

TEMA 7. MOLDEO ROTACIONAL

1. INTRODUCCIÓN.....	252
2. MÁQUINAS Y MOLDES	256
2.1. Máquinas.....	256
2.2. Moldes	260
3. ETAPAS	263
3.1. Etapa de inducción.....	265
3.2. Etapa de sinterización	266
3.3. Etapa de densificación	269
3.4. Etapas de enfriamiento, cristalización y enfriamiento final	271
4. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES PARA MOLDEO ROTACIONAL.....	275
4.1. Forma, tamaño y distribución de tamaño de partícula.....	275
4.2. Peso molecular y distribución de pesos moleculares.....	277
4.3. Cristalinidad.....	277
5. MOLDEO ROTACIONAL DE MATERIALES LÍQUIDOS.....	278
6. INNOVACIONES EN MOLDEO ROTACIONAL	281
6.1. Métodos alternativos de calefacción.....	282
6.2. Presurización de moldes	283
BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA.....	285

Resumen

En este tema se trata el proceso de obtención de artículos huecos mediante moldeo rotacional. Se explican las principales características del proceso, los materiales empleados y las peculiaridades de las máquinas y moldes. A continuación se estudian las etapas básicas por las que pasa el material desde que se introduce en el molde de moldeo rotacional hasta que se extrae la pieza. En el siguiente apartado se describe como cuales son las principales características que debe tener un polvo de moldeo para que sea apto para este proceso y a continuación se describe el proceso de moldeo rotacional de sistemas líquidos. Para finalizar se estudian las principales innovaciones que se están introduciendo en este proceso.

1. INTRODUCCIÓN

El moldeo rotacional o rotomoldeo es un método para transformar plásticos, que generalmente se encuentran en polvo, para obtener artículos huecos. De una forma simple el proceso se puede describir, tal y como se muestra en la figura 7.1.

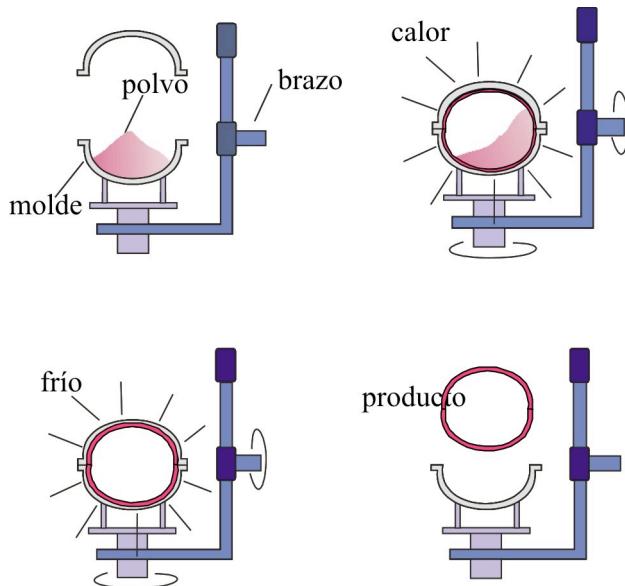


Figura 7.1. Proceso de moldeo rotacional.

En este proceso una cantidad de plástico frío, en polvo o líquido, se introduce en la mitad del molde también frío. El molde se cierra y se hace rotar en torno a dos ejes en el interior del horno. Cuando la superficie metálica del molde se calienta lo suficiente, el plástico que se encuentra sobre su base en el interior comienza a fundir y se adhiere a las paredes internas del molde. El plástico va fundiendo en capas sucesivas y gracias a la rotación biaxial cuando todo el plástico ha fundido el interior del molde debe estar completamente recubierto. En ese momento puede comenzar la etapa de enfriamiento mientras continúa la rotación del molde. Una vez solidificado el plástico, el molde se desplaza hacia la zona de carga y descarga donde se extrae la pieza. Este proceso se puede emplear también para materiales termoestables, siendo todas las etapas descritas iguales, sólo que en este caso

el material no funde si no que polimeriza sobre la superficie del molde y de modo que el diseño del molde debe ser tal que permita la extracción de las piezas.

A diferencia de lo que ocurre con las otras técnicas de transformación descritas, el calentamiento y enfriamiento del plástico tienen lugar en el interior de un molde en el que no se aplica presión.

El proceso de moldeo rotacional fue desarrollado en los años 40 pero en principio atrajo poca atención porque se consideró un proceso lento restringido a un número reducido de plásticos. A escala industrial comenzó a emplearse en la década de los 50 para la fabricación de muñecas y balones de playa que se fabricaban con plastisoles de PVC, siendo todavía un proceso marginal. En los años 60 comenzó la expansión con la introducción de ciertos grados de PE en polvo especialmente desarrollados para rotomoldeo. En las dos últimas décadas las mejoras en el control del proceso y el desarrollo de nuevos materiales para rotomoldeo han dado lugar a un gran aumento de la utilización de esta técnica de transformación. Actualmente se rotomoldea una gran diversidad de plásticos como distintos grados de PA, ABS, PC, HIPS, PP, EVA, acetales, materiales reactivos (termoestables), plastisoles de PVC, entre otros. El PE en sus diferentes grados supone el 85% de la cantidad total de plásticos rotomoldeados, pues presenta unas propiedades de flujo tanto del polvo como del fundido y una estabilidad térmica que lo hacen ideal para este proceso.

Actualmente el crecimiento del rotomoldeo frente a las demás técnicas de transformación es espectacular. En la figura 7.2 se compara el crecimiento promedio anual determinado como el aumento del consumo de plásticos por diferentes tipos de procesado entre el año 1996 y 2000. Mientras que el crecimiento de otras técnicas de transformación tradicionales como el soplado o la inyección, está alrededor del 4%, las cifras de crecimiento de estos años para rotomoldeo ascienden al 14%. A pesar de ello las cifras de negocio están todavía hoy alejadas de las de otras técnicas de transformación tradicionales como inyección o extrusión.

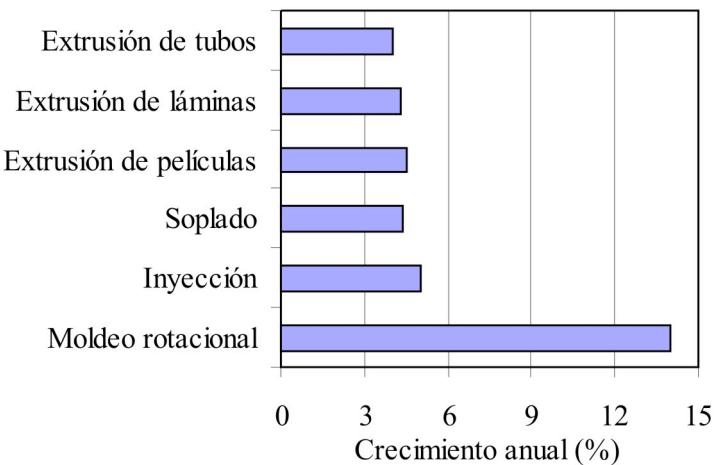


Figura 7.2. Crecimiento anual promedio del moldeo rotacional frente a otras técnicas de transformación para los años 1996-2000.

El tipo de artículos que actualmente se rotomoldea es muy variado, en general se trata de artículos huecos que pueden ser cerrados o abiertos, con paredes sencillas o con múltiples. Igualmente puede tratarse de artículos espumados o reforzados con fibras o artículos blandos. En EEUU más del 40% de la producción se destina a la industria del juguete, el 30% a la fabricación de tanques, contenedores y envases de todo tipo, y un 8% a la fabricación de piezas para automóviles, embarcaciones y aeronáutica. En Europa la situación es bastante diferente; los envases, tanques y contenedores suponen el 44% de los productos rotomoldeados, los juguetes tan solo el 12% y los productos de automoción y menaje el 17 y 16%, respectivamente. En la Comunidad Valenciana, y más concretamente en la provincia de Alicante, hay comarcas enteras en las que la economía reside básicamente en la industria del juguete, donde la mayor parte de las piezas de plásticos son rotomoldeadas, por lo que este proceso se encuentra muy extendido.

El competidor más directo del rotomoldeo para la fabricación de artículos huecos de una sola pieza es el soplado. Aunque también compite con los procesos de inyección y termoconformado en los que se puede fabricar artículos huecos obtenidos en dos mitades que deben ser unidas después.

Respecto de otras técnicas de transformación, las principales ventajas y desventajas del proceso de moldeo rotacional son las siguientes:

Ventajas:

- Las máquinas y los moldes son simples y relativamente baratos. Esto es debido al hecho de que el moldeo rotacional no emplea presión pues no es necesario obligar a que el material fluya desde unas partes de la máquina a otras, como ocurre con las demás técnicas de transformación, lo que hace que no se requieran moldes excesivamente resistentes
- En el mismo equipo, e incluso en un mismo ciclo se puede trabajar con moldes de distinto tamaño y forma, con lo que la planificación de la producción puede ser muy flexible
- Se puede obtener diversidad de productos huecos, artículos muy grandes (más que con cualquier otra técnica), con gran facilidad para modificar el espesor, dobles capas, artículos reforzados, espumados, entre otros
- Los productos pueden estar libres de tensiones si se adoptan las precauciones oportunas (puesto que no se aplica presión)
- Se puede evitar o disimular las líneas de unión en las piezas rotomoldeadas en el caso de piezas flexibles

Desventajas:

- El coste de los materiales es relativamente alto puesto que la mayoría de los plásticos se sirven en grana y deben ser sometidos a un proceso de molienda criogénica que encarece el proceso y, además las características del polvo obtenido son cruciales para la calidad de las piezas
- Los ciclos son largos pues cada vez los moldes se calientan desde temperatura ambiente hasta elevadas temperaturas y luego se enfrián, empleando por lo general hornos de convección forzada o corrientes de aire, lo que resulta en un deficiente aprovechamiento del calor
- Las etapas de carga y descarga de los moldes pueden resultar muy complicadas y requieren mucha mano de obra

- Los materiales que se emplean hoy todavía son limitados en comparación con otros procesos

En definitiva se trata de un proceso económico y muy flexible (tanto en la planificación de la producción como en el diseño de piezas), muy adecuado para la fabricación de tiradas cortas de piezas grandes, y en el cual se pueden obtener piezas de unas dimensiones que no es posible obtener mediante otros procesos. Sin embargo, también se trata de un proceso lento donde el aprovechamiento del calor es bastante deficiente y que requiere de mucha mano de obra en las etapas de carga y descarga.

2. MÁQUINAS Y MOLDES

2.1. MÁQUINAS

Las máquinas de rotomoldeo deben ser capaces de hacer girar al molde en torno a dos ejes perpendiculares. Las primeras máquinas empleadas utilizaban un sistema de giro de vaivén, y se denominan máquinas de tipo “Rock and Roll” como las que se muestran en la figura 7.3.



Figura 7.3. Máquina de rotomoldeo de vaivén.

En estas máquinas se produce el giro completo alrededor de uno de los ejes, mientras que simultáneamente el sistema se coloca sobre otro eje perpendicular que hace que el molde gire hasta 45°, provocando el movimiento de vaivén. Estas máquinas se emplean todavía hoy en la

producción de artículos muy grandes en los que resulta complicado hacer el giro completo alrededor de los dos ejes, como el que se muestra en la figura 7.3 para la fabricación de cascos de canoas.

Las máquinas más modernas consiguen la rotación completa como se muestra en la figura 7.4.

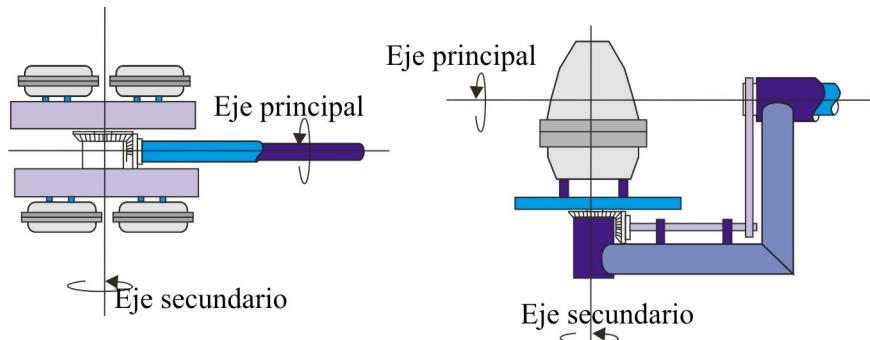


Figura 7.4. Brazo recto y brazo acodado para la realización del giro en torno a dos ejes en las máquinas de moldeo rotacional.

En el primer tipo de brazo (brazo recto) se puede colocar mayor número de moldes en cada ciclo, pero deben ser de menor tamaño que en el caso del brazo acodado. En ambos tipos de brazo los motores que hacen girar cada eje son independientes, de modo que se puede seleccionar distintas velocidades de rotación en cada eje para obtener la relación de rotación deseada. La velocidad de rotación óptima para conseguir una distribución adecuada del material dependerá especialmente de la geometría de la pieza que se desea moldear. Por ejemplo, para geometrías esféricas se recomienda una velocidad de rotación de 12 rpm (para el eje principal) y una relación de rotación de 4:1, mientras que para piezas alargadas (montadas en el molde horizontalmente) la relación que recomiendan los fabricantes es 8:1 (y 1:5 si van montadas verticalmente). Por lo general, el molde debe mantenerse girando durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento.

En cuanto al sistema de calentamiento, en el pasado se realizaron diversos intentos para calentar los moldes con aceite o disoluciones salinas calientes que circulaban por camisas situadas alrededor de los moldes, pero

hoy en día este tipo de calefacción no es habitual. Estos métodos ofrecen muy buena eficacia para la transmisión de calor pero presentan problemas de mantenimiento. En las máquinas modernas de rotomoldeo se emplea un horno de convección forzada para calentar los moldes. En la mayoría de los casos el horno se calienta por combustión de un gas, aceite o electricidad como fuente de energía. La electricidad es limpia pero lenta, el aceite requiere cuidados y mantenimiento regular, por lo que habitualmente se prefieren los hornos calentados por la combustión de un gas. Para conseguir una buena circulación del aire en el interior del horno se emplean ventiladores y tabiques deflectores, de modo que se evita la aparición de zonas muertas.

Habitualmente se emplea como sistema de enfriamiento aire forzado, agua pulverizada o combinaciones de ambos. En ocasiones se pueden sumergir los moldes en baños de agua.

Los sistemas de giro, calentamiento y enfriamiento son muy parecidos en todas las máquinas industriales. Las distintas máquinas de rotomoldeo empleadas industrialmente difieren principalmente en la disposición de las distintas estaciones (calentamiento/enfriamiento/descarga/carga) y en la forma de transferir los moldes de una estación a otra. Las máquinas más corrientes hoy en día son, sin duda, las máquinas tipo carrusel. Estas máquinas resultan muy eficientes, altamente productivas y de bajo mantenimiento. Las máquinas carrusel de tres brazos fijos, como la que se muestra en la figura 7.5 tienen tres estaciones, por lo que los brazos giran 120° para desplazarse. Se emplean cuando los ciclos de horno y enfriamiento tienen duraciones similares y cuando la carga y descarga pueden ser fácilmente manipuladas. En las máquinas de brazos fijos el tiempo en que los brazos están en cada estación está controlado por la duración de la etapa más lenta.

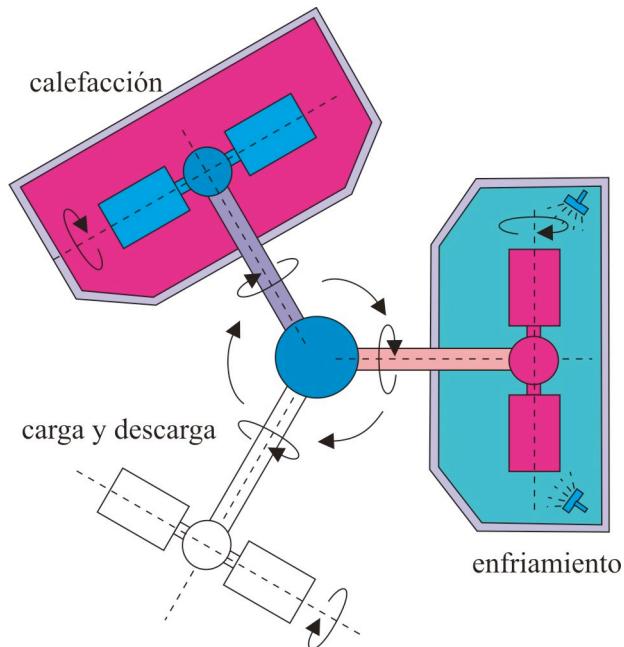


Figura 7.5. Máquina tipo carrusel de tres brazos fijos.

Cuando la duración de uno de los ciclos es muy superior a la duración de los otros se pueden emplear máquinas de 4 brazos, los cuales forman un ángulo de 90° entre sí. En estas máquinas la estación más lenta se encuentra duplicada. Actualmente estas máquinas están siendo equipadas con brazos independientes, de modo que la planificación de la producción es mucho más versátil. Además la mayoría de las máquinas modernas disponen de una línea de aire frío y/o caliente que circula por el interior del brazo que puede introducirse en el interior del molde o dirigirse a algún punto del exterior donde el acceso del frío o el calor es más complicado. En la figura 7.6 se muestra un máquina de carrusel de brazos independientes.

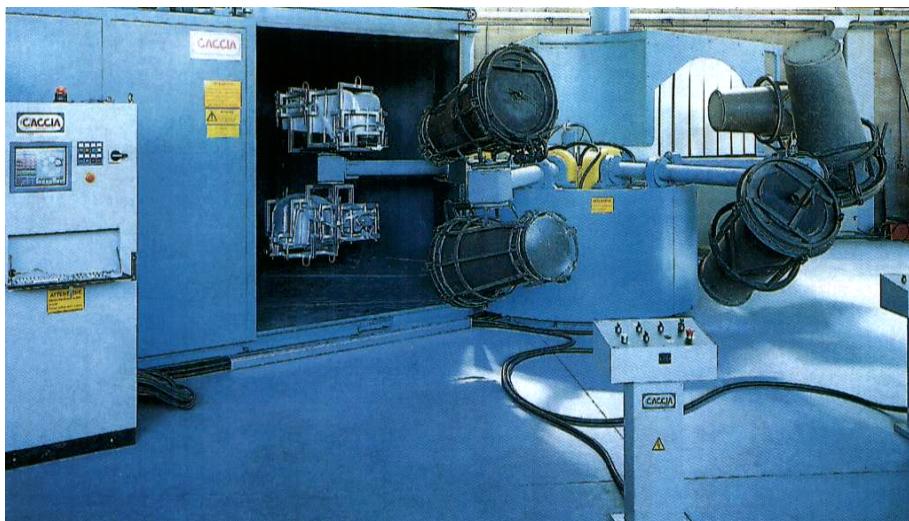


Figura 7.6. Máquina tipo carrusel de brazos independientes.

2.2. MOLDES

Los moldes son piezas clave en el proceso de rotomoldeo. Deben tener los siguientes requerimientos básicos:

- El material del que están fabricados debe tener una buena conductividad térmica para que el calor se transfiera o se elimine del plástico lo más rápidamente posible
- Deben tener la suficiente resistencia mecánica para permanecer sin alabearse durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento a que deben ser sometidos
- Las dos partes del molde deben disponer de un sistema de cierre que permita cerrarlo fuertemente y abrirlo con sencillez
- Deben poder montarse sobre el brazo o plato de forma que no se impida la circulación del aire a su alrededor
- Deben tener un respiradero que tiene la función de mantener la presión del interior del molde igual a la atmosférica. Esto es muy importante si se tiene en cuenta el gran volumen de aire que se aloja en el interior de los moldes y la gran variación de temperatura que se produce a lo largo del ciclo

Si el respiradero se bloquea en algún momento de la etapa de calentamiento puede dar lugar a sobrepresión que podría provocar que el material saliera por la línea de partición, o si el bloqueo del respiradero se produce durante la etapa de enfriamiento, se pueden producir presiones por debajo de la atmosférica, lo que puede conducir a piezas rechupadas y deformadas. En la figura 7.7 se muestra un molde típico de aluminio empleado en moldeo rotacional.

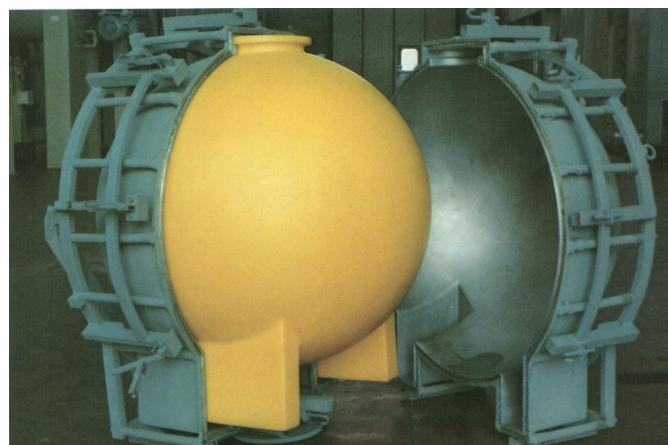


Figura 7.7. Molde de aluminio para moldeo rotacional.

Los moldes normalmente están constituidos por dos mitades, aunque cuando la geometría de la pieza es complicada pueden tener más partes para facilitar el desmoldeo. Se pueden fabricar a partir de distintos materiales, como el acero, aluminio y aleaciones de cobre/níquel. En cuanto a los métodos de fabricación, generalmente se fabrican por mecanización, galvanoplastia y fundición.

Los moldes de aluminio fundido son los más empleados, especialmente cuando se moldean formas complejas. El precio de una colada puede ser relativamente elevado, si bien cuando se fabrican diversas cavidades suele preferirse este tipo de moldes sobre otros. Por otra parte, estos moldes son algo más blandos y susceptibles de estropearse que, por ejemplo, los moldes fabricados de planchas de acero. Los moldes galvanizados, generalmente de

cobre/níquel, se emplean especialmente para plastisoles de PVC. En estos moldes la reproducción de detalles es muy precisa y suelen emplearse para artículos flexibles en los que no deben aparecer líneas de partición (como cabezas de muñecas). Estos moldes resultan relativamente baratos, sin embargo, tienen una duración corta. Los moldes fabricados a partir de planchas de metal son generalmente los más económicos y se emplean para productos muy grandes, que no requieran texturas especiales o reproducción de detalles muy precisa.

En cuanto al diseño de piezas en moldeo rotacional, se dice que este proceso es el sueño hecho realidad de cualquier diseñador por la libertad de la que goza para diseñar las piezas. Aún así existen una serie de restricciones. Mediante rotomoldeo se pueden producir artículos huecos de doble pared, como por ejemplo cascos de embarcaciones. En la figura 7.8a se muestra la sección de un molde de este tipo. En muchos casos este tipo de estructuras se pueden llenar con un material espumado para mejorar la resistencia o el aislamiento. Existe una serie de limitaciones en estas piezas como que el hueco de la cavidad debe tener un volumen al menos 3 veces mayor que el volumen de las paredes de la pieza, y la distancia entre las paredes debe ser al menos de 5 veces el espesor de la pared. Se suelen emplear nervios de refuerzo para dar rigidez a piezas que contienen grandes superficies planas con un espesor pequeño, como se muestra en la figura 7.8b. Se recomienda para estos nervios una altura de aproximadamente 4 veces el espesor de la pared y un ancho de 5 veces el espesor de la misma. También se puede construir canales para dar rigidez. En este caso son preferibles las estructuras de "casi-contacto" para evitar tensionar la pieza en esos puntos (figura 7.8c, estructura B). En cuanto a los ángulos, en general en ángulos agudos se acumulan más tensiones que en ángulos suaves. Diseñando piezas con ángulos amplios como los de la figura 7.8d se puede conseguir la resistencia adecuada, donde el material se reparte de forma correcta. En el caso de ángulos agudos hacia afuera tiende a acumularse una cantidad extra de material, mientras que los que se proyectan hacia adentro tendrán escasez de material.

Figura 7.8a

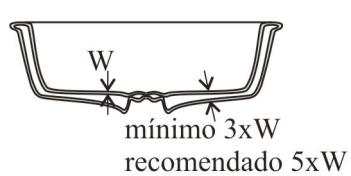


Figura 7.8b

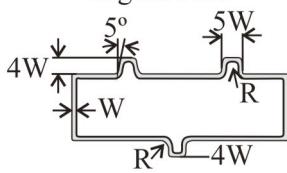


Figura 7.8c

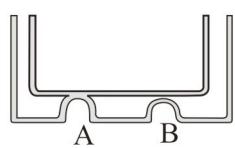


Figura 7.8d

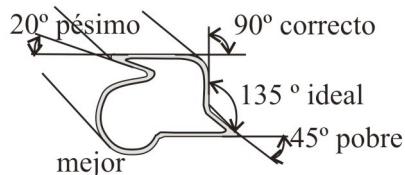


Figura 7.8. Limitaciones en el diseño de las piezas rotomoldeadas.

Otra ventaja que presentan las piezas y los moldes en rotomoldeo es que el espesor de la pared se puede modificar simplemente variando la cantidad de material que se introduce en el molde, a diferencia de lo que ocurre en otros procesos de transformación donde sería necesario rectificar el molde.

3. ETAPAS

Si se determina la temperatura en varios puntos del molde durante un ciclo de rotomoldeo se obtienen curvas como las que se muestran en la figura 7.9.

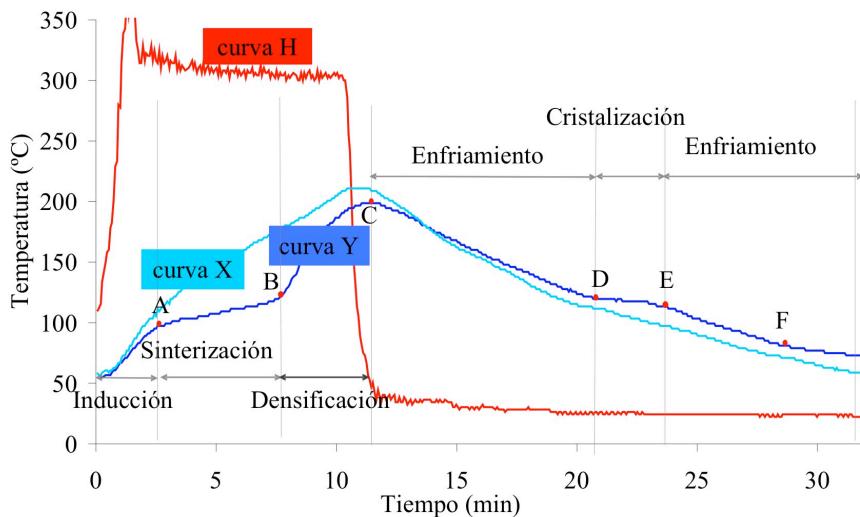


Figura 7.9. Evolución de la temperatura del aire que rodea al molde (curva H), del molde (curva X) y del aire del interior del molde (curva Y) durante el proceso de moldeo rotacional y etapas que se observan durante el ciclo.

La curva H muestra la temperatura del ambiente que rodea al molde, que como se puede observar tiende a alcanzar la temperatura nominal del horno tan pronto como el molde se introduce en su interior. La temperatura del molde y del aire del interior del mismo vienen representadas por las curvas X e Y. La temperatura del aire del interior del molde (curva Y) da información muy valiosa sobre los procesos que tienen lugar mientras el plástico se encuentra en el molde.

Se puede observar 6 etapas claramente diferenciadas en la curva Y. Durante la primera etapa, el material en polvo se encuentra tambaleándose en la base del molde mientras éste gira. Esta etapa se conoce con el nombre de **inducción**. Cuando el molde alcanza una cierta temperatura a la que el polvo comienza a fundir, el polvo comienza a adherirse a la superficie del interior del molde. En esta etapa diferentes capas de polvo quedan adheridas en la superficie interior del molde y van absorbiendo calor para fundir, por lo que la temperatura del material aumenta lentamente, lo que se conoce como etapa de **sinterización**. Una vez que todo el material se ha adherido al molde, la

temperatura aumentará a mayor velocidad, dependiendo de la capacidad calorífica del fundido. Esta es la etapa de **densificación** durante la que se consolida el fundido. A continuación tiene lugar la etapa de **enfriamiento inicial** a una velocidad que lógicamente estará determinada por el sistema de enfriamiento empleado. Cuando el material fundido comienza a cristalizar se observa una nueva meseta, que en este caso es debida al desprendimiento de calor durante la cristalización del material (etapa de **cristalización**). Por último se observa la etapa de **enfriamiento final** que se mantendrá hasta que la pieza tenga suficiente consistencia para poder ser extraída del molde sin deformarse. A continuación se describe con mayor detalle todo lo acaecido en cada una de las etapas.

3.1. ETAPA DE INDUCCIÓN

En la primera etapa el molde con el material en su interior se introduce en un horno de aire forzado que calienta su superficie. En principio el molde y el material están fríos, y el polvo se encuentra sobre la base del molde, de modo que conforme se produce la rotación del molde el polvo sufre un movimiento característico, debido a la rotación del molde y a la acción de la gravedad, como se puede observar en la figura 7.10 donde se representa lo que ocurriría en un molde oval que gira en torno a dos ejes.

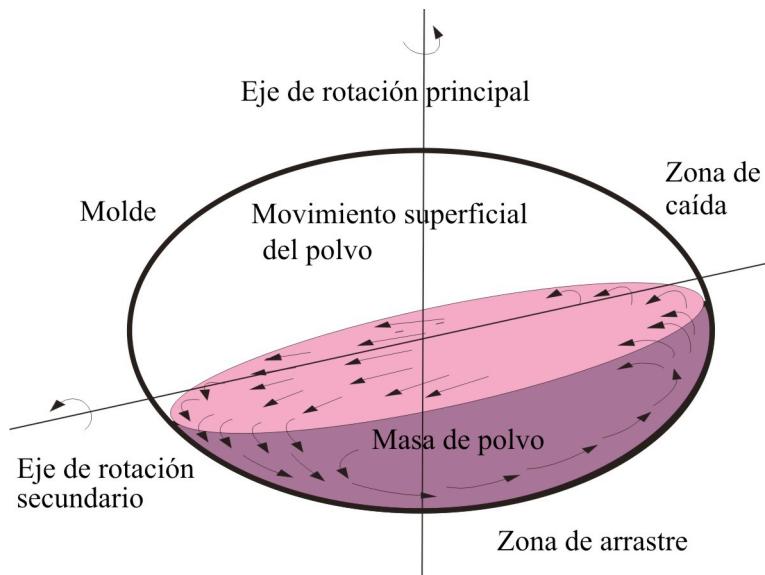


Figura 7.10. Movimiento del polvo en el interior del molde durante la etapa de sinterización.

Cuando comienza el movimiento del molde, el polvo que se encuentra cerca de las paredes del molde gira con éste a su misma velocidad. La capa de polvo en contacto con el molde irá ascendiendo arrastrado por la pared y caerá a la zona central cuando la fuerza de gravedad supere el rozamiento con la pared y entre las partículas. Durante la caída, las partículas de polvo que se encontraban cerca de la pared del molde (más caliente) se mezclan con las demás, que forman lo que llamaremos la balsa de polvo, de modo que la temperatura de las mismas se homogeneiza, y una capa renovada de polvo quedará en contacto con el molde. Mientras tanto el aire del interior del molde estará en contacto directo con la parte del molde que queda al descubierto y con la balsa de polvo.

3.2. ETAPA DE SINTERIZACIÓN

Llegado al punto A de la figura 7.9 algunas de las partículas más pequeñas inician la fusión, su superficie externa se hace pegajosa y se adhieren a la superficie del molde. Este punto marca el final de la etapa de inducción y el comienzo de la etapa de sinterización. Conforme el molde gira

diferentes capas de material se van adhiriendo unas sobre otras y de esta forma es como se produce el reparto del material sobre el molde. Cuando todo el polvo ha desaparecido finaliza esta etapa, en el punto B de la curva correspondiente a la temperatura del aire del interior del molde (figura 7.9). Por tanto, durante el periodo comprendido entre A y B coexisten polímero en polvo y fundido.

Cuando las partículas de un polímero, y en general de cualquier material sólido se ponen en contacto a elevadas temperaturas tienden a disminuir su superficie total por coalescencia. Este proceso es conocido como sinterización. Durante la sinterización se desarrollan, en primer lugar interfases entre partículas adyacentes, que van creciendo para formar puentes entre partículas. La disminución en el área superficial de las partículas implica la disminución de la energía superficial, por tanto, la tensión superficial es la fuerza impulsora en este proceso. En la figura 7.11 se muestra la evolución de la interfase de partículas adyacentes durante esta etapa.

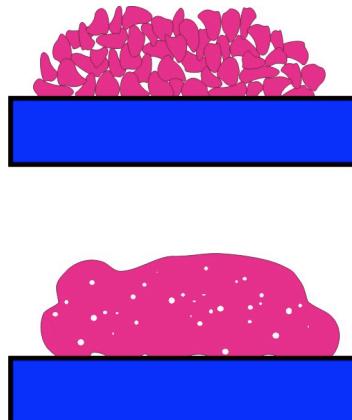


Figura 7.11. Evolución de la interfase entre partículas adyacentes durante la etapa de sinterización.

De este modo durante el proceso de sinterización se produce un aumento de la densidad aparente del material, que pasa de la densidad aparente del polvo con valores próximos a 0.4 g/cm^3 , a un valor de la densidad cercano a la densidad del fundido (algo menor que la densidad del

material sólido). Este hecho se debe tener en cuenta desde el punto de vista de la simulación, como se comentará mas adelante.

Los mecanismos que controlan el proceso de sinterización son básicamente la difusión y el flujo viscoso. En el caso de las moléculas de polímero la energía de activación para la difusión es muy alta, por lo que el proceso estará controlado principalmente por el flujo viscoso y, por tanto, por la temperatura. *Frenkel* obtuvo la siguiente expresión para la velocidad de coalescencia debida al flujo viscoso:

$$\frac{y}{a} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\Gamma}{\mu a} t \quad (1)$$

donde y y a son el radio del cuello y de las partículas, como se muestra en la figura 7.12, Γ y μ son la tensión superficial y la viscosidad del polímero y t el tiempo.

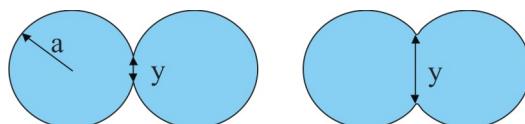


Figura 7.12. Evolución del radio del cuello entre partículas durante el proceso de sinterización.

El modelo de Frenkel es sólo aplicable a partículas redondas del mismo tamaño, además está limitado a materiales newtonianos, si bien es útil como primera aproximación. La mayoría de los polímeros en moldeo rotacional se comportan como Newtonianos, puesto que las velocidades de cizalla implicadas son extremadamente bajas (del orden de 10^{-4} s^{-1}). Este modelo ha sido extendido por algunos autores para considerar la respuesta viscoelástica de algunos materiales. Sin embargo, dado que la velocidad a la que transcurre el proceso es relativamente lenta y que el tiempo de relajación de los polímeros empleados habitualmente en moldeo rotacional es relativamente alto, se pueden despreciar, en una primera aproximación, efectos viscoelásticos.

A partir del modelo de Frenkel se puede establecer qué características del polímero influyen sobre el proceso de sinterización, y por tanto qué polímeros pueden ser aptos para moldeo rotacional. Según este modelo:

- La velocidad de sinterización está favorecida cuanto menor sea la viscosidad del polímero; por tanto el peso molecular de los polímeros no debe ser muy elevado (aunque tampoco demasiado bajo porque esto irá en detrimento de las propiedades mecánicas del material)
- Por otra parte, cuanto menor sea la curvatura de las partículas (mayor radio) se favorece el proceso. Lógicamente también hay un límite para las partículas demasiado grandes que tardan más en fundir y se moverán peor por el molde
- Cuanto mayor sea la tensión superficial más favorecido se verá el proceso, por lo que la presencia de ciertos aditivos y de agentes desmoldeantes no es conveniente

3.3. ETAPA DE DENSIFICACIÓN

En el punto B de la figura 7.9 todo el material recién sinterizado se encuentra formando una especie de película fundida que recubre el molde. En el interior del material quedan atrapadas burbujas de aire, consecuencia natural del proceso de sinterización. Durante la etapa de densificación la pieza se mantiene en el horno mientras las burbujas son eliminadas del fundido, hasta obtener un fundido homogéneo.

Durante mucho tiempo se ha pensado que las burbujas desparecían por migración hacia la superficie del plástico en contacto con el aire del interior del molde. Sin embargo, esta teoría puede ser fácilmente descartada si se realiza un balance de fuerzas sobre una burbuja inmersa en un plástico fundido, como la que se muestra en la figura 7.13:

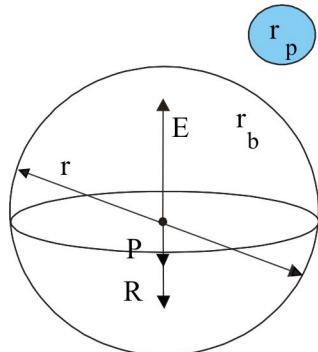


Figura 7.13. Balance de fuerzas sobre una burbuja de aire inmersa en plástico fundido.

se obtiene

$$\text{empuje} = \text{peso de la burbuja} + \text{resistencia del fundido}$$

$$\frac{4\pi r^3}{3} \rho_p g = \frac{4\pi r^3}{3} \rho_b g + 6\pi \eta_o r u \quad (2)$$

donde r es el radio de la burbuja, ρ_p y ρ_b son la densidad del polímero y de la burbuja, η_o es la viscosidad del polímero a cizalla cero, u la velocidad a la que se mueve la burbuja y g la gravedad. Para un diámetro de burbuja de $2.5 \cdot 10^{-4}$ m, tomando como densidad del aire y del polímeros fundido 1 y 950 kg/m^3 , respectivamente, y la viscosidad del polímero fundido de $1 \cdot 10^4 \text{ Pa.s}$, se puede comprobar que el empuje es despreciable dada la alta viscosidad de los polímeros fundidos (se obtiene que la velocidad a la que se mueve la burbuja es de 0.05 mm/h).

Actualmente se acepta que las burbujas desaparecen debido a la disolución de las mismas en el fundido. Cuando la temperatura aumenta el oxígeno comienza a disolverse en el polímero (el oxígeno tiene una solubilidad, por ejemplo, en el polietileno de dos veces la del nitrógeno). A temperaturas más altas, además, el oxígeno es reducido por las reacciones de oxidación que tendrán lugar con el polímero. Conforme desaparece el oxígeno la presión parcial del nitrógeno en la burbuja aumenta, con lo que se facilita el proceso de disolución de éste, lo que a su vez provocará un aumento de la

presión parcial del oxígeno. Esta cadena de situaciones se repite hasta que la burbuja desaparece. Cuanto más alta sea la temperatura máxima alcanzada por el fundido, menor será el contenido en burbujas y poros, y por tanto mejorarán las propiedades mecánicas de la pieza, como se puede observar en la figura 7.14, donde se pueden ver los resultados de la energía de impacto para piezas de polietileno rotomoldeadas hasta diferentes temperaturas. La energía de impacto aumenta hasta que la temperatura alcanzada por la pieza es demasiado elevada y en consecuencia se ha iniciado la descomposición del material. La descomposición de material, en contra de lo que se podría pensar, se inicia en la cara interior de las piezas donde, aunque la temperatura máxima alcanzada no será tan elevada como en la cara en contacto con el molde, existe aire en contacto con la pieza, produciéndose reacciones de oxidación.

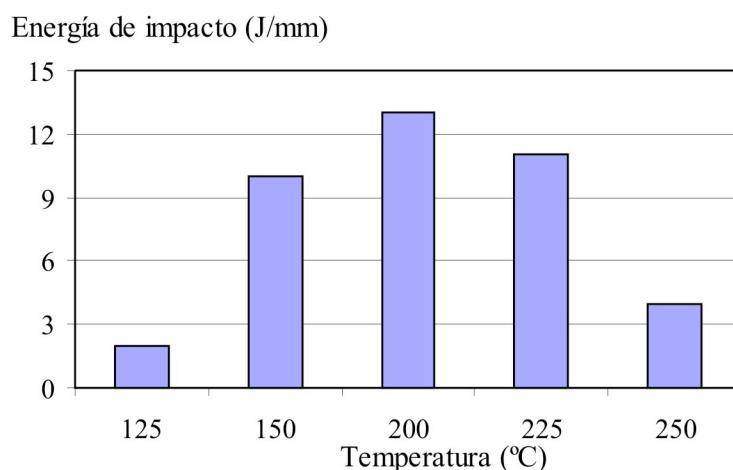


Figura 7.14. Evolución de la energía de impacto con la temperatura alcanzada por el aire del interior del molde de una pieza de polietileno rotomoldeada.

3.4. ETAPAS DE ENFRIAMIENTO INICIAL, CRISTALIZACIÓN Y ENFRIAMIENTO FINAL

Cuando el molde se mueve hacia el área de enfriamiento (justo antes del punto C de la figura 7.8), la temperatura sigue aumentando un poco debido al calor residual que queda en el molde y en el polímero fundido. A partir del punto C la temperatura disminuye a una velocidad que depende del

sistema de enfriamiento seleccionado, por lo general aire forzado, agua pulverizada o combinaciones de ambos. Durante esta primera etapa de enfriamiento el material se encuentra todavía en estado fundido. La etapa de enfriamiento inicial se prolonga hasta la meseta observada a partir del punto D de la figura 7.8.

Para materiales cristalinos se puede apreciar una meseta entre los puntos D y E de la figura 7.8, debido a que el calor latente absorbido durante la fusión es desprendido durante la cristalización, de modo que el aire del interior del molde se mantiene a temperatura prácticamente constante. La extensión de la meseta está directamente relacionada con la cantidad de material que hay en el interior del molde y con la cristalinidad desarrollada por el mismo, de modo que para materiales amorfos no es posible observar esta etapa.

Después del proceso de cristalización o solidificación (a partir del punto E de la figura 7.8) el proceso de enfriamiento continúa hasta que el material adquiere suficiente consistencia para poder ser extraído del molde. El material continúa enfriándose y una nueva revisión de la curva muestra un suave cambio de pendiente en el punto F. Esta inflexión tiene lugar cuando la pieza se separa de la pared del molde como consecuencia de la contracción. A partir de ahí el enfriamiento es más lento puesto que hay una capa de aire entre la pared del molde frío y el plástico. Si cuando esto ocurre la pieza tiene una temperatura a la que ya puede ser manipulada se escoge este punto para el desmoldeo. En este caso la separación de la pieza del molde facilita la etapa de desmoldeo.

La morfología del material (porcentaje de cristalinidad, tipo y tamaño de microcristales) determina en gran medida las propiedades de las piezas obtenidas (propiedades mecánicas, barrera, ópticas,...) y depende fundamentalmente de la velocidad a la que se realizan las tres etapas de enfriamiento comentadas.

Durante el enfriamiento el flujo de calor se invierte respecto de lo que ocurre durante el calentamiento, de forma que la superficie más caliente es la

del interior del plástico. Si las condiciones de enfriamiento son lentas, la pieza se enfriá a velocidades homogéneas y no aparecen gradientes de temperatura elevados entre el exterior y el interior. En condiciones de enfriamiento lentas los materiales con capacidad de cristalizar desarrollan contenidos cristalinos altos. En la figura 7.15 se representa como varía el volumen específico de un polímero amorfó y uno cristalino al disminuir su temperatura a altas y bajas velocidades de enfriamiento. Para polímeros cristalinos si se emplean velocidades de enfriamiento bajas se produce una gran reducción del volumen específico, por lo que la densidad del material aumenta mucho al pasar del estado fundido al sólido, de modo que la pieza se encoge. Si por el contrario el enfriamiento es muy drástico, el contenido en cristalinidad medio de la pieza es menor (y también el encogimiento), pero la velocidad a la que se enfrián las capas de material en contacto con el molde es mayor que la velocidad a la que se enfrián las capas del interior, de modo que el material del interior de la pieza tendrá un volumen específico menor que el del exterior. Es, por tanto, más denso el interior que el exterior, de modo que aparecerán tensiones que podrían provocar el alabeo de la pieza.

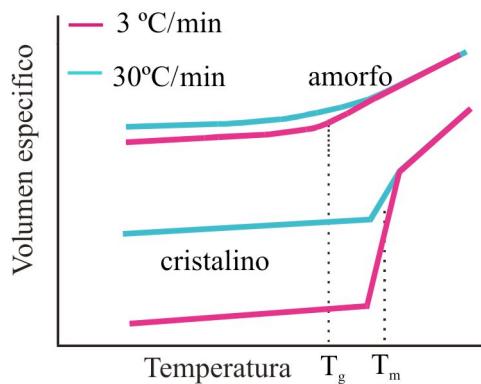


Figura 7.15. Evolución del volumen específico durante el enfriamiento para un polímero cristalino y otro amorfó a dos velocidades de enfriamiento.

En el caso de materiales amorfos, las condiciones de enfriamiento no afectan tanto a las propiedades del material, puesto que la variación de la densidad con la temperatura es pequeña y prácticamente independiente de la

velocidad de enfriamiento, hasta el punto de que cuando se emplean estos materiales los moldes se suelen sumergir en cubas de agua, durando el enfriamiento unos pocos segundos.

La figura 7.16 muestra la variación de la cristalinidad, resistencia al impacto y resistencia a la tracción de piezas de PE rotomoldeadas sometidas a diferentes ciclos de enfriamiento. Al aumentar la velocidad de enfriamiento el calor de fusión que presenta el material disminuye, lo que indica un menor contenido cristalino. En consecuencia, en estas condiciones el material es más blando con lo que la resistencia a la tracción disminuye, mientras que la resistencia al impacto aumenta.

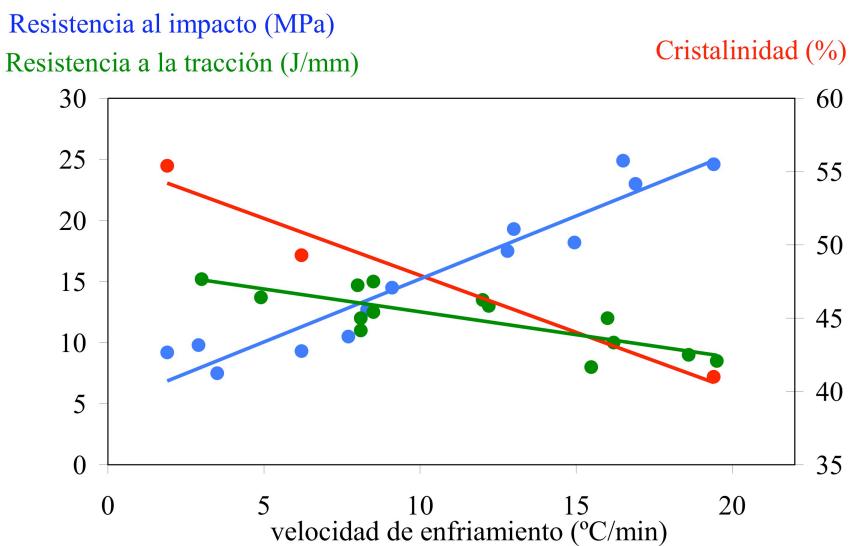


Figura 7.16. Evolución de la cristalinidad, resistencia al impacto y resistencia a la tracción para piezas de polietileno en función de la velocidad de enfriamiento en moldeo rotacional.

Por tanto habrá que llegar a un compromiso entre velocidad de enfriamiento lenta y rápida. Una velocidad de enfriamiento rápida supone:

- ciclos más cortos

- mayor alabeo si se emplea un material cristalino debido a la diferencia de densidad entre el interior y el exterior de la pieza
- menor contenido cristalino, por tanto mejores propiedades de impacto pero peor resistencia a la tracción
- bajo encogimiento debido a la menor cristalinidad del material

Evidentemente una velocidad de enfriamiento lenta supone todo lo contrario, por lo que, teniendo en cuenta qué es lo más importante para el producto que se desea moldear y las características del material, se escogen las condiciones de enfriamiento más adecuadas.

4. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES PARA MOLDEO ROTACIONAL

Las características de la resina empleada, junto con las condiciones de procesado, van a determinar la calidad del producto acabado. Las propiedades de las resinas que mayor influencia tienen sobre el producto transformado y sobre el proceso se exponen a continuación.

4.1. FORMA, TAMAÑO Y DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA DE LA RESINA

El tamaño de la partícula de los polímeros que se emplean en rotomoldeo varía entre 150 y 500 μm . En la figura 7.17 se muestra una distribución de tamaños típica.

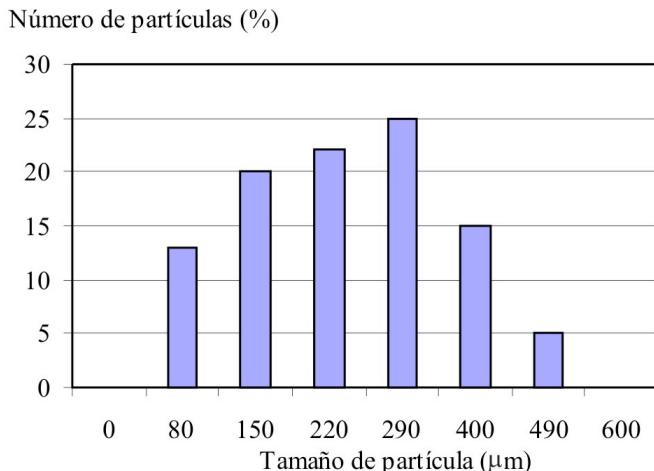


Figura 7.17. Distribución de tamaño de partícula típica para una resina de moldeo rotacional.

El tamaño (TP) y la distribución de tamaños de partícula (DTP) juegan un papel fundamental sobre el flujo del polvo en el molde durante las etapas de inducción y sinterización. Las partículas más finas se moverán con facilidad entre las gruesas y serán las primeras en fundir en contacto con el molde caliente. Estas partículas producen varios efectos deseables como son producir texturas finas con un mínimo de porosidad (mejor acabado superficial) y reducir los tiempos de ciclo. Sin embargo, hay al menos dos limitaciones prácticas por las que el tamaño de partícula no debe ser excesivamente fino. Por una parte, para conseguir partículas muy finas la excesiva cizalla y temperatura desarrollada por los equipos de molienda puede conducir a una pérdida de la resistencia de las partículas y a la degradación parcial de las mismas. Por otra parte, mover partículas muy finas por el interior del molde puede conducir a la aparición de altas cargas estáticas y a la aglomeración de las partículas. Esto provocaría una fusión y un espesor de pared poco uniformes. En contraste, si la proporción de partículas gruesas es demasiado grande el proceso de fusión será más lento y el contenido en burbujas y la porosidad superficial mayor.

La forma de las partículas juega un papel muy importante tanto en la transmisión de calor, como en el flujo del polvo durante el rotomoldeo. Las partículas cilíndricas con relación L/D grande presentan diversos tipos de problemas durante el moldeo. Si la etapa de molienda ha sido deficiente pueden obtenerse polvos con una especie de colas o tallos alargados. Polvos de este tipo son difíciles de moldear y presentan propiedades mecánicas pobres. Esto se atribuye al enrollamiento de estas colas, entre las que puede quedar aire atrapado. Por otra parte, cuanto mayor sea la relación entre la superficie de las partículas en contacto con el molde o con otras partículas y su volumen, tanto mejor será la transmisión de calor por conducción hacia la partícula, por lo que desde el punto de vista de la transmisión de calor interesan partículas cúbicas.

Por tanto, se puede decir que desde el punto de vista de la transmisión de calor y del flujo del polvo, lo ideal serían polvos de entre 150 y 400 μm , con formas cúbicas y con ángulos muy amplios. Es importante que haya presente una porción de finos tanto para mejorar el flujo del polvo y el acabado superficial como la transmisión de calor. Las partículas alargadas con colas no son deseables.

4.2. PESO MOLECULAR Y DISTRIBUCIÓN DE PESOS MOLECULARES

Como medida del peso molecular de las resinas se emplea generalmente el índice de fluidez (MFI). El MFI de las resinas empleadas en rotomoldeo oscila por lo general entre 2 y 10 (g/10 min, 2.16 kg y 190°C).

Un resina con un MFI alto tendrá peso molecular bajo, y por tanto las propiedades mecánicas del producto obtenido serán pobres (impacto y tracción). Sin embargo, los materiales con un MFI excesivamente bajo no son adecuados para rotomoldeo, pues presentan viscosidades altas, lo que dificulta los procesos de sinterización y densificación, y además (o en consecuencia) requieren tiempos de ciclo muy largos.

4.3. CRISTALINIDAD

La cristalinidad que el material sea capaz de desarrollar depende de su estructura. Los polímeros lineales (no ramificados), de pesos moleculares bajos y, en general, que presenten una estructura más regular (menos imperfecciones e impedimentos estéricos) serán capaces de desarrollar una mayor cristalinidad si el enfriamiento se produce en las condiciones adecuadas. Los polímeros cristalinos presentan mayor densidad, mayor resistencia a la tracción y rigidez, sin embargo son menos tenaces y se encogen y alabejan más que los polímeros no cristalinos, como consecuencia de las tensiones que pueden aparecer durante la cristalización, que a su vez son consecuencia de las diferentes velocidades a las que se enfriará el material a lo largo de su espesor.

5. MOLDEO ROTACIONAL DE MATERIALES LÍQUIDOS

El rotomoldeo de materiales en forma de polvo presenta ciertas diferencias con el de materiales líquidos. Como se ha descrito previamente los procesos de sinterización y densificación afectan en gran medida al acabado de las piezas y a sus propiedades mecánicas, y por ello se ha descrito el efecto de las características de los polvos de moldeo en estas etapas del proceso. Sin embargo estos procesos no tienen lugar en el caso de emplear materiales líquidos. En este caso la viscosidad mínima alcanzada por los sistemas líquidos dentro del molde, así como la evolución de la viscosidad con la temperatura juegan un papel fundamental. El efecto de la temperatura del horno y de la velocidad de rotación también es diferente en comparación con los sistemas sólidos.

Los sistemas líquidos empleados en moldeo rotacional son fundamentalmente plastisoles de PVC y en ocasiones resinas reactivas como poliuretanos, poliamidas, poliésteres, epoxis, siliconas y sistemas de urea-formaldehído. En el caso del empleo de sistemas líquidos la reproducción de detalles y el acabado superficial suele ser mucho mejor que en el caso del rotomoldeo de polvos, si bien existe una serie de problemas asociados al

empleo de sistemas líquidos, sobre todo en lo que se refiere a la distribución de espesores del material en el molde.

Como se ha comentado, los plastisoles de PVC son suspensiones de PVC de emulsión en un plastificante. Las formulaciones contienen además otros aditivos como pigmentos o estabilizantes térmicos y se emplean para la producción de muñecas, balones de playa y otros productos blandos. En principio se podría pensar que los requerimientos mecánicos de estas piezas no son excesivamente elevados, sin embargo la inserción de los ojos o el pelo en las cabezas de muñecas, o de mecanismos en piernas y brazos y el montaje final de estas piezas suponen grandes niveles de carga aplicados sobre las mismas. Además por lo general se trata de piezas de forma compleja y que requieren una reproducción de detalles muy precisa.

En la figura 7.18 se muestra la evolución de la viscosidad de una serie de plastisoles formulados con plastificantes de diferentes familias hasta que la viscosidad alcanza el valor de 10 Pa.s. A partir de este valor de viscosidad se estima que los plastisoles ya no serán capaces de fluir y por tanto el reparto del material en el molde debería haberse producido satisfactoriamente una vez alcanzado este punto, o en caso contrario se obtendría una pieza defectuosa. La forma de estas curvas es muy similar para todos los sistemas líquidos que se utilizan en moldeo rotacional, incluidas las resinas reactivas, aunque los mecanismos por los que se produce el aumento de viscosidad son realmente muy diferentes.

En el caso de los plastisoles, cuando comienza a calentarse el material dentro del molde, inicialmente se produce una reducción de la viscosidad como consecuencia del calentamiento del sistema. A continuación las partículas de PVC comienzan a hincharse y a adsorber plastificante con lo que se produce un marcado aumento de la viscosidad. Este proceso es conocido como gelificación. La viscosidad mínima alcanzada por el plastisol, la temperatura a la que se alcanza esta viscosidad, y la velocidad de aumento de la viscosidad con la temperatura condicionan el reparto del material en el interior del molde, y variables como la temperatura del horno o la velocidad de rotación del molde en torno a los dos ejes son fundamentales para obtener

una pieza con un reparto adecuado. Como se puede apreciar en la figura 7.18, dependiendo del tipo de plastificante se obtiene un comportamiento diferente, y lo mismo ocurre con el tipo de resina y con la proporción relativa entre ambos.

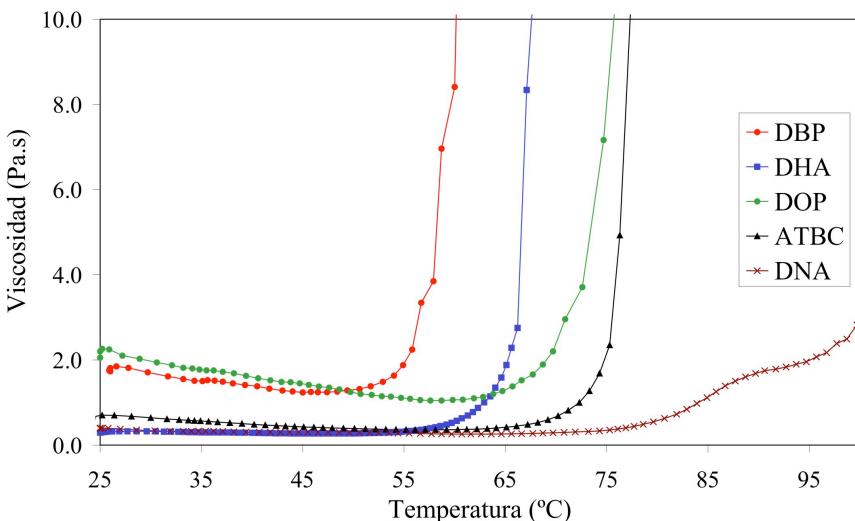


Figura 7.18. Evolución de la viscosidad de los plastisoles de PVC con la temperatura (DBP disobutil ftalato; DHA diheptil adipato; DOP diisoctil ftalato; ATBC tributil citrato; DNA diisononil ftalato).

Por otra parte, para obtener una pieza de la consistencia adecuada a partir de un plastisol no basta con que el reparto sea el adecuado, si no que además las propiedades mecánicas deben haberse desarrollado completamente. La figura 7.19 muestra el comportamiento reológico de un plastisol de PVC que contiene 65 phr de plastificante. En este caso se muestra la curva completa. Como se ha comentado, durante el proceso de gelificación el plastificante (fase continua) es adsorbido por la resina (fase discontinua), de modo que las partículas de PVC se hinchan y cada vez habrá menos plastificante libre en el medio, y como consecuencia se produce un marcado aumento de la viscosidad. Si la temperatura sigue aumentando además se producirá la fusión de los microcristales de PVC, y la mezcla formada por las partículas de PVC hinchadas con el plastificante, los microcristales de PVC y el resto de plastificante libre, acabará formando una masa homogénea. Este

proceso se conoce como fusión del plastisol (aunque no es una fusión en el sentido estricto). Es importante que estas etapas se hayan completado adecuadamente con objeto de que el material sea capaz de desarrollar por completo sus propiedades mecánicas. El valor de la viscosidad máxima alcanzada por el plastisol se relaciona con las propiedades mecánicas que desarrollará el material.

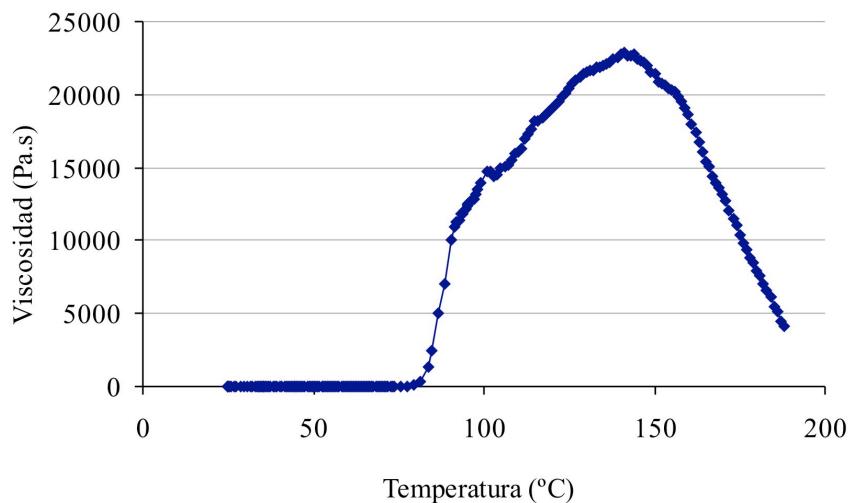


Figura 7.19. Curva viscosidad-temperatura para un plastisol de PVC.

6. INNOVACIONES EN MOLDEO ROTACIONAL

Existen tres claros inconvenientes del moldeo rotacional frente a otras técnicas de transformación, que se han ido comentando a lo largo del tema y que son:

- Ciclos relativamente largos, pues en cada etapa el molde debe calentarse desde temperatura ambiente hasta altas temperaturas y luego enfriarse otra vez
- La superficie de los productos rotomoldeados resulta relativamente pobre debido a la alta porosidad, y esto no es sólo un problema estético, sino a veces también higiénico. Además el alto contenido en burbujas

resulta en pobres propiedades mecánicas. La eliminación completa de las burbujas implica altos tiempos de horno, y en ocasiones esto puede suponer la degradación parcial del material.

- El alabeo es un problema frecuente en piezas rotomoldeadas, situación que se agrava en piezas grandes con superficies planas, tan frecuentes en moldeo rotacional.

Hay muchas estrategias que los rotomoldeadores adoptan para evitar estos problemas, como la introducción de aire frío-caliente en el interior del molde para reducir tiempos de ciclo, flameado de piezas porosas, diseño especial o acabados especiales en piezas grandes que evitan o disimulan el alabeo.

Las investigaciones en moldeo rotacional suelen centrarse en mejorar cualquiera de los tres aspectos mencionados. Entre los desarrollos más importantes que se están realizando para mejorar el proceso se encuentra la calefacción por infrarrojos, la calefacción por microondas y la presurización de moldes.

6.1. MÉTODOS ALTERNATIVOS DE CALEFACCIÓN

Existen máquinas de rotomoldeo comerciales que emplean calefacción mediante infrarrojos, que resultan más eficientes que las máquinas convencionales aunque de momento no se están empleando demasiado en la industria.

Por otra parte, la calefacción mediante microondas parece muy prometedora, pero todavía se encuentra en fase de desarrollo: los ciclos pueden reducirse hasta en un 70%, si bien presenta el inconveniente de que, en principio, sólo se puede emplear con materiales polares y que los moldes deben estar fabricados con materiales transparentes a los microondas (apolares), como el teflón o el vidrio, que son materiales de baja resistencia. Las investigaciones que se están realizando van encaminadas hacia estudios en el tipo de materiales para moldes.

6.2. PRESURIZACIÓN DE MOLDES

La presurización de moldes todavía no ha sido implantada en la industria de forma generalizada, pero es la innovación que por el momento parece más prometedora.

Se trata de introducir una ligera presión por el conducto de venteo del molde. La presión debe introducirse una vez que el polímero se encuentra completamente fundido y mantenerse tan sólo en el intervalo de temperaturas en que se mantiene fundido. Una vez que las burbujas se han producido en el fundido la presión actúa como una fuerza impulsora que provoca que las burbujas de gas se difundan a través del polímero hacia el exterior, como se muestra en la figura 7.20.

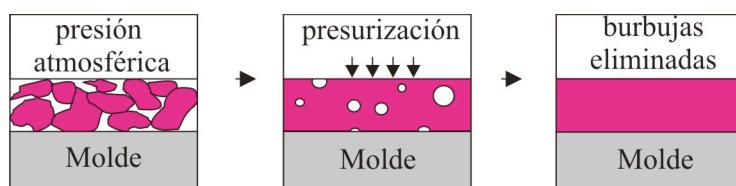


Figura 7.20. Efecto de la introducción de sobrepresión en el interior del molde durante las etapas de densificación y enfriamiento inicial.

Dependiendo de la presión aplicada, el proceso de eliminación de burbujas puede requerir tan sólo unos segundos. En general, las presiones necesarias dependen de la viscosidad del polímero al comienzo de la presurización. Para la mayoría de los materiales una sobrepresión de 0.5 bares es suficiente para eliminar completamente las burbujas, y en muchos casos es suficiente con sólo 0.2 ó 0.3 bares.

La principal ventaja de presurizar los moldes es la mejora en la calidad de los productos debido a la eliminación de las burbujas y los poros, lo que a su vez implica la mejora de propiedades mecánicas. La presurización proporciona además otras mejoras, como son una reducción de ciclos de horno (figura 7.21) puesto que las burbujas se eliminan rápidamente, y una mejora en las deformaciones y alabeos al obtenerse velocidades de enfriamiento más uniformes durante la primera etapa de enfriamiento.

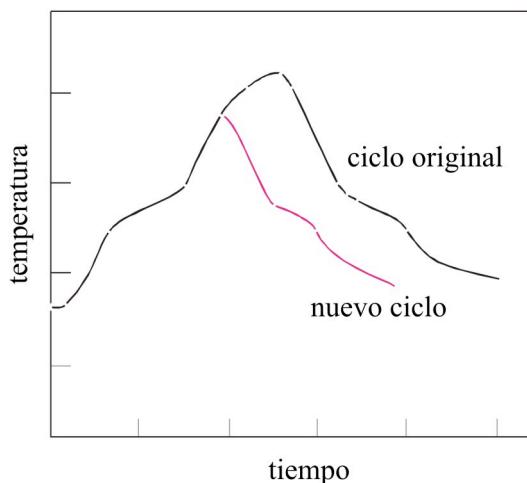


Figura 7.21. Evolución de la temperatura del aire del interior del molde para un ciclo convencional y un ciclo con presurización.

El empleo de presión, sin embargo, tiene ciertas limitaciones y puede resultar extremadamente peligroso si no se toman las precauciones oportunas. Para soportar las importantes fuerzas implicadas en el proceso de presurización se deben emplear moldes suficientemente resistentes (se debe tener en cuenta que aunque las sobrepresiones empleadas son relativamente pequeñas la superficie de los moldes típicos es muy grande, con lo que las fuerzas de apertura desarrolladas también lo serán). No es recomendable emplear presión en moldes no preparados para ello, pues incluso el empleo de presión una moderada puede causar la distorsión y hasta la rotura de los moldes. Los moldes deben estar especialmente fabricados para el empleo de presión, no deben tener superficies planas muy grandes o estas superficies deben tener estructuras de refuerzo, deben tener acabados superficiales muy buenos y líneas de partición muy bien definidas y por último deben incorporar una válvula de seguridad.

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

R. J. Crawford, "Rotational Moulding of Plastics". John Wiley & Sons Inc. New York, 1996.

Glenn L. Bell, "Rotational Molding. Design, Materials, Tooling and Processing" Hanser, Munich, 1998.

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

R. J. Crawford and J. A. Scott, "A Fresh Look at the Manufacturing of Plastic articles by Rotational Moulding". Proc. 2nd IMC Conference Jordanstown, 1985, p. 495-513.

J. L. Throne, "Principles of Rotational Molding", Polym. Eng. Sci., 1972, Vol 12, No. 4, 237-264.

W.V. Titow, "PVC Plastics", Elsevier Sci. Ltd., 1990.

M. Kontopoulou and J. Vlachopoulos, "Melting and Densification of Thermoplastic Powders", Polym. Eng. Sci., Vol. 41, (2), 2001.

R.J. Crawford and P. Nugent, "Computer Simulation of the Rotational Moulding Process for Plastics", Plast. Rubb., Process. Appl., Vol. 11(2), 1989.

A Marcilla, J.C. García, R. Ruiz, S.Sánchez, C. Vargas and M.I. Beltrán, "Rotational Moulding of PVC Plastisols", Intern. Polym. Process., Vol. XX(1), 2005.