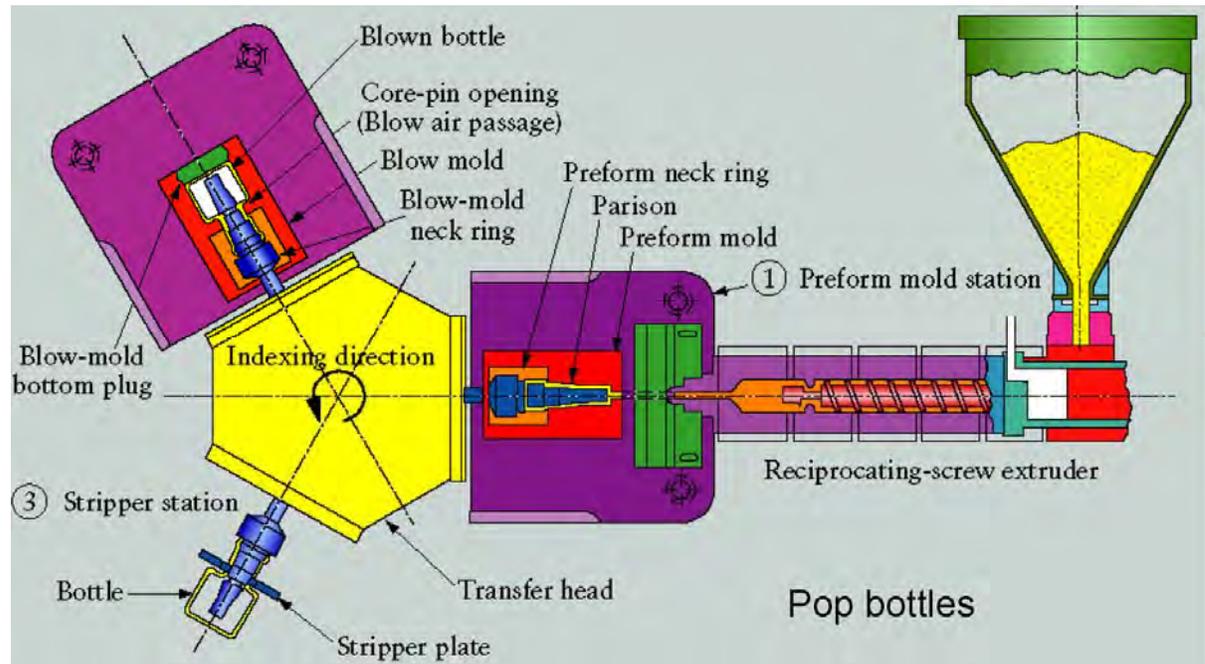


Figura 32-a

Las representaciones esquemáticas de los elementos más importantes del proceso se muestran en las Figuras 32-a y 32-b y 32-c.

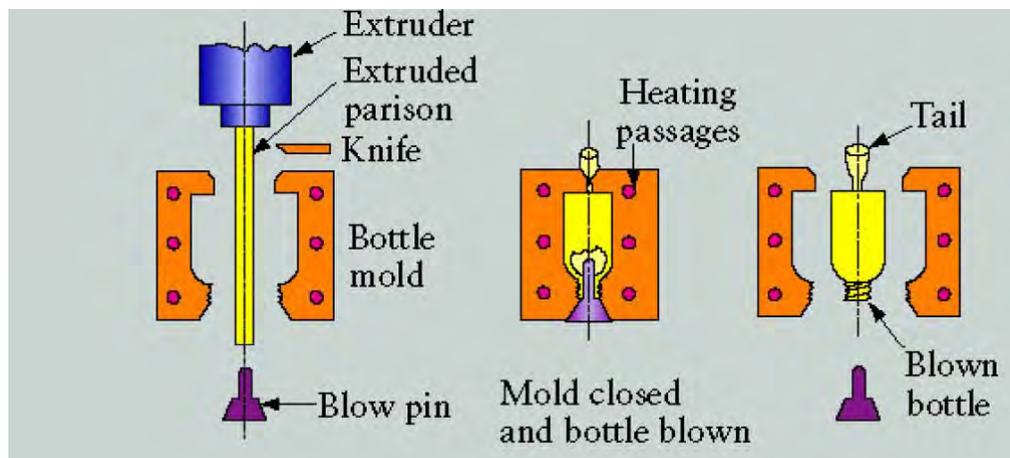


Figura 32-b

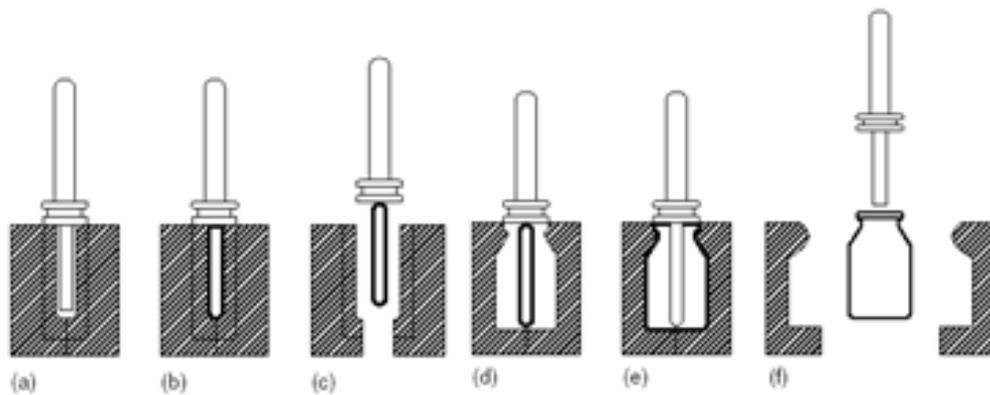


Figura 32-c

Hay dos grandes tipos de procesos de moldeo por soplado: a) por extrusión; y b) por inyección.

Moldeo mediante soplado por extrusión: el proceso incluye las siguientes etapas o estaciones:

- a) el material fundido que sale de la extrusora y que estará contenido en la pieza final, atraviesa una boquilla de sección anular (produce un tubo), y pasado por una estación de premoldeado (indicada con el ① en la Figura 32-a) en la cual es primeramente conformado como un cilindro hueco o *parison*. Este cilindro (esquema a la izquierda de la Figura 32-b) es adicionado de un tapón de soplado (*blow pin*) en la parte inferior y que luego se convertirá en la abertura de la botella a conformar, y sellado mediante una cuchilla que cierra la parte superior del tubo.
- b) el *parison* es colocado (estación de moldeo ② en la Figura 32-a) en el molde y firmemente fijado mediante grampas, el tapón retirado y el aire soplado en el interior de la masa de polímero aún fundido. El esquema de detalle que corresponde es el de la porción central de la Figura 32-b.
- c) una vez enfriado en el molde hasta alcanzar la rigidez necesaria, el producto es eyectado del sistema en la estación ③ de la Figura 32-a según el esquema en la porción derecha de la Figura 32-b. La secuencia se esquematiza en la Figura 32-c

Moldeo mediante soplado por inyección: el proceso incluye básicamente las mismas estaciones que en el caso por extrusión, solo que la extrusora es reemplazada por una inyectora, tal como la esquematizada en la Figura 33.

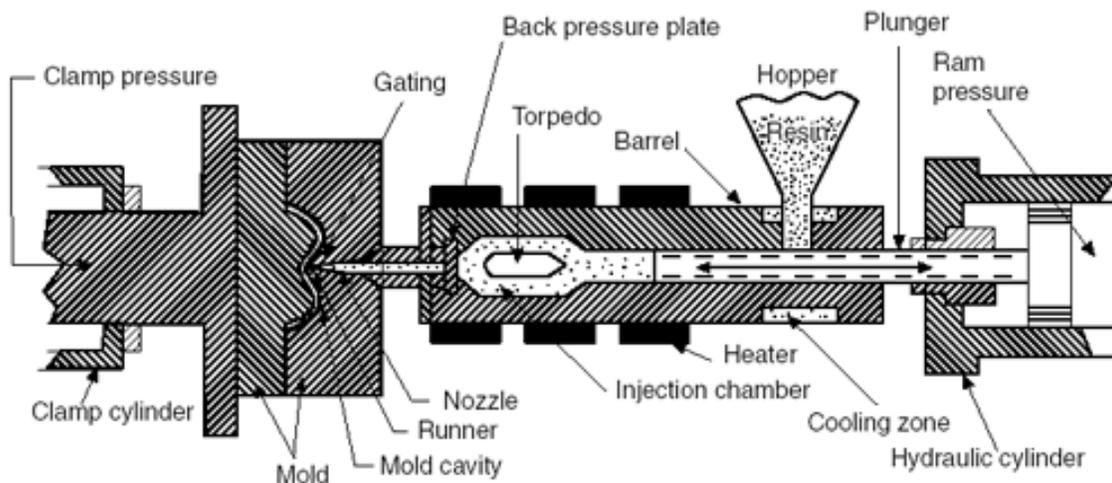


Figura 33

El material granulado es alimentado desde una tolva dentro del barril o cañón cuando se retira el pistón (*plunger*). Luego, al retornar este hacia adelante empuja el material polimérico dentro de la zona calefaccionada del barril en la cual, además del calentamiento y fusión, se produce la plastificación del material mediante aditivos. El calentamiento del material es rápido por cuanto es forzado en una zona estrecha de bajo volumen contra las paredes calefaccionadas, gracias a un torpedo ubicado en la línea de flujo.

El torpedo es mantenido en posición mediante aletas paralelas a la línea de flujo y que también contribuyen a la calefacción del polímero. El material ya fundido es empujado por el material que el pistón obliga alrededor del torpedo, y sale a través de una tobera (*nozzle*) en el extremo de la inyectora. Desde allí y una vez atravesada la cruceta (*sprue*) el polímero fundido ingresa al molde.

El ciclo unitario es fijado por cada par de un retroceso y un avance del pistón. La presión usualmente está entre las 500 y 3.000 atm, y los ciclos típicos duran del orden de 15 segundos a un minuto. Se clasifica a las inyectoras por su capacidad, medida en términos de cuánto PS pueden procesar en un disparo (o ciclo). Una inyectora de 20 gramos es capaz de generar el polímero para llenar un molde de 20 gramos de polímero por ciclo. La capacidad es determinada fundamentalmente por el volumen desplazado por el pistón (diámetro y longitud del movimiento) y por la capacidad de calefacción del barril (Kcal/s).

Dependiendo de la estabilidad térmica del material extrudado, el proceso indicado más arriba puede operarse en modo continuo o en modo intermitente. En este último caso los tornillos

reciprocantes o alternativos de la extrusora operan como pistones de impulsión para el moldeo por inyección.

El moldeo de soplado por inyección es preferido en los casos en que se requiere un preciso control dimensional, minimizar el desperdicio (*scrap*) y en general irregularidades en la pieza. Las botellas de PET para aguas y bebidas carbonatadas son el ejemplo más común de este tipo de moldeo por soplado.

Si el moldeo es complementado mecánicamente con el estiramiento de las piezas (*stretching*) se logran botellas con mejores propiedades mecánicas. La explicación es que el estiramiento promueve una mayor relación volumen de láminas a volumen de esferulitas en la cristalización inducida del PET.

El moldeo de soplado por extrusión se usa en los casos en que la pieza es esbelta (alta relación largo vs. diámetro) y para productos con manijas (envases de leche de 4 litros, por ejemplo).

## II.5 MOLDEO POR COMPRESION

Este proceso es el más antiguo y, quizá, rudimentario del procesamiento de materiales poliméricos. Hoy, al igual que en sus orígenes, se emplea mayoritariamente para termosets, y muy poco para termoplásticos. Al presente, el moldeo por inyección ha reemplazado buena parte de las antiguas aplicaciones del moldeo por compresión, debido fundamentalmente a los avances registrados en el manipuleo de los materiales y en la automatización.

Sin embargo, el moldeo por compresión presenta ventajas en el procesamiento de polímeros reforzados con fibra, del tipo del PRFV. Debido a los modestos niveles de tensiones y de deformación en el moldeo por compresión, las fibras del refuerzo en el compuesto no son dañadas. Además este proceso permite el procesamiento tanto de fibras largas como de altas concentraciones de fibras.

En el moldeo por compresión, la mezcla de grados de polímeros, la carga y los aditivos, es compuesta directamente y comprimida contra las paredes del molde (y llenándolo) empleando platinas o *platens* (placas calefaccionadas) con las que se aplica presión hidráulica. En términos de la comparación con procesos metalúrgicos, es similar al estampado de piezas metálicas planas.

## II.6 TERMOFORMADO

Este proceso incluye el ablandamiento por calentamiento de hojas del termoplástico seguido de su conformado por la aplicación de vacío, presión o métodos mecánicos.

a) Mediante vacío: la hoja de termoplástico engrampada en un marco es ablandada por calentamiento desde el marco y luego fijada al borde del molde.

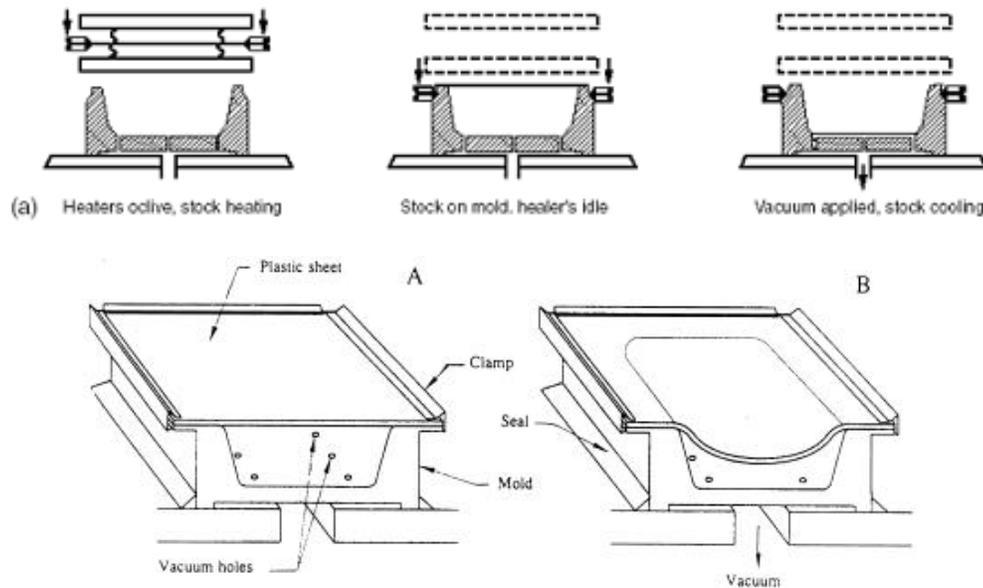


Figura 34-a

Al hacer vacío dentro del molde, desde el extremo inferior de éste, la hoja ablandada es forzada por la presión atmosférica encima de ella a adoptar la forma del molde, en el que se la deja bajo efecto del vacío hasta que se enfríe y solidifique. (Figura 34-a)

Este esquema suele producir un fenómeno con efectos no deseado: al aplicar el vacío, la hoja puede tocar las paredes laterales (verticales) y comenzar a enfriarse antes de haber modificado su espesor (fluir) en forma homogénea para tener en cuenta que la superficie total de la pieza moldeada es mayor que la de la hoja inicial.

El efecto indeseado es que las paredes laterales de la pieza son mas gruesas que el fondo horizontal ya que este contiene menos material por  $\text{cm}^2$  final que los laterales. Esto puede corregirse con el agregado de una pieza (pistón corrector calefactor) que permite:

a) que toda la superficie de la hoja permanezca a la misma temperatura mientras adquiere la forma del molde; y

b) si es necesario puede hacer aporte de material llevando una hoja más chica y de menor espesor, también calefaccionada, para reforzar el fondo (Figura 34-b)

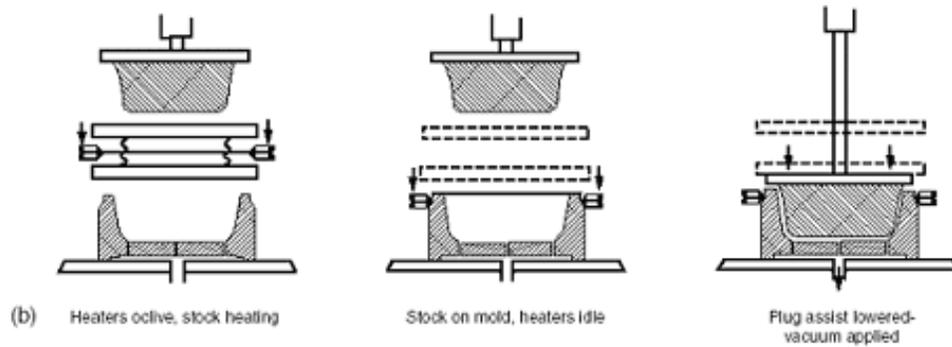


Figura 34-b

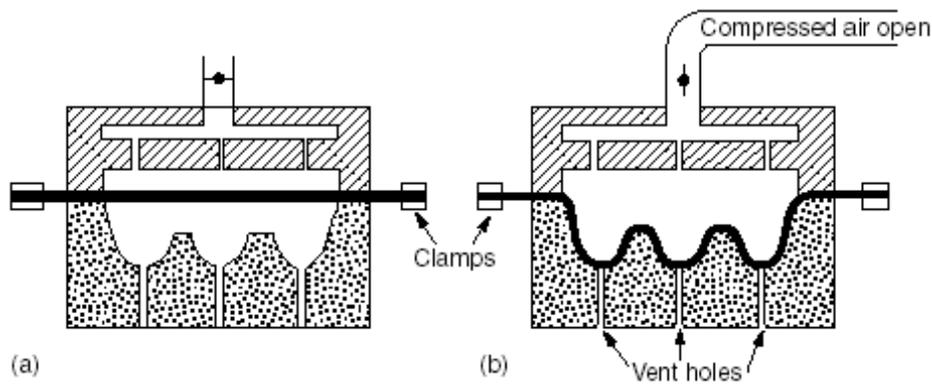


Figura 35

Cuando se lo compararon el proceso al vacío, el de presión permite ciclos de producción mas rápidos, mejor precisión en el diseño de las piezas y mayor control dimensional.

b) Mediante dispositivo mecánico: la hoja de termoplástico engrampada en un marco tipo campana, cerrado, es ablandada por calentamiento y fijada al borde del molde macho. La conformación se produce por compresión desde el molde hembra, como se indica en la Figura 36.

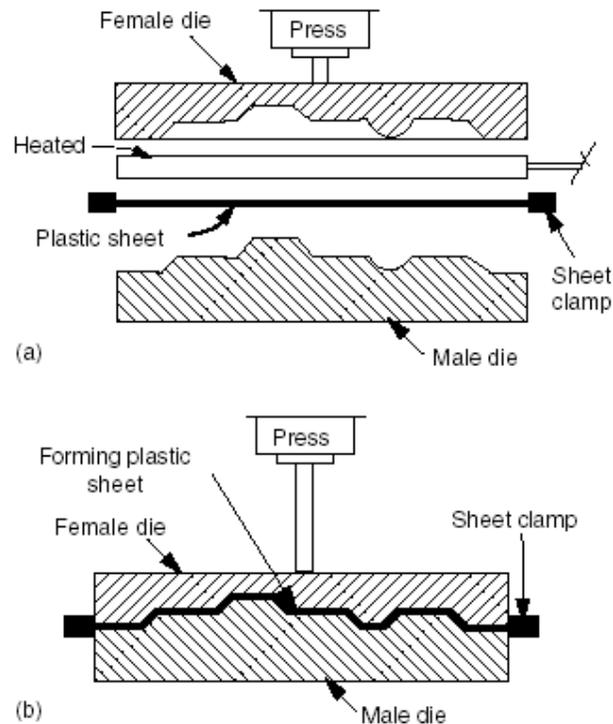


Figura 36

En un análisis general para el termo formado incluyendo todas sus variantes, este proceso compite con los moldeos por soplado y por inyección. Con respecto a ellos, el termoformado ofrece mucho menores costos en las máquinas para el conformado y menores costos de los moldes, en particular cuando se trata e producir piezas de gran superficie y pequeño espesor abiertas.

Sus mayores desventajas se ubican en el hecho de que la variedad de formas de productos posibles es muy limitada. También lo es su capacidad de lograr distribuciones homogéneas de espesores. Es casi nula la posibilidad de lograr efectos de orientación molecular (baja o inexistente tensión de corte) y de alcanzar controles precisos de las temperaturas, lo que puede resultar en recuperación (deshacerse) de la deformación, y en encogimiento de las piezas.

En la habitual comparación con metalurgia, el termoformado es similar al conformado de hojas de metal, si bien las velocidades de deformación son mayores para los materiales poliméricos.

## II.7 MOLDEO POR ROTACION

Este proceso se realiza colocando en el interior de un molde hueco y con capacidad de ser calefaccionado, los gránulos de la resina a conformar (Figura 37).

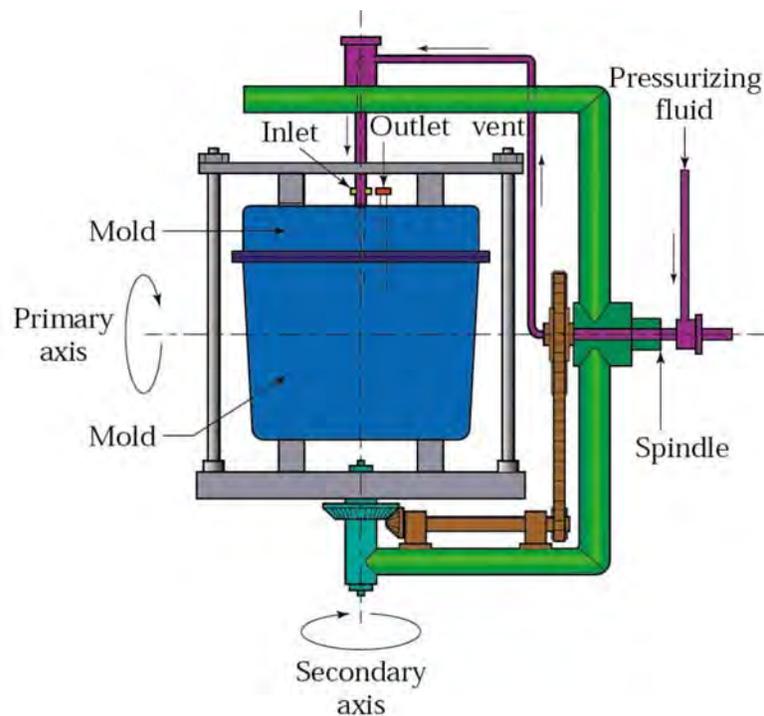


Figura 37

Para llenar el molde, este se desarma en dos mitades; en una de ellas se coloca la resina, y luego la otra es ensamblada con la primera, el conjunto se fija con grampas, y el molde es colocado en el dispositivo de control de temperatura.

El conjunto es luego sujeto a rotación según dos ejes (ver la figura). Por el efecto combinado de las fuerzas de gravedad y centrífugas, el polímero fundido coalesce y forma una capa homogénea sobre la superficie interior del molde. Este es luego enfriado y posteriormente abierto para retirar el producto. En la jerga, el proceso de fundido y coalescencia del polímero se denomina sinterizado (*sintering*).

El equipo es relativamente barato y los moldes simples. Este moldeo es generalmente usado para la construcción de grandes tanques (hasta 100 m<sup>3</sup>), juguetes y partes que requieren frecuentes cambios en su diseño (por lo barato de sus moldes).

Los ciclos tienen tiempos del orden de los 15 a 30 minutos (son largos)

**Notas sobre**

# **EXTRUSION**

Nota Importante: buena parte de estas notas está basada en el material de curso elaborado por la Dra. **María Isabel BELTRAN RICO**, del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Alicante, a quién agradecemos su disposición y autorización para usarlo.

## INDICE

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN.....  | 3  |
| 2. COMPONENTES DE LA EXTRUSORA.....                         | 7  |
| 2.1. El tornillo de extrusión.....                          | 7  |
| 2.2. Cilindro.....  | 8  |
| 2.3. Garganta de alimentación.....                          | 9  |
| 2.4. Tolva.....   | 10 |
| 2.5. Plato rompedor y filtros.....                          | 11 |
| 2.6. Cabezal y Boquilla.....                                | 12 |
| 3. ESPECIFICACIONES DE LA MÁQUINA.....                      | 14 |
| 4. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA EXTRUSORA.....     | 16 |
| 4.1 Transporte de sólidos (zona de alimentación).....       | 16 |
| 4.1.1. Transporte de sólidos en la tolva.....               | 17 |
| 4.1.2. Transporte de sólidos en el cilindro.....            | 18 |
| 4.2. Fusión (zona de transición).....                       | 22 |
| 4.3. Transporte del fundido (zona de dosificado).....       | 26 |
| 4.4. Mezclado.....  | 34 |
| 4.4.1. Mezclador de agujas.....                             | 34 |
| 4.4.2. Mezclador de anillo.....                             | 35 |
| 4.4.3. Mezclador con filetes desiguales.....                | 35 |
| 4.4.4. Mezcladores con filetes secundarios.....             | 36 |
| 4.5. Desgasificado.....                                     | 36 |
| 4.6. Conformado.....  | 37 |
| 4.6.1. Tensionado.....                                      | 38 |
| 4.6.2. Relajación.....                                      | 38 |
| 4.6.3. Enfriamiento.....                                    | 39 |
| 5. MODELADO DE LA ZONA DE DOSIFICACIÓN.....                 | 40 |
| 5.1 Obtención de las ecuaciones.....                        | 40 |
| 5.1.1. Ecuaciones de velocidad.....                         | 40 |
| 5.1.2. Cálculo del caudal.....                              | 43 |
| 5.2. Influencia de variables.....                           | 47 |
| 5.2.1. Efecto de las dimensiones del tornillo.....          | 47 |
| 5.2.2. Efecto de la viscosidad del polímero.....            | 49 |
| 5.2.3. Efecto de las condiciones de operación.....          | 49 |
| 5.2.4 Efecto de la restricción de la boquilla.....          | 50 |
| 6. LÍNEAS DE EXTRUSIÓN.....                                 | 54 |
| 6.1. Líneas de extrusión de tubos, tuberías y perfiles..... | 56 |
| 6.2. Líneas de mezclado.....                                | 57 |
| 6.3. Líneas de películas y láminas.....                     | 58 |
| 6.3.1. Proceso con pila de rodillos.....                    | 58 |
| 6.3.2. Proceso con sistema de rodillos fríos.....           | 60 |
| 6.3.3. Líneas de películas sopladas.....                    | 61 |
| 6.3.4. Coextrusión.....                                     | 63 |
| 6.3.5. Recubrimientos.....                                  | 64 |
| 6.4. Líneas para la producción de fibras y filamentos.....  | 65 |
| BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA.....                               | 66 |

## 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.

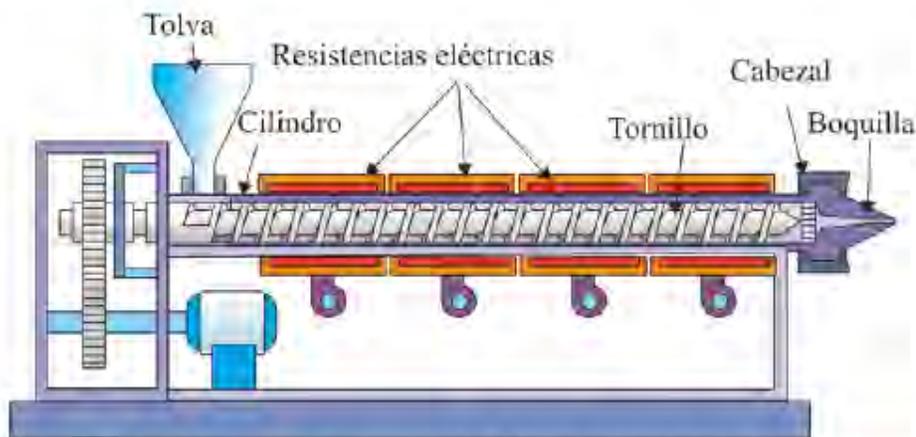
En el proceso de extrusión, por lo general, el polímero se alimenta en forma sólida y sale de la extrusora en estado fundido. En algunas ocasiones el polímero se puede alimentar fundido, procedente de un reactor. En este caso la extrusora actúa como una bomba, proporcionando la presión necesaria para 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 que 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 1 muestra, como ejemplo, una representación esquemática de una extrusora típica de husillo único.



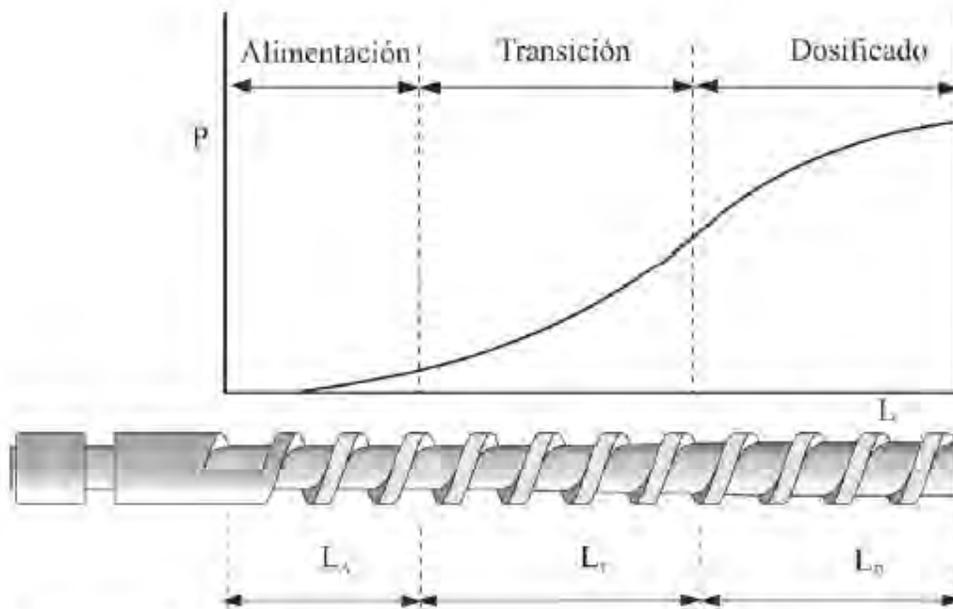
**Figura 1.** Representación esquemática de una extrusora de husillo sencillo.

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.

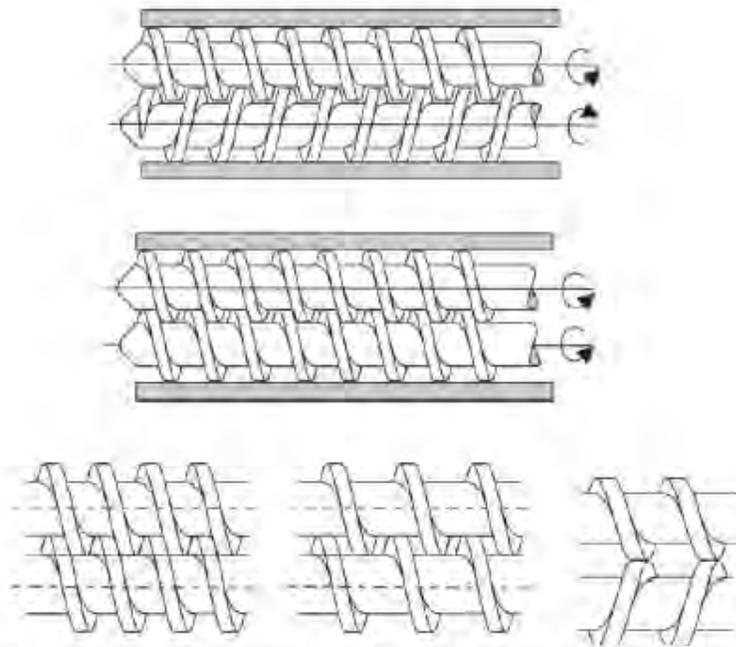
Todas las extrusoras se consideran divididas en tres zonas que se pueden apreciar en la figura 2, junto con la evolución de la presión a lo largo de la extrusora. La zona de alimentación es la más cercana a la tolva, en la cual la profundidad del canal del tornillo es máxima. Tiene como objetivo principal 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 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 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.

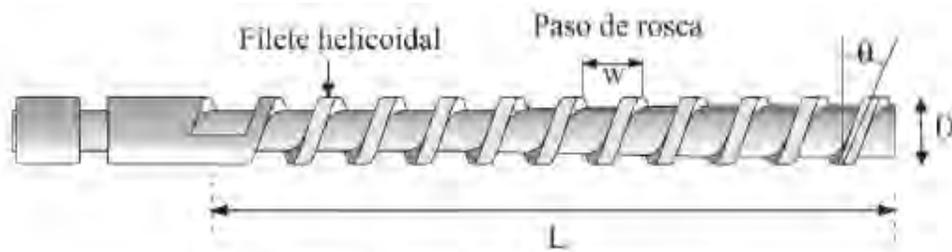


**Figura 3** Disposición posible de los husillos en las extrusoras de doble husillo: giro contrario y giro en paralelo: diferentes grados de interpenetración de los tornillos.

## 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 ). 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** . 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 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 5** Sistema cilindro de calefacción-tornillos

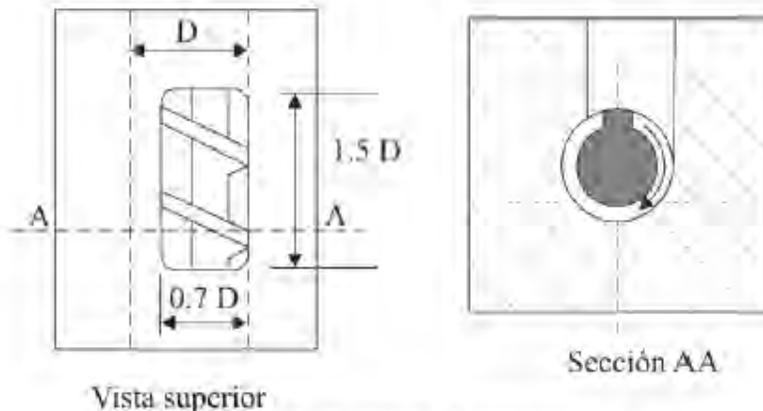
El cilindro por lo general posee sistemas de transferencia de calor. El calentamiento se puede realizar mediante resistencias eléctricas circulares localizadas en toda su longitud como se muestra en la figura 5, y también, aunque es menos usual, mediante radiación o encamisado con fluidos refrigerantes 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 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 6), y suele estar desplazada del eje del tornillo para facilitar la caída del material a la máquina.



**Figura 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 7). Se diseñan con un volumen que permita albergar material para 2 horas de trabajo.

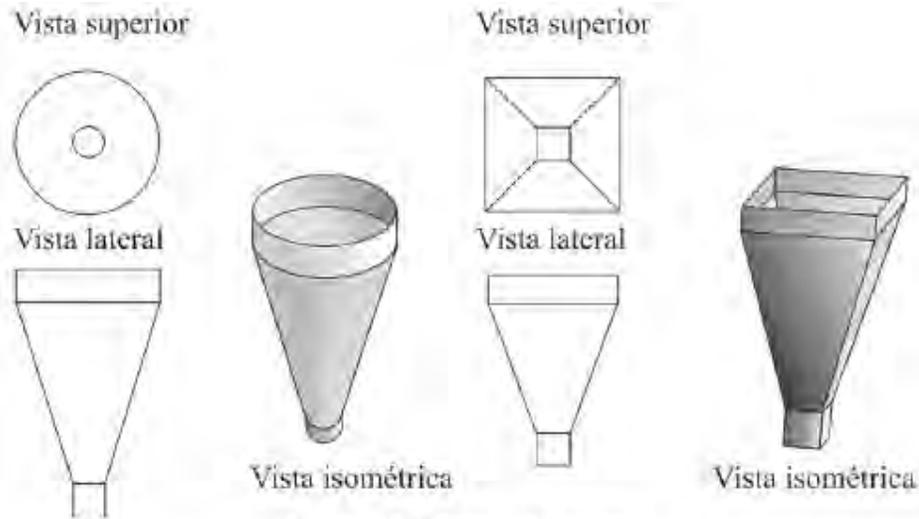


Figura 7. Tipos de tolvas.

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 8.

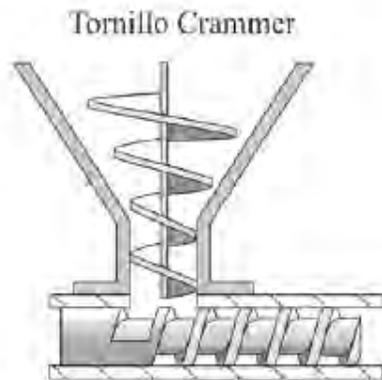


Figura 8. Ejemplo de un tornillo de alimentación.

## 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 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 extruido. 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.

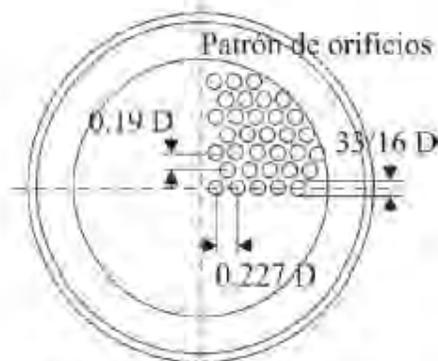


Figura 9. Plato rompedor.

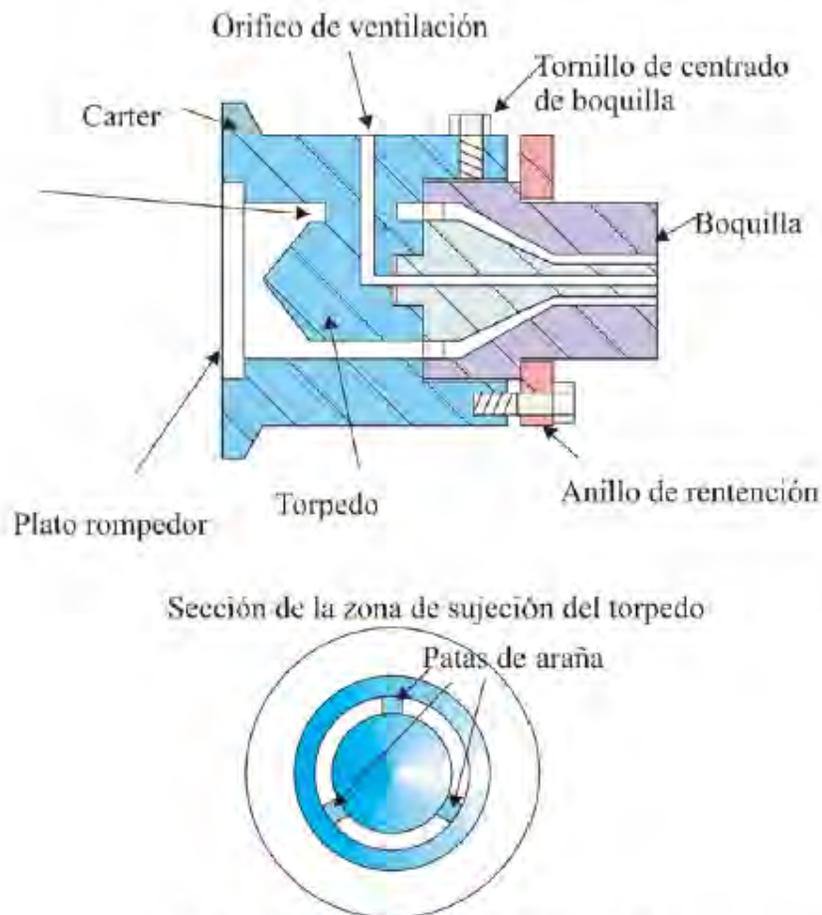
## 2.6. CABEZAL Y BOQUILLA

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 10 muestra un sistema cabezal-boquilla de forma anular. En la figura el material fluye del cilindro a la boquilla a través del torpedito, situado en el cabezal. La sección transversal de los soportes del torpedito 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 10 (por ejemplo, para la fabricación de

tuberías o recubrimientos de materiales cilíndricos), boquillas planas como la de la figura 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 11 (corte de boquilla plana): la primera parte es el canal de entrada, luego el distribuidor y a continuación la zona de salida.



**Figura 11.** Boquilla anular y cabezal.



**Figura 11.** Partes diferenciadas en una boquilla de extrusión.

Las dimensiones de la boquilla no son exactamente las mismas que las del producto extruido. 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 12.

1. Tornillo tipo nylon



2. Tornillo tipo polietileno



3. Tornillo de usos generales



4. Tornillo con cabeza plastificadora



5. Tornillo tipo estireno con cabeza plastificadora muleteada



6. Tornillo con punta cónica y profundidad decreciente



**Figura 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 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".

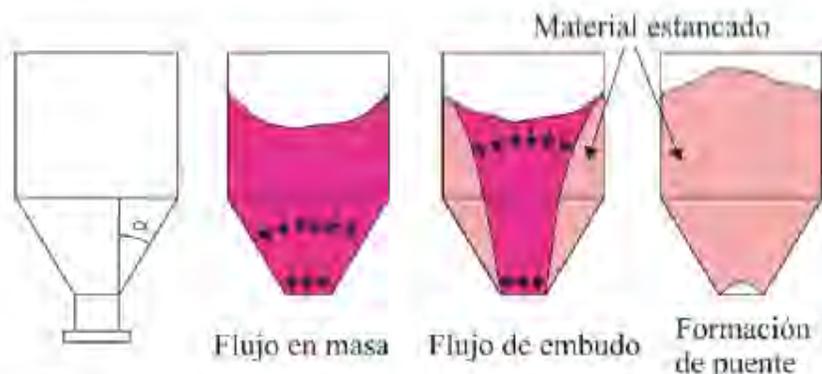


Figura 13 Flujo del material en una tolva de alimentación.

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 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 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 puentado.

#### *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 14.

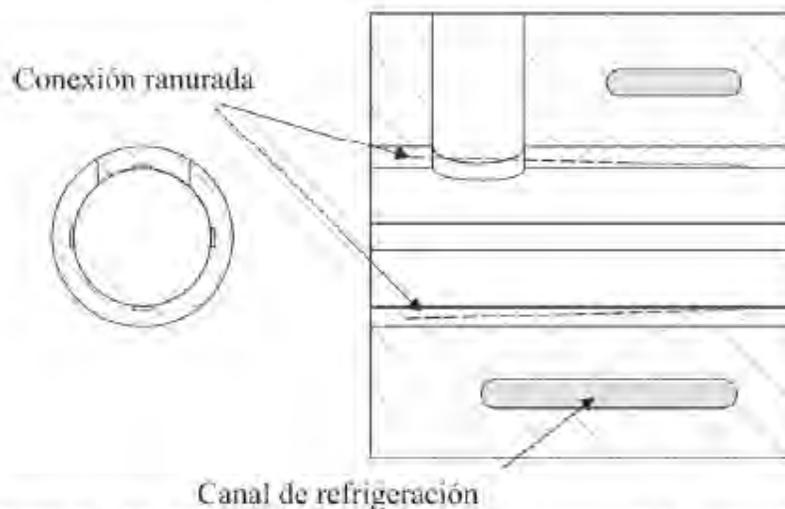
- Hay una mayor estabilidad en el caudal que proporciona el cilindro estriado, de modo que las oscilaciones de la presión a lo largo de la extrusora afectan más al caudal con el cilindro liso que con el estriado.



**Figura 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 estrias, obstruyéndolas y disminuyendo así la eficiencia del proceso. Además el material que queda atrapado en las estrias 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 estrias se pueden practicar directamente sobre el cilindro o sobre la garganta de alimentación, en aquellas extrusoras que dispongan de esta. En cualquier caso se practican en la dirección axial y tienen una longitud de varios diámetros, como se puede observar en la figura 15.



**Figura 15.** Sección de una garganta de alimentación ranurada.

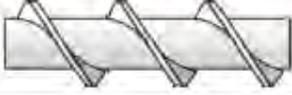
Otra forma de mejorar el transporte de sólidos inducido por arrastre es disminuir la fricción entre el tornillo y el material. Para conseguirlo se podría aumentar la temperatura del tornillo, si bien esto es poco frecuente pues la mayoría de los tornillos son macizos, como se comentó anteriormente. En 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 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 1** Diseño del tornillo para reducir el coeficiente de fricción entre el material y el tornillo.

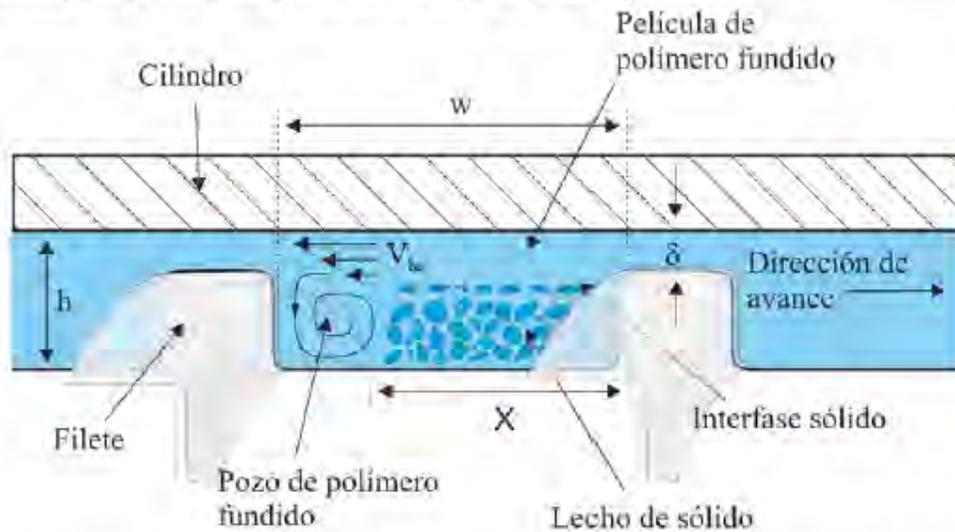
| Características del tornillo | Diseño adecuado   | Diseño defectuoso   |
|------------------------------|---|---|
| Número de filetes            | Sencillo<br> | Doble<br>   |
| Ángulo del filete            | Grande<br>   | Pequeño<br> |
| Radio del flanco del filete  | Grande<br>   | Pequeño<br> |

#### 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 16 muestra un corte transversal de la zona de transición.

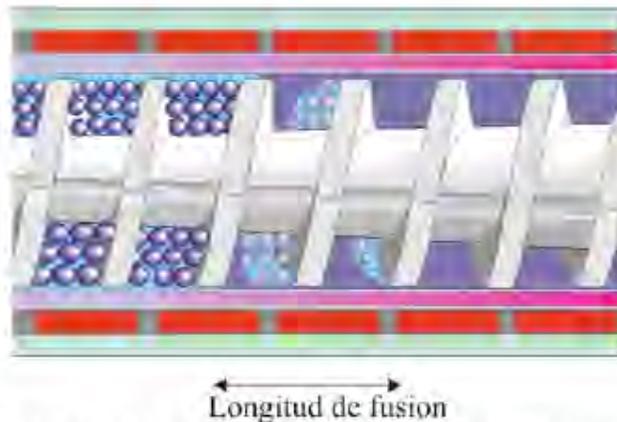


**Figura 16.** Corte transversal de la extrusora en la zona de transición.

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 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 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.

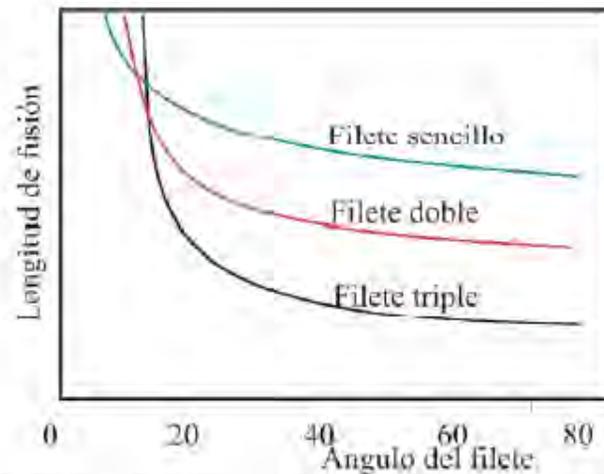
Por otro lado, un aumento de la temperatura del cilindro implicará en principio un aumento del flujo de calor por conducción, y por tanto aumento de la velocidad de fusión, pero por otra parte al aumentar la temperatura disminuirá la viscosidad del material y, por tanto, la generación de calor por disipación 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 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 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 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 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)

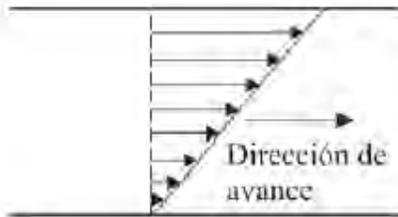
La zona de dosificado se inicia en el punto en que finaliza la fusión, es decir, en el punto en que todas las partículas de polímero han fundido. De hecho, la profundidad del canal es uniforme en la zona de dosificado, por lo que todo el lecho sólido debe haber desaparecido o en caso contrario el aire 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:

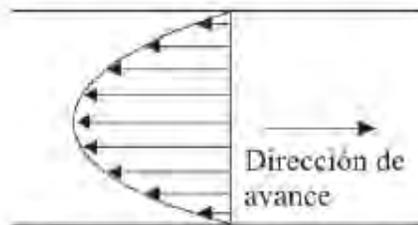
$$Q_{\text{total}} = Q_D + Q_P + Q_{\text{pérdida}}$$

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 20), y si la superficie en movimiento tuviera una velocidad  $V$ , la velocidad media de avance el material en el canal sería  $V/2$ .



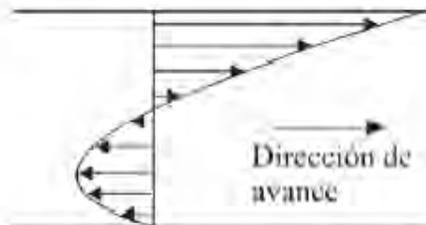
**Figura 20.** Perfil de velocidades originado por el flujo de arrastre.

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 21.



**Figura 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 22.

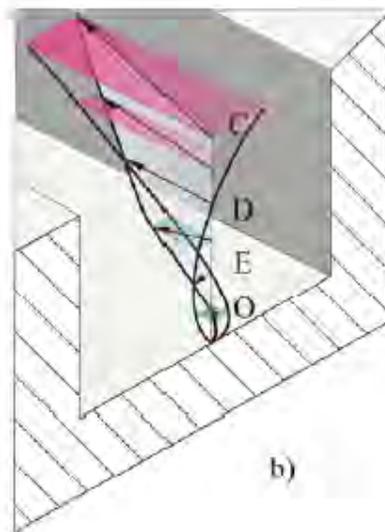
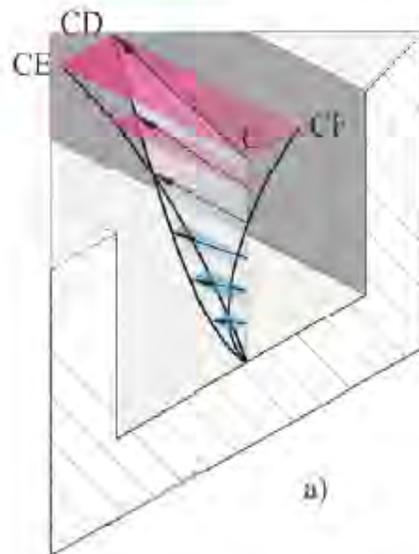


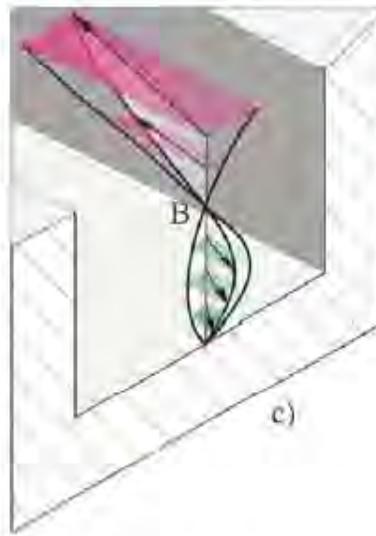
**Figura 22.** Perfil de velocidad del flujo total.

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 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 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 20, mientras que el perfil en la dirección X será el representado en la figura 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 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

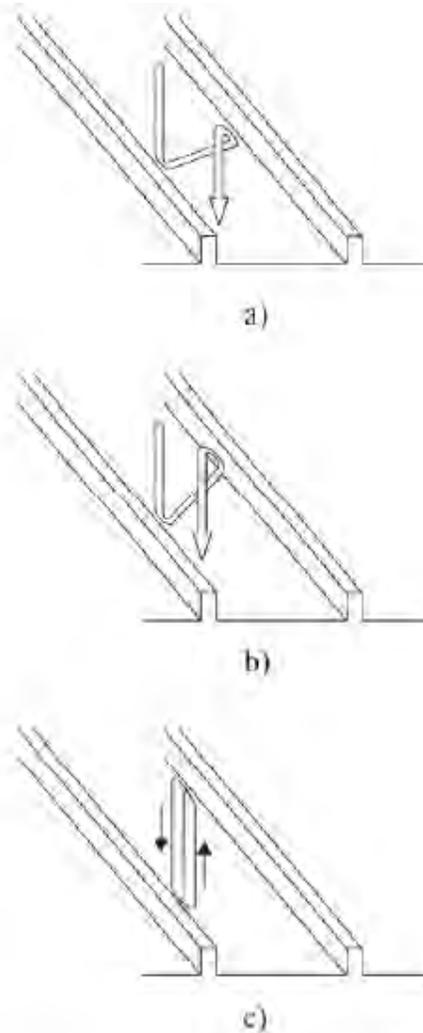
canal (punto O) lo hace en dirección opuesta. Por otra parte el material que se encuentra en los punto D y E sólo presenta una componente de velocidad en las direcciones axial y longitudinal, respectivamente. En el esquema (c), la producción de la extrusora está totalmente bloqueada y el flujo de polímero en la dirección axial del canal es análogo al flujo transversal excepto que sus velocidades son mayores; obsérvese que el punto B presenta una velocidad cero en dirección axial (Z) y en dirección transversal (X).





**Figura 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.

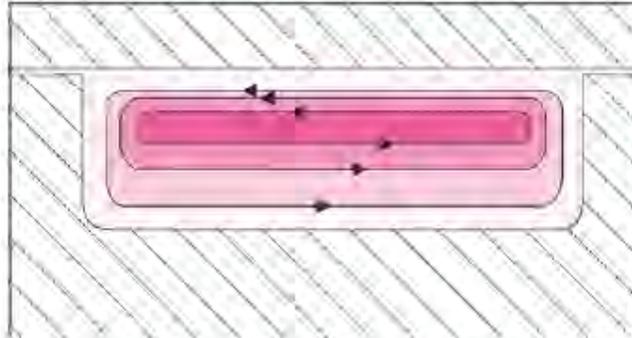
La figura 24 muestra otra representación de lo que ocurre en las tres situaciones planteadas. Si para el caso normal (b), seguimos el movimiento de una porción de fluido que se encuentra cerca de la superficie del cilindro, éste avanzará a lo largo de esta superficie hasta que se encuentre con la pared 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 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 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 23b) sufrirá un movimiento de avance hacia la boquilla mucho más lento. En la

figura 25 se observa un corte transversal del canal, donde la temperatura en las diferentes zonas del material se representa en diferentes colores.



**Figura 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 extruido. 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 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

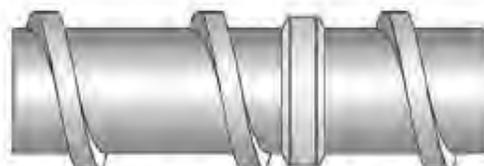


Orientación axial

**Figura 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 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 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 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 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 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 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 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.

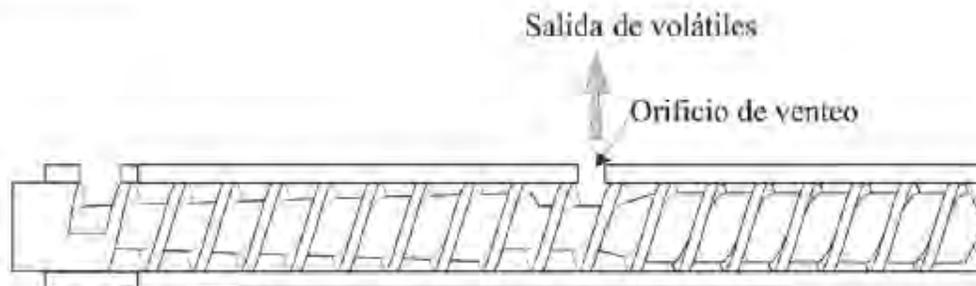


Figura 30. Extrusora con sección de desgasificado.

#### 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 31 se muestra el hinchamiento que sufriría un material extruido con sección cuadrada.

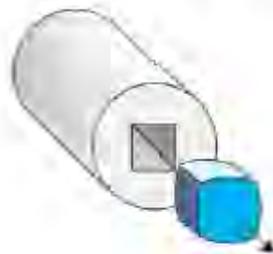
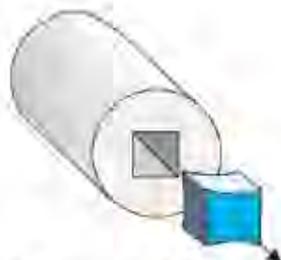


Figura 31. Hinchamiento debido a la relajación de un material de sección cuadrada.

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 extruido 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 32 se muestra la contracción que sufriría una pieza de sección cuadrada debido a la diferente velocidad de enfriamiento entre las distintas partes.



**Figura 32.** Contracción debida al enfriamiento de un material de sección cuadrada.

## 5. MODELADO DE LA ZONA DE DOSIFICACIÓN

### 5.1 OBTENCIÓN DE LAS ECUACIONES

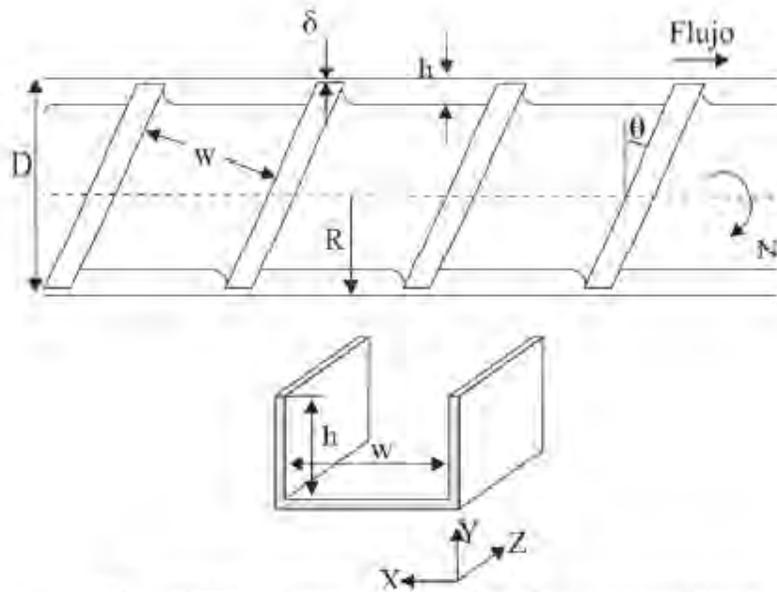
#### 5.1.1. Ecuaciones de velocidad

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 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 33.



**Figura 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 extruido 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:

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

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

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 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 34 podemos escribir la siguiente ecuación:

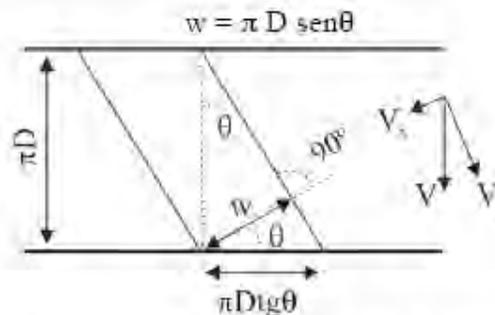


Figura 34 Tornillo cortado a lo largo de su eje y desenrollado.

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:

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

$$v_x = V \operatorname{sen}\theta = \pi D N \operatorname{sen}\theta$$

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:

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

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:

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

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:

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

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

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

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 35), y tiene gran utilidad en la predicción del caudal de salida de una extrusora.

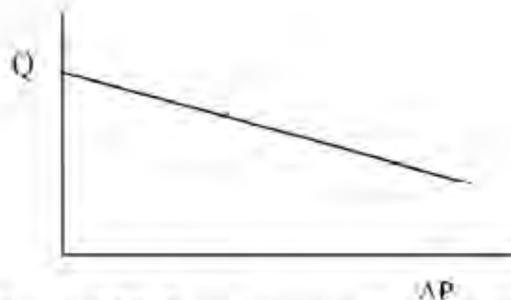


Figura 35. Recta operativa de un tornillo.

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

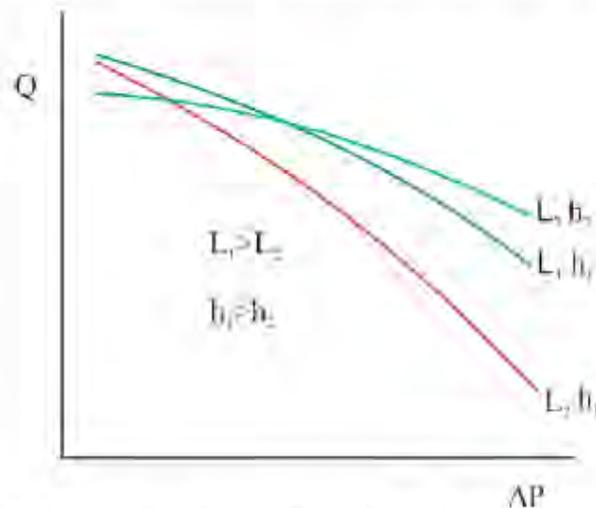
La longitud del tornillo no afecta al flujo de arrastre pero sí que afecta al flujo de presión. Si la zona de alimentación y transición lo permiten, un aumento en la longitud del tornillo conlleva una disminución del flujo de presión. El aumento de la longitud del tornillo se refleja en la representación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

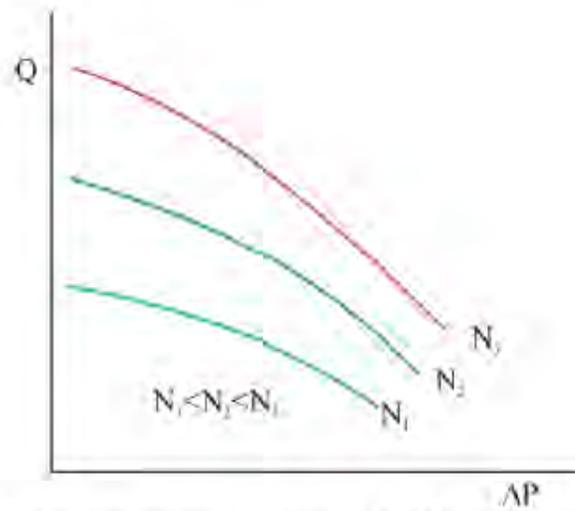
La ecuación (7) sugiere que un incremento en la viscosidad supone una disminución de la pendiente de las rectas. Sin embargo, una mayor viscosidad del polímero supone también un mayor consumo energético, por lo que en ocasiones resultante interesante utilizar materiales de baja viscosidad. La disminución 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 37



**Figura 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 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-Poiseille.

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

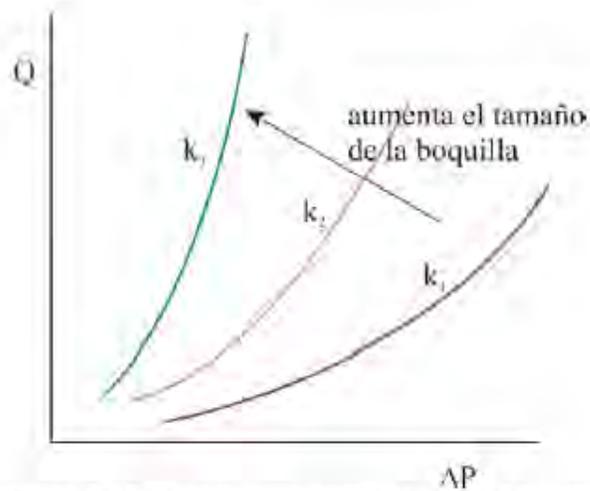
$$k = \frac{wh^3}{12L}$$

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

- Boquilla anular, de diámetro interno  $R_0$ , diámetro externo  $R_1$  y longitud  $L$  (obtención de tubos)

$$k = \frac{\pi(R_0 + R_1)(R_0 - R_1)^3}{12L}$$

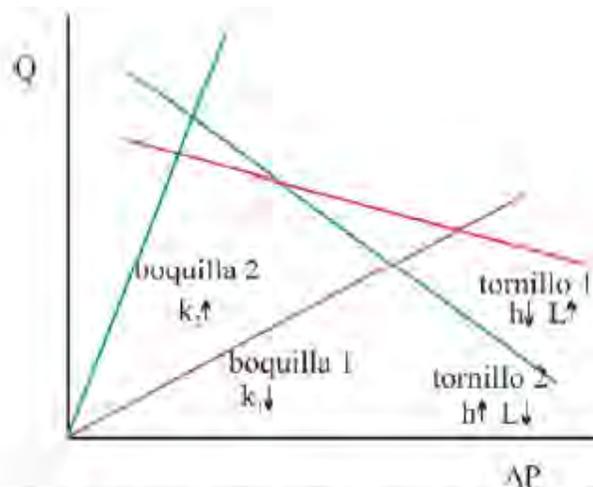
La representación de la ecuación (9) en un diagrama  $Q$  frente a  $\Delta P$  da una haz de rectas que pasan por el origen para distintos valores de  $k$ , es decir, para distintos tamaños y geometrías de la boquilla. Las rectas son conocidas como rectas operativas o líneas características de la boquilla. Esta representación se ilustra en la figura 38. Cada una de estas líneas representa el flujo de material a través de una boquilla particular.



**Figura 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 extruido. En la figura 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 39



**Figura 39.** Rectas operativas de un conjunto de boquillas y tornillos.

La recta característica del tornillo 1 en la figura 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 extruido. Esto quiere decir que el tornillo 2 da menor rendimiento en material extruido 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 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 extruido para unas determinadas condiciones de trabajo (N) y un determinado material ( $\eta$ ).

## 6. LÍNEAS DE EXTRUSIÓN

Para fabricar un producto extruido, 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 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 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.

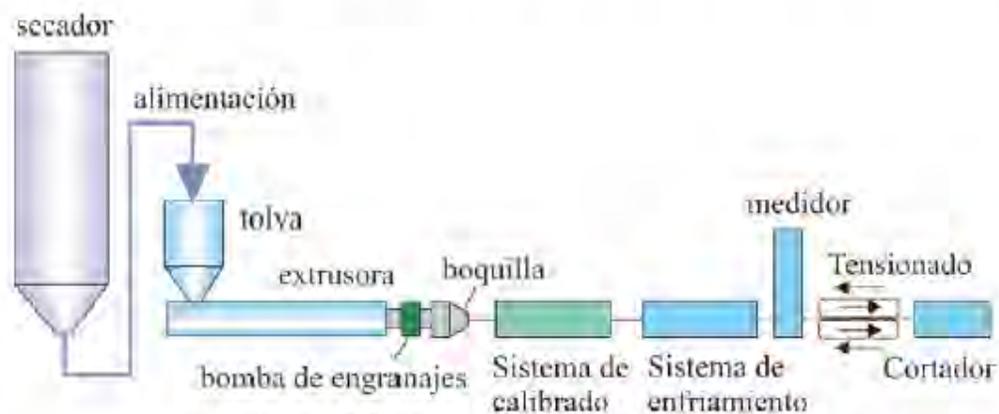


Figura 40 Línea de extrusión de tubos.

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 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 41.

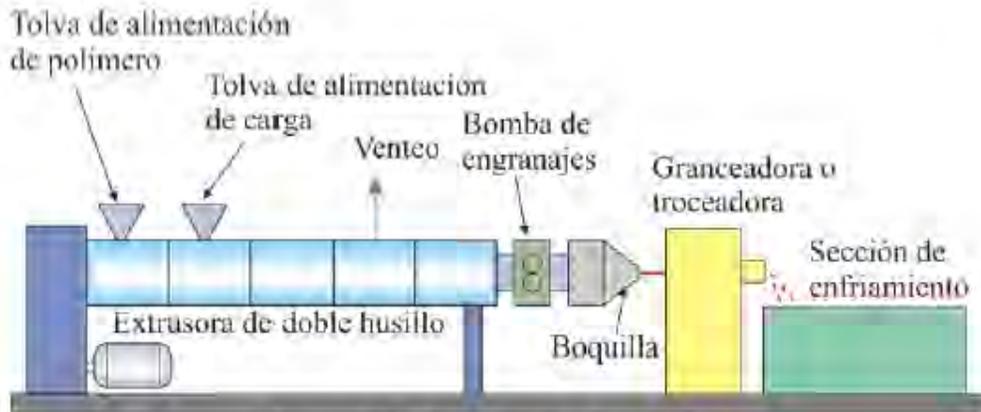


Figura 41. Línea típica de mezclado.

### 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 42 se emplea para la fabricación de láminas que pueden llegar a tener hasta 50 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 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 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.

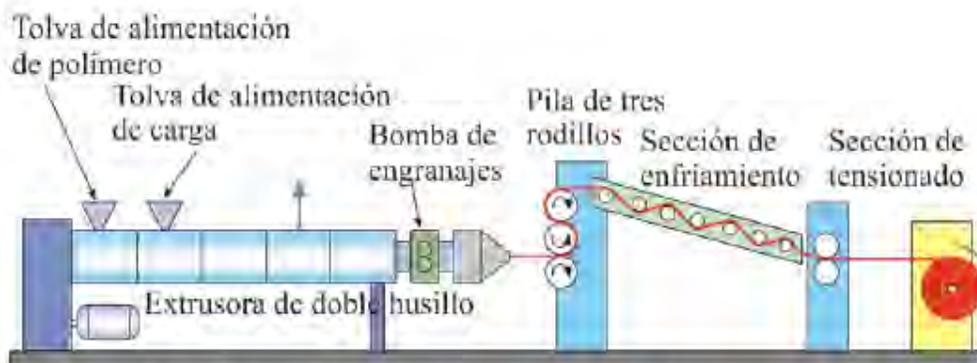


Figura 42. Proceso con pila de rodillos para la fabricación de láminas.

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 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.

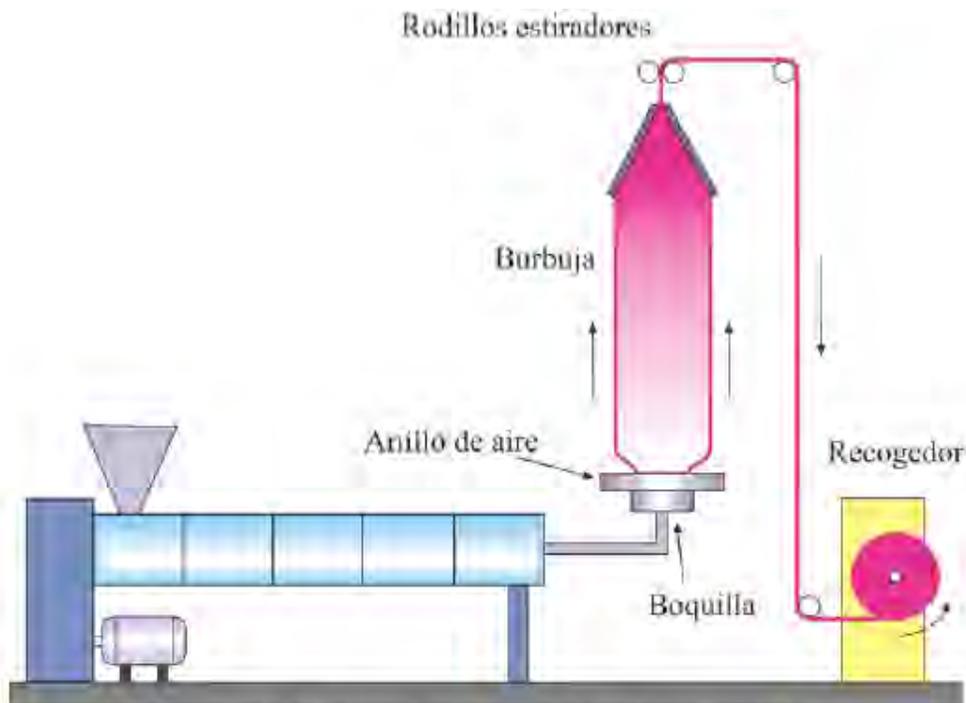
Mediante este proceso se pueden obtener productos que son prácticamente transparentes, aun en el caso de emplear materiales cristalinos, gracias al rápido enfriamiento que se produce en los rodillos conforme el material sale de la máquina. El proceso de rodillos fríos se emplea para la fabricación de 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 soplad*

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 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 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.

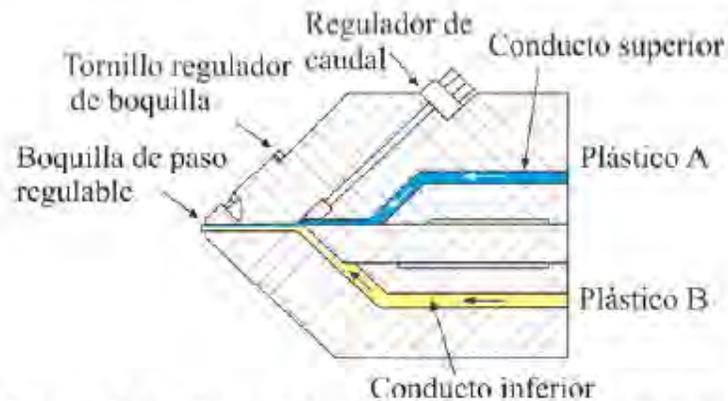
#### **6.3.4. Coextrusión**

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 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.



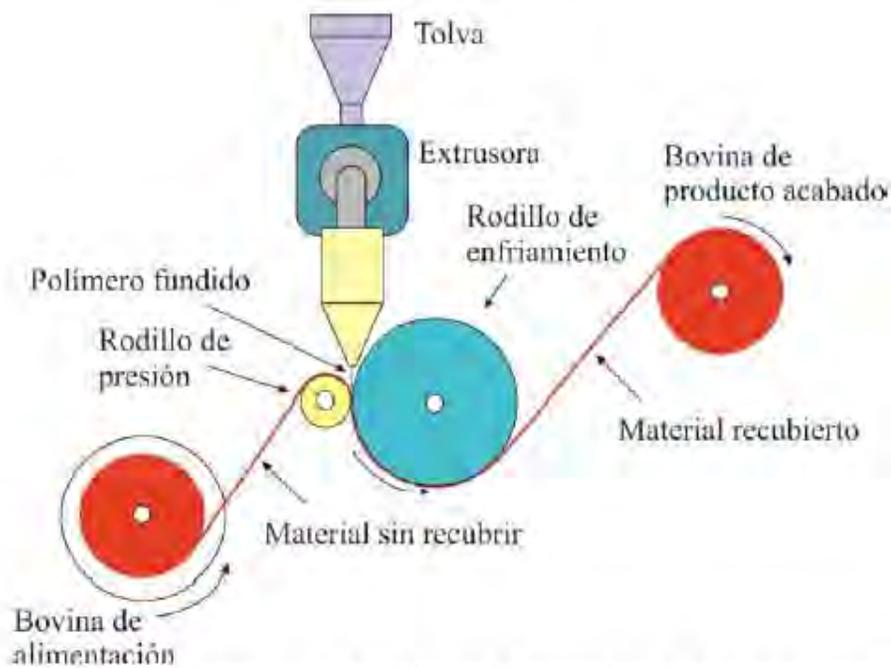
**Figura 44** Ejemplo de una boquilla de multiconducto.

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 45 muestra un esquema de este sistema.

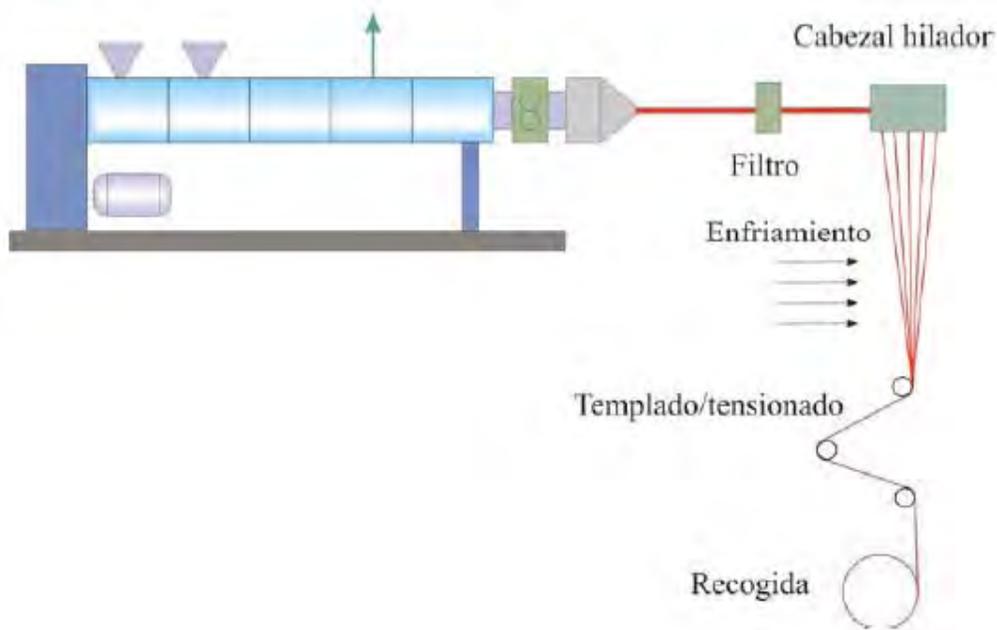
Este tipo de procesos se emplea para recubrimiento de madera, aluminio, acero, papel, cartón y los plásticos más habituales empleados son PVC plastificado y PE.



**Figura 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 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 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.*