

TEMA 5. INYECCIÓN

1. DESARROLLO Y ESTADO ACTUAL DEL MOLDEO POR INYECCIÓN.	
EVOLUCIÓN DE LAS MÁQUINAS DE INYECCIÓN.....	123
1.1. Máquinas de pistón	123
1.2. Máquinas de pistón con preplastificación.....	126
1.3. Máquinas de husillo	128
1.4. El ciclo de inyección.....	130
2. MÁQUINAS DE INYECCIÓN.....	131
2.1. Características básicas de las máquinas.....	131
2.1.1. Capacidad de inyección	131
2.1.2. Capacidad de plastificación	132
2.1.3. Presión de inyección.....	133
2.1.4. Velocidad de inyección.....	133
2.1.5. Fuerza de cierre.....	134
2.2. Variables que intervienen en el proceso	134
2.2.1. Temperatura de inyección.....	134
2.2.2. Temperatura del molde	134
2.2.3. Presión inicial o de llenado.....	135
2.2.4. Presión de mantenimiento o compactación (holding pressure)	135
2.2.5. Presión posterior o de retroceso (back pressure)	135
2.2.6. Tiempo de inyección inicial.....	135
2.2.7. Tiempo de mantenimiento o compactación	136
2.2.8. Tiempo de enfriamiento.....	136
2.3. Componentes de la máquina de inyección.....	136
2.3.1. Unidad de inyección	137
2.3.1.1. Válvulas de no retorno.....	137
2.3.1.2. La tobera.....	138
2.3.2. La unidad de cierre	140
2.3.2.1. Sistemas mecánicos	140
2.3.2.2. Sistemas hidráulicos	140
2.3.2.3. Sistemas mecánico-hidráulicos.....	141
3. MOLDES DE INYECCIÓN.....	142
4. FUNDAMENTOS DEL MOLDEO POR INYECCIÓN	146
4.1. Control de la temperatura en la cámara de calefacción	146
4.2. Comportamiento del material dentro del molde	147
4.2.1. Análisis de la etapa de llenado de la cavidad.....	149
4.2.1.1. Flujo del material durante la etapa de llenado	149
4.2.1.2. Determinación del tiempo óptimo de llenado.....	150
4.2.2. Análisis de la etapa de compactación	152
4.2.2.1. Transición entre llenado y compactación	152
4.2.2.2. Influencia de variables durante la fase de compactación.....	153
4.2.3. Análisis de la etapa de enfriamiento	155
4.3. Análisis del proceso a partir de curvas P-V-T	156
5. DEFECTOS COMUNES EN PIEZAS INYECTADAS.....	158
6. TÉCNICAS DE INYECCIÓN.....	160
6.1. Inyección de múltiples materiales.....	160
6.2. Inyección de termoestables.....	162
6.3. Inyección asistida por gas	163

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA..... 167

Resumen

El objetivo de este tema es profundizar en diferentes aspectos del proceso de inyección. En primer lugar se describe el ciclo de inyección, las características técnicas de una máquina de inyección, los componentes de las máquinas y las variables del proceso. A continuación, se describen con detalle todas las etapas por las que pasa el material desde que se introduce en el molde hasta que se extrae la pieza, así como el efecto de las diferentes variables sobre estas etapas. Por último, se describen diferentes técnicas dentro de la inyección, como son la inyección asistida por gas, la inyección multicapa o la inyección de termoestables.

1. DESARROLLO Y ESTADO ACTUAL DEL MOLDEO POR INYECCIÓN. EVOLUCIÓN DE LAS MÁQUINAS DE INYECCIÓN

El moldeo por inyección 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 a la que las piezas puedan ser extraídas sin deformarse. Éste es, sin duda, el método de transformación más característico de la industria de plásticos, y de hecho las máquinas de inyección modernas son un ejemplo de máquinas ideadas y fabricadas con vistas a la producción masiva de piezas. Esta técnica comenzó a desarrollarse a principios del siglo pasado a partir de máquinas muy rudimentarias que se empleaban para procesar resinas de termoplásticos. Muchos de los plásticos corrientes hoy en día como PS, PA, PVC, PMMA, etc., se desarrollaron específicamente para este proceso en la década de los años 30 del siglo pasado. El gran desarrollo que las máquinas de inyección sufrieron en los años 60 a 80 fue debido, en parte, al creciente número de materiales disponibles y, sobre todo, a la demanda creciente de artículos de plástico. El moldeo por inyección se aplica normalmente a resinas termoplásticas, si bien, con ciertas modificaciones, se puede aplicar a materiales termoestables y a elastómeros sintéticos.

En el moldeo por inyección un polímero en estado líquido y caliente, no newtoniano, fluye a través de conductos o canales de geometría compleja, las paredes de los cuales están mucho más frías que el propio polímero, y llena un molde que también tiene las paredes frías. El modelado del proceso es muy complejo, aunque existen algunos programas comerciales ampliamente extendidos como el MOLDFLOW, que han contribuido al estado actual de desarrollo de esta técnica.

El proceso puede dividirse en dos fases; en la primera tiene lugar la fusión del material y en la segunda la inyección del mismo en el molde. La manera de realizar estas dos fases es lo que distingue unas máquinas de otras. A continuación, se describen las primeras máquinas de inyección empleadas y la evolución lógica que sufrieron las mismas hasta llegar a las máquinas convencionales actuales. Al final del apartado se describe un ciclo completo de inyección en una máquina convencional.

1.1. MÁQUINAS DE PISTÓN

En las primeras máquinas empleadas (figura 5.1), la fase de fusión se realizaba en una cámara cilíndrica de calefacción. En estas máquinas el material, en forma de gránulos o granza, entra en el cilindro de calefacción a través de la 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, empujado en veces sucesivas por las emboladas de un pistón que se mueve ajustadamente en el cilindro de calefacción. Este pistón de inyección obliga al material fundido a pasar desde el cilindro de calefacción a las cavidades del molde, realizando así la segunda fase del proceso. Por tanto, en estas máquinas, tanto la inyección como la fusión se realizan en un único cilindro diseñado para cumplir estos dos fines.

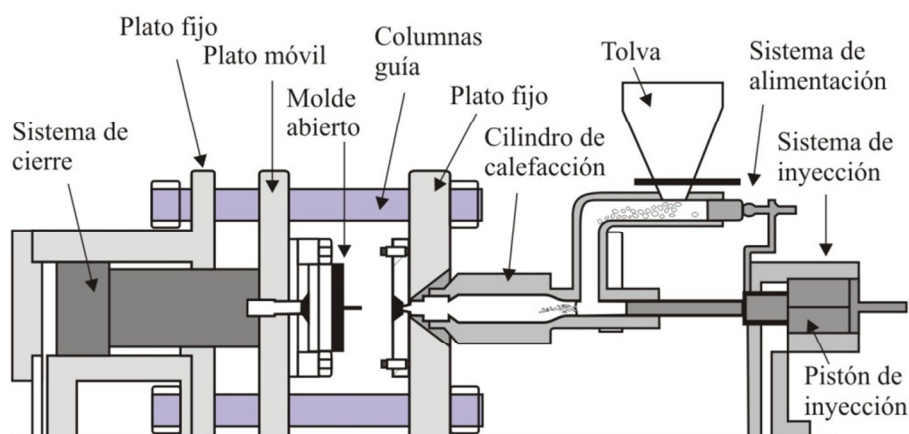


Figura 5.1. Esquema de una máquina de moldeo por inyección con pistón.

La máquina esquematizada en la figura 5.1 se puede considerar constituida por los elementos básicos siguientes:

- Un sistema de alimentación y dosificación.
- Un pistón de inyección, que empuja al material dentro de la cámara de calefacción y le da presión para que entre en el molde.
- Una cámara de calefacción, que calienta al material a una temperatura suficiente para que pueda fluir al ser sometido a la presión del pistón.
- El molde en el que se inyecta el material, que debe abrirse en un momento determinado del ciclo de moldeo, lo que permite extraer la pieza moldeada.
- Un mecanismo de cierre que mantiene unidas las dos mitades del molde durante el ciclo de inyección.
- Un sistema de controles para que los distintos mecanismos actúen en la secuencia adecuada.

Estas máquinas de inyección fueron empleadas durante muchos años y siguen siendo utilizadas en laboratorios o para producciones a pequeña escala. Sin embargo, presentan una serie de desventajas, que se comentan a continuación.

En las máquinas de pistón se realiza una **dosificación volumétrica de la grana**, lo que significa que se alimenta a la máquina el volumen de material sólido que cae delante del pistón de alimentación, solidario al pistón de inyección, como se puede apreciar en la figura 5.1. El tamaño y forma de la grana de polímero suele ser bastante irregular, lo que afecta muy sensiblemente a la densidad aparente del material y, por tanto, a la cantidad de material alimentado en cada embolada. El deslizamiento de los gránulos entre sí también afecta a este tipo de dosificación. Otro inconveniente importante es que, aunque se dispusiera de granas muy uniformes, la reutilización de los recortes (mermas de producción) no es posible ya que afecta negativamente al flujo del material.

Por otra parte, la **transmisión de calor** en el **cilindro de calefacción** de estas máquinas es bastante deficiente. Dada la baja conductividad térmica de los plásticos, en la práctica es difícil calentarlos rápida y uniformemente. Además, los polímeros fundidos son sumamente viscosos y es también difícil crear en ellos cualquier tipo de turbulencia que mejore la mezcla. El problema de la transmisión de calor se complica aún más por la limitación en el tiempo de permanencia del material dentro del cilindro, limitación impuesta por razones de producción evidentes y, en algunos casos, debido a la baja estabilidad térmica de los polímeros. Evidentemente, el diseño más simple del cilindro de calefacción sería un cilindro recto calentado exteriormente y dentro del cual se aloja el material. Este diseño tan elemental se empleó en las primeras máquinas de inyección, pero muy pronto se llegó a la conclusión de que era necesario mejorar la transmisión de calor en la cámara de calefacción, para lo que la relación entre la superficie disponible para la transmisión de calor y el volumen de material a calentar debe ser lo mayor posible. Por ello, se introdujo un torpedo cilíndrico colocado centralmente en el cilindro de calefacción y sujeto a las paredes del mismo por aletas laterales (figura 5.2), lo que obliga al material a circular en capas delgadas. Por lo general, el torpedo lleva unas resistencias eléctricas que permiten calentarlos desde el interior.

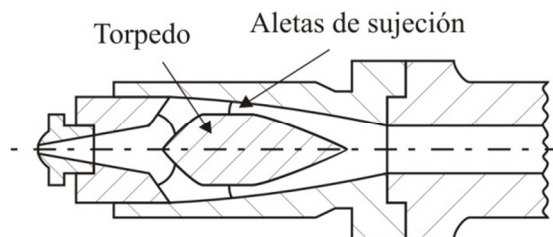


Figura 5.2. Cilindro de calefacción con torpedo.

Otra manera de aumentar la superficie de calefacción podría ser hacer muy larga la cámara de calefacción y disminuir su diámetro. Sin embargo, en este tipo de cilindros aumentan innecesariamente las pérdidas de presión y la resistencia al flujo del polímero, por lo que realmente no ha habido tendencia a construir máquinas con este tipo de cámaras.

Por otra parte, en las máquinas de pistón la **unidad de inyección** está constituida por el propio cilindro en el que se realiza la plastificación (calentamiento) del material. Para que la presión sea suficientemente alta en las cavidades de moldeo es preciso que las pérdidas de presión sean lo menores posible. Estas pérdidas de presión se deben fundamentalmente a la fricción que tiene lugar entre los gránulos fríos situados en la zona posterior del cilindro (delante del pistón de inyección) y a la fricción entre éstos y las paredes del cilindro. La máxima caída de presión se produce delante de la superficie de ataque del torpedo en donde los gránulos aún sin fundir son obligados a pasar a la zona anular alrededor del torpedo. En esta zona, aunque la sección disponible para el paso del polímero es más pequeña, el polímero está ya fundido y las pérdidas de presión causadas por el flujo del polímero son relativamente menores, como se puede apreciar en la figura 5.3.

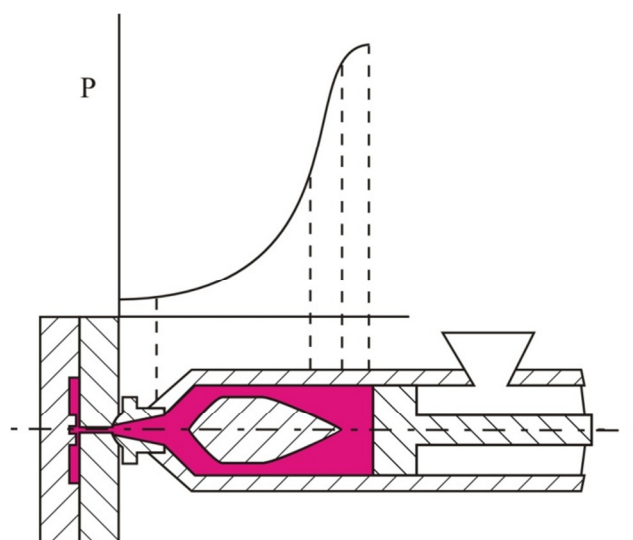


Figura 5.3. Evolución de la presión a lo largo de la cámara de plastificación en una máquina de pistón.

Considerando el cilindro como un mecanismo de inyección sería preciso conseguir que las pérdidas de presión fueran lo más pequeñas posible. Para ello, la sección del cilindro debería ser lo más grande posible. Además, el cilindro debería ser todo lo corto que permitiera la construcción de la máquina y finalmente debería eliminarse cualquier tipo de obstáculo dentro del cilindro que, como el torpedero, dificulte el paso del material. Por ello, en estas máquinas el diseño del cilindro descansa en un balance razonable entre los requisitos para conseguir una buena eficacia para la transmisión de calor y reducir en lo posible la caída de presión.

Por último, la **velocidad de inyección** en las máquinas con pistón se ve muy limitada por la presencia del torpedero, por el diseño de la cámara de calefacción y por la presencia de los gránulos fríos delante del pistón de inyección.

1.2. MÁQUINAS DE PISTÓN CON PREPLASTIFICACIÓN

Por los motivos mencionados, las máquinas con pistón fueron paulatinamente sustituidas por las máquinas de inyección con preplastificación. En estas máquinas las etapas de fusión y plastificación son independientes, de modo que el diseño de cada una de las zonas de la máquina resulta más adecuado. La idea de la preplastificación consiste en calentar el material en una cámara o cilindro de calefacción y transferir el material ya caliente (al que nos referiremos como material plastificado) desde esta cámara al cilindro de inyección. Generalmente, se distinguen dos tipos de máquinas con preplastificación: de pistón y de husillo, según utilicen uno u otro elemento en la cámara de preplastificación. Además, pueden ser en paralelo o en ángulo, según sea la disposición relativa de los cilindros de plastificación e inyección.

En las máquinas de preplastificación de pistón y en ángulo, como la de la figura 5.4, el material es plastificado en la primera cámara y cuando se encuentra en condiciones adecuadas se transfiere al cilindro de inyección. Durante la inyección del material en el molde el propio émbolo de inyección actúa como válvula de cierre del cilindro de plastificación. Las máquinas con esta disposición tienen el inconveniente de que es preciso disponer de dos estructuras diferentes para soportar los esfuerzos originados en cada cámara.

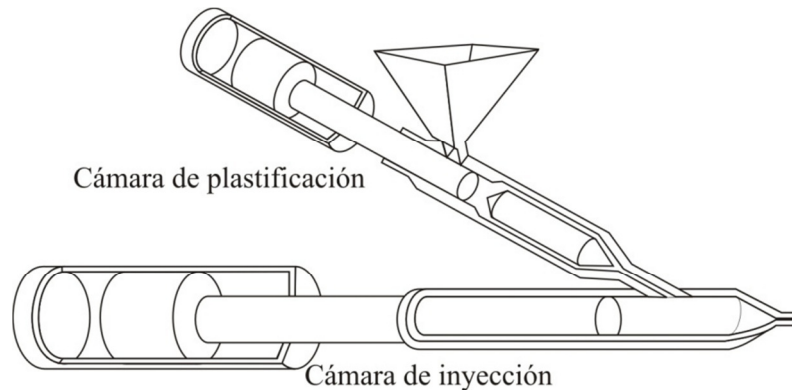


Figura 5.4. Máquina de inyección de preplastificación con pistón en ángulo.

En las máquinas de preplastificación con pistón y en línea como la de la figura 5.5, el cuerpo del cilindro de preplastificación actúa como pistón de inyección una vez que el cilindro de inyección se ha terminado de llenar. El material plastificado entra al cilindro de inyección por el taladrado central del émbolo de inyección, donde se coloca una válvula para evitar el retroceso del material durante el periodo de inyección. Las máquinas de este tipo ofrecen la ventaja de su simetría y la de constituir máquinas compactas, junto con una mayor economía de construcción en comparación con las máquinas de preplastificación en ángulo.

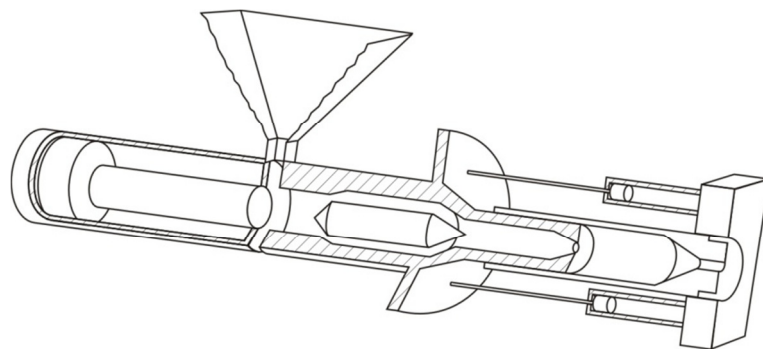


Figura 5.5. Máquina de inyección con pistón de preplastificación en línea.

En las máquinas de inyección con preplastificación suele ser frecuente el problema de que el material fundido tienda a fluir hacia la cámara de plastificación cuando se realiza la inyección, o bien que tienda a salirse de la máquina mientras se llena el pistón de inyección. Para evitarlo se emplean válvulas de retención que sólo permiten el paso del polímero fundido en una dirección. Estas válvulas suelen ser de construcción sencilla,

generalmente de tipo de asiento de bola, y se abren o cierran por la propia presión del polímero. Su principal inconveniente es que pueden afectar al flujo del polímero y esto a veces puede dar lugar a defectos que aparecen en las piezas moldeadas. Además de las válvulas de bola, se emplean también válvulas de tipo rotatorio. En cualquier caso el diseño de este tipo de válvulas debe ser tal que no haya zonas en las que pueda estancarse el material. En otros casos el propio pistón de inyección sirve como válvula que impide el retroceso del polímero hacia la cámara de plastificación.

1.3. MÁQUINAS DE HUSILLO

Las máquinas de husillo (figura 5.6) proporcionan un calentamiento uniforme del material así como un mezclado homogéneo. En estas máquinas la inyección del material se realiza desde la cámara de plastificación, que está provista de un husillo similar al de las máquinas de extrusión. El calentamiento del material se produce, por tanto, de forma similar a como ocurre en las máquinas de extrusión: la rotación del tornillo transforma parte de la energía mecánica en calor por fricción, y además las paredes calientes del cilindro contribuyen a aumentar la temperatura por conducción. La eficiencia en la transmisión de calor de estas máquinas resulta muy elevada frente a las máquinas con pistón. Sin embargo, en este caso, a diferencia de lo que ocurre en las máquinas de extrusión, el tornillo además se mueve axialmente para realizar la inyección. El funcionamiento de estas máquinas en cuanto al transporte de sólidos, plastificación y transporte del fundido es análogo a lo que se estudió en el proceso de extrusión. En la actualidad son, con diferencia, las más utilizadas, por lo que a partir de ahora nos referiremos a ellas como "máquinas convencionales".

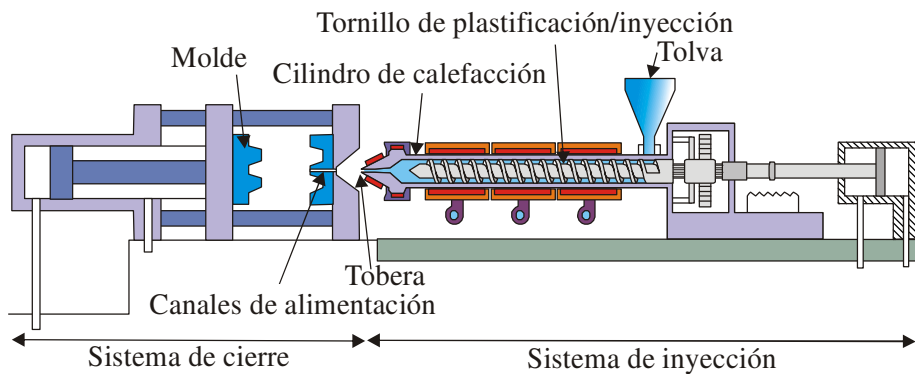


Figura 5.6. Máquina de inyección de tornillo.

En estas máquinas, conforme el tornillo gira el material funde, avanza hacia adelante y se va acumulando en la parte anterior del cilindro. Para alojar este material fundido dentro del cilindro, el tornillo debe retroceder lentamente mientras gira. Una vez que hay suficiente cantidad de material fundido acumulada, se detiene el giro y el tornillo realiza un movimiento axial hacia adelante, con lo que se realiza la inyección del material fundido. Esta secuencia de movimientos se puede apreciar en la figura 5.7. Al igual que en las máquinas de extrusión, el diseño del tornillo viene determinado por las características del polímero con que se ha de trabajar y por las condiciones del proceso.

Las variaciones de diseño se consiguen modificando el paso de hélice, la profundidad del canal y la longitud del tornillo.

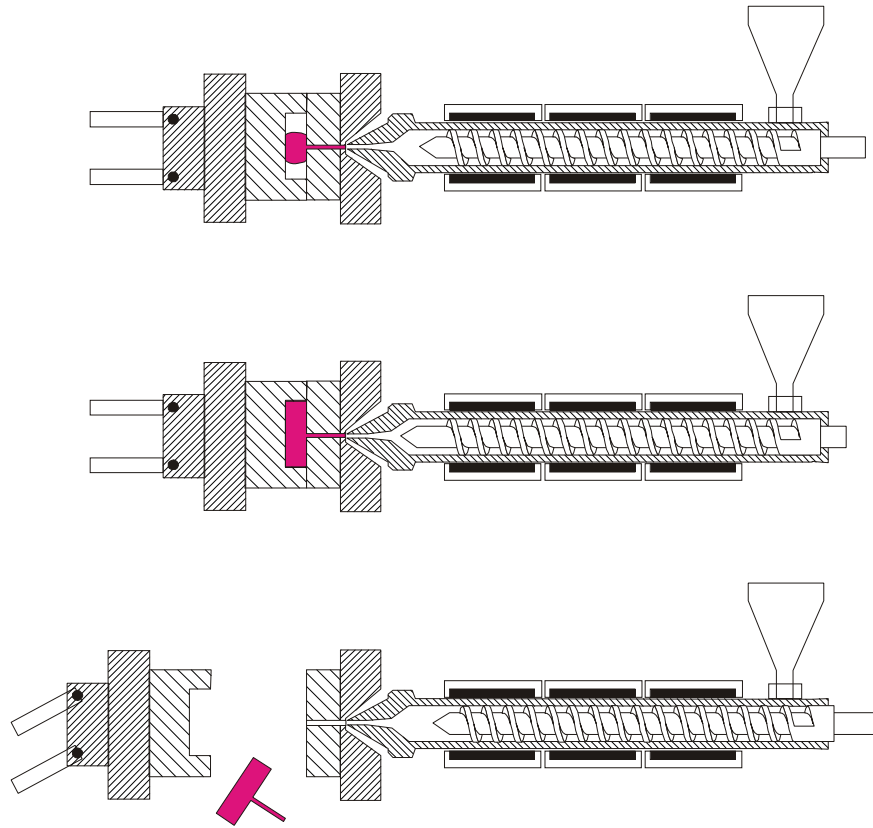


Figura 5.7. Secuencia de movimientos de una máquina de inyección convencional.

Un tornillo con movimiento axial, que actúa como pistón de inyección, tiene que vencer una gran resistencia para realizar la inyección. Por eso en ocasiones se emplean máquinas que presentan un tornillo de extrusión en la cámara de plastificación y un pistón de inyección, como la que se muestra en la figura 5.8.

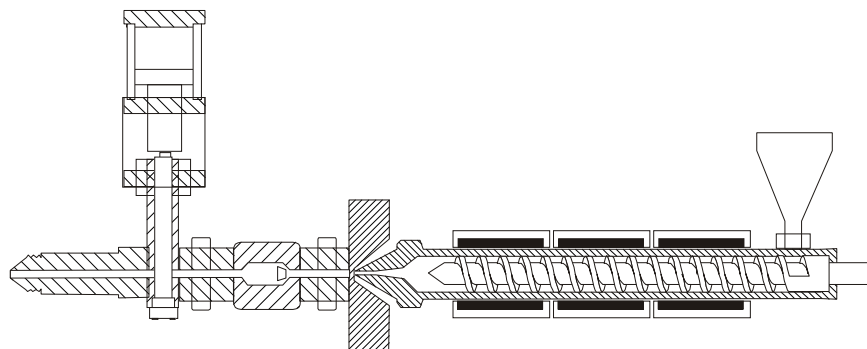


Figura 5.8. Máquina con tornillo preplastificador y pistón de inyección.

1.4. EL CICLO DE INYECCIÓN

De acuerdo con lo visto hasta ahora, un ciclo de inyección en una máquina convencional puede considerarse constituido por los tiempos y movimientos siguientes:

a) **Tiempo de cierre del molde**, durante el cual actúa el sistema de cierre, la máquina ejecuta el movimiento necesario y cierra el molde.

b) **Tiempo de avance de la unidad de inyección**, durante el cual la unidad de inyección, que hasta ese momento se encuentra separada del molde, avanza hasta que la boquilla se posa sobre el bebedero del molde (punto de entrada al molde).

c) **Tiempo de llenado o de inyección**, en el que el pistón o el husillo avanza realizando la inyección del material. En este tiempo el molde se llena con el polímero inyectado. El tiempo necesario para realizar la inyección depende del polímero empleado, de la temperatura que éste alcanza, de la velocidad de avance del husillo, del tamaño del molde y de los canales que ponen en comunicación el molde con el cilindro de inyección.

d) **Tiempo de compactación** (o tiempo de moldeo o de mantenimiento), durante el cual el molde permanece cerrado y el polímero comienza a enfriarse en el molde. Cuando el material comienza a enfriarse se contrae, por lo que para mantener la presión en el molde durante este periodo se suele introducir lentamente algo más de material dentro de la cavidad de moldeo, con objeto de compensar la contracción. Este periodo puede variar entre unos segundos y varios minutos. El peso final de la pieza, su estabilidad dimensional y las tensiones internas que pudieran aparecer dependen de cómo se realice esta etapa, que finaliza en el momento en el que el material que ocupa la entrada del molde solidifica, de modo que el hecho de mantener la unidad de inyección en posición avanzada ya no contribuye a seguir manteniendo la presión en el interior del molde.

e) **Tiempo de retroceso de la unidad de inyección**. Cuando la entrada a la cavidad solidifica la unidad de inyección retrocede y comienza el movimiento rotatorio del husillo para plastificar el material para la siguiente etapa, simultaneándose con la fase de enfriamiento, apertura del molde y extracción de la pieza y acelerando así el tiempo total de ciclo.

f) **Tiempo de enfriamiento**, necesario para enfriar el polímero que ocupa las cavidades del molde. Generalmente se toma este tiempo desde que acaba la etapa de compactación hasta que se abre el molde. Sin embargo, realmente el enfriamiento del material comienza tan pronto como el polímero toca las paredes frías del molde y finaliza cuando se extrae la pieza, por lo que el enfriamiento tiene lugar también durante las etapas de llenado y compactación.

g) **Tiempo de apertura del molde**, durante el cual se abre el molde. Este tiempo viene a ser aproximadamente constante para cada máquina.

h) **Tiempo de extracción de la pieza**, durante el cual se sacan las piezas moldeadas de las cavidades de moldeo.

i) **Tiempo con el molde abierto**, que generalmente es muy corto, pero que en ocasiones puede ser considerable, por ejemplo, cuando es preciso colocar inserciones metálicas en el molde.

La figura 5.9 muestra la duración relativa de cada una de estas etapas para la fabricación de peines de poliestireno. El ciclo completo en este ejemplo está compuesto por los siguientes tiempos: tiempo para cerrar el molde y para el avance de la unidad de inyección 1s (mold closing time); tiempo de inyección 1s (mold filling time); tiempo de compactación 5 s (injection hold time); tiempo de enfriamiento 16 s (clamp time); tiempo de apertura del molde 2 s (mold opening time); tiempo de extracción de la pieza 5s (part removal time).

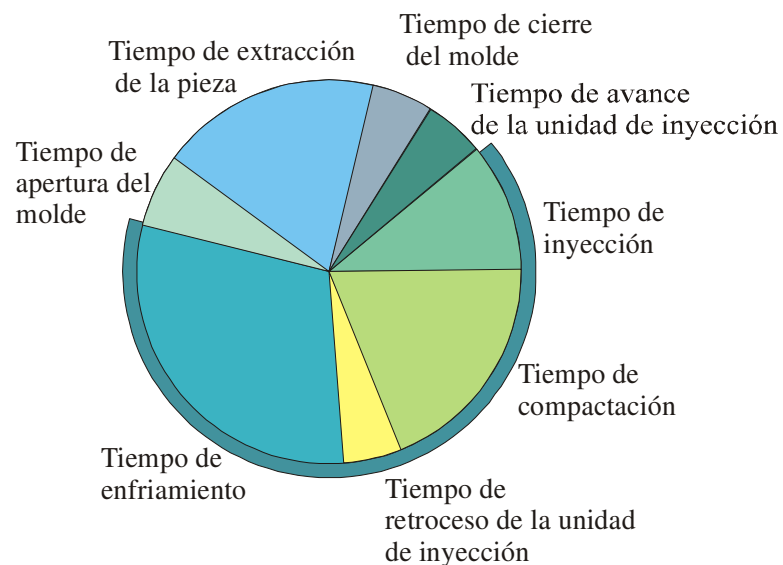


Figura 5.9. Duración relativa de las diferentes etapas del ciclo de inyección en una máquina convencional.

2. MÁQUINAS DE INYECCIÓN

2.1. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LAS MÁQUINAS

Antes de seguir adelante conviene aclarar y definir algunos conceptos y vocablos propios de las máquinas, moldes y tecnología del moldeo por inyección.

Con respecto a la máquina debemos considerar las siguientes características básicas que son las primeras consideraciones que se realizan a la hora de definir una máquina de inyección: capacidad de inyección, capacidad de plastificación, presión de inyección máxima, fuerza de cierre máxima y velocidad de inyección máxima.

2.1.1. Capacidad de inyección

Se entiende por **capacidad de inyección** la cantidad máxima de material que una máquina es capaz de inyectar de una sola vez en un molde a una presión determinada. La capacidad de inyección proporciona una idea de las posibilidades de la máquina considerada.

En los catálogos de los fabricantes de máquinas de inyección en ocasiones se indica la capacidad de inyección como el peso máximo de material que puede inyectar la máquina en un solo ciclo, supuesto que no se ha colocado ningún molde o que éste ofrece muy poca resistencia a la entrada del polímero. Es frecuente encontrar la capacidad de inyección referida al poliestireno, aunque en ocasiones también viene referida a otros materiales de uso común en inyección. En ocasiones también se expresa la capacidad de inyección de la máquina como el volumen barrido por el husillo de inyección en su recorrido hacia adelante, lo que resulta menos ambiguo que referirla a un tipo concreto de material.

En una situación real la capacidad de inyección viene determinada por el diámetro y la carrera del pistón o husillo de inyección, así como por el tipo de molde utilizado, la temperatura que alcanza el polímero fundido, la presión a que se inyecta y otras variables. Cuando se emplea un molde que es difícil de llenar, la capacidad real de inyección de la máquina es siempre algo menor que la indicada por el fabricante.

La unidad de inyección suele escogerse de forma que sea capaz de contener material suficiente para dos ciclos. En otras palabras el 50% de la capacidad de inyección de un cilindro debería vaciarse en cada ciclo. Por otra parte, la cantidad de material introducida en el molde nunca debería ser inferior al 20% ni superior al 80% de la capacidad del cilindro, de modo que el tiempo de permanencia del material en la cámara de plastificación no sea excesivamente largo para evitar que el material se degrade, ni excesivamente corto para evitar que no se encuentre correctamente plastificado.

2.1.2. Capacidad de plastificación

La **capacidad de plastificación** es otro dato muy importante para evaluar las posibilidades de una máquina de inyección, sin embargo no es fácil expresar numéricamente este concepto. Se puede definir, aunque ambigualmente, como la cantidad máxima de material que la máquina es capaz de plastificar por unidad de tiempo. Para comprender mejor este criterio es preciso aclarar que por “plastificar” un polímero debe entenderse el calentar éste lo suficiente para que alcance una temperatura a la que pueda ser inyectado, y esta aclaración mantiene la ambigüedad de la definición anterior. Evidentemente, la capacidad de plastificación depende de la eficacia de calefacción de la cámara de plastificación y de las propiedades térmicas del polímero que se calienta.

No hay método universalmente aceptado que indique las condiciones en que debe medirse la capacidad de plastificación de una máquina. Como en el caso de la capacidad de inyección, cada fabricante indica en el catálogo de sus máquinas la capacidad de plastificación de éstas expresada como caudal máximo plastificado de un material en unas condiciones de procesado determinadas, por lo general poliestireno (en kg/h o g/s), de modo que sólo sirve como guía para hacer comparaciones aproximadas entre máquinas de diversa procedencia.

2.1.3. Presión de inyección

La **presión de inyección** es una característica mejor definida. Se entiende por presión de inyección la medida en la cara delantera "a" del pistón de inyección o husillo (figura 5.10). Como el husillo está actuado por un pistón hidráulico al que es solidario, la fuerza en ambas caras "A" y "a" será la misma, y si p es la presión de la línea hidráulica y P la presión de inyección se cumplirá:

$$P = p (A/a)$$

La presión p en la línea puede medirse y la relación de superficies entre las caras de los pistones (A/a) es una característica de construcción de la máquina. Las máquinas convencionales se construyen con relaciones A/a entre 8 y 9 generalmente. En los catálogos de los fabricantes, generalmente figura la máxima presión de inyección que es posible desarrollar. Por otra parte, la presión de inyección no es la misma que la presión de compactación que se desarrolla en las cavidades de moldeo, la cual es bastante menor y puede tener valores solamente del 20% de la presión de inyección y aun menores, dependiendo de las características del molde, de las condiciones de moldeo y del polímero utilizado.

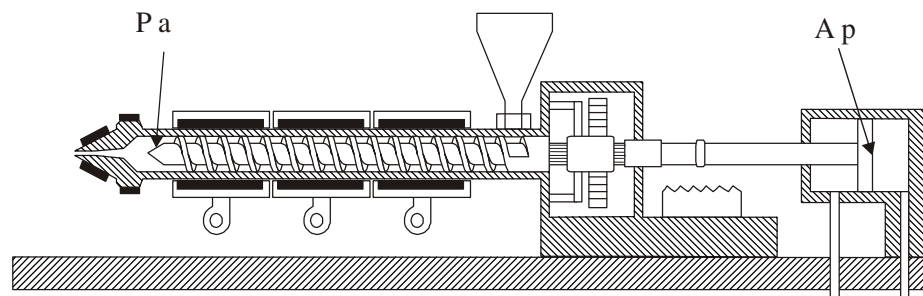


Figura 5.10. Posición en la que se determina la presión de inyección, P, y la presión del sistema hidráulico, p, que actúa sobre el tornillo.

2.1.4. Velocidad de inyección

La **velocidad de inyección** es el caudal de material que sale de la máquina durante el periodo de inyección; se expresa generalmente en cm^3/s y es una medida de la rapidez con que puede llenarse un molde dado. La velocidad de inyección máxima proporcionada por los fabricantes viene principalmente determinada por la velocidad de avance del pistón o husillo, y también se puede expresar como el número de veces por unidad de tiempo que el tornillo puede efectuar su recorrido completo de ida y vuelta cuando la máquina funciona en vacío, es decir, sin molde y sin material de moldeo. Esta característica de la máquina depende en especial del tipo de sistema hidráulico.

En una situación real (con material y molde en la máquina) la velocidad de inyección del material en el molde dependerá de otros factores como la presión de

inyección, la temperatura de la cámara de calefacción, las características del material utilizado y el camino que debe recorrer el polímero fundido hasta llegar a las cavidades de moldeo, principalmente.

2.1.5. Fuerza de cierre

La **fuerza de cierre** es aquella que mantiene unidas las dos mitades del molde mientras en la cavidad de moldeo se desarrolla la presión de compactación como consecuencia de su llenado. Como ya se ha mencionado, la presión en la cavidad de moldeo es mucho menor que la presión de inyección, si bien se desarrolla una fuerza que tiende a separar las dos mitades del molde y que viene dada por el producto de la presión máxima en la cavidad de moldeo (presión de compactación) por el área proyectada de ésta. Esta fuerza interna del molde puede ser muy grande y necesita ser contrarrestada por una fuerza de cierre que en todo momento sea superior a ella para asegurar así que el molde se mantiene cerrado durante la inyección. Cuanto mayor es la fuerza disponible para mantener cerrado el molde tanto mayor es el área transversal de la pieza que puede moldearse, a igualdad de las demás condiciones. Las máquinas de inyección convencionales empleadas hoy en día son capaces de desarrollar fuerzas de cierre de más de 1000 toneladas.

2.2. VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO

Se considera que en el proceso de inyección intervienen de forma directa o indirecta del orden de 200 variables diferentes. Sin embargo para simplificar, estas variables se pueden clasificar en 4 categorías; temperatura, presión, tiempo y distancia. Lamentablemente estas variables no son independientes y un cambio en una de ellas afectará a las otras. A continuación se comentan las más importantes.

2.2.1. Temperatura de inyección

Es la temperatura a la que se calienta el material para introducirlo en el interior del molde. La temperatura del material aumenta gradualmente desde que entra por la tolva hasta que se encuentra preparado para ser inyectado. Esta temperatura es función del tipo de material y no debe ser superior a la temperatura a la que comienza a descomponerse, pero debe ser suficientemente elevada para permitir que el material fluya correctamente. La fusión y homogeneización del material a lo largo de la cámara de plastificación se lleva a cabo por los mismos mecanismos que se describieron para las extrusoras.

2.2.2. Temperatura del molde

Es la temperatura a la que se encuentra la superficie de la cavidad de moldeo. Debe ser lo suficientemente baja para enfriar el material fundido y conseguir que solidifique. Esta temperatura varía a lo largo del molde y depende de varios parámetros (temperatura del fluido refrigerante, temperatura del material, características térmicas del molde, etc.),

pero a efectos prácticos se evalúa como el valor medio a lo largo de toda la cavidad. La velocidad a la que se enfría el plástico es un factor muy importante puesto que va a condicionar la morfología del material y, por tanto, sus propiedades físicas, mecánicas, ópticas, etc.

2.2.3. Presión inicial o de llenado

Es la presión que se aplica inicialmente al material fundido y que se desarrolla como consecuencia del movimiento hacia adelante del tornillo. Esta presión obliga a que el material fundido fluya hacia adelante, produciendo el llenado inicial del molde. En una situación ideal la presión inicial debe ser lo mayor posible, de modo que el llenado se produzca lo más rápidamente posible.

2.2.4. Presión de mantenimiento o compactación (holding pressure)

Es la presión que se aplica al final de la inyección del material, cuando el molde se encuentra casi completamente lleno. Se llama presión de mantenimiento o compactación, puesto que es la presión que se aplica durante la etapa de compactación, cuando algunas partes del material han comenzado a enfriarse y contraerse, y obliga a que el molde se acabe de llenar y se obtenga una pieza con una densidad uniforme.

2.2.5. Presión posterior o de retroceso (back pressure)

Es la presión que se aplica al tornillo mientras retrocede, una vez finalizada la etapa de compactación. Una vez que el molde está completamente lleno el tornillo comienza a girar para plastificar más material para el siguiente ciclo. Este material comienza a alojarse delante del tornillo, obligando a que el tornillo retroceda, sin embargo, no se permite que el tornillo retroceda libremente sino que se aplica una cierta presión posterior para conseguir que el material se mezcle y homogenice adecuadamente.

2.2.6. Tiempo de llenado o de inyección inicial

El tiempo necesario para realizar la inyección depende de numerosos factores, como de cuánto material se está inyectando, su viscosidad, las características del molde y el porcentaje de la capacidad de inyección que se está empleando. En la mayoría de las máquinas, el tiempo de inyección se divide en dos: el tiempo de llenado o de inyección inicial y el tiempo de mantenimiento. El tiempo de inyección inicial es el tiempo necesario para que el tornillo realice el recorrido hacia adelante, obligando a que el material se introduzca dentro del molde. Normalmente este tiempo no es superior a 2 segundos y, rara vez excede los 3 segundos.

2.2.7. Tiempo de mantenimiento o compactación

El tiempo de mantenimiento o tiempo de compactación es el tiempo que, después de realizar la inyección inicial del material, el tornillo permanece en posición avanzada, para mantener la presión del material dentro del molde. Este tiempo se prolonga hasta que la entrada a la cavidad de moldeo solidifica. A partir de ese instante la cavidad de moldeo queda aislada del resto del sistema mientras continúa enfriándose, por lo que prolongar el tiempo que el pistón permanece en posición avanzada carecería de sentido. Para una pieza de 1.5 mm de espesor el tiempo de mantenimiento no suele exceder de 6 segundos.

2.2.8. Tiempo de enfriamiento

Es una de las variables más importantes para conseguir una pieza de buena calidad. Es el tiempo que la pieza requiere para enfriarse hasta que ha solidificado y además ha adquirido la rigidez suficiente para poder ser extraída del molde sin que se deforme. Las partes más externas de las piezas se enfrían a velocidad más rápida. El tiempo de enfriamiento debe ser suficiente para que un espesor considerable de la pieza (al menos el 95% de la pieza) se encuentre frío para evitar que la pieza se deforme. Lógicamente cuanto mayor sea el espesor de la pieza que se está moldeando mayor será el tiempo de enfriamiento requerido. Como media una pieza de 1.5 mm de espesor requiere de 9 a 12 segundos para solidificar y adquirir suficiente resistencia para poder ser extraída del molde sin deformaciones.

2.3. COMPONENTES DE LA MÁQUINA DE INYECCIÓN

Considerando todo lo comentado anteriormente, la máquina de inyección convencional puede considerarse constituida por dos unidades fundamentales; el sistema de cierre y la unidad de inyección, como se aprecia en la figura 5.6. Cuando se proyecta y construye una máquina, estas unidades pueden acoplarse de varias formas. En particular la manera de disponer la unidad de inyección y el sistema de cierre permite distinguir entre máquinas con sistema de inyección vertical u horizontal y, según la dirección en que actúa la fuerza de cierre, se distingue entre máquinas de cierre vertical y horizontal.

El hecho de considerar independientes las unidades de cierre y de inyección permite la construcción de máquinas "a medida", de acuerdo con las características de la pieza que se desea moldear. De esta forma se aprovechan al máximo las posibilidades de ambas unidades y se abarata el proceso tanto desde el punto de vista de los costes de operación como desde el punto de vista de inversión en equipo. Esto es particularmente interesante, por ejemplo, en el caso de que se desee moldear piezas de gran sección transversal y pared delgada, por ejemplo bandejas, que pesan relativamente poco pero que requieren grandes fuerzas de cierre. También puede presentarse el caso inverso, cuando se pretenda moldear piezas muy compactas, con espesores de pared gruesos y sección transversal pequeña, de modo que se requiere una máquina con elevada capacidad de inyección, pero no es necesaria una fuerza de cierre elevada. Otra ventaja de las máquinas

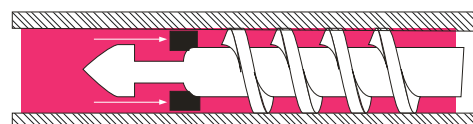
"a medida" es la de que permiten intercambiar estas unidades cuando se precisa moldear otro tipo de piezas.

2.3.1. Unidad de inyección

La unidad de inyección consta de un sistema de alimentación (tolva) y del sistema cilindro-tornillo, ambos de características muy similares a los de las máquinas de extrusión que se estudiaron anteriormente. Sin embargo, en el proceso de extrusión el material sale de la máquina por la boquilla, que tiene un diseño condicionado por la geometría de la pieza, mientras que en el proceso de inyección el diseño de esa parte de la máquina (tobera) se realiza teniendo en cuenta exclusivamente las características térmicas y de flujo del material. Otra diferencia clara con las máquinas de extrusión reside en el movimiento hacia adelante que realizan los tornillos de las máquinas de inyección. Para evitar el retroceso del material durante la inyección, estas máquinas están dotadas de válvulas o sistemas que impiden el retorno del material a la unidad de inyección. En este tema se abordarán aquellas partes de la unidad de inyección diferentes de las que se estudiaron en el tema de extrusión, esto es; las válvulas de no retorno y la tobera.

2.3.1.1. Válvulas de no-retorno

Las válvulas de no-retorno de tipo anillo son las más utilizadas y están constituidas por un anillo que debe deslizarse sobre el cilindro con muy poca holgura sobre éste, como se muestra en la figura 5.11. Mientras el tornillo gira, la válvula se encuentra abierta y el material que está siendo plastificado fluye a través del espacio entre el extremo del tornillo y el anillo. Cuando el tornillo realiza su movimiento hacia adelante para inyectar el material en el molde, la válvula se cierra, de modo que el tornillo queda apoyado sobre el asiento del anillo, lo que impide el retroceso de material.



a) Cerrada



b) Abierta

Figura 5.11. Válvula de no-retorno de tipo anillo.

Este tipo de válvulas sufre un gran desgaste, por lo que deben reemplazarse con frecuencia, y aumentan las pérdidas de presión en la cámara de plastificación. Además

pueden crear zonas donde el material pudiera quedar estancado, por lo que en el caso de emplear materiales muy sensibles térmicamente se suele evitar el empleo de estos mecanismos, para no provocar la degradación del material. Hay otros mecanismos de no retorno que se utilizan frecuentemente, como las válvulas de asiento de bola, aunque aparecen continuamente en el mercado nuevos tipos de sistemas de no-retorno.

2.3.1.2. La tobera

La tobera es la pieza situada en el extremo del cilindro de inyección y que da salida al material fundido hacia los canales del molde. El diseño de la tobera depende mucho del tipo de polímero con que se trabaje y del diseño del molde. El diámetro del taladro de la tobera suele oscilar entre 3 y 8 mm dependiendo del peso de la pieza inyectada. La tobera debe poder intercambiarse con facilidad para poder emplear la más adecuada dependiendo del tipo de polímero y de las características de las piezas moldeadas. Debe, además, mantener correctamente la temperatura del polímero y evitar el goteo de material que impediría un buen asiento entre tobera y bebedero (la zona del molde sobre la que se apoya la tobera se conoce como bebedero) y, por supuesto, debe tener un diseño tal que evite caídas de presión innecesarias.

En líneas generales, puede considerarse dos tipos de toberas dependiendo de la forma como hacen su asiento en el molde. Estos dos tipos son la tobera redonda y la plana, que se presentan en la figura 5.12. Como se puede apreciar el diámetro del taladro de la tobera siempre debe ser menor que el del bebedero (casos a y b) para evitar retenciones del material. Si se usa una tobera redonda la curvatura de la punta debe ser menor que la del asiento sobre el molde, como se aprecia en la figura 5.12 (caso b), pues en caso contrario se produciría la salida del polímero fundido y no sería posible conseguir un buen asiento entre tobera y bebedero (caso c).

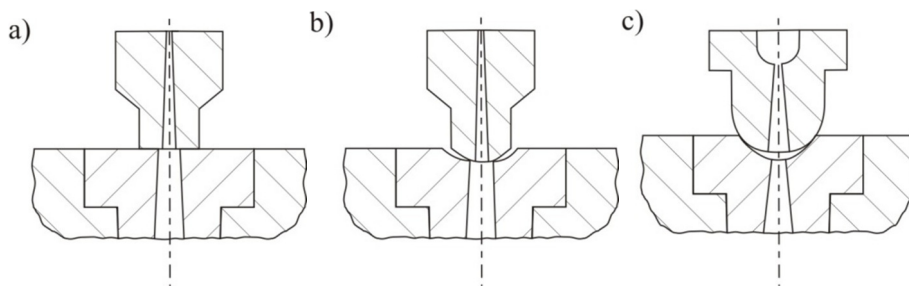


Figura 5.12. Diferentes diseños de toberas y bebederos.

En la figura 5.13 se han representado diferentes tipos de toberas. La tobera normal o cónica de la figura 5.13a es económica y fácil de fabricar. Sin embargo, la conicidad de su taladro provoca pérdidas de presión innecesarias en el polímero fundido. No se aconseja el uso de esta tobera cuando se producen grandes pérdidas de presión en el molde, pues para mantener la presión suficiente para llenar las cavidades sería necesario un orificio de salida de la tobera excesivamente grande. En la figura 5.13b se representa la tobera de flujo libre que mantiene el diámetro del taladro principal de la tobera

relativamente grande y muy corto el recorrido del pequeño orificio final. De este modo la resistencia ofrecida al paso del material es menor. El diseño de esta tobera permite la colocación de bandas de calefacción a lo largo de la misma para mantener la temperatura del polímero, así como la prolongación (toberas prolongadas) de la misma dentro del propio molde para así poder disminuir la longitud del bebedero y mantener el diámetro de entrada de éste en un valor pequeño.

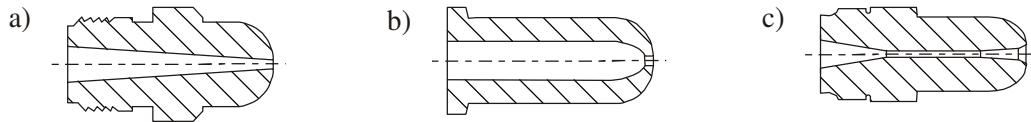


Figura 5.13. Esquema de diferentes tipos de toberas: a) tobera normal o cónica, b) tobera de flujo libre, c) tobera de conicidad invertida.

Un problema típico que suele presentarse en materiales que tienen viscosidad muy baja del fundido, como es el caso de las poliamidas, es que entre ciclo y ciclo salga material goteando por la tobera, el cual podría ensuciar la superficie exterior de la tobera, impidiendo así un buen asiento sobre el molde. Este problema se evita empleando toberas de conicidad invertida, como es el caso de la “tobera italiana” que se presenta en la figura 5.13c. El problema del goteo de material también se puede evitar mediante el uso de los diferentes tipos de toberas con válvula, como por ejemplo es el caso de la tobera con válvula deslizante de la figura 5.14. Cuando esta tobera apoya sobre el molde, la pieza que lleva el orificio que permite la salida del material se desliza hacia atrás y sus taladros laterales se ponen en comunicación con el polímero fundido que llena el cuerpo principal de la tobera, con lo que el material puede salir y ser inyectado (figura 5.14a). Cuando el cilindro de inyección se retira y la tobera deja de apoyarse en el molde, la propia presión del polímero fundido obliga al elemento móvil a deslizarse hacia adelante, con lo que los taladros laterales dejan de estar en comunicación con el cuerpo principal de la tobera (figura 5.14b).

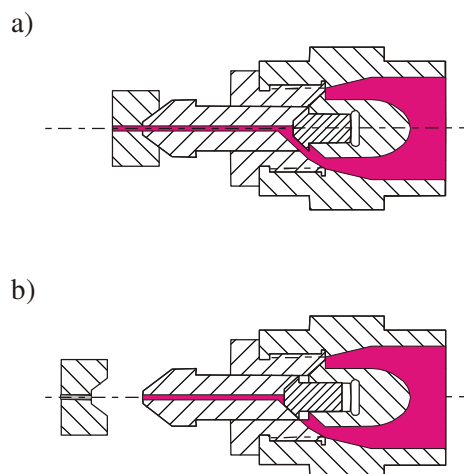


Figura 5.14. Tobera con válvula deslizante.

2.3.2. La unidad de cierre

Un cierre perfecto del molde tiene una gran importancia sobre la calidad de la pieza moldeada y puede hacer innecesarias operaciones secundarias de eliminación de rebabas de los artículos producidos. Al escoger las condiciones del proceso debe darse la debida consideración a la fuerza de cierre que, según lo que llevamos comentado, debe ser superior a la fuerza de apertura desarrollada en el interior del molde.

Los sistemas de cierre constan generalmente de dos platos o placas fijas unidas por unas robustas columnas de alineación, generalmente cuatro (figura 5.15). Entre los dos platos fijos hay uno móvil que desliza por las columnas de alineación. A un lado de un plato fijo va situada la unidad de inyección y al otro lado del otro plato fijo va situada la unidad de cierre, que desplaza al plato móvil. El molde se coloca entre el plato móvil y el plato fijo situado en el lado de la unidad de inyección.

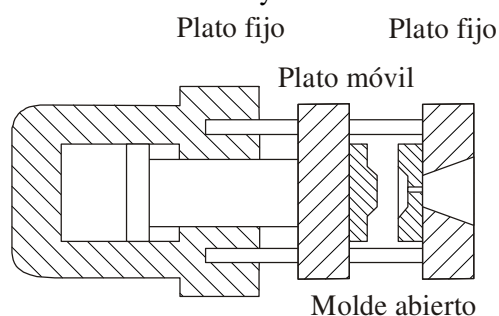


Figura 5.15. Esquema de sistema de cierre hidráulico.

La acción de cierre requiere la máxima eficacia y la máxima rapidez. Conviene que se haga lo más rápidamente posible (50 m/min) hasta un instante antes de que se toquen las dos mitades del molde y, que después, el movimiento sea más lento aplicando la máxima fuerza de cierre (5-10000 T). De este modo se evitan golpes innecesarios sobre los moldes. Suelen distinguirse tres tipos básicos de sistemas de cierre: sistemas mecánicos, sistemas mecánico-hidráulicos y sistemas hidráulicos.

2.3.2.1. Sistemas mecánicos

Estos sistemas emplean una acción mecánica para el cierre del molde y se encuentran en las pequeñas máquinas de laboratorio. El sistema, en su forma más sencilla, puede consistir en una palanca, piñón o manubrio. Las ventajas de los sistemas totalmente mecánicos están en su sencillez y bajo coste, si bien consiguen fuerzas de cierre moderadas y velocidades bajas.

2.3.2.2. Sistemas hidráulicos

El pistón hidráulico directo como el representado en la figura 5.15 es el sistema de cierre hidráulico más sencillo y el primero que se utilizó. La principal ventaja que ofrece

es la elevada fuerza de cierre que puede desarrollar, que es constante en toda la carrera del pistón de cierre. Estos sistemas de cierre pueden llegar a desarrollar movimientos muy rápidos (50 m/min), si bien el coste para conseguirlo resulta muy elevado. La situación general que plantea un sistema de cierre hidráulico de cualquier tipo es que para mantener un tamaño razonablemente pequeño del pistón de cierre consiguiendo una fuerza de cierre adecuada, es necesario aumentar la presión del fluido, con lo que las pérdidas de fluido hidráulico y la deformación de tuberías y accesorios llegan a constituir un serio problema.

Las máquinas más modernas utilizan, para los movimientos rápidos de avance y retroceso del pistón principal, otros pistones auxiliares que son de pequeño diámetro y van situados paralelamente al pistón principal o incluidos centralmente en él. La fuerza total de cierre la da el pistón principal mientras que los pistones auxiliares sólo sirven para conseguir movimientos más rápidos del sistema. En la figura 5.16 se representa un sistema de cierre hidráulico de este tipo, que consta de un pistón hidráulico principal, de mayor sección, que da una elevada fuerza de cierre y que realiza los movimientos finales, mientras que el resto del movimiento del plato móvil es debido a un pistón secundario de menor sección y que proporciona movimientos más rápidos.

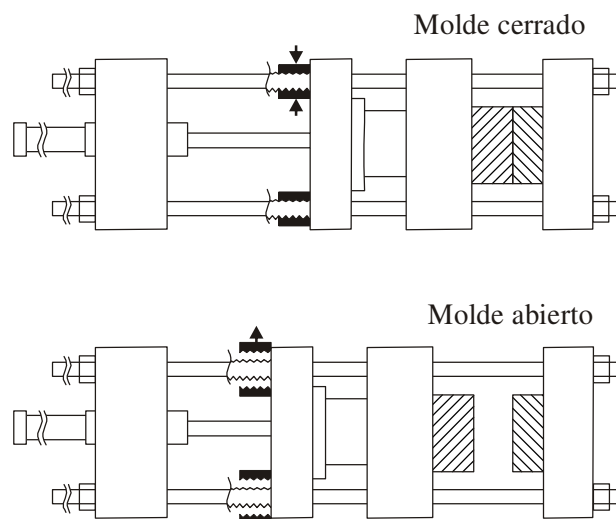


Figura 5.16. Sistema de cierre de dos pistones.

Entre las principales ventajas de los sistemas hidráulicos de cierre se encuentra que la fuerza de cierre puede ser monitorizada y cambiada en cualquier momento durante el ciclo, y lo mismo ocurre con la velocidad a la que se mueve el pistón a lo largo de su recorrido.

2.3.2.3. Sistemas mecánico-hidráulicos

Las máquinas con sistema de cierre mecánico-hidráulico están basadas en el uso de rodilleras actuadas por un sistema hidráulico. Estos sistemas de cierre son muy empleados en máquinas de pequeño y mediano tamaño.

Las ventajas de los sistemas de rodilleras estriban en la acción positiva de cierre de las rodilleras, así como en la mayor velocidad de cierre empleando un pistón más pequeño, ya que las rodilleras son sistemas multiplicadores de fuerza. Además, la fuerza relativamente grande que se desarrolla al final de la carrera de cierre va acompañada de una reducción de velocidad del mismo orden, lo que es muy conveniente para evitar golpes cuando se cierra el molde. En la figura 5.17 se muestra un sistema mecánico-hidráulico de rodillera simple. Cuando el molde está abierto las rodilleras se encuentran formando una V. Cuando se aplica presión el eje que conecta las dos rodilleras obliga a éstas a mantenerse en línea recta. La fuerza necesaria para mantener las rodilleras rectas la proporciona un pistón hidráulico. En este caso cuando el pistón hidráulico comienza a avanzar el plato móvil se mueve en principio lentamente, alcanzando la velocidad máxima a mitad del recorrido. Cuando las rodilleras están casi extendidas la velocidad vuelve a decrecer.

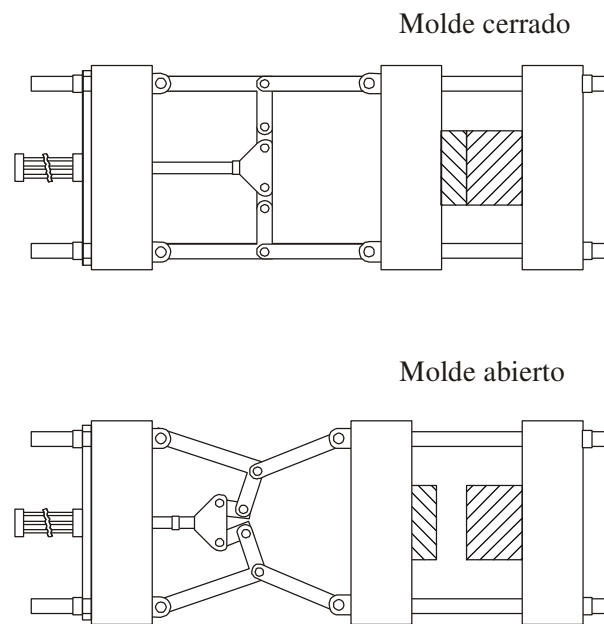


Figura 5.17. Sistema mecánico-hidráulico de cierre.

Estos sistemas presentan la desventaja de que tanto la velocidad de cierre como la fuerza son más difíciles de controlar que con sistemas completamente hidráulicos. La principal ventaja que presentan los sistemas mecánico-hidráulicos de cierre es el bajo coste de operación, tanto para conseguir elevadas fuerzas de cierre como elevadas velocidades de cierre.

3. MOLDES DE INYECCIÓN

Con respecto a los moldes de inyección conviene definir algunas partes de los mismos antes de seguir avanzando. En la figura 5.18 se presentan esquemáticamente dos moldes que ayudan a describir algunos términos que se emplean para denominar diferentes partes de los moldes o de las piezas de inyección, tales como:

- Bebedero.
- Mazarote.
- Canales de alimentación.
- Ramificaciones.
- Cavidades de moldeo.
- Recortes.

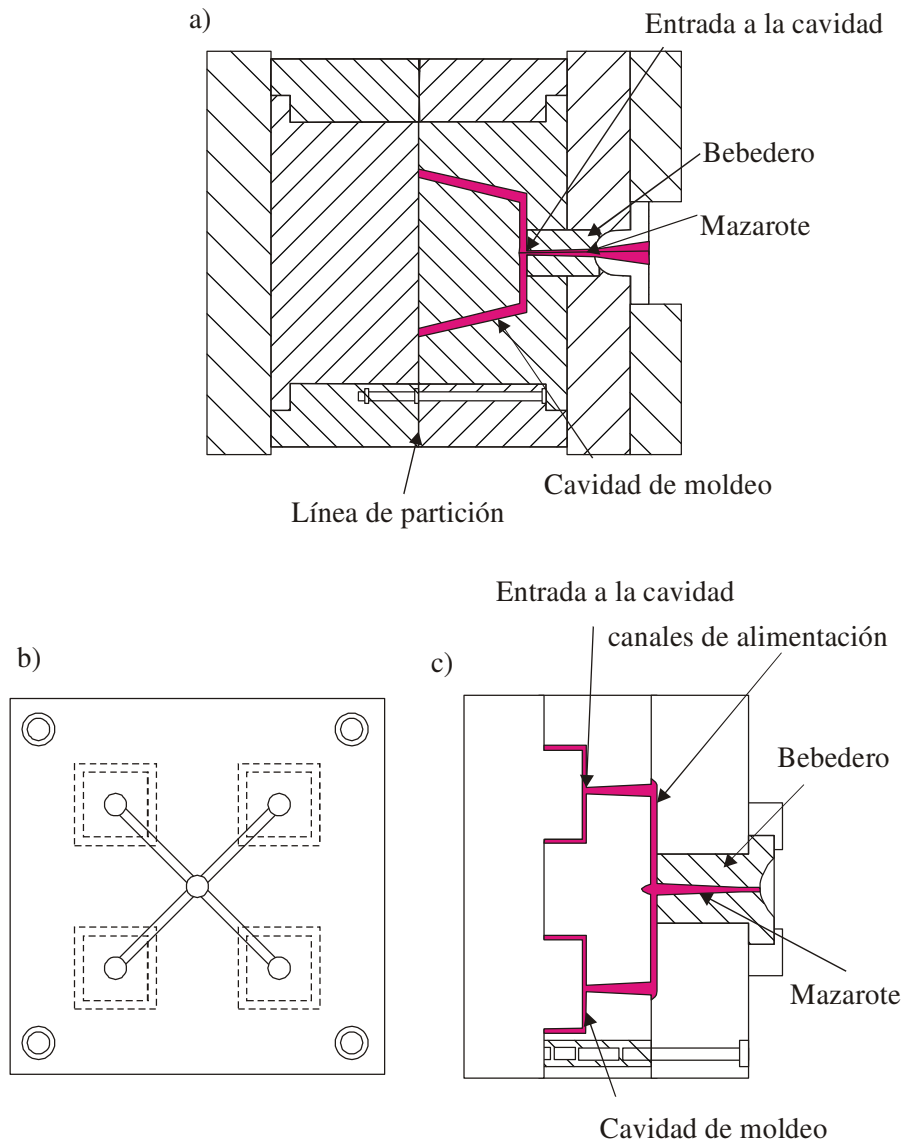


Figura 5.18. Representación esquemática de un molde: a) molde de una sola cavidad; b) y c) área transversal y corte de un molde de cuatro cavidades

El **bebedero** es la parte del molde sobre la que se apoya la tobera y el polímero fundido que ocupa el bebedero cuando termina el moldeo recibe el nombre de **mazarote**. En la figura 5.18a, el bebedero comunica directamente con la cavidad de moldeo mientras que, en las figuras 5.18b y 5.18c, el bebedero se ramifica en varios canales que llegan hasta las **cavidades de moldeo**. Estos canales se denominan **canales de alimentación** y

el polímero que los llena después de terminar cada ciclo de moldeo se conoce como **ramificaciones**. Mazarote y ramificaciones suelen ir unidos a las piezas moldeadas y reciben en conjunto la denominación de **recortes** pues han de ser separados de las piezas moldeadas en una operación posterior de recorte.

Los canales de alimentación acaban en una sección más estrecha que comunica con la cavidad de moldeo, a la que se llama **entrada a la cavidad** o simplemente entrada (gate). Según el tamaño de la pieza que se moldea, la cavidad puede tener una sola o varias entradas convenientemente distribuidas. Después de lo expuesto, el concepto de cavidad de moldeo no necesita ningún otro comentario. Un molde de inyección puede tener una o varias cavidades de moldeo.

Un molde está constituido al menos por dos mitades, una mitad positiva y otra negativa, que juntas forman la cavidad de moldeo. Estas mitades se unen por presión cuando se cierra el molde, tocándose entre sí en una superficie plana a la que se suele llamar **plano de partición del molde**. Cuando se representa una sección del molde, la superficie de partición puede quedar reducida en el dibujo a una sola línea que recibe el nombre de **línea de partición**. El plano de partición es perpendicular a la dirección en que actúa la fuerza de cierre. Se llama **área transversal de las cavidades** o "área proyectada de las cavidades" (figura 5.18b) a la proyección de las cavidades de moldeo sobre el plano de partición. El producto de la presión del polímero dentro de la cavidad por el área transversal de ésta será igual a la fuerza que tiende a separar las dos mitades del molde. El área transversal de la pieza depende de la posición en que se coloca en el molde la cavidad de moldeo.

En ocasiones se utilizan moldes en tres partes como el de la figura 5.18c. En éstos los canales de alimentación y las cavidades de moldeo están en diferentes planos. Los moldes en tres partes resultan más caros, si bien tienen la ventaja de que el llenado de las cavidades puede ser mucho más simétrico y las piezas obtenidas son de mejor calidad.

Conforme el polímero llena el molde cerrado, el aire que se encontraba llenando la cavidad de moldeo debe ser evacuado. Por lo general este aire escapa por la línea de partición del molde o por la holgura que queda entre el molde y las espigas extractoras. Cuando esto no sea posible (por ejemplo, cuando se emplean fuerzas de cierre muy elevadas) el molde debe tener una serie de pequeños orificios, generalmente practicados a lo largo del plano de partición que permitan la evacuación del aire, pero no del polímero fundido (con un diámetro próximo a 0.025 mm).

En los moldes de inyección es muy importante que la temperatura de la pieza sea lo más uniforme posible durante el enfriamiento. Por ello, el molde contiene una serie de **canales de refrigeración** por los que circula el líquido de refrigeración, generalmente agua. Estos canales deben estar diseñados de modo que permitan el enfriamiento de la pieza a velocidad adecuada y de manera uniforme.

La calidad y propiedades finales de las piezas moldeadas dependen en gran medida de las condiciones físicas del polímero que llena la cavidad en el momento en que solidifica el mazarote. Por ello, en los moldes de múltiples cavidades, se requiere que todas ellas comiencen a llenarse a la vez y acaben al mismo tiempo. Esto se puede conseguir haciendo que el material recorra siempre el mismo camino para llenar todas las cavidades, lo que se conoce como **flujo equilibrado** (figura 5.19a), pero presenta los inconvenientes de que se pierde una cantidad de material considerable en los recortes y de que el molde debe ser bastante grande. Otra posibilidad es modificar el diámetro y la longitud de la entrada a las cavidades para compensar las diferentes caídas de presión debidas al flujo del material, lo que se conoce como **flujo compensado** (figura 5.19b). Con el flujo compensado se consigue disponer las cavidades lo más juntas posible y con canales lo más cortos posible.

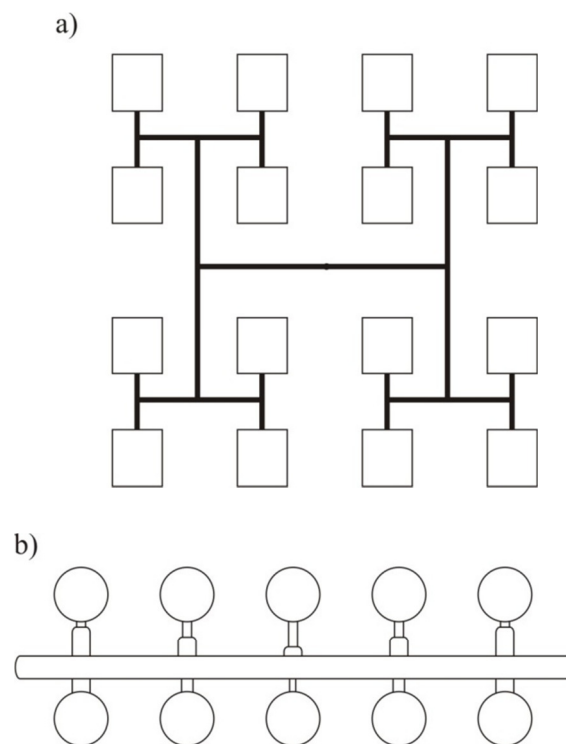


Figura 5.19. Cavidades de moldeo dispuestas en: a) flujo equilibrado, y b) flujo compensado.

En un molde convencional, los canales de alimentación que conducen desde la tobera y el bebedero hasta las cavidades de moldeo quedan llenos de polímero fundido al terminar cada etapa de inyección. Este polímero se enfría a la vez que las piezas moldeadas y se extrae con ellas del molde, frecuentemente unido a las propias piezas, por lo que es preciso realizar una operación posterior para separarlos y otra operación para triturar estos recortes y poder aprovecharlos de nuevo en otro ciclo. El **moldeo con canales calientes** se realiza con moldes de inyección que incluyen un sistema que mantiene los canales de alimentación a una temperatura más alta que las cavidades de moldeo. De este modo, el polímero que ocupa los canales de alimentación permanece

siempre en estado fundido y preparado para la próxima inyección. Esto significa que el control de la temperatura debe ser muy riguroso, tanto en el molde como en las toberas, que el área de contacto entre las toberas secundarias y el molde ha de mantenerse en el mínimo y que el ciclo de moldeo ha de ser rigurosamente constante. Se suelen rebajar determinadas zonas del molde para disminuir el área de contacto de las toberas y se aísla el sistema de canales del resto del molde. Estos moldes resultan caros y por ello, sólo se usan para producciones muy grandes que permiten amortizar el coste de los mismos. La técnica de **moldeo con canales aislados** elimina prácticamente estos inconvenientes. En esta técnica los canales son de gran diámetro (como mínimo 12.5 mm). Cuando se inyecta el material plástico la capa en contacto con el metal frío solidifica. Esta capa actúa como aislante térmico por lo que el polímero que fluye por el centro del canal permanece fundido inyección tras inyección. Estos moldes permiten economizar los costes de construcción, no necesitan de un control tan riguroso de la temperatura y suprimen la necesidad de eliminar recortes.

4. FUNDAMENTOS DEL MOLDEO POR INYECCIÓN

En este apartado se estudian todas las etapas por las que pasa el material desde que se introduce en la máquina hasta que se obtiene la pieza moldeada. En primer lugar, se compara el comportamiento del material dentro de la cámara de plastificación con el comportamiento en una extrusora y, a continuación, se estudia con detalle el proceso de llenado del molde y enfriamiento del material dentro de la cavidad de moldeo.

4.1. CONTROL DE LA TEMPERATURA EN LA CÁMARA DE CALEFACCIÓN

Como se ha comentado, en todo lo referente al transporte de sólidos, mecanismo de fusión y transporte del fundido, el comportamiento del material en una máquina de inyección es análogo al de extrusión, que se estudió en el tema 4. El calentamiento del material es muy similar, si bien existen algunas diferencias. En una extrusora el calentamiento del material tiene lugar por conducción del calor suministrado por los elementos externos de calefacción y por disipación viscosa debido al giro del tornillo. En las máquinas de inyección existe una contribución adicional; conforme el tornillo gira se acumula material fundido delante de la cámara de plastificación y, puesto que no se permite la salida continua del material por la tobera ni el retroceso libre del tornillo, este material se encuentra sometido a presión (**presión posterior** del tornillo). Al aumentar esta presión aumenta el trabajo que realiza el tornillo sobre el polímero fundido, lo que se traduce en un aumento de la temperatura del material. Por tanto, para controlar la temperatura del material es preciso controlar la presión posterior del tornillo, además de la velocidad de giro y de la temperatura del cilindro de inyección.

En la figura 5.20 se muestra la influencia de la presión posterior que se aplica sobre el tornillo durante la plastificación del material sobre la temperatura que alcanza el

polímero fundido. Al aumentar la presión aumenta la temperatura del fundido y mejora notablemente la eficacia de plastificación y de mezclado del material.

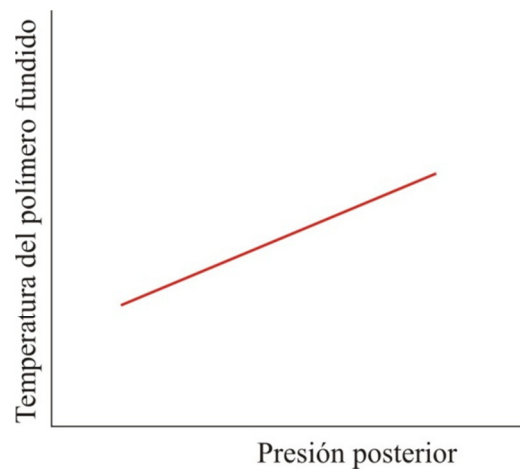


Figura 5.20. Efecto de la presión posterior del tornillo sobre la temperatura del polímero fundido.

La presión posterior que se ejerce sobre el tornillo se iguala a la que se crea delante del mismo y, por tanto, durante la etapa de plastificación equivale a la presión con la que el tornillo descarga material plastificado y que queda acumulado delante de él. Durante esta etapa, el tornillo presenta unas líneas características o rectas operativas, que dependen de su diseño y de las variables de operación, de forma similar al tornillo de una extrusora. Sin embargo, en el caso de la máquina de inyección debe tenerse en cuenta que las variaciones de presión afectan, no sólo al caudal de material descargado, sino también, a la temperatura del mismo. En consecuencia, para conseguir un control adecuado de la temperatura es preciso controlar todas las causas de calentamiento; los elementos externos de calefacción, el calor causado por el giro del tornillo y la presión posterior que se ejerce sobre el tornillo.

4.2. COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL DENTRO DEL MOLDE

Desde un punto de vista teórico, el flujo del polímero fundido en el moldeo por inyección resulta un problema reológico muy complejo. Se trata del flujo de un líquido no Newtoniano, compresible y que fluye a través de canales de geometría compleja, cuyas paredes están mucho más frías que el polímero. En esta sección se describen detallada y cualitativamente las diferentes etapas por las que pasa el material desde que abandona la cámara de plastificación hasta que se extrae la pieza del molde, y el efecto de las principales variables sobre las propiedades de la pieza moldeada. Las tres variables fundamentales que rigen el comportamiento del material dentro del molde son temperatura, presión y tiempo.

El proceso que se va a estudiar se puede resumir de la siguiente forma. Se puede considerar que el ciclo de inyección comienza en el momento en el que el molde vacío se cierra y queda listo para la inyección del material. A continuación el husillo comienza a

avanzar haciendo fluir al fundido, que sale a través de la tobera y recorre los canales de alimentación hasta que llena las cavidades de moldeo. Cuando el plástico fundido entra en el molde y toca las paredes relativamente frías de éste, la capa de fundido más externa en contacto con las paredes metálicas se enfría rápidamente, por lo que el artículo moldeado consiste en una corteza de polímero sólido que rodea a un núcleo fundido. Conforme se enfría, el material comienza a contraerse, por lo que el pistón de inyección debe permanecer un corto periodo de tiempo en posición avanzada para compactar el material y compensar la contracción que sufre al enfriarse. La presión máxima que puede mantenerse a través de la entrada a la cavidad dependerá del tamaño eficaz de ésta, de las dimensiones del núcleo fundido y de la fluidez del polímero dentro del molde. El punto de entrada a la cavidad de moldeo es, generalmente, la zona más estrecha del sistema y que presenta la máxima relación entre la superficie disponible para la transmisión de calor y el volumen de material que aloja, por tanto, es la primera zona donde el material solidifica. Una vez que la entrada a la cavidad solidifica, el pistón ya no es capaz de transmitir más presión dentro del molde, por lo que se le hace retroceder. Dentro del molde, la capa fría de material va engrosando gradualmente hasta que el polímero solidifica completamente. La presión dentro de la cavidad disminuirá a medida que el polímero se enfría y se contrae. La presión variará con la temperatura del artículo moldeado, es decir, habrá una relación de estado entre la presión, el volumen y la temperatura de la pieza que se está enfriando, que va a determinar en gran medida la calidad de la pieza obtenida.

Una manera muy conveniente de estudiar el ciclo de moldeo por inyección es medir la presión del material que ocupa la cavidad y ver cómo ésta varía con el tiempo. En la figura 5.21 se muestra un diagrama típico presión/tiempo donde se pueden observar las etapas que se acaban de describir; llenado, compactación y enfriamiento. El origen de tiempos se toma en el momento en que se cierra el molde.

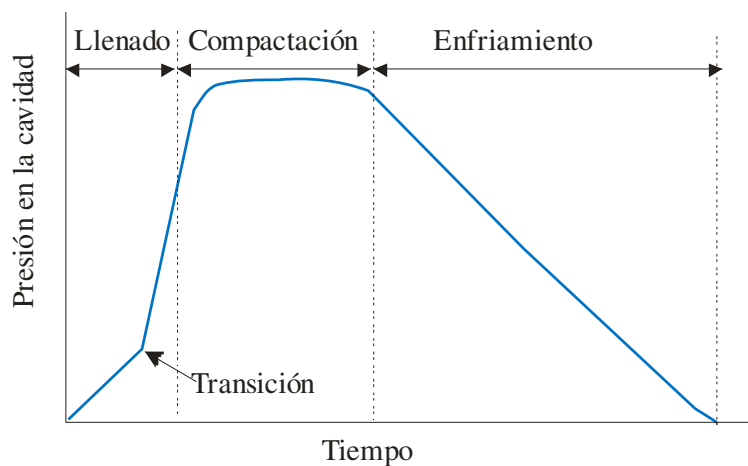


Figura 5.21. Presión en el molde durante un ciclo típico de moldeo.

A continuación se analizan con mayor detalle las tres etapas: 1) llenado de la cavidad, 2) compactación y 3) enfriamiento de la pieza.

4.2.1. Análisis de la etapa de llenado de la cavidad

La etapa de llenado comprende desde que el material entra en la cavidad hasta que comienza la fase de compactación. Los dos parámetros más importantes que intervienen en esta fase son la velocidad de inyección y la temperatura de inyección.

4.2.1.1. Flujo del material durante la etapa de llenado

En la figura 5.22 se representa la sección de un molde que se está llenando, junto con el perfil de velocidades del material en el frente de llenado y en 2 puntos detrás del mismo. Puesto que la superficie de los moldes está perfectamente pulida se puede suponer que el frente de llenado presenta un perfil de velocidades prácticamente lineal, como el que se muestra en la figura 5.22. Conforme avanza el frente de llenado el material se enfría y aparece una capa de material solidificado sobre las paredes del molde, que recibe el nombre de **capa fría**. El material que circula cerca de la capa fría presentará una viscosidad elevada por lo que tiende a detenerse, pero es arrastrado por el material que sigue entrando al molde a gran velocidad. Cuando este material rebasa el límite de la capa fría, si su viscosidad es suficientemente elevada quedará retenido sobre las paredes del molde provocando lo que se conoce como **efecto fuente** (que se aprecia en la figura 5.22) que origina una fuerte orientación de las moléculas.

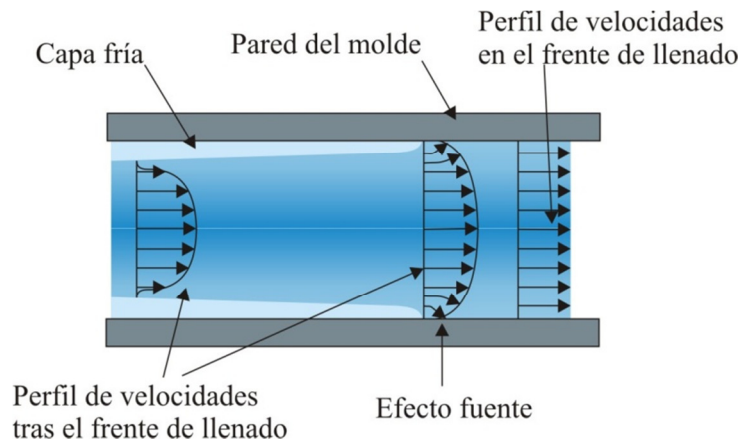


Figura 5.22. Perfil de velocidades en el frente de llenado y en 2 puntos por detrás del mismo.

En la siguiente figura se representan los perfiles de la velocidad, gradiente de velocidad y temperatura a través de la capa fría y del núcleo fundido en una sección de un molde que se está llenando. En las cercanías de la capa fría el material se ve sometido a un gradiente de velocidad elevado, tal como se observa en la figura 5.23. En una situación normal, la temperatura del material aumentará de forma progresiva desde la capa fría hacia el núcleo fundido. Sin embargo, si como consecuencia del gradiente de velocidad en el límite entre la capa fría y el núcleo, la cizalla es muy elevada, se puede producir un

incremento local de la temperatura del material en esa zona, como se aprecia en la figura 5.23.

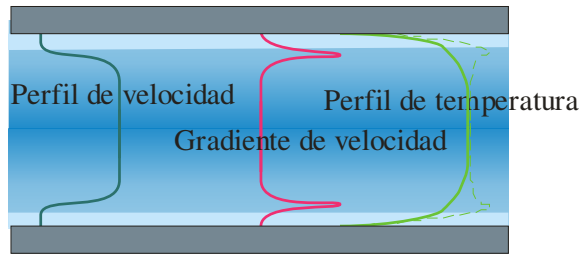


Figura 5.23 Perfil de velocidad de flujo, gradiente de velocidad y temperatura durante el llenado de un molde.

El espesor de la capa fría por detrás del frente de llenado no es constante. Por lo general, el máximo porcentaje de capa fría se encuentra en el punto medio de la longitud recorrida, pues en la zona cercana a la entrada, el material se encuentra todavía a una temperatura elevada y fluye a una velocidad más o menos uniforme, de forma que la capa fría se mantiene en un espesor pequeño, mientras que en la última zona del recorrido el material es renovado continuamente y se encuentra relativamente caliente. En la figura 5.24 se muestra cómo varía el espesor de la capa fría para un molde rectangular de sección constante en función de la distancia a la entrada de la cavidad recorrida por el frente de llenado.

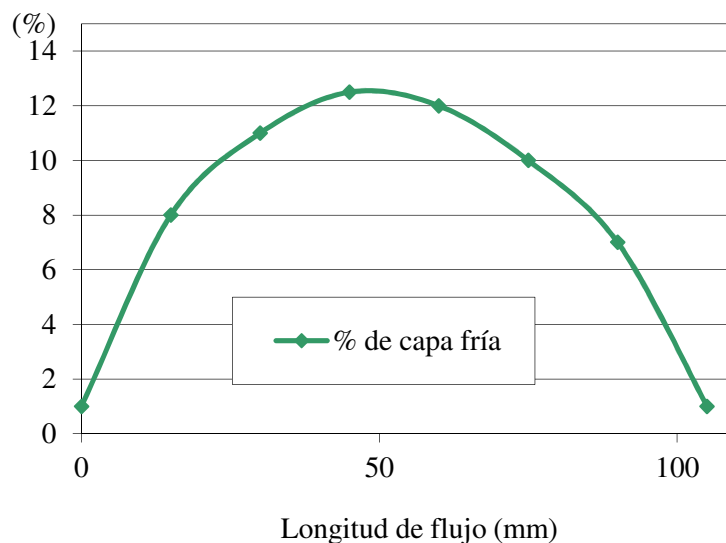


Figura 5.24. Espesor de la capa fría en función de la distancia recorrida por el frente de llenado.

4.2.1.2. Determinación del tiempo óptimo de llenado

La velocidad de llenado del molde depende de la velocidad a la que avanza el pistón de inyección que, por lo general, no es constante sino que se encuentra parametrizada en una serie de intervalos para conseguir que el llenado de la cavidad sea

lo más uniforme posible. El motivo es evitar que cuando el frente de llenado alcanza las zonas de paso más estrecho se produzcan gradientes de velocidades excesivamente elevados en el seno del material. La velocidad de llenado al final del recorrido del pistón de inyección debe disminuir para conseguir que la transición entre la etapa de llenado y la de compactación sea adecuada. El tiempo de llenado óptimo se establece atendiendo a 2 criterios; mínima presión de inyección y mínima diferencia de temperatura entre diferentes puntos de la pieza.

El tiempo de llenado óptimo se establece atendiendo a dos criterios; mínima presión de inyección y mínima diferencia de temperatura. Si el tiempo establecido de llenado es muy bajo (velocidad de llenado media muy alta), la **presión de inyección** necesaria para conseguir el caudal adecuado de material será muy alta. Igualmente, si el tiempo de llenado es demasiado alto (velocidad media lenta) también se necesitará una presión de inyección elevada para conseguir llenar el molde, puesto que parte del material que ocupa los canales habrá solidificado y la sección de paso del material puede haber disminuido mucho. Una presión de inyección elevada supone la necesidad de emplear fuerzas de cierre muy altas, lo que repercute sobre los costes y sobre la vida de la máquina y de los moldes. Por ello, la selección de la velocidad de llenado adecuada debe realizarse atendiendo a criterios de presión mínima de inyección. Por otra parte, es deseable que entre diferentes puntos de la pieza no exista una **diferencia de temperatura** grande, para evitar que éstos solidifiquen a velocidades muy diferentes y, por tanto, que existan diferencias importantes de densidad en la pieza. La temperatura del material que se encuentra llenando la cavidad es más alta en el punto de entrada y, en principio, va descendiendo conforme se aleja de la entrada, puesto que se va enfriando en contacto con las paredes del molde. Sin embargo, también puede ocurrir que la temperatura del material aumente conforme se aleja del punto de inyección. Esto puede suceder cuando la velocidad de llenado es muy alta (tiempos de llenado muy bajos) y hay zonas de paso muy estrecho, de modo que se produce una disipación de calor en el seno del material debido a las fricciones internas a las que está sometido.

En la figura 5.25 se muestra la evolución de la presión de inyección y de la temperatura del material en la entrada a la cavidad y en un punto alejado de la misma en función del tiempo de llenado. El análisis de este tipo de curvas permite determinar el tiempo de llenado óptimo teniendo en cuenta los 2 criterios mencionados; mantenimiento de la presión de inyección necesaria en un mínimo (y por tanto de la fuerza de cierre), así como mínima diferencia de temperatura entre diferentes partes de la pieza.

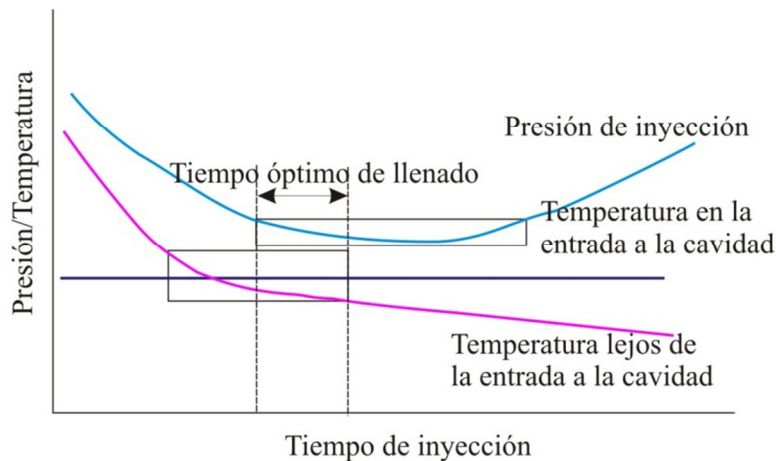


Figura 5.25. Determinación del tiempo óptimo de llenado en la cavidad en función de la presión de inyección y temperatura de la entrada a la cavidad y de un punto alejado de la misma.

4.2.2. Análisis de la etapa de compactación

Durante la etapa de compactación se añade el material necesario para acabar de llenar la cavidad, compensando la contracción térmica que sufre el material durante su enfriamiento y solidificación. Durante esta fase se consigue evitar la presencia de aire atrapado y de rechupes, así como minimizar la contracción final de la pieza y las deformaciones que algunas partes pudieran sufrir. La fase de compactación finaliza cuando la entrada a la cavidad solidifica, de modo que la máquina ya no puede transmitir la presión de compactación al interior de la cavidad.

La etapa de llenado se realiza a una velocidad de avance del pistón elevada y por ello se realiza bajo "el control de la velocidad". La fase de compactación se realiza, sin embargo, bajo el control de la presión. Durante esta etapa el tornillo de inyección se mantiene en posición avanzada, de modo que transmite una determinada presión, que puede ser variable, y en la mayoría de las máquinas se encuentra parametrizada en una serie de intervalos. La transición entre la fase de llenado y la de compactación debe realizarse de forma que se eviten picos de presión dentro de la cavidad, lo que provocaría la aparición de tensiones en las piezas.

4.2.2.1. Transición entre llenado y compactación

La transición entre las etapas de llenado y compactación debe realizarse de manera suave. En la figura 5.26 se muestran tres ejemplos de transición entre estas etapas, efectuados a distintos tiempos. Si la transición se realiza demasiado pronto, una parte del llenado se realiza bajo el control de la presión, lo cual provoca una caída brusca de la misma (figura 5.26a). En consecuencia la pieza presentará defectos superficiales, rechupes y porosidad interna. Si por el contrario la transición se efectúa demasiado tarde (figura 5.26b), se produce un pico de presión dentro de la cavidad y un retorno de

material hacia la entrada del molde, lo cual genera orientaciones del material inadecuadas. En este caso suelen aparecer rebabas en el plano de partición del molde, así como sobreesfuerzos en la máquina y el molde, que pueden afectar a su vida útil. En la figura 5.26c aparece un ejemplo de transición adecuada, que favorece una evolución suave de la presión en la cavidad y que evita los defectos señalados.

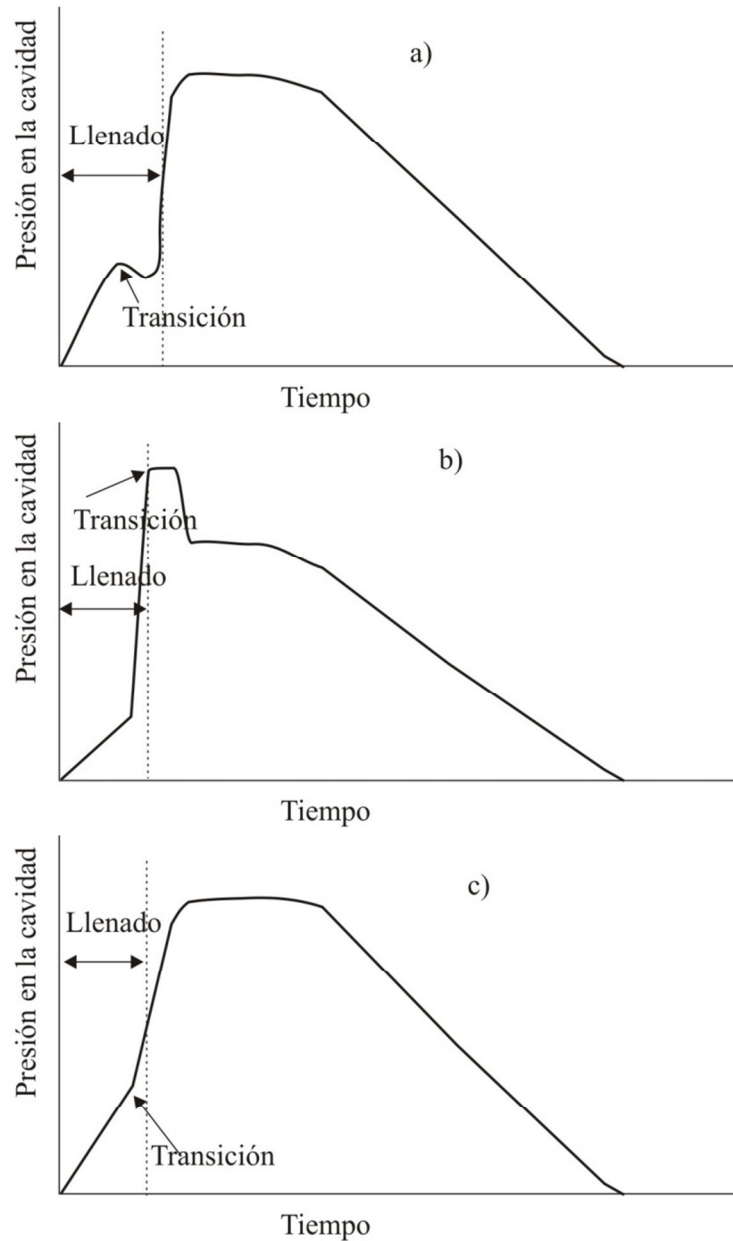


Figura 5.26. Transición entre la etapa de llenado y la de compactación.

4.2.2.2. Determinación del tiempo óptimo de compactación

Las principales variables que afectan a la calidad del material durante esta etapa son el tiempo, la presión y la temperatura de compactación, así como la temperatura del molde.

El **tiempo de compactación** puede influir en el perfil de presiones en la cavidad. Si el tiempo establecido para la compactación es demasiado bajo, en el momento en que se retira la presión de compactación (retrocede el pistón de inyección), la entrada del material no habrá solidificado aún y parte del material contenido en el molde fluirá hacia la cámara de calefacción, reduciéndose el peso final de la pieza, provocando la aparición de orientaciones en el material y favoreciendo la aparición de rechupes. En este caso, se observará una disminución muy pronunciada de la presión en el momento en el que se retira el pistón de inyección. Por otra parte, si se mantiene la presión de compactación después de que la entrada a la cavidad haya solidificado, el efecto de dicha presión no se transmitirá a la cavidad. En este caso, el perfil de presiones no se modificará y el único efecto será un aumento del consumo de la máquina y la ralentización del ciclo. En la figura 5.27 quedan reflejadas tres situaciones posibles en una curva presión-tiempo.

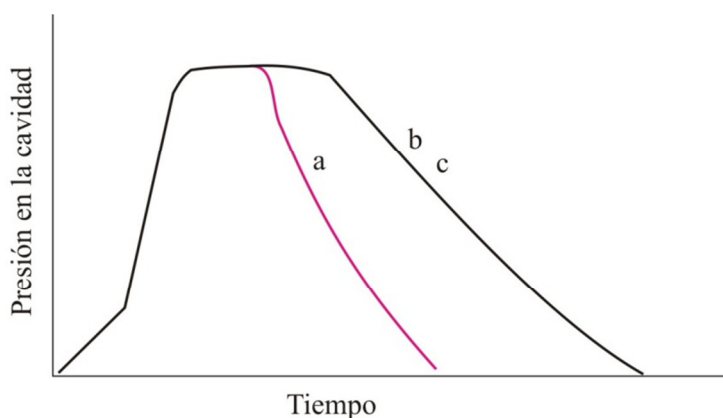


Figura 5.27. Efecto del tiempo de compactación en una curva P-t. a) tiempo de compactación demasiado corto, b) situación normal en la que el pistón se retira cuando la entrada solidifica, c) el pistón permanece demasiado tiempo en posición avanzada.

Para poder establecer el instante en que el material de la entrada solidifica y, por tanto, el tiempo óptimo de compactación, existen principalmente dos métodos:

- Comprobación de la presión en la entrada de la cavidad. Mientras la entrada no haya solidificado la presión irá disminuyendo paulatinamente y a partir del momento que la entrada solidifica, la presión se mantiene constante.
- Determinación del peso de piezas obtenidas a diferentes tiempos de compactación. Se pueden realizar varios ciclos aumentando gradualmente el tiempo de compactación. Cuando se detecte que el peso de la pieza no varía se puede deducir que la entrada a la cavidad está sellada.

La **presión de compactación** influye sobre el tiempo de compactación. Si la presión de compactación se aumenta, el resultado es que el tiempo necesario para que se produzca la solidificación del material que ocupa la entrada será mayor y, por el contrario, al disminuir la presión de compactación disminuirá el tiempo de compactación necesario.

En cuanto a la influencia de la **temperatura de inyección** sobre el tiempo de compactación, se producen dos efectos que pueden llegar a compensarse: al aumentar la temperatura de inyección el material fundido del núcleo tiene mayor temperatura y menor viscosidad. Según esto, el tiempo necesario para que la entrada a la cavidad se cierre aumentaría. Sin embargo, un aumento de la temperatura de inyección permite reducir la presión de inyección necesaria, lo que supone que el tiempo de compactación necesario disminuye.

El último factor que afecta a esta etapa es la **temperatura del molde**. Cuando la temperatura de las paredes del molde se incrementa, el material fundido se enfría más lentamente y la entrada a la cavidad solidifica más tarde, alargando el tiempo necesario para la compactación.

4.2.3. Análisis de la etapa de enfriamiento

Una vez que la entrada a la cavidad ha solidificado la pieza queda aislada en el interior del molde, independientemente de si el tornillo se mantiene en posición avanzada o no. Al enfriarse el material aparecen dos efectos contrarios y simultáneos. Por un lado, como consecuencia del enfriamiento tiene lugar un aumento de la densidad del material, lo que supone la contracción del mismo; por otro lado, al disminuir la temperatura disminuye la presión a que está sometido, y esto tiende a permitir la expansión del material, con el consiguiente aumento de volumen de la pieza moldeada (disminución de densidad del material). Estos dos efectos tienen lugar simultáneamente y se deben compensar de tal manera que el volumen de la pieza moldeada se mantenga constante. En el momento en que se abre el molde, las piezas moldeadas deben estar libres de defectos, deben llenar totalmente la cavidad del molde y, finalmente, su temperatura debe ser tal que no sufran deformación alguna cuando se extraen. Teniendo en cuenta lo anterior, la relación entre presión, temperatura y densidad en el momento de abrir el molde seguirá uno de los tres caminos siguientes:

a) La presión ha disminuido hasta ser prácticamente nula, y al disminuir ha compensado exactamente la contracción originada por el enfriamiento de la pieza moldeada, de manera que el volumen de ésta es adecuado y se extrae de la cavidad fácilmente. Ésta es la situación ideal que debe buscar el moldeador para obtener piezas de la calidad máxima.

b) En el momento de abrir el molde queda aún cierta presión residual sobre la pieza moldeada que permite una última expansión de la pieza dentro de la cavidad. Esto origina que la pieza se ajuste contra las paredes de la cavidad, dificultando la extracción. Es frecuente también que cuando la pieza no está limitada por el molde sufra una dilatación, modificando sus dimensiones y presentando esfuerzos internos indeseables.

c) El último caso que puede presentarse es que la presión en el material que llena la cavidad del molde se anule antes de que la temperatura disminuya hasta su valor previsto para la extracción. En este caso, el efecto que subsiste es el de contracción de la pieza hasta que se enfría a la temperatura de extracción. Esto da lugar a la aparición de ampollas o burbujas, bien en la superficie de la pieza moldeada, bien en el interior de dicha pieza (cavitación).

La velocidad de enfriamiento y, por tanto, la temperatura del molde, juegan un papel muy importante en esta etapa. Mientras la pieza está enfriándose en el interior del molde las paredes de la cavidad inhiben las contracciones y deformaciones que pueda sufrir la pieza. Puesto que la pieza no puede deformarse libremente, en su lugar se generan tensiones internas que se acumulan en el seno del material. Parte de estas tensiones se liberan cuando la pieza se desmoldea y se deforma libremente, pero otra parte quedan acumuladas en el material, afectando a sus características y comportamiento mecánico, químico y a las dimensiones finales de la pieza. Las condiciones de enfriamiento son, además, muy diferentes en el interior del molde y en el exterior. En el interior del molde predomina fundamentalmente el mecanismo de conducción, mientras que la pieza una vez desmoldeada se enfría por convección, con lo que la velocidad de enfriamiento es mucho más baja. Si la pieza una vez expulsada se encuentra todavía a temperatura elevada, se enfriará con lentitud, por lo que se ve sometida a un efecto de relajación de tensiones, que favorece la deformación de la pieza.

La velocidad de enfriamiento también condiciona el grado de cristalinidad alcanzado por el material; cuanto menor sea la velocidad de enfriamiento mayor cristalinidad desarrollará el material. Lógicamente, dentro de una sección de la cavidad, la velocidad de enfriamiento es distinta y depende de la distancia que existe entre el punto considerado y la pared del molde. Esto provoca que el grado de cristalinidad sea variable dentro de la misma sección, lo que favorece la aparición de tensiones entre distintas partes de la pieza.

4.3. ANÁLISIS DEL PROCESO A PARTIR DE CURVAS P-V-T

La figura 5.28 muestra cómo varía el volumen específico de un polímero semicristalino en función de la temperatura para diferentes presiones (diferencias de presión con la atmosférica). Como es sabido mientras el material permanece fundido el volumen específico disminuirá paulatinamente conforme el material se enfría (figura 1.8). Cuando el material alcanza la temperatura de cristalización se produce una disminución muy acentuada del volumen específico (aumento de la densidad) como consecuencia de la cristalización del material. Cuando el proceso de cristalización finaliza, el volumen específico disminuye otra vez progresivamente al enfriarse el material. Al ser los polímeros fundidos muy compresibles, cuanto mayor sea la presión a la que está sometido el material, menor será el volumen específico del mismo. Estas curvas proporcionan información muy valiosa sobre la evolución de las características del material durante el

proceso, ya que sobre las mismas se puede trazar el ciclo de inyección desde que el material entra en el interior de la cavidad hasta que se extrae la pieza.

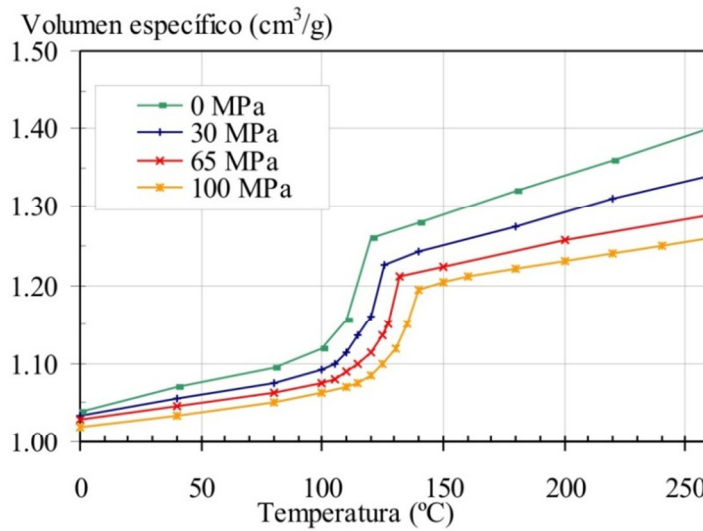


Figura 5.28. Curva PVT para un material semicristalino.

En la figura 5.29 se muestra la evolución de la presión y de la temperatura en el interior de la cavidad. Entre los **puntos 0 y 1** tiene lugar el llenado de la cavidad. En el caso que se muestra, el llenado se produce a 240°C. Durante el llenado la presión en la cavidad aumenta rápidamente (desde 0 MPa hasta un valor comprendido entre 30 y 65 MPa) mientras que el material apenas se enfría. Durante la fase de compactación la presión en el interior del molde prácticamente no varía (**punto 2**) puesto que el tornillo permanece en posición avanzada introduciendo material para compensar la contracción, de modo que el material todavía en estado fundido se enfría por una isobara. Entre los **puntos 2 y 3** el material cristaliza, mientras continúa la fase de compactación. Una vez que el material solidifica (**punto 3**) el pistón de inyección puede retroceder puesto que la entrada a la cavidad queda cerrada. A partir de este momento, el material queda aislado en el interior del molde mientras continúa enfriándose. Simultáneamente disminuye la presión a que está sometido, consecuencia lógica de la disminución de la temperatura, por lo que el material evoluciona desde el **punto 3** al **punto 4**. Una vez que la presión se ha igualado a la presión atmosférica y que el material se encuentra suficientemente frío, se puede desmoldear la pieza sin riesgo de que se deforme.

La calidad de una pieza será óptima cuando se obtenga la mínima diferencia entre el valor del volumen específico en el momento en el que la temperatura se iguala a la del molde y la presión se iguala a la atmosférica. La evolución mostrada en la figura 5.29 es adecuada, ya que la simultaneidad entre la disminución de la temperatura y la caída de presión da como resultado un volumen específico adecuado a temperatura ambiente. Esto supone que gran parte de la contracción de la pieza ha sido compensada con material inyectado.

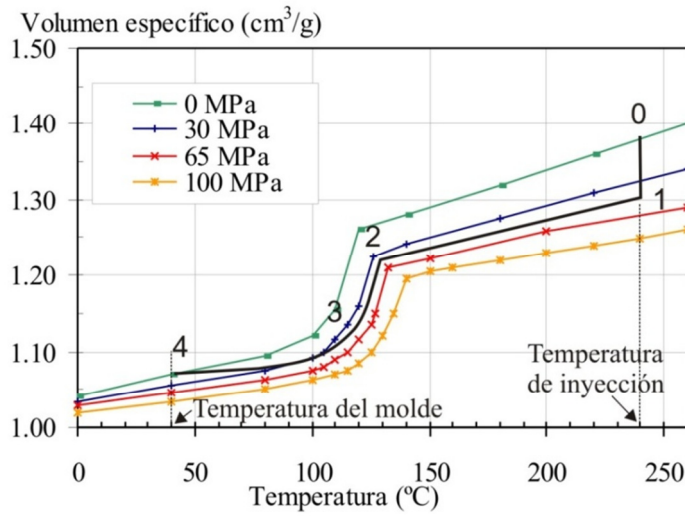


Figura 5.29. Curva PVT mostrando las etapas de moldeo.

5. DEFECTOS COMUNES EN PIEZAS INYECTADAS

Sobre los diagramas PVT es fácil comprobar la influencia de parámetros tales como la temperatura de inyección, presión de compactación, tiempo de compactación y temperatura del molde sobre la calidad de la pieza.

En la figura 5.30 se muestra un diagrama PVT para una pieza en la que la etapa de compactación ha sido demasiado corta. En este caso el punto en que se alcanza la presión atmosférica tiene un volumen específico elevado. La contracción que sufre el material es función de la diferencia de volúmenes específicos entre el punto en el que se alcanza la presión atmosférica (punto 3) y el punto en el que la pieza alcanza la temperatura del molde (punto 4). En este caso la contracción se verá notablemente acentuada.

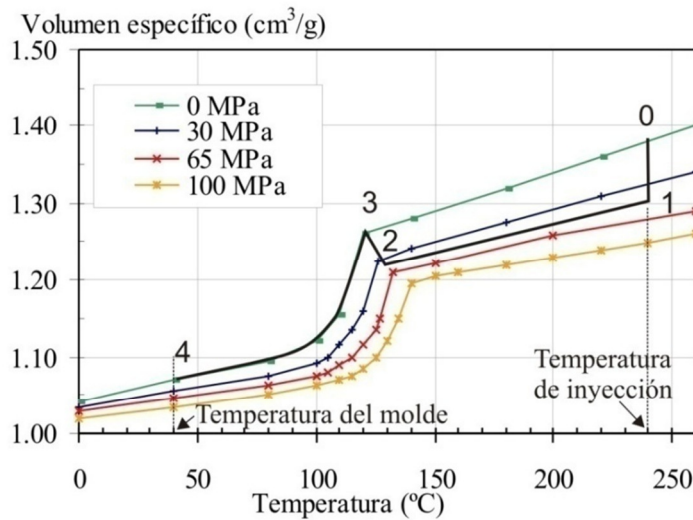


Figura 5.30. Curva PVT mostrando la evolución de una pieza en la que el tiempo de compactación ha sido demasiado corto.

En la figura 5.31 se muestra otro ejemplo. En el caso de piezas moldeadas con secciones gruesas, el enfriamiento del material queda limitado a la superficie en contacto con el molde, por lo que se produce de forma muy defectuosa. Cuando la entrada a la cavidad solidifica, la temperatura media del material puede ser elevada, y lo más probable es que la presión del material en el interior de la cavidad se anule antes de que la temperatura media disminuya hasta la temperatura de extracción, dando lugar a la contracción de la pieza. Este efecto se observa en la figura 5.31. Para contrarrestar este efecto y obtener piezas sin ampollas y con la densidad debida, se podría emplear una presión de inyección mayor y disminuir la temperatura de inyección.

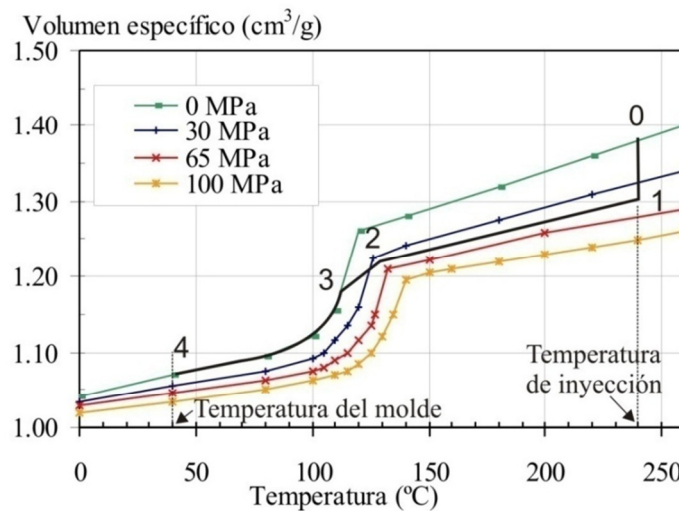


Figura 5.31. Curva PVT mostrando la evolución de una pieza en la que el enfriamiento es defectuoso.

En el caso de piezas moldeadas con secciones delgadas el material inyectado en la cavidad se enfría rápidamente cuando entra en contacto con las paredes frías del molde. Cuando la entrada a la cavidad solidifica la temperatura media del material es baja, pero la presión ejercida puede ser todavía grande. En consecuencia, cuando se alcanza la temperatura de extracción, lo más probable es que la presión aún no se haya anulado, dando lugar al "agarrotamiento" de la pieza en el molde. Las posibles soluciones cuando se trata de moldes sencillos son disminuir la presión de inyección, o bien disminuir el tiempo que el émbolo permanece en posición avanzada. De ambas formas se podría eliminar la presión residual. En el caso de moldes de geometría compleja el problema podría resolverse reduciendo la entrada de las cavidades o mediante el empleo de válvulas especiales, etc.

Un problema típico en moldes que tienen entradas pequeñas o mal situadas, ocurre cuando el primer material se inyecta a una velocidad excesivamente grande. En estos casos esta porción inicial de material se enfría muy deprisa, dificultando la entrada del resto del material, con el que no llega a soldar, siendo perceptible las **líneas de flujo** y de unión entre el material inicial y el resto.

Otro fenómeno muy corriente es la formación de **líneas de soldadura**. Cuando se llena un molde la entrada del material se produce siguiendo un frente de flujo que habitualmente encuentra una serie de obstáculos que frenan o favorecen su avance. Cuando dos frentes de flujo están excesivamente fríos puede ocurrir que no suelden bien, produciéndose las líneas de soldadura (figura 5.32). Las líneas de soldadura pueden ser zonas débiles de las piezas donde eventualmente se producirán fracturas.

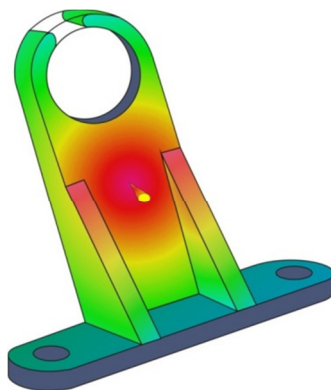


Figura 5.32. Formación de líneas de soldadura.

La aparición de **orientaciones o tensiones congeladas** dentro del material también es frecuente. Las tensiones congeladas y formación de capas orientadas se producen como consecuencia del flujo de material una vez que la cavidad del molde se ha llenado y el pistón de inyección permanece en posición avanzada introduciendo más material. Parte del material se encontrará ya formando una capa rígida y fría, mientras que el material que acaba de incorporarse a la cavidad continúa caliente y en movimiento y entra en la cavidad prácticamente a la máxima presión de inyección. Las fuerzas de fricción entre estas capas son muy altas, especialmente en las zonas cercanas a las paredes, y dan lugar a esfuerzos o tensiones de cizalla que tienden a orientar al polímero en la dirección del flujo. Las fuerzas moleculares internas pueden llegar a alabear las piezas si la temperatura de desmoldeo no es suficientemente baja para congelar estas tensiones. Si se aumenta la temperatura del molde pueden reducirse las tensiones internas, puesto que al disminuir la velocidad de enfriamiento las moléculas orientadas pueden relajarse. Un fenómeno frecuente asociado con las tensiones congeladas es el "**glaseado o crazing**". Con este término se denomina a la aparición de un cuarteamiento superficial, es decir, la formación de pequeñas y numerosas grietas en la superficie del plástico que no se desarrollan hacia el interior.

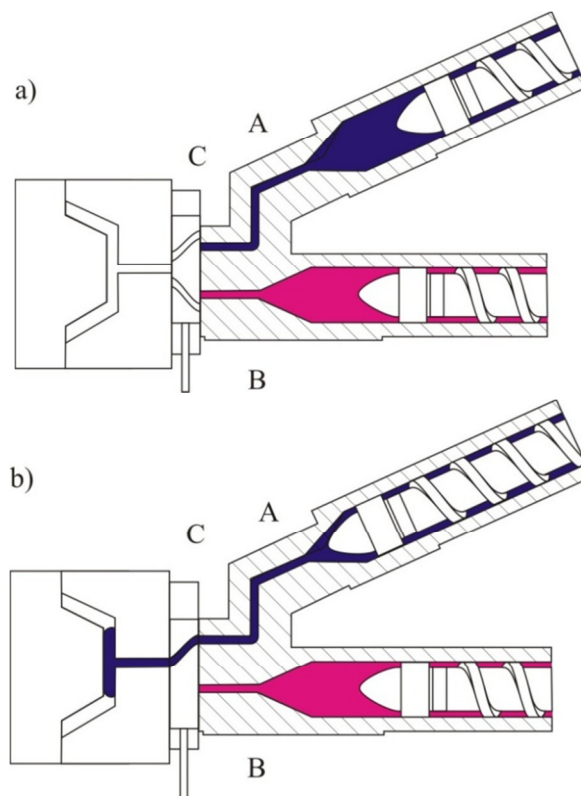
6. TÉCNICAS DE INYECCIÓN

6.1. INYECCIÓN DE MÚLTIPLES MATERIALES

La inyección de varios materiales diferentes en una misma cavidad de moldeo, o inyección "sandwich", consiste en inyectar a través de un solo bebedero dos materiales distintos que proceden de dos unidades de inyección diferentes. Mediante este

procedimiento se pueden obtener piezas en las que el material de la capa superficial presenta un acabado especial, mientras que el material del núcleo admite materiales reforzados, de menor densidad (espumas) o de menor calidad o precio, para conseguir una estructura más rígida, más ligera o más económica. Mediante esta técnica se obtienen excelentes acabados, con total distinción entre núcleo y piel, y diversidad de texturas y tactos. Por otra parte, tanto las máquinas como los moldes resultan relativamente caros y es necesario un ajuste muy preciso de las condiciones de operación.

La operación de moldeo en el caso de emplear dos materiales se realiza del siguiente modo (figura 5.33). Inicialmente el molde se encuentra cerrado con las dos unidades de inyección (A y B) cargadas de material, y ambos tornillos en posición retrasada. La válvula de conmutación de paso de material está en posición de cierre para ambos circuitos (C) (figura 5.33a). A continuación, la válvula se desplaza permitiendo el paso del material de la unidad de inyección (A), introduciendo en el molde una carga parcial mediante avance (casi total) del tornillo (figura 5.33b). La válvula C vuelve a desplazarse pero dejando paso ahora a la segunda unidad de inyección (B), cuyo tornillo avanza introduciendo el material en el interior de la masa inyectada anteriormente y obligándola a acoplarse a las paredes del molde (figura 5.33c-d). Por último, se vuelve a inyectar material de la primera unidad de inyección (A); el tornillo avanza en su totalidad, cerrando la entrada y completando la piel de la pieza (figura 5.33e). Cuando se desea inyectar más materiales diferentes, el procedimiento es similar. El problema fundamental es la dosificación adecuada de cada uno de los materiales, así como la fluidez y presiones de llenado, ya que debe evitarse el flujo turbulento para evitar que los materiales se mezclen inadecuadamente.



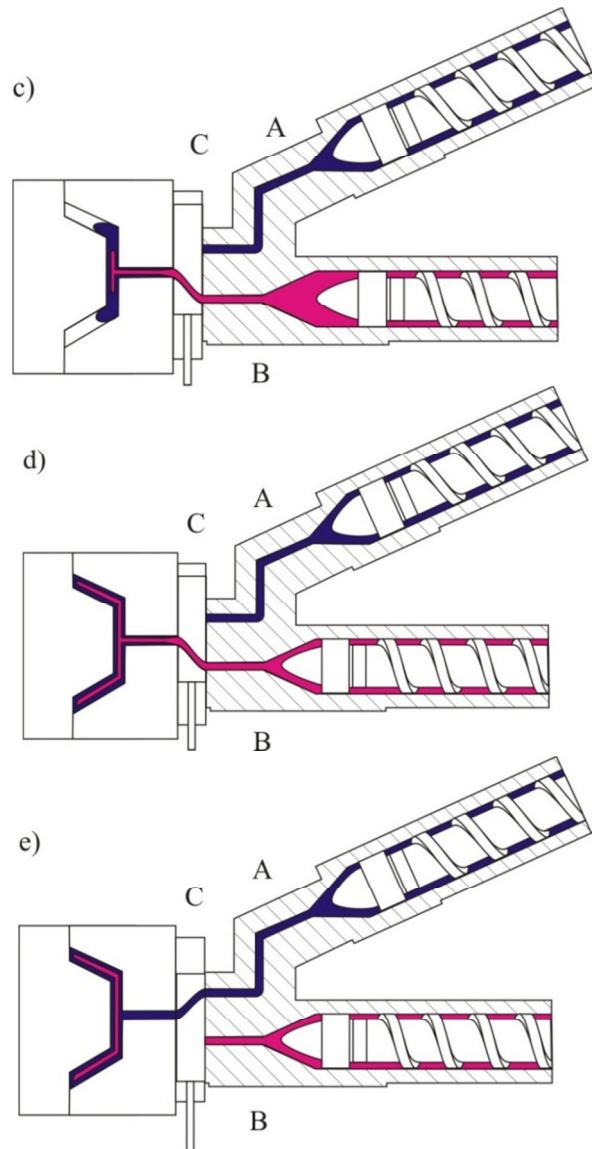


Figura 5.33. Secuencia de operaciones en el moldeo de piezas de doble capa.

6.2. INYECCIÓN DE TERMOESTABLES

La tecnología de inyección se ha extendido al moldeo de termoestables. Aunque los fundamentos de la técnica son los mismos que para termoplásticos, la inyección de termoestables requiere una serie de modificaciones en los ciclos y en los equipos respecto al moldeo de termoplásticos.

Los termoestables inician su reticulación a temperaturas relativamente bajas. Al aumentar la temperatura hay inicialmente una disminución de la viscosidad de estos compuestos, y un posterior aumento de la misma como consecuencia del proceso de reticulación. La disminución de viscosidad inicial debe producirse en el cilindro de plastificación, que suele situarse entre 60 y 120 °C, donde el material adquiere la fluidez suficiente para ser transportado al molde. El molde se encuentra a temperaturas mucho

más altas, entre 150-180 °C, y es allí donde el material reticula y adquiere una forma determinada. El control de temperatura, por tanto, debe ser mucho más preciso que en el moldeo de termoplásticos.

Las formulaciones de resinas para inyección de termoestables están especialmente diseñadas para que reticulen lentamente a la temperatura del cilindro y rápidamente a la temperatura del molde. En el caso de moldeo de termoestables se necesitarán mayores presiones de inyección, tanto para la compactación del material como para el llenado del molde. Por ello, las máquinas de inyección de termoestables deben poseer elevadas fuerzas de cierre. Por último, en muchas ocasiones, como consecuencia de las reacciones de reticulación se desprende algún volátil, por lo que los moldes deben estar diseñados de forma adecuada y contener respiraderos.

6.3. INYECCIÓN ASISTIDA POR GAS

El proceso de inyección asistida por gas se utiliza para conseguir piezas inyectadas con partes huecas en su interior. Podría decirse que es una modalidad de la inyección de materiales múltiples, en este caso polímero y gas. Consiste en un llenado parcial o a veces completo de la cavidad con un polímero convencional, seguido por la inyección a presión de un gas inerte en su interior. Este gas, normalmente nitrógeno, empuja al material termoplástico fundido para que termine de llenar la cavidad, de tal forma que el interior de la pieza queda hueco. El gas se introduce a través de la boquilla de la máquina o con algún otro dispositivo directamente en el interior de la pieza. En cualquier caso el gas avanzará por la parte central de la pieza, todavía fundida (de menor viscosidad que la corteza o piel).

La secuencia de operaciones en inyección asistida por gas es la siguiente:

- a) Cierre del molde y aplicación de la fuerza de cierre.
- b) Inyección del termoplástico fundido.
- c) Introducción del gas a presión en el interior de la vena líquida del material plástico.
- d) Mantenimiento de la presión del gas durante el tiempo necesario para la compactación.
- e) Enfriamiento de la pieza en el molde.
- f) Apertura del molde y expulsión de la pieza.

En las figuras 5.34 a 5.36 se muestra la secuencia de operaciones para la obtención de piezas de inyección asistida por gas en las que el gas se inyecta directamente en la pieza. En la figura 5.34 se representa el caso más sencillo en el que la pieza se llena parcialmente con el material y el gas empuja al material para que acabe de llenar el molde.

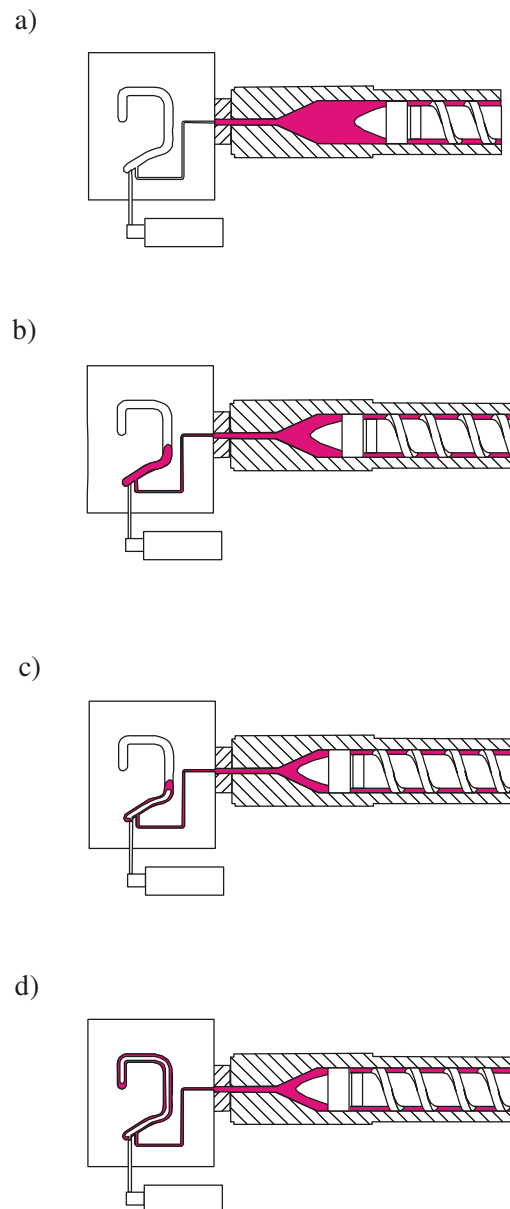


Figura 5.34. Inyección asistida por gas.

En las figuras 5.35 y 5.36 se muestran diferentes posibilidades para el llenado del molde. En el caso de la figura 5.35 el molde se llena completamente (figura 5.35b) y conforme se introduce el gas en el mismo se abre un vástago que permite que el material sobrante se desplace a un rebosadero (figura 5.35c y d). En el caso de la figura 5.36 el molde también se llena completamente y se encuentra articulado, de modo que la parte móvil del molde se desplace para permitir la entrada del gas (figura 5.36c y d).

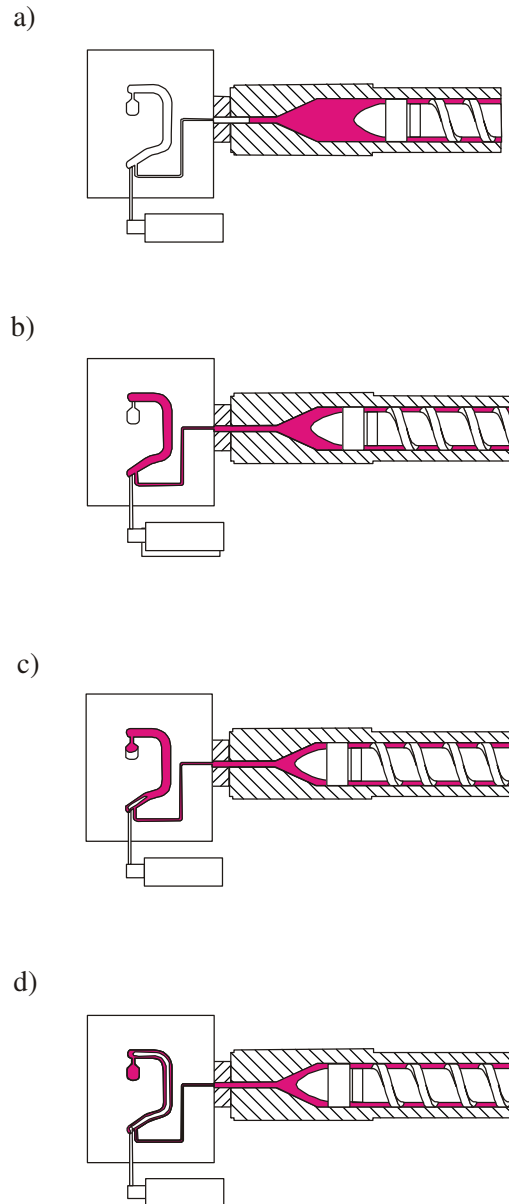


Figura 5.35. Inyección asistida por gas en molde con rebosadero.

Existen básicamente 3 tipos de piezas susceptibles de ser moldeadas por inyección asistida por gas: piezas gruesas de espesor uniforme, piezas con nervios y piezas con distribución sensible de espesores. Las piezas con espesor uniforme son generalmente piezas con forma de barra o asa, en las que no existe una dirección preferente de avance del gas frente a las demás. Mediante inyección asistida en este tipo de piezas es posible conseguir una reducción de peso, el acortamiento del tiempo de ciclo así como evitar rechupes. La principal desventaja es que puede aparecer la marca del punto por donde se introduce el gas. Por lo general, las piezas que contienen nervios suelen ser piezas planas con problemas de rigidez y de formación de alabeos. Los nervios se introducen en estas piezas para mejorar su rigidez, sin embargo, en la superficie de los nervios suele aparecer rechupes debido al mayor espesor de material en los mismos. El vaciado de los nervios con gas, colocando al final de los nervios unos rebosaderos que recogen el material

sobrante suele solucionar este problema. Por último, en el caso de piezas con zonas de espesor grueso y zonas de espesor delgado la colocación de los puntos de entrada del plástico y del gas debe ser la correcta para conseguir una distribución adecuada del gas dentro de la pieza. Las zonas de menor espesor deben quedar completamente llenas mientras que sólo se produce el llenado parcial de la zona gruesa. A continuación el gas desplaza al plástico, acabando de llenar la zona gruesa mientras que se va compactando la zona más fina.

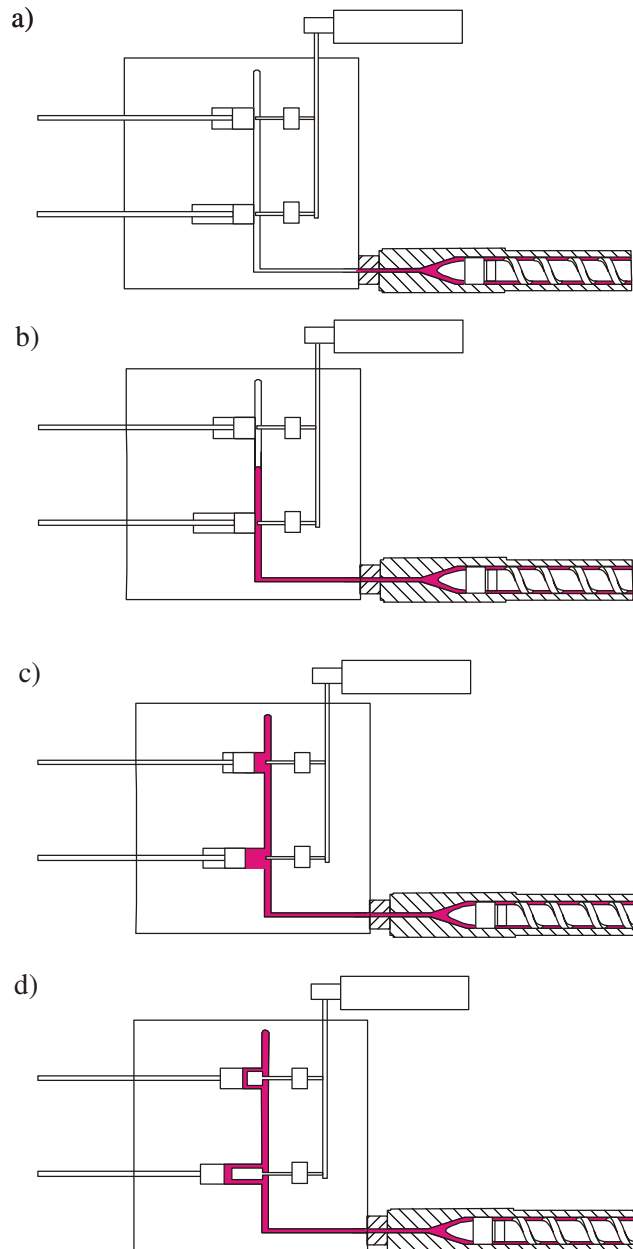


Figura 5.36. Inyección asistida por gas en molde articulado.

Aunque en algunos casos la inyección con gas reduce considerablemente el ciclo de inyección, no en todos los casos esta secuencia de operaciones conduce a un ciclo más corto. La presión del gas actúa como presión de compactación, con la ventaja de que actúa no sólo en la entrada del molde, sino que lo hace por igual en toda la superficie de recorrido del gas, homogenizando más la pieza. En general, la inyección asistida por gas es una técnica novedosa que puede presentar grandes ventajas respecto a la inyección convencional, como son:

- Reducción de peso (de hasta un 50 %)
- Reducción del tiempo de enfriamiento (más de un 50%)
- Desaparición o reducción de rechupes
- Reducción de las deformaciones y alabeos
- Disminución de la fuerza de cierre necesaria

Para la aplicación de esta técnica las piezas y moldes deben estar especialmente diseñados teniendo en cuenta el comportamiento reológico del material y del gas. Igualmente el ajuste de los parámetros que controlan el proceso debe ser muy preciso.

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

Douglas M. Bryce, "Plastics Injection Molding. Manufacturing Process Fundamentals", SME. Dearborn, 1996.

Herbert Rees, "Understanding Injection Molding Technology", Hanser Publishers, New York, 1994.

I.I. Rubin, "Injection Molding. Theory and Practice", Wiley Interscience, New York, 1972.

F. Johannaber, "Injection Molding Machines. A User's Guide", Hanser Publishers, 1983.

Michael L. Berins, "Plastics Engineering Handbook", Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.

Ramón Anguita Delgado, "Moldeo por Inyección", Ed. Blume, Barcelona, 1975.

D.V. Rosato & D.V. Rosato, "Injection Molding Handbook", Kluwer Academic Publishers, 2nd ed., Boston, 1995.

