

TEMA 6. MOLDEO POR COMPRESIÓN

1. INTRODUCCIÓN	234
1.1. Descripción de la técnica de moldeo por compresión	235
1.2. Moldeo por compresión frente a moldeo por inyección	237
1.3. Descripción de la técnica de moldeo por transferencia	238
2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES PARA MOLDEO POR COMPRESIÓN	240
2.1. Gelificación y vitrificación de termoestables	240
2.2. Factor de compresión.....	241
2.3. Propiedades de flujo y tiempo de curado.....	242
2.4. Influencia de la temperatura y la presión.....	244
3. EQUIPOS PARA MOLDEO POR COMPRESIÓN	246
3.1. El uso de preformas	246
3.2. Precafección del material.....	248
3.3. Moldeo por compresión totalmente automático	249
BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA.....	250

Resumen

En esta tema se describe la técnica de moldeo por compresión de termoestables y moldeo por transferencia, y se comparan estas técnicas frente al moldeo por inyección. Se explican las principales características de los materiales termoestables y su comportamiento durante el procesado. Para finalizar se describen algunos equipos que se pueden utilizar para automatizar el moldeo por compresión.

1. INTRODUCCIÓN

El moldeo por compresión es el método de transformación de plásticos más antiguo que existe. Aparece descrito por primera vez en la bibliografía de principios del siglo XIX, aunque no comenzó a desarrollarse a escala industrial hasta 1908, cuando Leo Baeckeland desarrolló las resinas de fenol-formaldehído, que siguen empleándose hoy en día.

El moldeo por compresión se utiliza casi exclusivamente para moldear materiales termoestables, y ocasionalmente para procesar termoplásticos. Los materiales termoestables son, como se estudió en temas anteriores, materiales altamente entrecruzados. Para procesarlos se parte de mezclas de precursores (termoendurecibles), que además incluyen una serie de aditivos, como cargas, lubricantes, pigmentos, catalizadores, etc. Estos materiales se encuentran inicialmente en forma de polvos o granzas, a veces incluso son líquidos. Cuando los materiales termoendurecibles se someten a calor y presión, en primer lugar disminuye su viscosidad, hasta alcanzar el estado líquido y luego sufren una reacción química irreversible (polimerización o curado). Los principales materiales termoestables empleados son resinas epoxi, fenólicas, poliésteres, poliuretanos y siliconas. Los materiales reforzados de con fibras (BMC; bulk moulding compounds) también se suelen procesar mediante esta técnica, así como los materiales espumados. Como ya se comentó en temas anteriores (tema 1 y 2), los termoestables poseen una buena estabilidad dimensional, estabilidad térmica y resistencia química.

En algunas ocasiones el moldeo por compresión de termoplásticos se prefiere al moldeo por inyección debido al bajo nivel de orientación que se consigue en compresión, y por tanto a las bajas deformaciones y alabeos que alcanzan las piezas, lo que es muy importante en algunos artículos como por ejemplo lentes de gafas (fabricadas de PMMA) o de discos de música (los antiguos LP que se fabricaban de PVC). En otras ocasiones se escoge el moldeo por compresión simplemente debido a la baja inversión que se debe realizar frente al moldeo por inyección, lo que resultará interesante en el caso de producciones cortas. En el caso de la compresión de termoplásticos el

material debe enfriarse en el interior del molde antes de ser desmoldeado, lo que implica ciclos muy largos.

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DE MOLDEO POR COMPRESIÓN

En el moldeo por compresión (figura 6.1) el material, bien líquido, o en forma de polvo, grana o de pastillas preformadas (preformas), se coloca en el molde caliente, y éste se cierra lentamente, hasta que las dos mitades del molde ejercen presión sobre el material. Conforme el molde va cerrándose, el material es obligado a ocupar todas las partes de la cavidad de moldeo. En ciertos casos, es ventajoso realizar el moldeo cerrando primeramente el molde casi por completo y abriéndolo después unos segundos antes de aplicar la presión definitiva. De esta forma se deja “respirar” al material, para permitir la evacuación del gas que queda atrapado entre el polvo de moldeo o que es generado en la reacción de polimerización. Una vez que el molde se ha cerrado completamente se aplica la máxima presión, que provoca el llenado final y completo de la cavidad. Bajo la acción conjunta del calor y la presión tienen lugar las reacciones de entrecruzamiento que transforman al material termoendurecible en termoestable, proceso que se conoce vulgarmente como “curado”. Tras el curado se abre el molde y se extrae la pieza totalmente sólida, que solamente alcanza su rigidez definitiva cuando se ha enfriado totalmente. Cuando la pieza tiene forma complicada o grandes dimensiones, es aconsejable colocarla en conformadores después de extraerla del molde, para evitar que se deforme mientras se enfría.

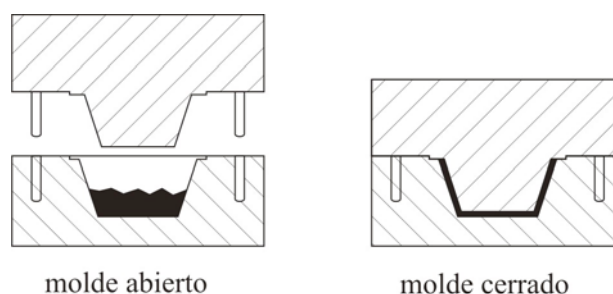


Figura 6.1. Esquema del proceso de moldeo por compresión.

El ciclo de moldeo, por tanto, podría considerarse el siguiente:

- Apertura del molde
- Extracción de las piezas moldeadas en el ciclo anterior
- Preparación del molde, lo que incluye limpieza del molde y lubricación para facilitar la extracción de la pieza siguiente y colocación de las inserciones metálicas, si las hubiera, y del compuesto de moldeo, bien líquido, en forma de polvo o de pastilla
- Cierre del molde caliente y aplicación de presión.
- Apertura del molde para dejarlo “respirar” y permitir la salida de humedad y materias volátiles
- Aplicación de toda la presión al molde caliente y mantenimiento durante el tiempo necesario hasta que el material haya curado totalmente
- Extracción de la pieza

La temperatura del molde y la presión aplicada son los factores más importantes del proceso. Además de estas variables, otros factores que influyen en la calidad de las piezas moldeadas por compresión son: el diseño de la pieza que debe moldearse, la velocidad de cierre de la prensa, la plasticidad del material y las condiciones en que se encuentra la superficie de la cavidad de moldeo. Es importante poner en la cavidad de moldeo la cantidad exacta de material que se necesita, pues una cantidad en defecto puede dar lugar a piezas porosas con baja densidad y con malas propiedades mecánicas, mientras que una cantidad en exceso puede dar lugar a excesivas rebabas.

El moldeo por compresión tiene algunas limitaciones, y no es muy aconsejable cuando se trata de moldear artículos de forma muy complicada con resaltes, entrantes o pequeños taladros laterales. Tampoco es aconsejable para moldear artículos de paredes gruesas (1 cm o más). Valores típicos de temperatura del molde, presión de moldeo y tiempo de moldeo para, por ejemplo, una resina fenólica son 150-200 °C, 20000 kg/cm² y 1.5 min, respectivamente.

Los moldes en moldeo por compresión suelen tener áreas muy elevadas, por lo que las prensas utilizadas deben desarrollar elevadas fuerzas de cierre. Las características de las prensas empleadas en moldeo por compresión son las mismas que se describieron en inyección, cuando se estudió el sistema de cierre de la máquina. La figura 6.2 muestra una prensa típica empleada en moldeo por compresión.

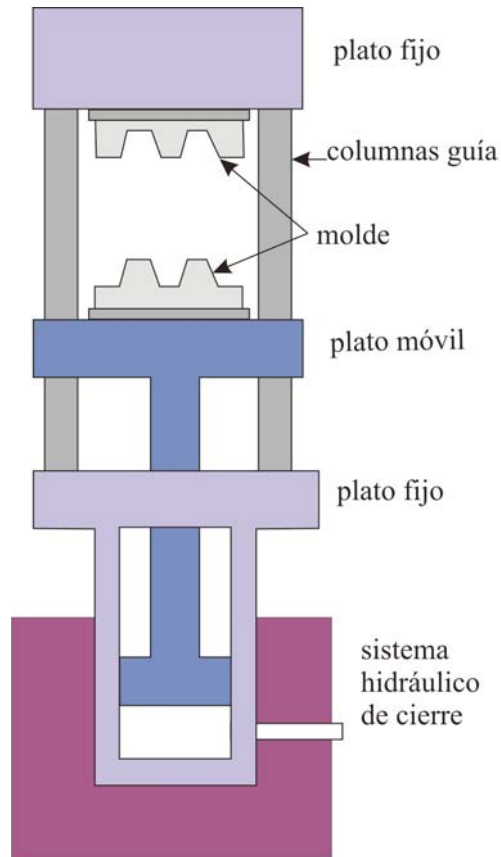


Figura 6.2. Prensa de moldeo por compresión.

1.2. MOLDEO POR COMPRESIÓN FRENTE A MOLDEO POR INYECCIÓN

A pesar de ser una técnica mucho más rudimentaria, el moldeo por compresión presenta una serie de ventajas respecto al moldeo por inyección.

- En el moldeo por compresión prácticamente no hay recortes, por lo que se genera una cantidad muy pequeña de mermas.
- Los materiales gozan de mejores propiedades mecánicas al no sufrir orientaciones elevadas.
- Es posible fabricar piezas de sección muy fina que mantienen su forma sin alabearse.
- Es posible fabricar piezas de más de 1.5 kg de peso que pueden resultar muy problemáticas mediante inyección.
- Los moldes y en general la maquinaria son bastante más económicos que en el moldeo por inyección.

Asimismo el moldeo por compresión presenta una serie de desventajas frente al moldeo por inyección.

- No es aconsejable esta técnica en caso de emplear moldes con formas complejas.
- Para conseguir que el molde se llene completamente con un material de viscosidad elevada es necesario emplear presiones elevadas y, por tanto, que los moldes cierren perfectamente para evitar que el material pueda salir por la línea de partición antes de llenar las partes de acceso más difícil. El polvo debe repartirse de forma adecuada o se deben emplear preformas.

1.3. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DE MOLDEO POR TRANSFERENCIA

El moldeo por transferencia es un desarrollo a partir del moldeo por compresión en el que el compuesto de moldeo se introduce en una cavidad dentro del molde, de modo que al cerrar el molde el compuesto se transfiere hasta las diferentes cavidades de moldeo a través de una serie de canales. En la figura 6.3 se muestra un esquema de este proceso.

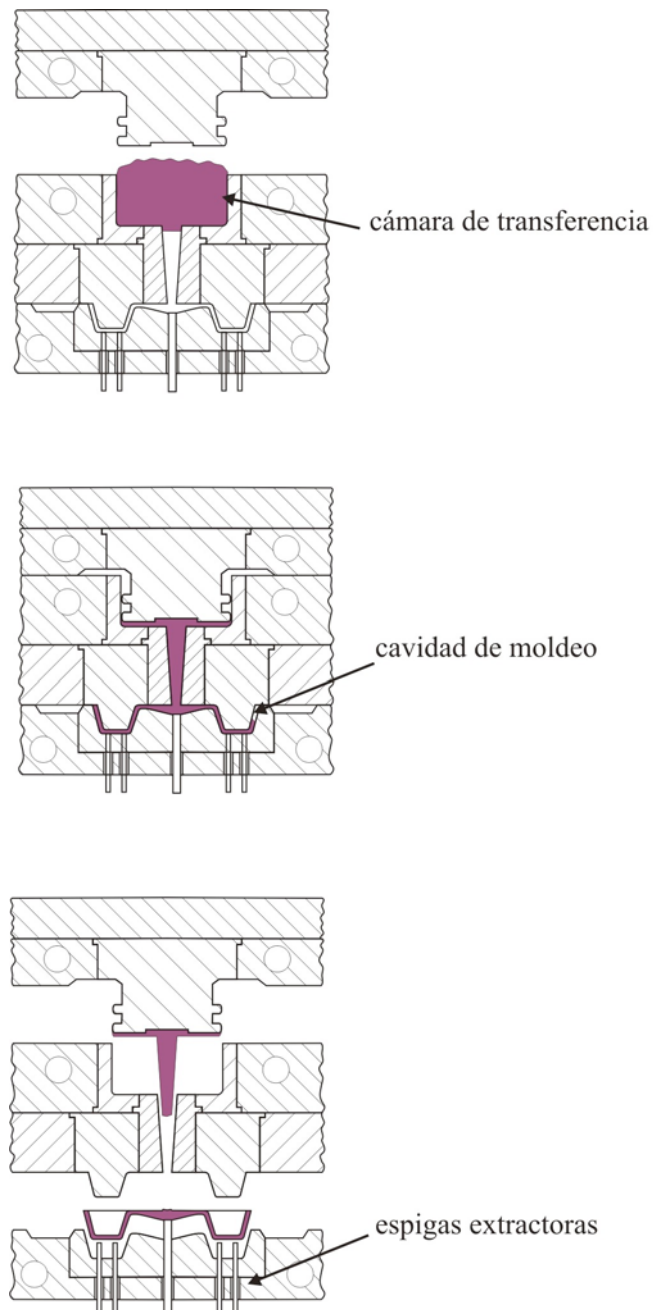


Figura 6.3. Esquema del moldeo por transferencia.

El proceso de transferencia es, por tanto, un proceso intermedio entre la inyección y la compresión y presenta una serie de ventajas y desventajas respecto a éstos. El moldeo por transferencia está indicado en el caso de que se deseen moldear muchas cavidades o cuando el llenado del molde con el material de moldeo resulte problemático (moldes muy planos, con inserciones metálicas, cuando se emplea polvo de moldeo de densidad aparente muy baja, etc.). El ciclo en moldeo por transferencia suele ser algo más corto debido a la mejor transferencia de calor cuando el material circula por los canales. En contrapartida el moldeo por transferencia presenta una serie de desventajas frente al moldeo por compresión: el flujo del material a través del molde es más complejo, por lo que puede darse cierto grado de orientación; los moldes sufren más abrasión de modo que el mantenimiento es más costoso; los equipos son más complejos y más caros; y por último es material que queda en los canales tras el proceso es material de desecho, que no se puede reutilizar.

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES PARA MOLDEO POR COMPRESIÓN

2.1. GELIFICACIÓN Y VITRIFICACIÓN DE TERMOESTABLES

El curado de termoestables es complejo e incluye varias etapas. Como se ilustra en la figura 6.4, el proceso de curado empieza con la formación y el crecimiento lineal de las cadenas que pronto empiezan a ramificarse y posteriormente a entrecruzarse. A medida que la reacción avanza el peso molecular aumenta rápidamente y varias cadenas se unen en un retículo de peso molecular infinito. La transformación, que ocurre rápidamente y de forma irreversible, en la que el material pasa desde un estado líquido viscoso hasta un estado gel elástico, que marca el inicio de la aparición del retículo, suele llamarse **proceso de gelificación** o **punto de gel**. La gelificación es característica de los termoestables y tiene una gran importancia en el procesado. El punto de gel es crítico en la manipulación de los materiales termoestables, ya que a partir de este estado el material deja de fluir. Después de la gelificación, la reacción continúa hasta la formación de un retículo infinito, con un aumento sustancial de la densidad de entrecruzamiento, de la

temperatura de transición vítrea y de las propiedades físicas últimas alcanzadas.

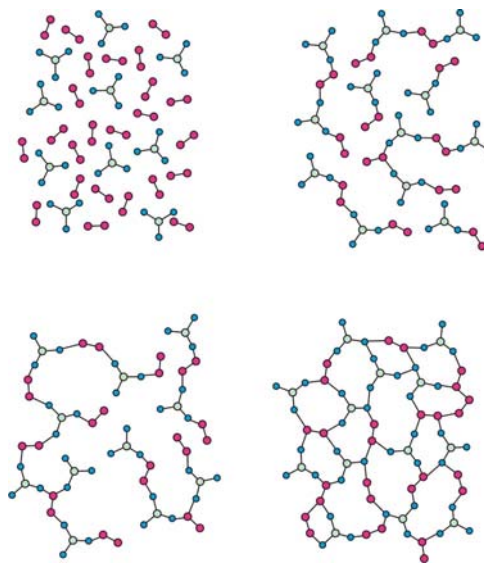


Figura 6.4. Representación del proceso de entrecruzamiento de termoplásticos.

Otro fenómeno que puede ocurrir durante el curado es la **vitrificación** de las cadenas que están creciendo. Esta transformación, desde un estado líquido viscoso o de gel elástico a un estado vítreo, empieza a ocurrir cuando la temperatura de transición vítrea de las cadenas crecientes o del retículo coincide con la temperatura de curado. A partir de aquí, el curado es extremadamente lento y, a efectos prácticos, la vitrificación supone una parada brusca del curado. La vitrificación es un fenómeno reversible y el curado puede ser completado por calentamiento, desvitrificándose el termoplástico parcialmente curado.

2.2. FACTOR DE COMPRESIÓN

Se llama **factor de compresión** de un material de moldeo a la relación entre la densidad de la pieza moldeada y la densidad aparente del polvo de moldeo. Como ya se definió, la **densidad aparente** es la relación entre el

peso de material que, sin compactar, llena un volumen normalizado, y dicho volumen. Según lo anterior podemos escribir las siguientes relaciones:

$$\text{Factor de compresión} = FC = \frac{\text{Densidad de la pieza moldeada}}{\text{Densidad aparente del polvo moldeo}}$$

$$F.C. = \frac{\text{peso de la pieza moldeada}}{\text{volumen de la pieza moldedada}} \times \frac{\text{volumen aparente del polvo de moldeo}}{\text{peso del polvo de moldeo}}$$

$$F.C. = \frac{\text{volumen aparente del polvo de moldeo}}{\text{volumen de la pieza moldeada}}$$

Por tanto, el factor de compresión es la relación entre el volumen que ocupa el polvo de moldeo sin compactar y el volumen de la pieza tras ser moldeada.

El factor de compresión en un material de moldeo depende, fundamentalmente, del tipo de carga utilizada y del tamaño de partícula y distribución de tamaño de partícula del polvo de moldeo. Cuando el factor de compresión tiene un valor alto, es deseable, siempre que sea posible, comprimir previamente el material antes del moldeo, es decir, utilizar preformas. De esta forma se reduce notablemente el factor de compresión y es posible colocar la cantidad correcta de material en el molde sin necesidad de un espacio suplementario encima de la cavidad (espacio de carga). En otros materiales con factores de compresión inferiores, entre 2.5 y 1.8 se pueden emplear directamente los polvos para moldear sin necesidad de usar preformas.

2.3. PROPIEDADES DE FLUJO Y TIEMPO DE CURADO

En moldeo por compresión el material se calienta por contacto con las paredes del molde, reblandeciéndose y adaptándose a los contornos de la cavidad de moldeo, siguiendo posteriormente un proceso de curado y endurecimiento. El tiempo que tarda en endurecerse el material totalmente, o **tiempo de curado**, es función del espesor de la pieza moldeada debido a que

el material plástico es mal conductor del calor. Cuanto mayor es el espesor de la pieza tanto más largo será el tiempo de curado.

Dos características fundamentales de un compuesto de moldeo son la fluidez y la velocidad de curado. Un polvo de moldeo que en su proceso de preparación ha sido calentado a temperaturas elevadas (termoendurecible) y ha alcanzado un grado avanzado de curado, permanecerá lo suficientemente fluido un tiempo sumamente corto. A este tipo de polvo de moldeo se le llama de **flujo duro** y convendrá emplearlo para moldear artículos de formas muy sencillas y que no necesitan fluir mucho para llenar el molde. Con este tipo de polvo de moldeo la contracción que aparece después del moldeo será pequeña, y las piezas moldeadas tendrán una buena apariencia. Si el polvo no ha alcanzado un grado de curado avanzado, necesitará un tiempo de curado más largo durante el proceso de moldeo. Este polvo de moldeo se dice que es de **flujo blando**. El aspecto de las piezas será algo peor que en el caso de moldear con un material de flujo duro y la contracción de dichas piezas será algo mayor.

Generalmente, los fabricantes de compuestos de moldeo proporcionan información técnica sobre las mejores condiciones de moldeo para sus productos. Este tipo de información se suele dar en gráficos como el de la figura 6.5, donde se representa el tiempo de curado frente a la temperatura del molde para un espesor (3 ó 4 mm.) y presión determinados. Esta información está completa cuando se dispone de estas gráficas de curado para un intervalo razonable de espesores. En la figura se indican las curvas de curado mínimo, óptimo y máximo, así como las zonas que corresponden a condiciones en las que se obtienen piezas excesivamente curadas o poco curadas.

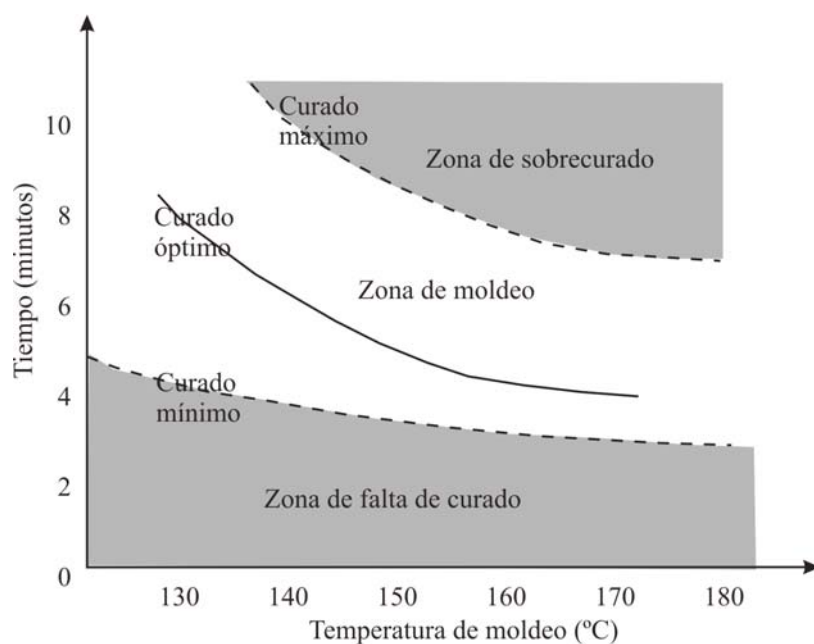


Figura 6.5. Representación de las condiciones de curado para una pieza de espesor dado y una determinada resina de moldeo.

2.4. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y LA PRESIÓN

Se llama **temperatura de moldeo** a la temperatura media del molde. La temperatura óptima de moldeo es, en la mayoría de los casos, próxima a 160 °C. Si la temperatura disminuye, también disminuye sensiblemente la máxima fluidez de material hasta el punto de que si la temperatura se hace demasiado baja, puede hacerse difícil el llenado de un molde de forma compleja. Por otra parte, si la temperatura es demasiado elevada, también puede resultar difícil llenar las cavidades, debido a que, si bien el material de moldeo es más fluido, sólo lo es durante un tiempo excesivamente corto (figura 6.6). El tiempo de curado disminuye marcadamente con la temperatura de moldeo. Por otra parte la fluidez máxima que alcanza el material es tanto mayor (viscosidad mínima) cuanto mayor es la temperatura de moldeo y disminuye cuando la temperatura disminuye.

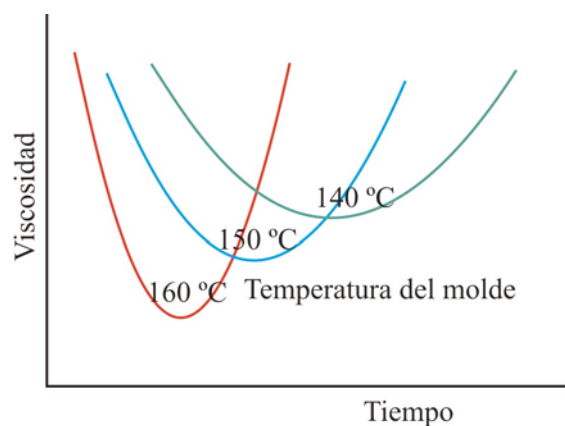


Figura 6.6. Variación de la viscosidad de los materiales termoestables con el tiempo a diferentes temperaturas del molde.

Como guía general, podemos decir que se podrá moldear a una temperatura elevada cuando la pieza es de forma sencilla, el material de moldeo es blando y el material no ha sido precalentado. Sin embargo, se debe tener presente que un curado muy lento, obtenido a una temperatura relativamente baja, da más posibilidades de obtener una pieza moldeada homogénea y de buena calidad, puesto que como el calentamiento es más uniforme, no habrá grandes diferencias en el grado de curado alcanzado por las paredes y el interior de la pieza.

Se llama **presión de moldeo** al cociente entre la fuerza de la prensa y la sección transversal de la cavidad. Cuando una prensa cierra un molde completamente, se mejoran las condiciones de moldeo al aumentar la fuerza de la prensa. No es aconsejable un cierre demasiado rápido de la prensa, pues puede conducir a que parte del material salga repentinamente expulsado de la cavidad, dando lugar a la formación de artículos de baja densidad y pobres características técnicas. Cuanto mayor sea la presión de moldeo, mejor será la calidad de las piezas y menor la temperatura necesaria para alcanzar el curado óptimo.

3. EQUIPOS PARA MOLDEO POR COMPRESIÓN

La parte fundamental de la máquina de compresión es la prensa, de la que ya se habló en temas previos. Además hay una serie de equipos que se pueden emplear para mejorar el proceso.

3.1. EL USO DE PREFORMAS

El uso de preformas permite controlar mejor la cantidad de material de moldeo, conseguir una manipulación más sencilla y acortar el ciclo de moldeo. Una **preforma** o tableta no es otra cosa que una pastilla de polvo de moldeo someramente aglomerada por presión para que mantenga su forma, de manera que permita su manejo sin problemas. Las preformas suelen tener formas sencillas y son fáciles de obtener en prensas de empastillar.

Las ventajas del empleo de preformas se pueden resumir como sigue:

- Acortar el ciclo de moldeo.
- Controlar el peso de la carga.
- Facilitar el manejo del material de moldeo.
- Facilitar el precalentamiento.

Por otra parte, las principales desventajas son las siguientes:

- El coste de obtención de preformas no está siempre compensado.
- Algunos materiales no pueden prepararse en preformas.
- Los polvos de moldeo dan mejores distribuciones de flujo y llenan mejor moldes de forma compleja.

En la figura 6.7 se muestra esquemáticamente el funcionamiento de una máquina de hacer preformas de tipo horizontal; A es el pistón fijo, B es el pistón móvil unido al cilindro hidráulico C, y D es la matriz que comunica con la tolva. La distancia entre A y B, cuando la máquina está abierta se puede variar para aumentar o disminuir el peso de la tableta ajustando el retroceso del pistón C. La matriz junto con la tolva se mueven mediante pequeños pistones hidráulicos que no están dibujados en el esquema.

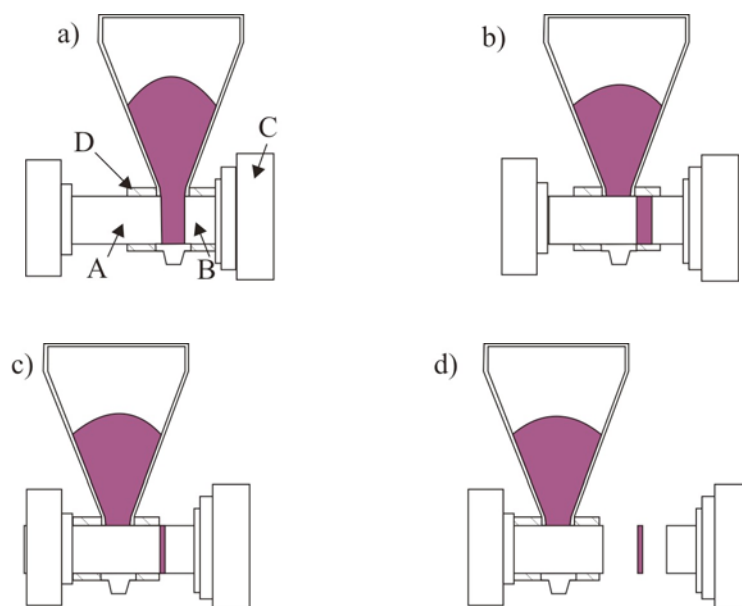


Figura 6.7. Máquina horizontal para fabricar preformas.

La secuencia de operación es la siguiente:

a) Posición de llenado; la abertura entre pistones queda situada debajo de la tolva.

b) Matriz y tolva se han desplazado a la izquierda; la abertura entre pistones (llena de polvo de moldeo) queda situada dentro de la matriz.

c) La tableta o preforma es comprimida entre los pistones. El pistón C avanza comprimiendo al polvo dentro de la matriz.

d) Matriz y tolva se desplazan hacia la izquierda y la tableta sale de la máquina (simultáneamente retrocede el pistón C). El siguiente movimiento es el de desplazamiento de matriz y tolva hacia la derecha para volver a cargarse de polvo.

Para justificar el uso de preformas, hay otros dos puntos que deben tenerse en cuenta. Durante el proceso de moldeo de los materiales termoendurecibles se produce cierta cantidad de gases y materias volátiles. Estos gases son generalmente aire que queda atrapado en el polvo de moldeo

y vapor de agua que se forma como consecuencia de la condensación final. La manera de eliminar los productos volátiles es dejando respirar el molde unos segundos. Con el empleo de tabletas de preformas, el material de moldeo está densificado y es menos probable que aparezcan este tipo de problemas.

3.2. PRECALEFACCIÓN DEL MATERIAL

Las técnicas de precalefacción colocan el material (bien en polvo o en tabletas de preforma) dentro de las cavidades del molde a mayor temperatura que la ambiente, para así disminuir los ciclos de moldeo, reduciendo el tiempo necesario para el curado. El empleo simultáneo de precalefacción y preformas permite mejorar notablemente la velocidad de producción. Se consiguen además, otras ventajas adicionales, como la eliminación del tiempo necesario para la “desgasificación” del material de moldeo y un secado previo que en ocasiones puede ser interesante. Por tanto, las ventajas que se consiguen usando precalefacción son las siguientes:

- Gran aumento en la producción: reducción del tiempo de curado en un 50-60%.
- Aumentan las posibilidades de la prensa, debido a que la mayor fluidez de la masa precalentada permite reducir las presiones de moldeo necesarias. Se pueden moldear piezas mayores y más gruesas en la misma prensa o usar una prensa menor.
- Disminución del desgaste de los moldes (el material es menos abrasivo).
- Supresión del desgasificado (los gases se pierden durante el precalentamiento).
- Curado más homogéneo (mejores propiedades mecánicas y eléctricas de las piezas).
- Mejor acabado y pulido de la superficie de los artículos.

Si la pieza que debe ser moldeada necesita un gran flujo del material, puede ser preciso reducir el tiempo de precalefacción o la temperatura de precalefacción. En general un material de flujo blando se puede precalentar

durante más tiempo, con seguridad de obtener buenos resultados, que un material de flujo duro.

3.3. MOLDEO POR COMPRESIÓN TOTALMENTE AUTOMÁTICO

En algunas ocasiones el moldeo por compresión se realiza de forma automática. Para ello es necesario utilizar una prensa de moldeo equipada con sistemas adicionales para almacenar cierta cantidad de material de moldeo, medir exactamente la cantidad de polvo de moldeo por ciclo, depositarla dentro de las cavidades del molde, y extraer, finalmente, la pieza moldeada. Con este tipo de prensa el operario sólo debe cargar periódicamente la tolva de alimentación y retirar las piezas moldeadas. En este caso se necesitan producciones suficientemente grandes ya que exige una mayor inversión de capital. Por otra parte, el moldeo automático asegura una producción masiva de artículos moldeados de calidad muy homogénea y con unos costes mínimos de producción. Como principal inconveniente, destacar que el moldeo automático no es practicable cuando la pieza moldeada lleva inserciones, resaltes o taladros laterales.

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

D.H., Morton-Jones, Douglas M. Bryce, "Polymer Processing", Chapman & Hall, Londres, 1991.

Michel L. Berins, "Plastics Engineering Handbook", Van Nostran Reinhold, New York, 1991.

Jack Avery, "Injection Molding Alternatives", Hanser Publishers, Cincinnati, 1998.