

TEMA 3. BASES DEL PROCESADO DE POLÍMEROS

1. PRINCIPALES TÉCNICAS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS	66
1.1. Extrusión.....	66
1.2. Inyección.....	67
1.3. Moldeo por soplado	68
1.4. Moldeo rotacional	69
1.5. Moldeo por compresión.....	70
1.6. Termoconformado	71
2. OPERACIONES UNITARIAS EN EL PROCESADO DE POLÍMEROS.....	72
2.1. Manejo de sólidos	72
2.2. Calentamiento y fusión de polímeros	73
2.3. Flujo a través de canales	74
2.4. Solidificación o endurecimiento	75
2.4.1. Solidificación química.....	75
2.4.2. Enfriamiento de termoplásticos	75
BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA	76

Resumen

En este tema se describen brevemente las técnicas de transformación que se tratarán con mayor detalle en los temas siguientes, así como cada una de las operaciones unitarias comunes a todas las técnicas de transformación.

1. PRINCIPALES TÉCNICAS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

En los siguientes temas se van a estudiar los métodos más empleados para la transformación de plásticos, como son la extrusión, inyección, compresión, moldeo rotacional, soplado y termoconformado. A continuación se da una visión general de estos procesos de transformación.

1.1. EXTRUSIÓN

El proceso de extrusión se utiliza ampliamente en la industria de plásticos para la producción en continuo de piezas con sección constante de materiales termoplásticos (y algunos termoestables). Se utiliza también para recubrimiento de superficies y en el moldeo por soplado y termoconformado para la obtención de las preformas. Consiste en obligar a un material fundido a pasar a través de una boquilla o matriz que tiene la forma adecuada, para obtener el diseño deseado. El equipo debe ser capaz de proporcionar sobre el material suficiente presión de una forma continua, uniforme y reblandecer y acondicionar el material de forma que pueda ser extruido. Para ello, se requiere de una máquina compuesta de un cilindro y un husillo o tornillo de plastificación que gira dentro del cilindro, como se muestra en la figura 3.1.

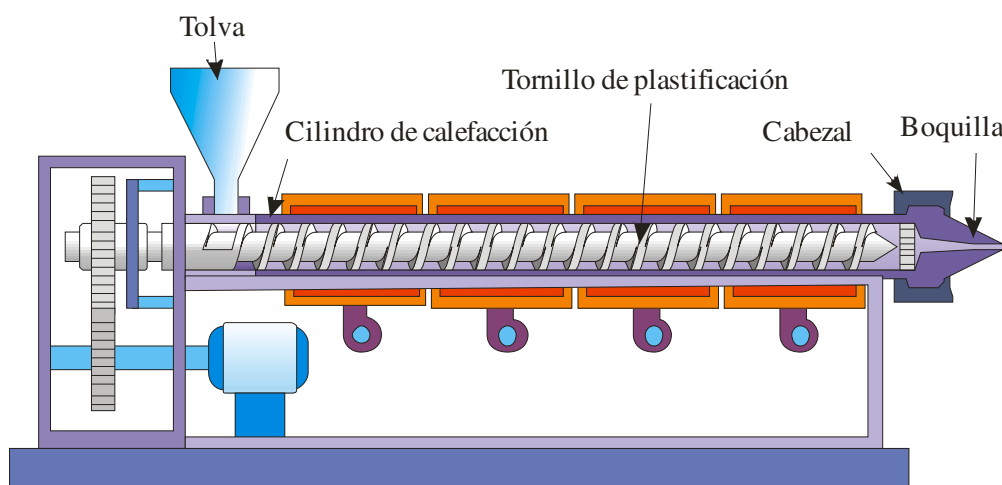


Figura 3.1. Máquina convencional de extrusión con husillo.

El material granulado o en forma de polvo se carga en una tolva, desde la cual se alimenta al cilindro, donde el husillo se encarga de introducirlo, transportarlo hacia adelante y comprimirlo. El calentamiento hasta la fusión se realiza desde la cara exterior del cilindro, mediante elementos calefactores y desde el interior por conversión del esfuerzo en calor. De esta forma el material termoplástico funde (se plastifica) y al salir del cilindro a través de una boquilla recibe la forma de ésta. En una línea completa de extrusión, además debe existir un sistema de enfriamiento del material que sale de la máquina, así como equipos de tensionado y recogida. El resultado es un perfil (a veces se le llama semifabricado o preforma).

1.2. INYECCIÓN

El moldeo por inyección es, quizás, el método de moldeo más característico de la industria de plásticos. Consiste básicamente en fundir un material plástico en condiciones adecuadas e introducirlo a presión en las cavidades de un molde donde se enfría hasta una temperatura apta para que las piezas puedan ser extraídas sin deformarse. En el moldeo por inyección son de gran importancia las características de los polímeros tales como peso molecular y distribución, configuración química y morfología, cristalinidad, estabilidad, etc. El comportamiento reológico de los materiales es fundamental en el moldeo por inyección; puede darse el caso, por ejemplo, de que un plástico demasiado viscoso no llene el molde a velocidades de cizalla bajas, pero que pueda llenarlo si se modifican las condiciones de procesado.

El proceso, en lo que a moldeo se refiere, puede dividirse en dos fases, en la primera tiene lugar la fusión del material y en la segunda la inyección en el molde. En las máquinas convencionales como la de la figura 3.2, el material de moldeo, en forma de gránulos o granza, entra en el cilindro de calefacción a través de una tolva de alimentación situada en la parte posterior del cilindro. El material se calienta y funde en el cilindro de calefacción, al mismo tiempo que circula hacia la parte anterior de éste, gracias al movimiento rotatorio del tornillo de plastificación que se encuentra en el interior del cilindro, de forma similar a como ocurre en el proceso de extrusión. Sin embargo, en el proceso de inyección el material plastificado va quedando acumulado en la parte anterior del tornillo, para lo cual, el tornillo debe retroceder lentamente mientras gira. Una vez que hay suficiente cantidad de material fundido acumulado delante del tornillo, se detiene el giro y el tornillo realiza un movimiento axial hacia adelante, con lo que el material fundido sale por la boquilla de inyección hacia el molde. De esta forma el tornillo actúa como tornillo plastificador y además como émbolo de inyección. El molde se encuentra refrigerado y en el momento de la inyección del material debe estar cerrado. El tornillo permanecerá en posición avanzada hasta que el material que se encuentra en los canales de alimentación del molde tenga suficiente consistencia para evitar su retroceso hacia la máquina de inyección. Una vez que el tornillo retrocede comienza a plastificar nuevamente material para el siguiente ciclo. El molde se mantiene cerrado el tiempo suficiente para que el material se enfríe a una temperatura tal que la pieza pueda ser extraída sin que sufra deformaciones. Cuando esto sucede se abre el molde y se extrae la pieza de modo que el molde queda preparado para el ciclo siguiente.

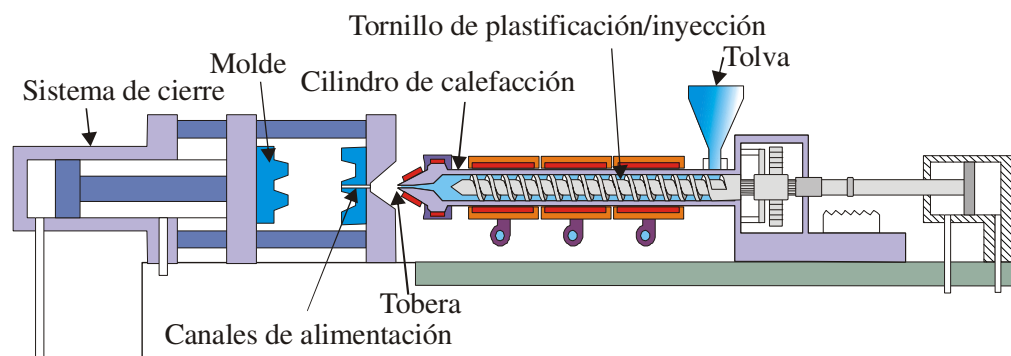


Figura 3.2. Máquina convencional de inyección.

1.3. MOLDEO POR SOPLADO

Mediante el proceso de soplado pueden fabricarse cuerpos huecos como son depósitos de combustibles, bidones, tablas de surf, depósitos de aceite de calefacción y botellas. El proceso consiste básicamente en insuflar aire en una preforma tubular fundida que se encuentra en el interior del molde. Se emplea exclusivamente con materiales termoplásticos. Para ello son necesarias dos piezas fundamentales: una extrusora o una inyectora con la que preparar la preforma y una unidad de soplado. El funcionamiento del proceso de soplado se esquematiza en la figura 3.3, para el caso del proceso de extrusión-soplado.

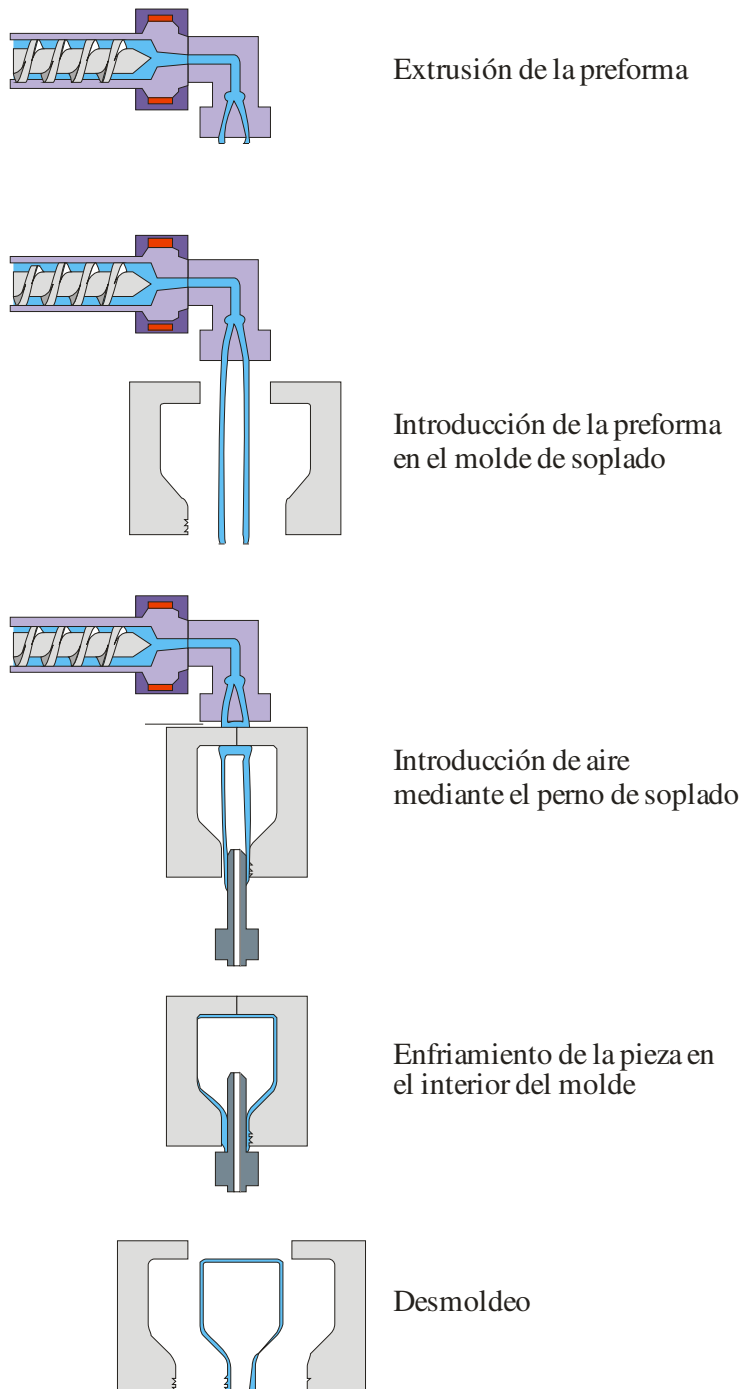


Figura 3.3. Proceso de extrusión-soplado.

En el caso del proceso de extrusión-soplado, por ejemplo, la extrusora transforma el plástico en una masa fundida homogénea, como se ha descrito anteriormente. El cabezal adosado a ella desvía la masa hasta la dirección vertical, para después hacerla pasar por una boquilla que la convierte en una preforma tubular. Esta preforma queda entonces colgando hacia abajo. El molde de soplado consta de dos partes móviles con la forma del negativo de la pieza a moldear. Una vez que la preforma tiene la longitud suficiente, el molde se cierra en torno a ella. Seguidamente el molde se desplaza hacia la unidad de soplado donde el cabezal de soplado penetra dentro del molde y de la preforma, de forma que el cabezal da forma a la región del cuello del cuerpo hueco y al mismo tiempo le insufla aire. Esto origina una presión que obliga al material a estamparse contra las paredes del molde, adoptando la forma deseada. El molde debe permitir la evacuación del aire que queda entre la pieza y la cavidad. La pieza se enfría en el molde, de donde es extraída una vez que ha adquirido la consistencia adecuada.

1.4. MOLDEO ROTACIONAL

El moldeo rotacional o rotomoldeo es un método para transformar plásticos, que generalmente se encuentran en polvo o en forma de pasta líquida, para producir artículos huecos. En rotomoldeo, a diferencia de lo que ocurre en las demás técnicas de transformación, el calentamiento y enfriamiento del plástico tienen lugar en el interior de un molde en el que no se aplica presión. De una forma simple el proceso se puede describir tal y como se muestra en la figura 3.4. Una cantidad de plástico frío, se introduce en la mitad de un molde también frío. El molde se cierra y se hace rotar biaxialmente en el interior del horno. Como la superficie metálica del molde se calienta, el plástico que se encuentra en el interior comienza a pegarse sobre las paredes del molde, de modo que es arrastrado por éstas. Cuando el plástico finaliza la fusión, toda la superficie interna del molde debe estar completamente recubierta por el plástico. En ese momento puede comenzar la etapa de enfriamiento mientras continúa la rotación biaxial del molde. Una vez solidificado el plástico se abre el molde y se extrae la pieza. Se puede emplear indistintamente para materiales termoplásticos y termoestables.

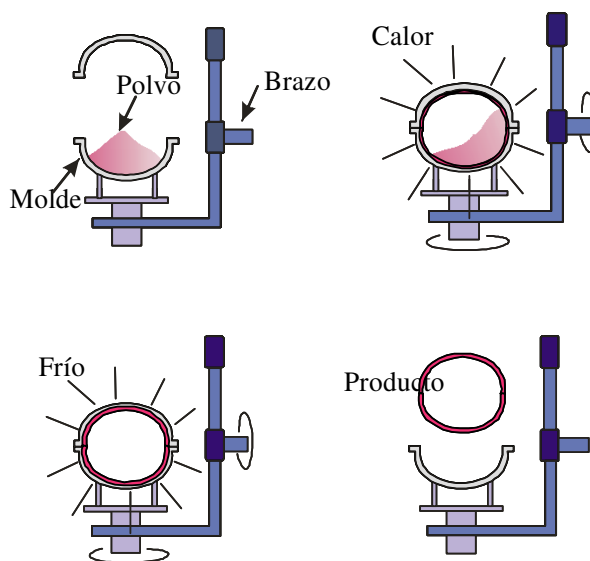


Figura 3.4. Esquema del proceso de rotomoldeo.

El competidor directo del rotomoldeo para la fabricación de artículos huecos es el soplado. Mediante rotomoldeo se pueden fabricar artículos más grandes que mediante soplado, sin embargo, para piezas que pueden ser fabricadas por los dos procesos, el soplado suele resultar más rentable que el rotomoldeo. El rotomoldeo presenta las ventajas de que las piezas fabricadas pueden tener formas más complejas, se pueden emplear simultáneamente moldes de distinto tamaño y forma y, además, como no se emplea presión, los moldes resultan relativamente baratos y las piezas están libres de tensiones. Por otra parte, en el caso del rotomoldeo los materiales deben estar finamente pulverizados, las etapas de carga y descarga del material se realizan a mano y los ciclos son relativamente lentos.

1.5. MOLDEO POR COMPRESIÓN

La industria transformadora de plásticos utiliza el moldeo por compresión para moldear materiales termoestables. En la figura 3.5 se muestra una prensa empleada en moldeo por compresión. Puede considerarse que el ciclo comienza con la apertura del molde para la extracción de la pieza obtenida en el ciclo anterior. Una vez que el molde se encuentra limpio, se colocan en las inserciones metálicas si las hubiera y se introduce el material de moldeo, bien en forma de polvo o en forma de pastilla; se cierra el molde caliente y se aplica presión. En ocasiones se abre después un instante para permitir la salida de humedad y materias volátiles que pudieran haber quedado atrapadas o que se generan durante el entrecruzamiento del material. Finalmente, se aplica toda la presión al molde caliente y se mantiene el tiempo necesario hasta que el material haya curado totalmente.

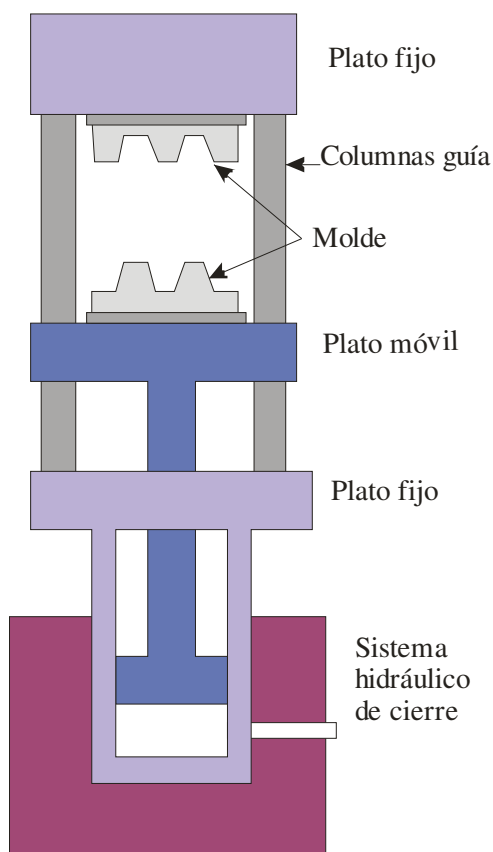


Figura 3.5. Prensa para moldeo por compresión.

1.6. TERMOCONFORMADO

El termoconformado es un proceso de moldeo de preformas de termoplásticos que generalmente se encuentran en forma de lámina o plancha. El proceso de moldeo del semifabricado o preforma se desarrolla en tres etapas, tal y como se muestra en la figura 3.6. En el primer paso el material se calienta, generalmente por radiación infrarroja, aunque también se puede calentar mediante convección o conducción. A continuación se tensa encima de un bastidor y, por medio de aire a presión o vacío, se estampa o se presiona sobre las paredes de un molde frío.

Se distingue entre procesos en positivo y en negativo, según sea la cara exterior o interior de la pieza la que se moldea. El proceso en negativo es el que queda reflejado en la figura 3.6. Este proceso se emplea para moldear piezas muy grandes que difícilmente se podrían obtener por otra técnica. La principal desventaja del proceso es que sólo una de las caras de la pieza copia exactamente la forma del molde.

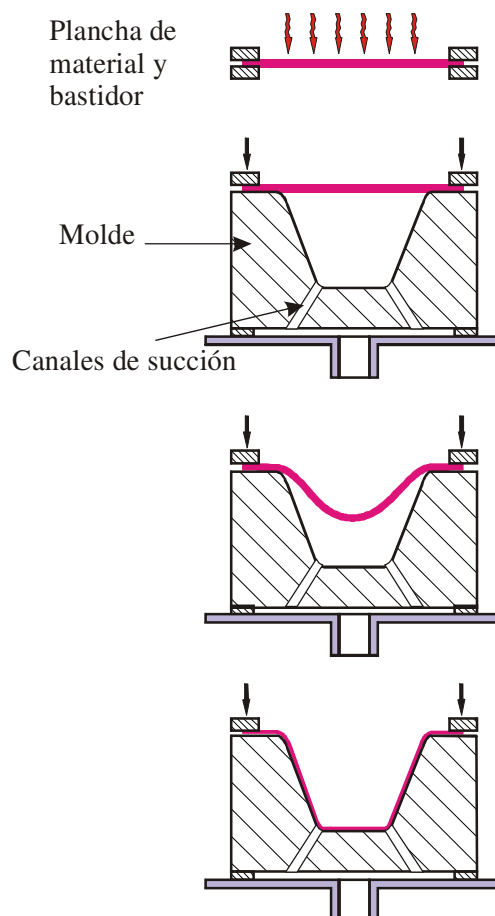


Figura 3.6. Proceso de termoconformado.

2. OPERACIONES UNITARIAS EN EL PROCESADO DE POLÍMEROS

Bajo el término de "operaciones unitarias en procesado de polímeros" se engloban todas aquellas operaciones comunes a las distintas técnicas de transformación, como son manejo y transporte de sólidos, fusión, transporte de fluidos y solidificación, que se describen a continuación.

En alguno de los libros que aparecen en la bibliografía recomendada se realiza un tratamiento muy riguroso de las distintas operaciones unitarias, lo que requiere plantear y resolver simultáneamente las ecuaciones de transferencia cantidad de movimiento y energía en procesos no isotermos, y teniendo en cuenta además que los polímeros fundidos o en disolución son materiales compresibles y no Newtonianos. Desde el punto de vista del ingeniero químico es una visión muy adecuada, si bien ese tratamiento riguroso excede en mucho de los objetivos de este tema, donde sólo se pretende dar una breve descripción de estas operaciones unitarias.

2.1. MANEJO DE SÓLIDOS

La mayoría de los polímeros se suministran a los transformadores en forma de sólidos particulados. Ésta es la forma más conveniente de manejarlos, transportarlo, mezclarlos, almacenarlos y más importante, de procesarlos en la maquinaria existente. Las formas más frecuentes son los pellets o granza, en una gran variedad de formas, como cubos, cilindros, esferas, lentejas o elipsoides, así como polvos o granulados. La granza se obtiene al final del proceso de polimerización en etapas especiales. La elección del proceso de granceado depende de la naturaleza del polímero, producción requerida y características del proceso. Los procesos más comunes son los de cortado del extruido bajo corriente de agua o aire o el cortado en frío de tiras. Los tamaños típicos oscilan entre 3 y 6 mm. La granza a veces contiene todos los aditivos requeridos para el posterior procesado del material y son la forma normalmente preferida como alimentación para las máquinas de transformado como extrusoras, inyectoras y máquinas de soplado. Otros procesos requieren otro tipo de alimentaciones, así por ejemplo, el moldeo rotacional requiere de alimentación en forma de polvo de la granulometría adecuada. Los polvos se pueden preparar directamente en el proceso de polimerización o por procesos posteriores de molienda en molinos o pulverizadores (molinos de martillos, de cuchillas, de chorro, etc.). El material de recortes suele triturarse en granulados de tamaño variable que se suele reprocesar mezclado con material virgen.

2.2. CALENTAMIENTO Y FUSIÓN DE POLÍMEROS

En la mayoría de las técnicas de transformación el polímero está originalmente en estado sólido y debe calentarse hasta su punto de fusión o reblandecimiento. La capacidad calorífica de los plásticos y el calor latente de fusión tienen valores elevados, de modo que la cantidad de calor que hay que aplicar para fundir estos materiales es muy alta. En la tabla 3.1 se muestra el valor del calor específico de algunos polímeros en estado sólido y en el caso de los cristalinos se muestra, además, el calor latente de fusión. También se muestra la temperatura habitual de procesado de estos polímeros y el calor que es necesario aplicar a 1

kg de polímero que se encuentra a temperatura ambiente para alcanzar la temperatura de procesado, calculado de la forma habitual ($q = c_p \Delta T + \lambda$). Como se puede apreciar el calor que es necesario aplicar en el caso de los polímeros cristalinos es mayor que en el caso de los polímeros amorfos, en los que no hay fusión.

Tabla 3.1. Propiedades térmicas de algunos polímeros y cantidad de calor necesario para su procesado.

Polímero	Calor específico (kJ/kg/°C)	Calor latente de fusión (kJ/kg)	Temperatura de procesado (°C)	Calor procesado (kJ/kg)
HDPE	2.30	209	240	720
PP	1.93	100	250	550
PS	1.34	---	200	240
PVC	1.00	---	180	160
PMMA	1.47	---	225	300
ABS	1.47	---	225	300
Nailon 6,6	1.67	130	280	570

El calor para conseguir la fusión en los procesos de transformación puede proceder de dos fuentes. Lo más frecuente es que sea aportado desde el exterior, por ejemplo, por medio de resistencias eléctricas, como ocurre en las máquinas de extrusión o de inyección, o por la combustión de un gas que a su vez calienta hornos de convección forzada, como en el caso del moldeo rotacional, o por radiación infrarroja como ocurre en termoconformado. La segunda fuente de calor es el propio calor generado cuando se aplica una cizalla muy alta a un fluido muy viscoso. Éste se conoce como calor generado por disipación viscosa y en los procesos en los que se realiza un trabajo importante sobre el polímero puede llegar a superar al calor aportado desde el exterior, como ocurre con frecuencia en los procesos de extrusión e inyección.

2.3. FLUJO A TRAVÉS DE CANALES

En el procesado de polímeros es frecuente que éstos sean obligados a fluir desde un punto a otro de la máquina a través de canales de geometría cilíndrica. Si la longitud del canal es L y su radio R , la caída de presión a lo largo del canal es ΔP y Q es el caudal de fluido que circula por el interior, el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla en la pared del canal se pueden calcular por medio de las siguientes expresiones:

$$\text{Esfuerzo de cizalla en la pared} \quad \sigma = \frac{\Delta P R}{2L}$$

$$\text{Velocidad de cizalla en la pared} \quad \dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3}$$

De modo que de acuerdo con la expresión de Newton la viscosidad se puede calcular de la siguiente forma:

$$\eta_{ap} = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 L Q}$$

Que no es otra que la ecuación de Poiseuille. Esta expresión puede emplearse para determinar de manera aproximada la viscosidad de un material que fluye a través de una conducción de dimensiones conocidas cuando se aplica una caída de presión determinada entre los dos extremos de la conducción, como es por ejemplo el caso de un polímero fluyendo a través de una boquilla cilíndrica en un proceso de extrusión. Determinando experimentalmente el caudal de material y conociendo las dimensiones de la boquilla se puede obtener la viscosidad aparente. Además variando la presión variará el esfuerzo de cizalla y de esta forma se puede determinar la respuesta no Newtoniana del material.

Por otra parte, también se pueden emplear expresiones de este tipo para evaluar de forma muy sencilla (aunque sólo aproximada) la presión con la que es necesario llenar un molde en moldeo por inyección. Si las dimensiones del molde son conocidas y se conoce la viscosidad aparente del material a una velocidad de cizalla determinada, se puede calcular la presión que es necesario emplear para llenar el molde a una velocidad (caudal) determinada. Por ejemplo, si las dimensiones del canal son $L = 5 \text{ cm}$, $R = 0.25 \text{ cm}$ y el llenado del molde debe realizarse a una velocidad de $250 \text{ cm}^3/\text{s}$ y la viscosidad del material es de $150 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (para una velocidad de cizalla de 1000 s^{-1}), mediante la expresión anterior se obtiene ΔP :

$$\Delta P = \frac{\eta_{ap} 8 L Q}{\pi R^4} = 122 \text{ MNm}^{-2}$$

En el moldeo por inyección son frecuentes presiones de este orden en los canales de alimentación que conducen al molde. Antes de la entrada al molde se produce un estrechamiento (entrada a la cavidad) donde la velocidad de cizalla puede alcanzar valores de 10^5 s^{-1} . La viscosidad en estas condiciones disminuirá como consecuencia del comportamiento pseudoplástico del material, mientras que el esfuerzo de cizalla se mantendrá del mismo orden de magnitud.

2.4. SOLIDIFICACIÓN O ENDURECIMIENTO

Una vez que el material que se encuentra en estado líquido o fundido y ha adquirido la forma final deseada debe solidificarse. En las diferentes técnicas de transformación encontramos dos posibilidades; que la solidificación del sistema se produzca mediante reacción química (en el caso de los termoestables) o bien simplemente enfriando el polímero (termoplásticos).

2.4.1. Solidificación química o física

Existen diferentes tipos de reacciones químicas que pueden darse para conseguir la solidificación. A veces se emplean resinas líquidas que se introducen en el molde con una mezcla de aditivos que contienen agentes entrecruzantes, generalmente peróxidos que son iniciadores de radicales libres, junto con otros aditivos como iniciadores y catalizadores de la reacción, de modo que el entrecruzamiento del material se produce en el molde. En otros casos se emplean “polvos de moldeo”. En este caso en lugar de partir de materiales líquidos se parte de materiales sólidos con un cierto grado de polimerización (termoendurecibles) y la reacción se completa en el molde.

En el proceso de vulcanización o curado de cauchos y gomas también tiene lugar una reacción química. Generalmente se parte de un caucho (polibutadieno) termoplástico y, por la adición de los aditivos adecuados se obtiene el entrecruzamiento parcial del material que confiere a los cauchos la capacidad de recuperar su forma original tras la aplicación de un esfuerzo.

Otra posibilidad es el empleo de plastisoles de PVC. Los plastisoles son mezclas líquidas de PVC con un plastificante, de modo que el PVC forma una suspensión en el plastificante. El material se introduce dentro del molde y por la aplicación de calor tiene lugar la gelificación del sistema, que consiste en la completa plastificación del PVC, esto es, el plastificante se mezcla completamente con el PVC y es adsorbido por éste, de modo que cuando el proceso finaliza, aun estando el material caliente, se obtiene un material sólido altamente plastificado y muy flexible con comportamiento similar al de los cauchos.

2.4.2. Enfriamiento de termoplásticos

El proceso de enfriamiento es inverso al de calentamiento o fusión de polímeros, si bien hay una diferencia básica y es que el enfriamiento se realiza mediante la eliminación de calor por conducción, y a veces por convección, y el trabajo realizado sobre el polímero no contribuye al enfriamiento del mismo como sí ocurría en el proceso de calentamiento. Generalmente, el enfriamiento no se realiza hasta temperatura ambiente, basta con alcanzar una temperatura a la que la pieza pueda ser desmoldeada sin que se deforme. En el caso de los termoplásticos cristalinos la etapa de enfriamiento puede ser la que más tiempo consuma de todo el proceso de transformación, y desde luego es de crucial importancia en las propiedades de la pieza terminada.

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

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

Donal. G. Baird, Dimitris I. Collias, "Polymer Processing. Principles and Design", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.

Z. Tadmor, C.G. Gogos, "Principles of Polymer Processing", Wiley Interscience, New York 1979.

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