

CENTRO DE INVESTIGACION EN QUIMICA APLICADA



**“Factores del proceso que influyen sobre la
contracción, dimensiones y alabeo en piezas
moldeadas por inyección”**

CASO DE ESTUDIO
PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE:

ESPECIALIZACION EN QUIMICA APLICADA
OPCION: PROCESOS DE TRANSFORMACION DE PLASTICOS

PRESENTA:

RODOLFO REVILLA DÍAZ



11 ENF 2006

SALTILLO, COAHUILA

RECIBIDO

SEPTIEMBRE 2004

Febrero 2005

CENTRO DE INVESTIGACION EN QUIMICA APLICADA



HACE CONSTAR QUE EL CASO DE ESTUDIO TITULADO:

**“Factores del proceso que influyen sobre la
contracción, dimensiones y alabeo en piezas
moldeadas por inyección”**

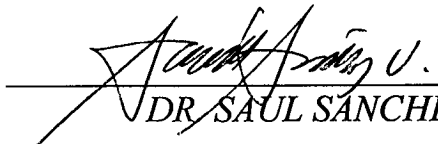
PRESENTADO POR:

RODOLFO REVILLA DÍAZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACION EN QUIMICA APLICADA
OPCION EN PROCESOS DE TRANSFORMACION DE PLASTICOS

HA SIDO DIRIGIDO POR:



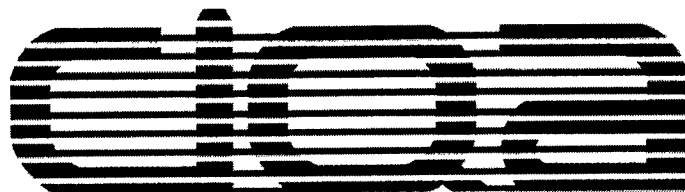
DR. SAUL SANCHEZ

SALTILLO, COAHUILA

~~SEPTIEMBRE 2004~~

Febrero 2005

CENTRO DE INVESTIGACION EN QUIMICA APLICADA



A TRAVES DEL JURADO EXAMINADOR HACE CONSTAR QUE EL
CASO DE ESTUDIO TITULADO:

**“Factores del proceso que influyen sobre la
contracción, dimensiones y alabeo en piezas
moldeadas por inyección”**

QUE PRESENTA:

RODOLFO REVILLA DÍAZ

HA SIDO ACEPTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO DE:

ESPECIALIZACION EN QUIMICA APLICADA
OPCION EN PROCESOS DE TRANSFORMACION DE PLASTICOS

PRESIDENTE

VOCAL

SALTILLO, COAHUILA

SEPTIEMBRE 2004

Febrero 2005

Contenido

1. Introducción	1
1.1. Definición del problema	1
1.1.1. Contracción en el moldeo	1
1.1.2. Contracción post-moldeo	2
1.1.3. Alabeo o distorsión de la pieza	2
2. Objetivos	4
3. Causas debidas al material	5
3.1. Estructura de los materiales poliméricos	5
3.2. Cristalización y paso al estado vítreo	7
3.3. Proceso de moldeo por inyección	8
3.4. Comportamiento de la contracción en materiales amorfos	9
3.5. Comportamiento de la contracción en materiales semicristalinos	11
3.6. Efecto del peso molecular	12
3.7. Contracción en resinas con refuerzos y rellenos	13
3.8. Efecto de pigmentos	14
4. El Factor Molde	15
4.1. Efecto de las entradas de inyección	15
4.1.1. Tipo de compuertas	16
4.1.2. Localización de las entradas de alimentación	18
4.2. El sistema de alimentación	20
4.3. Sistema de enfriamiento del molde	22
4.4. Sistema de venteo	26
4.5. Material del molde	26

5. Variables del proceso	28
5.1. Variables del proceso	28
5.2. Temperatura	28
5.2.1. Temperatura de inyección del fundido	29
5.2.2. Temperatura del molde	29
5.2.4. Temperatura de desmolde	30
5.3. Velocidad o razón de inyección	31
5.4. Presión	31
5.4.1. Presión de inyección	31
5.4.2. Presión de sostenimiento	32
5.5. Tiempo	33
5.5.1. Tiempo de sostenimiento	34
6. El medio ambiente	35
6.1. Efecto de la temperatura ambiental	35
6.2. Efecto de la humedad	36
7. Control de la contracción y el alabeo	37
7.1. Identificación de las causas del problema	38
7.2. Soluciones para una incorrecta contracción o alabeo	39
7.2.1. Contracción excesiva	39
7.2.2. Variación en las dimensiones de la pieza	40
7.2.3. Alabeo	41
8. Estado actual del arte	45
9. Áreas de oportunidad	47
10. Conclusiones y recomendaciones	49
Referencias bibliográficas	51

1. INTRODUCCIÓN

La utilización creciente de materiales poliméricos en la fabricación de piezas que tradicionalmente se hacían de otros materiales, tales como acero, madera, vidrio, papel, etc., se ha dado debido a una serie de ventajas de los materiales plásticos sobre otros materiales, ventajas tales como su facilidad y bajo costo de procesamiento, su baja densidad, sus propiedades eléctricas como aislante, sus propiedades ópticas, su resistencia a sustancias químicas, etc. Sin embargo, debido a su característica intrínseca de estar formados por grandes cadenas moleculares, tienen un comportamiento, durante el proceso de transformación, que da lugar a una serie de problemas que no se presentan en otros materiales.

Para producir una pieza a partir de un material plástico, es necesario calentarlo hasta una temperatura tal que, dependiendo del tipo de proceso, pueda ser deformado o bien fluya dentro de o a través de un molde para darle la forma necesaria, para después enfriarlo a la temperatura ambiente y obtener de esta forma la pieza solidificada. Un problema que se presenta con frecuencia es su falta de estabilidad dimensional debido a la contracción que se produce durante la solidificación de la pieza después de que esta ha sido formada, y si esta contracción no se produce de manera uniforme, entonces se tiene un problema aun mas grave que es la deformación o alabeo de la pieza. En este trabajo se hace un estudio de las causas que producen los problemas de contracción inadecuada y deformación o alabeo en las piezas plásticas obtenidas por el proceso de inyección.

1.1. Definición Del Problema

Una definición de contracción durante el moldeo y contracción post-moldeo se puede dar de la siguiente forma⁽¹⁾

1.1.1. Contracción en el moldeo. Se define como la diferencia en dimensiones lineales entre el molde y la pieza dentro de las siguientes 48 horas después de que la pieza es sacada del molde.

1.1.2. Contracción Post-Moldeo. Se define como la contracción adicional que se produce después del periodo inicial de 48 horas.

1.1.3. Alabeo o Distorsión de la Pieza. Esto es una deformación en la pieza debido a una contracción anisotrópica, es decir, cantidad de contracción diferente en diferentes direcciones, dando por resultado la deformación de la pieza. Los factores que influyen en esta contracción diferencial son:

- **Orientación preferencial.** Durante el llenado del molde, las cadenas moleculares y las fibras de refuerzo tienden a alinearse en dirección del flujo, de tal manera que su comportamiento en relación a la contracción durante la solidificación de la pieza es diferente en la dirección de orientación preferencial que en dirección perpendicular a ella. En polímeros sin fibras de refuerzo, la contracción es mayor en la dirección de la orientación mientras que para materiales reforzados la contracción es restringida en la dirección de orientación de las fibras
- **Cristalinidad no uniforme.** Una rapidez de enfriamiento no uniforme en materiales semicristalinos, trae como consecuencia que las partes de la pieza que se enfrían más lentamente tendrán una mayor tasa de cristalización y, por lo tanto, una mayor contracción. La falta de uniformidad en el enfriamiento puede deberse a una falla, ya sea de diseño o de funcionamiento, en el sistema de enfriamiento del molde o a una diferencia de espesor en las paredes de la pieza.
- **Características del material.** La formulación del material influye en la forma que la pieza contrae al solidificar. La utilización de agentes nucleantes pueden utilizarse para controlar la cristalinidad. La utilización de copolímeros en lugar de homopolímeros es otro factor que influye en el problema de alabeo. El tipo de carga o refuerzos también son factores que influyen en la forma que la pieza contrae.

La tendencia de una pieza a contraerse o deformarse es influenciada por todas las acciones tomadas en el proceso de su fabricación: en la etapa de diseño de la pieza, en la selección del

material, en la etapa del diseño del molde y en el procesado. La forma y tamaño de la pieza, su distribución de espesores, el tipo y la calidad de la materia prima, el material y funcionamiento del molde y los diferentes parámetros de procesado como temperatura, presión, tiempo de enfriamiento y velocidad de inyección son todos factores que influyen de una u otra forma en la manera como se contrae la pieza durante la solidificación.

El medio ambiente y el manejo de la pieza después de su fabricación son también factores que influyen en la contracción y posible deformación post-moldeo. La humedad, la exposición a altas temperaturas y a esfuerzos durante su transportación son factores que deben ser controlados para evitar este tipo de problemas.

2. OBJETIVOS

- Identificar las causas genéricas, debidas al material, al molde o al proceso, que influyen en la contracción, dimensiones y el alabeo de piezas plásticas producidas por inyección de materiales poliméricos
- Organizar estas causas de acuerdo con los factores que las producen: materia prima, molde, proceso y medio ambiente
- Buscar y proponer posibles soluciones a los problemas generados por estas causas, que sirvan de guía, a los técnicos responsables del proceso de manufactura de piezas plásticas por inyección, en la solución de estos problemas

3. CAUSAS DEBIDAS AL MATERIAL

3.1. Estructura de los materiales poliméricos

El proceso de síntesis de un polímero es un proceso químico en el que a partir de moléculas simples, llamadas monómeros, se forman cadenas macromoleculares, ya sea por un proceso de poliadición o por un proceso de policondensación. La diferencia fundamental entre reacciones orgánicas simples y reacciones de polimerización es que se requieren moléculas difuncionales o polifuncionales para formar polímeros.

- **Polimerización por adición o en cadena.** El doble enlace existente entre los átomos que forman la molécula monomérica juega un papel decisivo en este tipo de reacción. Como un ejemplo, considérese la molécula de cloruro de vinilo, donde existe un doble enlace entre los 2 carbonos. Mediante la acción de un radical libre R^* se rompe uno de los enlaces dejando un electrón de valencia disponible en cada uno de los carbonos. Con el electrón de valencia del radical y uno de los carbonos se forma un enlace covalente, dejando el otro electrón de valencia disponible en el otro extremo de la molécula (fig. 3.1.). Este electrón de valencia puede a su vez romper el doble enlace en otra molécula de cloruro de vinilo, repitiéndose el proceso. Este proceso puede continuar una y otra vez, dando por resultado el crecimiento de una macromolécula de PVC en forma de cadena. Otros Polímeros obtenidos por este proceso son: PE, PP, PMMA, etc.

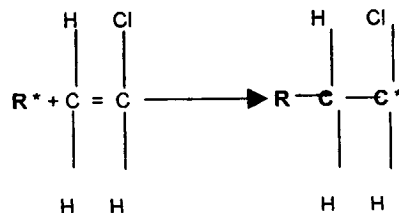


Fig. 3.1. Primera etapa del proceso de polimerización por adición

- **Policondensación.** En este tipo de reacción, una pequeña molécula, generalmente agua, se condensa durante la reacción. La formación de macromoléculas por policondensación requiere moléculas que tengan 2 o mas grupos funcionales, como por ejemplo, grupos

carboxil, carbonil, amino, hidroxil, etc. Con el fin de ejemplificar este proceso, considérese, la obtención de una poliamida (PA66) a partir de la hexametildiamina y del ácido adípico. La figura 3.2. muestra este proceso.

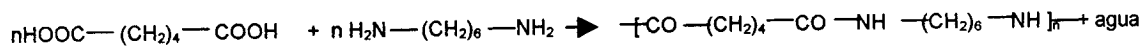


Fig. 3.2. Reacción de policondensación de la PA66

Trotignon, J. P., Verdu, J., Dobraczynski, A. y Piperaud, M.,⁽²⁾ proponen un esquema muy simple para entender la síntesis de un polímetro; puede semejarse a un juego de construcción en el que se dispone de 3 tipos de piezas elementales: monofuncionales, difuncionales, o de funcionalidad mayor que 2. Aquí la funcionalidad se entiende como el número de enlaces que la pieza es capaz de establecer con otra. La asociación de piezas únicamente de tipo monofuncional da lugar solo a pequeñas moléculas no poliméricas (Fig. 3.3(a)). La utilización exclusiva de moléculas difuncionales resulta en la formación de macromoléculas de tipo de cadena lineal, es decir, polímeros lineales cuya terminación es establecida por piezas monofuncionales (Fig. 3.3(b)). La combinación de moléculas monofuncionales, difuncionales y de funcionalidad mayor que 2, da lugar a polímeros lineales ramificados (Fig. 3.3(c)) o a polímeros en forma de una red tridimensional.

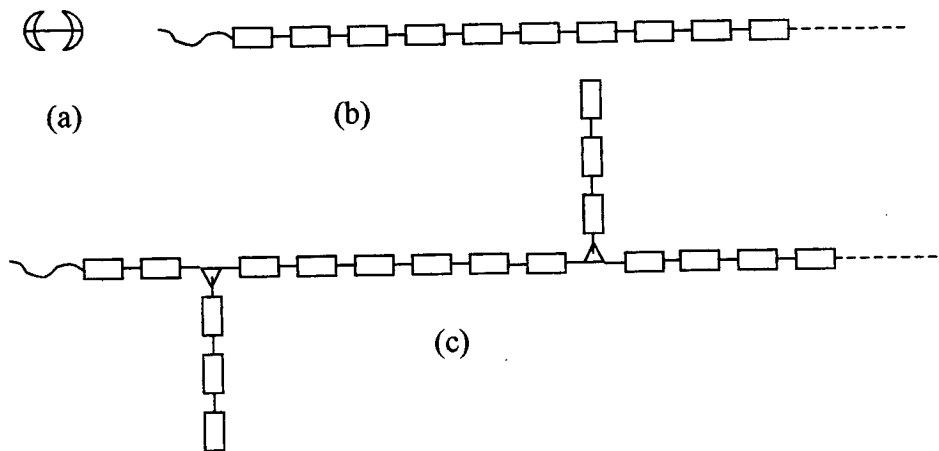


Fig. 3.3. Diferentes arreglos de los grupos funcionales: (a) Pequeña molécula formada por piezas monofuncionales, (b) Polímero lineal formado por piezas difuncionales, (c) Polímero ramificado formado por piezas di y tri funcionales

Cuando la estructura química de todos los monómeros es idéntica se tiene un homopolímero. Cuando la molécula polimérica esta formada con monómeros de diferente estructura química se tiene un copolímero.

Por todo lo anterior, puede decirse que para entender el comportamiento de un material polimérico, debe conocerse su estructura a escala molecular, la estructura química del o de los monómeros o unidades repetitivas, y a escala macromolecular, es decir, la forma y tamaño de las macromoléculas (lineales, ramificadas, homopolímeros, copolímeros, longitud de las cadenas, peso molecular, etc.)

3.2. Cristalización y paso al estado vítreo

Considérese una muestra pequeña de un polímero en estado líquido a una temperatura T_1 . Si se enfría a una razón constante, de tal forma que en todo instante se tenga equilibrio termodinámico, su volumen específico disminuirá de 2 posibles formas típicas según sea el polímero, como puede verse en la gráfica de volumen específico contra temperatura (Fig. 3.4). La curva (a) corresponde a uno que solidifica en estado amorfo, mientras que la (c) a un polímero que cristaliza. El comportamiento aquí mostrado es para una presión constante dada. La variación en la presión también afecta el comportamiento del volumen específico y por lo tanto de la contracción, como se verá más adelante.

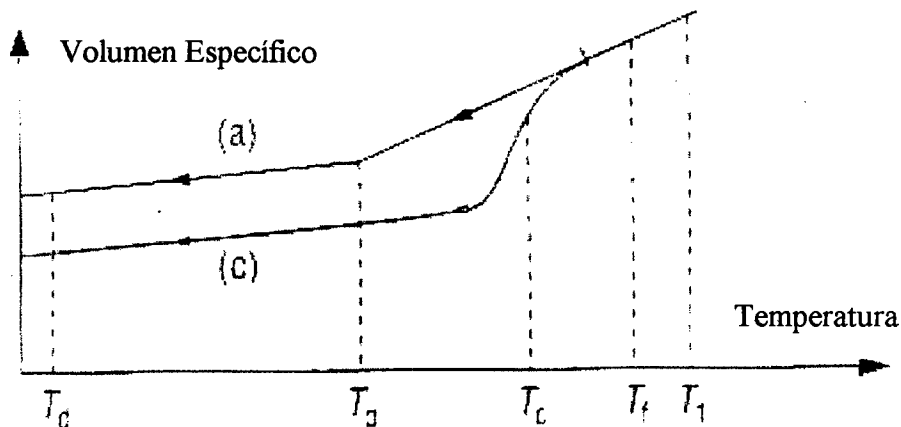


Fig. 3.4. Variación del volumen específico para un polímero: (a) Amorfo y (c) Cristalino (Ref. 2)

En el caso (a), a la temperatura T_1 el polímero es un fluido y, conforme la temperatura disminuye, su viscosidad aumenta de tal forma que deja de ser un fluido, pero todavía es posible deformarlo fácilmente. Al alcanzar la temperatura T_g su viscosidad aumenta drásticamente pasando a un estado sólido vítreo amorfo, disminuyendo ligeramente la razón de variación, con respecto a la temperatura, del volumen específico.

En el caso (c) el polímero permanece temporalmente en estado fundido por debajo de la temperatura de fusión T_F pero finalmente cristaliza alrededor de una temperatura de cristalización T_C , donde se observa una rápida disminución de su volumen específico debida a la formación de una estructura cristalina compacta.

Si se varía la velocidad de enfriamiento, el comportamiento puede cambiar según sea el polímero. Para un polímero del tipo (a), sin importar la velocidad de enfriamiento, el polímero vitrificará en estado amorfo, como es el caso del PMMA y del PS atácticos. Para algunos del tipo (c), a medida que se aumenta la velocidad de enfriamiento, el polímero solo cristalizará parcialmente o, si la velocidad de enfriamiento es suficientemente grande, el polímero pasará al estado vítreo en estado amorfo como es el caso del PET y el PP.

Por lo anterior, se puede decir que un polímero solidifica en estado amorfo, ya sea porque su estructura no le permite cristalizar o bien porque su proceso de cristalización es muy lento comparado con la velocidad de enfriamiento. Esto es de gran importancia en el caso de piezas moldeadas por inyección, donde la velocidad de enfriamiento puede variar de un punto a otro de la pieza dando comportamientos diferentes con respecto a la cristalización y a la forma de contraer.

3.3. Proceso de moldeo por inyección.

Para moldear una pieza por inyección, el material tiene primero que calentarse hasta llevarlo a una temperatura en la que pueda fluir, para luego, mediante la aplicación de una presión, inyectarlo dentro del molde. Si el material es amorfo, al ir aumentando su temperatura, las cadenas moleculares van adquiriendo mayor movilidad, dando por resultado una disminución

de su viscosidad hasta que esta es lo suficientemente baja para que el material pueda fluir. En el caso de un material cristalino, el material permanece en estado sólido hasta que se alcanza la temperatura de fusión, en la cuál desaparece el orden cristalino en las cadenas poliméricas, el material funde y puede empezar a fluir. En cualquiera de los dos casos, al llegar a la etapa en que el material puede fluir, las cadenas poliméricas se encuentran en un estado desordenado, es decir, en estado amorfo. Al ser inyectado en el molde, bajo la acción de una diferencia de presión, las cadenas moleculares tienden a orientarse en dirección del flujo, de tal forma que al empezar a enfriarse y al cesar la presión después de que el molde es llenado y el material compactado dentro del molde, las cadenas poliméricas tienden a relajarse y volver a su estado mas estable, ya sea amorfo o cristalino, dando lugar a contracción que será mayor en el material cristalino, ya que al formarse los cristales las cadenas poliméricas quedan mejor empacadas, ocupando así menor volumen. Por ejemplo, bajo condiciones similares de enfriamiento, Whelan⁽³⁾ reporta una contracción del PP (semicristalino) hasta 5 veces mayor que la del PMMA (amorfo).

Dependiendo de la velocidad de enfriamiento, las moléculas pueden perder toda o parte de la orientación que adquirieron durante el proceso de inyección. Si el enfriamiento es muy rápido, la solidificación puede producirse antes que las moléculas terminen de relajarse, dando por resultado esfuerzos congelados.

Algunos autores como, como McIlvaine⁽⁴⁾, han preparado cartas que muestran la cantidad de contracción esperada de la pieza, para diferentes resinas, en función de las dimensiones y geometría de la pieza. Otros, como Johannaber⁽⁵⁾, dan tablas donde se muestra el porcentaje de contracción para diferentes resinas y condiciones de proceso dadas. Estas cartas o tablas pueden ser usadas, en primera aproximación para predecir el comportamiento de la contracción.

3.4. Comportamiento de la contracción en materiales amorfos

En el estado amorfo, las macromoléculas de un material polimérico están replegadas sobre si mismas adoptando la forma de un ovillo estadístico, enredadas con las macromoléculas

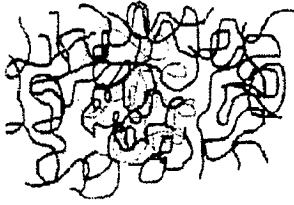


Fig. 3.5 Estructura amorfa
(Ref. 2)

vecinas, de tal forma que no se distingue ningún orden a gran escala (Fig. 3.5). Cuando un material amorfo es calentado más allá de su temperatura de transición vítrea, T_g , las moléculas adquieren mayor movilidad, la resina empieza a ablandar y al mismo tiempo a ocupar un mayor volumen. Al seguir aumentando su temperatura la movilidad aumenta y así también el volumen ocupado, hasta llegar a una temperatura en que el material puede fluir bajo la acción de la presión de inyección. En consecuencia, entre mas alta sea la temperatura de inyección, mas tiempo de enfriamiento para la solidificación y, por lo tanto, mayor oportunidad de que las cadenas poliméricas se relajen y pierdan su orientación, por lo que es de esperar una contracción mayor y mas uniforme. Sin embargo, en la práctica, deben considerarse también los aspectos económicos, ya que un mayor tiempo de enfriamiento implica un ciclo mas largo y una menor productividad.

Los materiales amorfos tienen, por lo general, una rápida razón de relajación por lo que es de esperarse que en una pieza inyectada con material amorfo, la contracción sea isotrópica, es decir, misma contracción en dirección del flujo que en dirección perpendicular al flujo, ya que en el momento que las cadenas han relajado, la temperatura todavía es suficientemente alta para que las moléculas se acomoden dentro del molde llenándolo de manera homogénea.

Debido a que los materiales plásticos no conducen eficientemente el calor, el espesor de la pieza es un factor que afecta la forma como se produce la contracción durante el enfriamiento. Entre mas gruesa es la pieza, el tiempo de enfriamiento es mayor y así también la oportunidad de contracción. Si la pieza es de un material amorfo, debido al grosor de la misma, se produce un diferencial de la velocidad de enfriamiento entre la superficie de la pieza, que enfría rápidamente al contacto con el molde y el corazón de la pieza que tendrá un enfriamiento mas lento. Esto trae como consecuencia que las moléculas en el corazón de la pieza queden más relajadas que las que están más cercanas a la pared del molde, dando lugar a la aparición de esfuerzos residuales y la posibilidad de la formación de un hueco en el centro de la pieza.

3.5. Comportamiento de la contracción en materiales semicristalinos

El estado cristalino es caracterizado por un orden. Las cadenas poliméricas adoptan una conformación regular en zig-zag o en hélice, empaquetándose en forma ordenada y compacta. Se puede definir una celda cristalina que se repite en el espacio en forma periódica, produciéndose diferentes morfologías, siendo la más común la lamela (Fig. 3.6), y si las condiciones son propicias se forman superestructuras cristalinas llamadas esferulitas

En la práctica los materiales cristalinos no lo son totalmente, sino que solo algunas porciones son cristalinas y lo demás amorfo, es decir, que en realidad los materiales son semicristalinos. Son varias las razones por las que no cristalizan totalmente:

- La presencia de irregularidades estructurales como ramificaciones impiden la cristalización
- La copolimerización introduce desorden en las cadenas poliméricas y también puede impedir la cristalización
- El enredamiento entre las cadenas en la fase amorfa se opone a la cristalización. Este factor de limitación de la cristalización es el más común, por lo que el peso molecular alto es un parámetro que afecta la cristalinidad, a mayor peso molecular menor tasa de cristalinidad

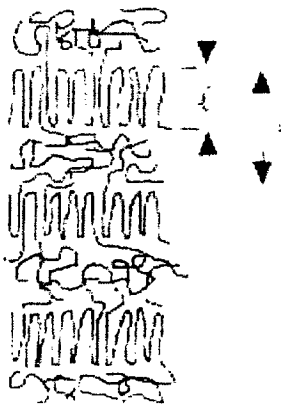


Fig. 3.6. Estructura semicristalina, e es el espesor de la lamela (Ref. 2)

Un material semicristalino consta de zonas donde las cadenas poliméricas se ordenan formando cristales y otras zonas donde las cadenas poliméricas no tienen un orden (Fig. 3.6). Cuando un material semicristalino es calentado, al llegar a la temperatura de transición vítrea, las zonas amorfas empiezan a adquirir mayor movilidad hasta que, al seguir calentando, eventualmente son capaces de fluir. Las zonas cristalinas permanecen en estado sólido hasta que se alcanza la temperatura de fusión y el material funde desapareciendo el orden cristalino. En esta etapa, todas las

cadenas poliméricas se encuentran en un estado desordenado, por lo que al fluir para ser inyectadas en el molde se orientan en dirección del flujo. Dentro del molde el material empieza a enfriar y cuando la temperatura alcanza un punto por abajo de la temperatura de fusión, se empiezan a formar centros de nucleación, es decir, puntos dentro del fundido donde empieza a producirse la cristalización. Una vez iniciada la cristalización, ésta continua creciendo alrededor de los centros de nucleación y el proceso continua hasta que la temperatura es lo suficientemente baja para impedir que las cadenas poliméricas se sigan empaquetando en forma cristalina, de tal forma que solo ciertas regiones dentro del material quedan con estructura cristalina mientras que otras solidifican en estado amorfo.

El porcentaje de material cristalizado depende de la velocidad de cristalización del material y de la velocidad de enfriamiento. A mayor velocidad de cristalización, mayor porcentaje de volumen cristalizado. A mayor velocidad de enfriamiento, menor porcentaje de cristalinidad. Como el empaquetamiento es mayor en las zonas cristalinas que en las amorfas, la contracción total de la pieza depende del porcentaje de cristalinidad, es decir, a mayor tasa de cristalinidad mayor es el porcentaje de contracción, pero menor posibilidad de alabeo debido a una mayor rigidez. Por otra parte, cuando la cristalización no se produce de manera homogénea debido a la orientación de las cadenas la contracción será anisotrópica, dando lugar a posible alabeo.

3.6. Efecto del peso molecular.

Un alto peso molecular implica una mayor longitud de las cadenas poliméricas y la posibilidad de mayor enmarañamiento entre ellas y, como ya se ha dicho, una menor cristalinidad, y por lo tanto, menor contracción. Otra forma en que el peso molecular puede influenciar el grado de contracción, es en piezas donde el recorrido del fundido es largo para llenar el molde. Entre mas alto sea el peso molecular, mayor será la viscosidad y mayor la caída de presión a lo largo del recorrido. Esta caída de presión trae como consecuencia un empaquetamiento insuficiente de la pieza en las regiones de baja presión y un mayor porcentaje de contracción.

3.7. Contracción en resinas con refuerzos y rellenos

El uso de rellenos y reforzantes en forma de polvos, hojuelas o fibras, incorporados a la resina plástica, es una práctica común para modificar de manera selectiva algunas propiedades mecánicas de las piezas moldeadas por inyección. Muchos de estos rellenos y refuerzos son inorgánicos y tienen un bajo coeficiente de expansión térmica, por lo que cuando son inyectados al molde y luego enfriados, tienen una contracción significativamente mas baja que la matriz polimérica donde están inmersos, dando por resultado una disminución en la contracción total de la pieza. Esta reducción en la contracción es proporcional contenido del relleno en la resina.

Los polvos y en menor grado las hojuelas tienen una distribución geométrica mas o menos uniforme, por lo que la reducción en la contracción es mas o menos la misma en todas direcciones, por lo que no se tiene problema de contracción anisotrópica

En el caso de reforzamiento con fibras, la contracción, contrario a lo que sucede en una resina

no reforzada, es restringida en dirección de la orientación de las fibras, es decir, en la dirección del flujo. Esto trae como consecuencia una contracción diferencial y posible alabeo de la pieza. El monto de esta contracción diferencial depende del porcentaje de fibra reforzante en la resina. En la figura Fig. 3.7 se puede notar el efecto de la fibra reforzante en el comportamiento de la contracción. Para ningún o poco reforzante, la contracción es mayor en dirección del flujo (dirección longitudinal) que en

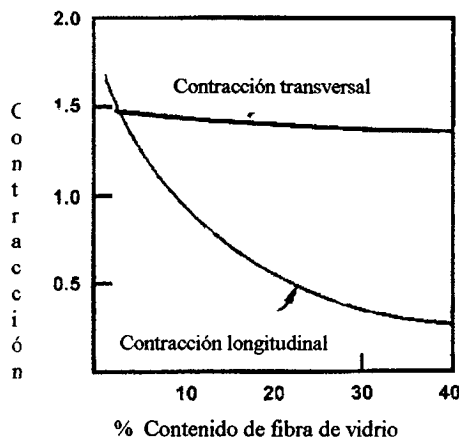


Fig. 3.7. Efecto de las fibras reforzantes (Ref. 6)

dirección transversal del flujo. Este comportamiento se revierte cuando el porcentaje de fibra reforzante aumenta.

3.8. Efecto de los Pigmentos

Una medida de la anisotropía, en la contracción de una pieza plástica moldeada por inyección, es la contracción en dirección paralela menos la contracción en dirección perpendicular al flujo del plástico, la cuál, para resinas sin carga, es normalmente positiva. Algunos pigmentos, principalmente orgánicos y dependiendo de su tamaño, pueden actuar como agentes de nucleación promoviendo la cristalización en una etapa más temprana del proceso de solidificación y una mayor rapidez de cristalización, resultando un mayor porcentaje de cristalinidad y, por lo tanto, mayor contracción. En materiales cristalinos esto se refleja en una mayor contracción en dirección transversal del flujo que puede llegar a cambiar el signo de la anisotropía en la contracción.

4. EL FACTOR MOLDE

Como se ha dicho en párrafos anteriores, la contracción y la posible deformación de la pieza dependen de la forma como fluyan y se orienten las moléculas poliméricas durante el llenado del molde y de la forma como relajen o cristalicen, según sea el caso, durante el enfriamiento y solidificación de la pieza. Factores de diseño del molde pueden influenciar este comportamiento de los polímeros durante el proceso de moldeo de una pieza. El diseño del sistema de alimentación, vena, correderas y puntos de inyección son factores que influyen en la forma como el material fluye y se orienta durante el proceso de llenado del molde y también en la forma como el material es compactado dentro del molde. Las dimensiones y forma de la cavidad, el material con que se fabrica el molde y el sistema de enfriamiento son factores que influyen en como la pieza se enfría y solidifica.

4.1. Efecto de las entradas de inyección.

La compuerta o entrada de inyección, es decir, el orificio a través del cual pasa el plástico fundido del canal de alimentación o corredera al molde, es uno de los elementos más importantes del diseño del molde. Las compuertas de inyección, por lo general, son de un tamaño pequeño (un diámetro de unos pocos milímetros en el caso de entradas circulares) de tal forma que al pasar el material a través de ellos, aumenta la velocidad de corte y disminuye la viscosidad, aumentando la orientación de las moléculas y generándose algo de calor en esa zona. Por otra parte, debido a su poco espesor, la pieza, una vez solidificada, puede desprenderse con facilidad de los canales de alimentación. Cuando el plástico empieza a fluir a través de la compuerta de inyección, debe continuar hasta llenar debidamente el molde, de otra forma, si el flujo de plástico cesa antes de que esto suceda, debido a su pequeño tamaño, la compuerta solidificará y ya no dejara pasar mas material dando lugar a un llenado incompleto o a rechupes por un compactado insuficiente. El tipo de compuerta y sobre todo su localización son factores que influyen en la forma como la pieza contrae.

4.1.1. Tipos de compuertas.

El tipo de compuerta tiene un efecto significativo sobre la contracción y la posible de formación de la pieza. Existen diferentes tipos de puntos de inyección y cada uno de ellos tiene sus ventajas y desventajas. La selección del tipo de punto de inyección dependerá de la geometría y tamaño de la pieza, así como del material plástico utilizado.

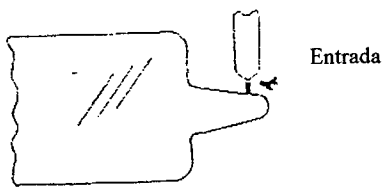


Fig. 4.1. Entrada Capilar

- **Entradas capilar, de túnel o submarina.**

Este tipo de entrada o compuerta de inyección (Fig. 4.1) tienen la particularidad de que el fundido pasa de los canales de alimentación a la pieza por un orificio con un diámetro no mayor a 2.5 mm. Uno de los problemas que se presentan con este tipo de entradas es la tendencia a producirse el fenómeno de "jetting". Este problema puede solucionarse colocando la entrada de tal forma que el flujo de plástico fundido impacte, casi inmediatamente de entrar a la cavidad, con un obstáculo que impida la formación del "jetting". Otro inconveniente de este tipo de entrada es que, debido a su espesor, solidifique antes de que se produzca un empaquetamiento suficiente, dando lugar a una contracción mayor, sobre todo en las partes de la pieza mas alejadas de la compuerta de inyección. Su ventaja es que casi no deja marca en la pieza y ésta puede desprenderse fácilmente.

- **Entrada lateral.** En este tipo de entrada la alimentación es por un costado de la pieza y el desprendimiento de la misma debe hacerse manualmente. El ancho de este tipo de



Fig. 4.2. Entrada lateral

alimentación es usualmente igual al del canal de alimentación o corredera (Fig. 4.2). Este tipo de entrada se utiliza para plásticos muy sensibles al esfuerzo cortante o en materiales semicristalinos para minimizar la contracción. La compuerta lateral tiene menos tendencia a producir el "jetting" que la capilar.

- **Entrada de abanico.** Este tipo de compuerta (Fig. 4.3) controla de una mejor

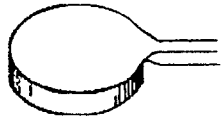


Fig. 4.3. Entrada de Abanico

manera el flujo de material dentro de la cavidad, produciendo una orientación consistente de fibras y moléculas y reduciendo la posibilidad de jetting. Este

tipo de entrada ofrece poca resistencia al flujo del fundido por lo que no es muy adecuado para balancear el flujo en moldes multicavidades

- **Entradas de diafragma, membrana y anillo.** Una característica común de estas entradas (Fig. 4.4) es

que son a todo lo ancho de la pieza o de la circunferencia completa de la pieza.

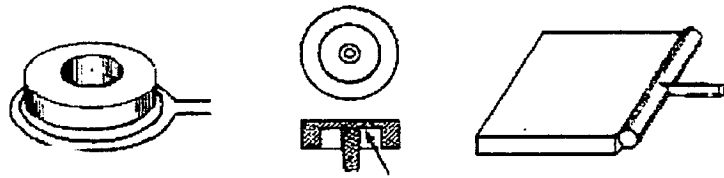


Fig. 4.4. Entradas de anillo, diafragma y membrana

Debido a esta

característica, tienen buen control del flujo y orientación de las moléculas y fibras.

- **Entrada de lengüeta.** Este tipo de entrada (Fig. 4.5) se utiliza cuando se desea

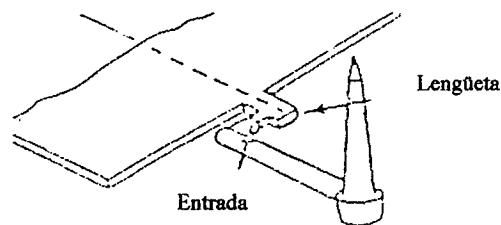


Fig. 4.5. Entrada de Lengüeta

evitar en la pieza los altos esfuerzos generados en la entrada. La entrada de área reducida produce un aumento de temperatura por fricción, de tal manera que en la pequeña cámara formada por la lengüeta, el flujo de

material caliente choque contra sus paredes, evitando el “jetting” y produciendo un flujo uniforme y homogéneo hacia la cavidad. La pequeña entrada hacia la lengüeta produce una restricción al flujo que permite balancear el llenado en moldes de cavidades múltiples.

4.1.2. Localización de la entrada de alimentación

La posición de la entrada o entradas de alimentación afecta en alto grado la forma del flujo dentro de la cavidad. Afecta la orientación de moléculas y fibras y por lo tanto la forma en que contrae, la posible deformación y la estabilidad dimensional de la pieza. Es un hecho que, en materiales no reforzados con fibras, la contracción es mayor en dirección del flujo que en dirección transversal del flujo como efecto de la orientación de las moléculas. Este comportamiento es mas acentuado en materiales semicristalinos que en amorfos. Por otra parte, si el material plástico es reforzado con fibras el comportamiento se revierte, es decir, la contracción es mayor en dirección transversal al flujo. En cualquier caso, la localización del punto de inyección debe ser enfocada a minimizar la orientación y a buscar que esta orientación sea lo mas uniforme posible, para evitar contracción diferencial y deformación o esfuerzos congelados.

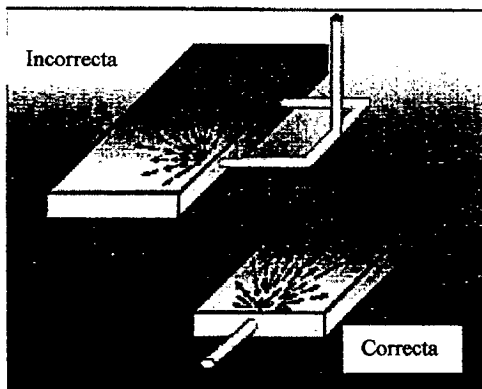


Fig.4.6. Localización de alimentación para una geometría rectangular (Ref. 1)

En el caso de piezas con geometría rectangular, lo recomendable es que la alimentación se coloque en forma lateral en el lado con menor longitud (Fig. 4.6). En este caso, la orientación será esencialmente a lo largo del eje longitudinal y la contracción deberá ser razonablemente uniforme a través de la pieza, produciéndose mínima distorsión.

Si la pieza es alimentada por el lado de mayor longitud, el flujo en el lado de la alimentación será aproximadamente paralelo al eje longitudinal, mientras que en lado opuesto el flujo llegará casi perpendicular. El resultado de esto será una contracción diferencial entre un lado y otro de la pieza. Si es material no reforzado con fibras, habrá una contracción longitudinal mayor en el lado de la alimentación. Si el material es reforzado con fibras, la tendencia se revertirá, es decir, la contracción longitudinal mayor será en el lado opuesto al de la alimentación. En cualquier caso, el resultado final será una distorsión o alabeo de la pieza, salvo que, debido a la cristalización o a su geometría, la pieza sea suficientemente rígida para soportar la distorsión, en cuyo caso se tendrán esfuerzos congelados.

Una alimentación centrada en la superficie mayor de la pieza se traducirá en una fuerte orientación a lo largo de las diagonales de la pieza. Si el material esta reforzado con fibras, se tendrá una contracción baja en dirección diagonal. Los costados de mayor longitud tienen una dirección casi paralela al flujo, por lo que se tendrá una contracción moderada. En los costados de menor longitud la dirección es casi transversal al flujo, por lo que la contracción será alta en esta dirección. El resultado de todo esto es que la pieza queda sujeta a una fuerza de compresión a lo largo de las diagonales la cual es aliviada por una torsión de la pieza (Fig. 4.7)

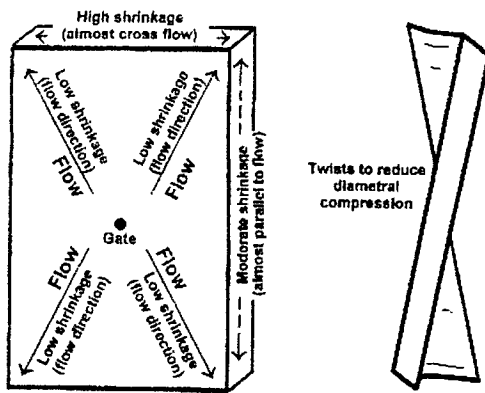


Fig. 4.7. Contracción diferencial en una pieza plana con alimentación central (Ref. 1)

Cuando en la cavidad del molde existe un obstáculo que restringe el flujo de material, puede producirse una distribución no simétrica en la orientación de las cadenas moleculares o las fibras si este obstáculo esta fuera del eje de simetría de la pieza. Un ejemplo de esto, es el caso de una pieza rectangular con un orificio en uno de los lados de la pieza (Fig. 4.8). Cuando el material fluye dentro de este molde, la orientación será paralela a lo largo del lado opuesto al orificio, pero en el lado del orificio, el flujo será disturbado produciéndose una orientación azarosa. El resultado de esto es que la contracción será diferente en un lado y en otro de la pieza produciéndose una deformación. Una posible solución a este problema es poner un perno en el molde, simétrico al orificio, para compensar el efecto del mismo.

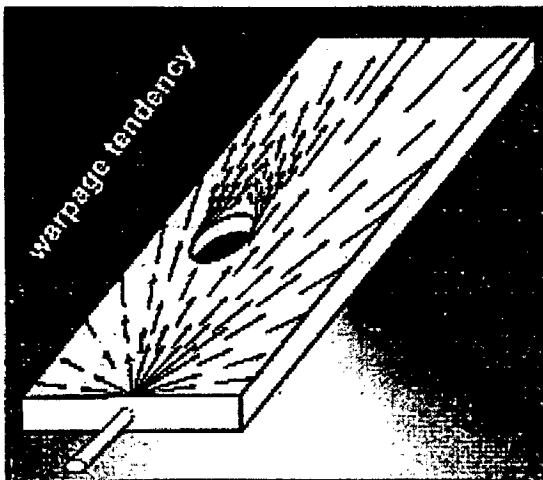


Fig. 4.8. Efecto, sobre la orientación, de un obstáculo en la dirección del flujo (Ref. 1)

Para decidir la localización de la o las entradas de alimentación no únicamente debe tomarse en cuenta el aspecto de la contracción y deformación, sino que deben tomarse en cuenta otros aspectos como la apariencia de la pieza, sus propiedades mecánicas, etc.

4.2. El sistema de alimentación

En moldes de cavidades múltiples, el sistema de alimentación debe ser bien balanceado y las entradas de alimentación iguales con el fin de obtener un llenado uniforme de las diferentes cavidades y con ello asegurar homogeneidad en las dimensiones en las piezas. Un primer requerimiento para que esto suceda es que el recorrido del fundido sea el mismo para todas las cavidades. En este caso se dice que el balanceo es en forma natural. En la figura 4.9 se muestran ejemplos de sistemas de alimentación balanceados y no balanceados. En el caso de moldes multicavidades, con cavidades diferentes, el balanceo no puede hacerse de forma

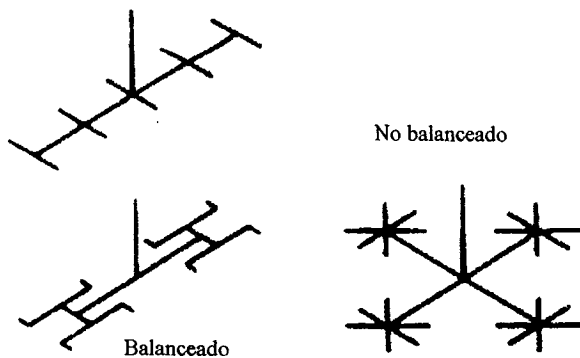


Fig. 4.9. Sistemas de alimentación multicavidades (Ref. 1)

natural. En este caso es necesario hacer un cálculo del flujo en cada una de las cavidades para que el llenado sea uniforme, y con ello calcular el diámetro necesario en cada uno de los canales de alimentación

A pesar de un sistema de alimentación bien balanceado en moldes multicavidad, es difícil obtener un llenado y contracción totalmente uniforme. Desafortunadamente existe un

fenómeno que da por resultado un flujo con una diferencia de temperatura entre las cavidades internas y externas del sistema de alimentación.

Un estudio de diseño de correderas y trayectorias de llenado en moldes de cavidades múltiples⁽⁷⁾, muestra que el fundido más caliente dentro de la corredera permanece pegado a

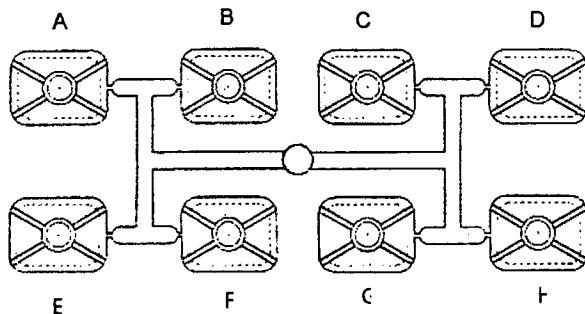


Fig. 4.10. Molde multicavidad (Ref. 7)

las paredes de los canales más cercanas a la vena de alimentación, dando por resultado que el plástico fluya más fácilmente en las cavidades internas que en las externas, es decir, las cavidades B, C, F y G, mostradas en la figura 4.10, llenarán más fácilmente que las otras.

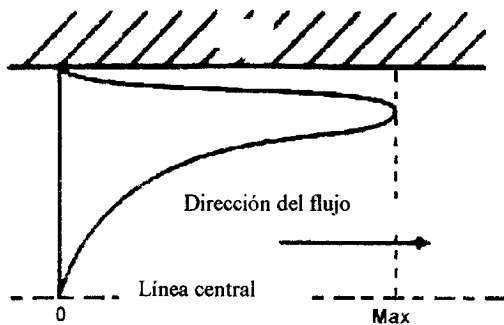


Fig. 4.11. Perfil de esfuerzo cortante en un canal circular (Ref. 8)

Debido a la alta viscosidad del plástico fundido dentro del canal, el flujo es casi laminar por lo que no existe un mezclado turbulento de la región mas caliente con la mas fría, de tal forma que cuando el flujo llega a un canal secundario se divide en dos ramales y la región mas caliente, siguiendo la trayectoria mas corta, continua pegado a la pared del canal secundario mas cercana a la vena de alimentación, de tal forma que el fundido que llega a las cavidades internas es mas caliente que el que llega a las cavidades externas (Fig. 4.12).

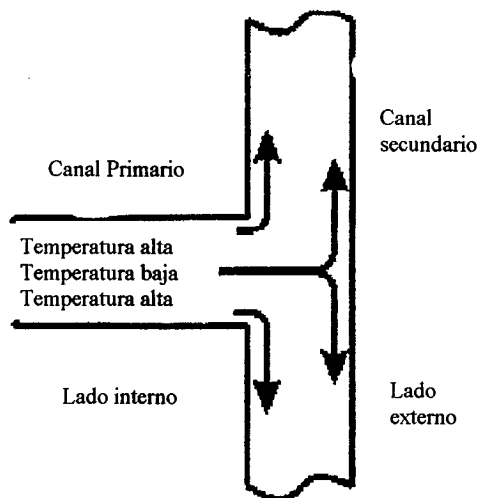


Fig. 4.12. Distribución del fundido en la bifurcación del canal primario con el secundario (Ref. 8)

Si no existe un medio de redistribución del fundido dentro de los canales, al llegar a las cavidades, llegará con un gradiente térmico, mas caliente en la parte pegada a la pared mas cercana a la vena de alimentación y disminuyendo hacia la otra pared. El resultado es, que una vez llena y

Recientemente, John P. Beaumont⁽⁸⁾ de la Universidad Penn State, ha descubierto la causa de este comportamiento. Las causas raíz de este problema son, que el fundido no se desliza por las paredes de los canales ni mantiene un perfil parabólico de velocidad, sino que una película, en las orillas del frente de flujo, se adhieren a las paredes del canal, mientras que la parte central se mueva a una velocidad casi constante. Esto trae como consecuencia la formación de un perfil de esfuerzo cortante con un valor máximo cerca de las paredes del canal y un mínimo en el centro del canal (Fig. 4.11). Los altos esfuerzos cortantes producen un alineamiento de las moléculas poliméricas y una reducción de la viscosidad del plástico, además de un aumento en su temperatura que a su vez disminuye aun más la viscosidad. El resultado de esto es la formación de una capa de forma cilíndrica con mayor temperatura y menor viscosidad, rodeando a la región central del canal.

que cuando el flujo llega a un canal secundario se divide en dos ramales y la región mas caliente, siguiendo la trayectoria mas corta, continua pegado a la pared del canal secundario mas cercana a la vena de alimentación, de tal forma que el fundido que llega a las cavidades internas es mas caliente que el que llega a las cavidades externas (Fig. 4.12).

Si no existe un medio de redistribución del fundido dentro de los canales, al llegar a las cavidades, llegará con un gradiente térmico, mas caliente en la parte pegada a la pared mas cercana a la vena de alimentación y disminuyendo hacia la otra pared. El resultado es, que una vez llena y

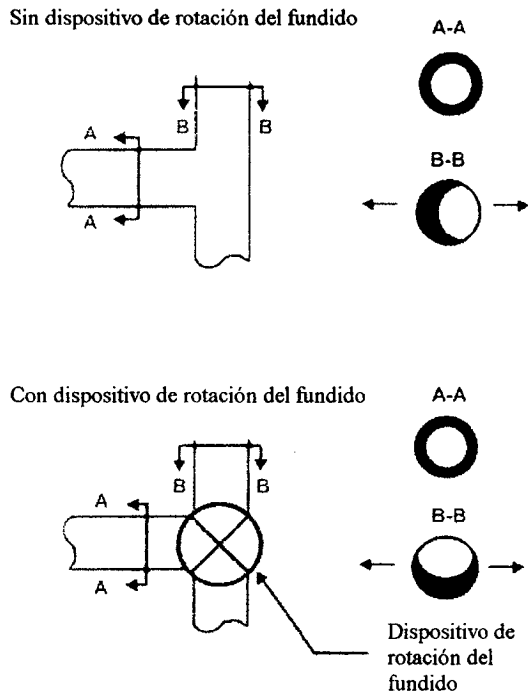


Fig. 4.13. Efecto del dispositivo de Beaumont (Ref. 9)

empacada la cavidad, el enfriamiento no será uniforme, causando diferencias entre una cavidad y otra: En las dimensiones, en el peso y en la contracción.

Una solución a este problema ha sido propuesta y patentada por Beaumont.⁽⁹⁾ Consiste en un dispositivo que hace girar el perfil de temperatura dentro del canal secundario, en un ángulo de 90° , de tal forma que la distribución de temperatura será simétrica con respecto al lado interno y externo del canal secundario. En la figura 4.13 puede verse, en la parte superior, los perfiles de temperatura en los canales primario y secundario. Nótese que el perfil en el canal secundario es más caliente (más oscuro) hacia el lado interno del sistema. En la parte inferior se muestra la situación con la utilización del dispositivo de rotación del fundido. Aquí, el perfil de temperatura en el canal secundario es simétrico en la dirección interno-externo, con lo que el fundido se reparte en forma simétrica, en cuanto a temperatura, en las cavidades internas y externas.

4.3. Sistema de enfriamiento del molde

Aparte de dar la forma y contener la pieza moldeada, otra función del molde es enfriar la pieza moldeada para su solidificación, por lo que el molde debe funcionar como un intercambiador de calor. Algunos aspectos importantes relacionados con el tipo de material y geometría de la pieza deben ser tomados en cuenta al diseñar el sistema de enfriamiento del molde.

Los materiales semicristalinos requieren más enfriamiento que los amorfos debido a que el proceso de cristalización es un proceso exotérmico, es decir, el sistema de enfriamiento debe disipar el calor liberado durante este proceso. El espesor de las paredes de la pieza es otro

factor a tomar en cuenta al diseñar el sistema de enfriamiento, pues debido a una mayor masa a enfriar y a la mala conductividad de los polímeros, las partes más gruesas de la pieza requieren de mayor enfriamiento. La geometría de la pieza también afecta el enfriamiento de la pieza, pues en las esquinas internas de la pieza así como en los corazones del molde se tiene una mayor concentración del flujo de calor por lo que requieren de una mayor razón de enfriamiento.

Los canales de enfriamiento deben ser diseñados de tal forma que el flujo de refrigerante dentro de ellos sea un flujo turbulento, ya que el flujo turbulento promueve un mezclado continuo del refrigerante que mantiene una temperatura uniforme desde la superficie al centro del canal y una más efectiva disipación del calor. Un flujo laminar promueve la formación de una capa de fluido más caliente cercana a la superficie del canal que actúa como un aislante del calor y hace que el intercambio de calor del molde al fluido refrigerante sea menos efectivo. Las características geométricas del canal junto con la velocidad y viscosidad cinemática del refrigerante determinan el número de Reynolds que se recomienda sea mayor de 5000 para asegurar un flujo turbulento. El número de Reynolds es dado por la siguiente ecuación:

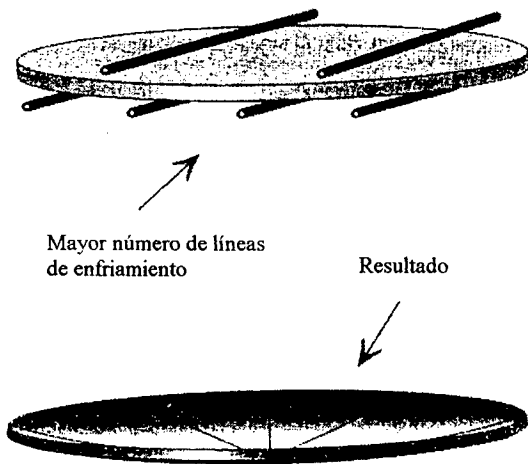
$$Re = \frac{vd}{K}$$

donde v es la velocidad del fluido, d el diámetro del canal y K la viscosidad cinemática del fluido.

Algunas ocasiones es necesario utilizar anticongelante en el refrigerante con el fin de disminuir su punto de congelación y así poder disminuir más su temperatura sin que llegue a solidificar y obstruir los canales de enfriamiento del molde. El anticongelante puede actuar como un lubricante dentro del fluido e inhibir el flujo turbulento, estableciéndose un flujo laminar que, como ya se dijo, disminuye la eficiencia en la disipación del calor. En estos casos, cuando al disminuir la temperatura del refrigerante más allá de su punto natural de

congelación utilizando anticongelante, no se detecta una mejora en la razón de enfriamiento, es necesario aumentar la velocidad del refrigerante con el fin de restablecer el flujo turbulento.

La meta de un buen diseño del sistema de enfriamiento es obtener un enfriamiento uniforme



en toda la pieza, pues en caso contrario, las partes de la pieza que enfrían más lentamente, tardarán más tiempo en solidificar, dando lugar a una contracción mayor y por lo tanto a posible deformación. Por ejemplo, en una pieza con geometría plana, si una de las mitades del molde enfría más lentamente que la otra, se producirá una mayor contracción en esta parte dando lugar a alabeo, como se muestra en la figura 4.14.

Fig. 4.14. Alabeo por enfriamiento diferencial (Ref. 1)

Una regla general para evitar la deformación térmica, como en el ejemplo anterior, es que la razón de extracción de calor sea igual en las dos mitades del molde. Esto se logra si se cumple que el gasto de refrigerante multiplicado por su aumento de temperatura en la mitad macho del molde sea igual al gasto de refrigerante multiplicado por el aumento de su temperatura en la mitad hembra del molde.

Si esto no se cumple, deberán hacerse algunas modificaciones en la mitad del molde con más baja razón de extracción de calor. Algunas de estas modificaciones son:

- Disminuir la temperatura del refrigerante
- Aumentar el gasto de refrigerante
- Aumentar el diámetro de los canales de enfriamiento
- Aumentar el número de canales de enfriamiento
- Colocar las líneas de enfriamiento más cerca de la superficie del molde

- Colocar líneas de enfriamiento tipo fuente o bien los llamados “heat pipes” en partes con poca área de disipación de calor, como esquinas internas de la pieza, corazones o pernos (Fig. 4.15),

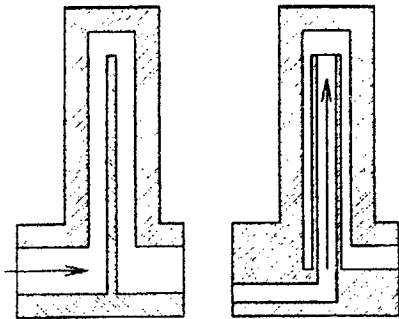


Fig. 4.15. Sistemas de enfriamiento para esquinas y corazones (Ref. 1)

El tamaño, colocación y número de las líneas de enfriamiento del molde es muy importantes en el diseño del sistema de enfriamiento del molde. Se recomienda el uso de canales con un diámetro de alrededor de 12 mm, es decir, 7/16 de pulgada aproximadamente. Este diámetro de canal es adecuado para que la razón de flujo del medio refrigerante mantenga un régimen turbulento y una temperatura de la superficie del molde con una variación no mayor a 1 °C. Con el fin de mantener el molde a temperatura constante, se recomienda utilizar placas térmicamente aislantes entre el molde y las platinas de la máquina de inyección. Esto último es esencial en el caso del moldeo de partes planas con tolerancias cerradas o para piezas grandes con recorridos de flujo largos desde el punto de inyección. La colocación de las líneas de enfriamiento depende en parte de la geometría del molde. Para áreas planas, una guía de colocación de las líneas de enfriamiento se muestra en la figura 4.17. En esta figura se muestra la colocación (distancia a la superficie del molde D y distancia entre líneas P) y diámetro (d) de las líneas de enfriamiento para diferentes materiales del molde.

Esto último es muy importante, pues un inadecuado enfriamiento en esquinas internas de la pieza da lugar a deformaciones como las mostradas en la figura 4.16. Aquí puede verse como el perfil se comba hacia adentro como resultado de una mayor contracción en la parte interior, debida a un enfriamiento mas lento que la parte externa.

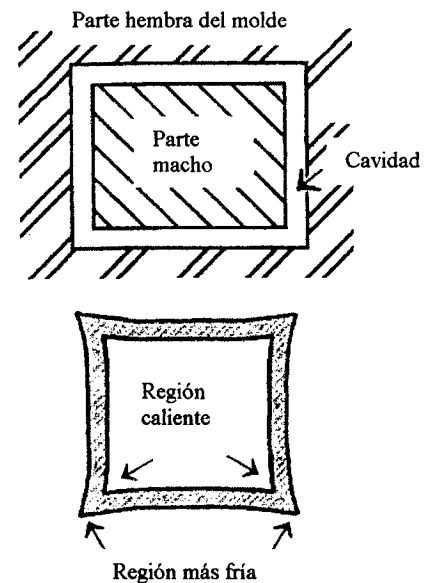


Fig. 4.16. Alabeo Térmico (Ref. 1)

4.4. Sistema de venteo

Antes de ser inyectada la resina en la cavidad del molde, esta cavidad esta llena de aire, por lo

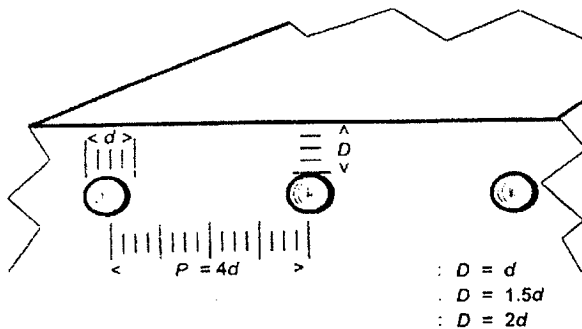


Fig. 4.18. Colocación de líneas de enfriamiento (Ref. 1)

que durante la etapa de llenado de la cavidad, este aire debe ser expulsado. Si el aire no encuentra una salida, será comprimido dentro de la cavidad causando un llenado incompleto y problemas dimensionales. Es por esto que el molde debe tener un sistema de venteo que permita el escape de los gases. Venteos típicos son ranuras con un espesor entre

0.01 y 0.03 mm y de 6.0 a 13.0 mm de ancho. Estas ranuras de venteo deben ser colocadas cerca de las líneas de soldadura, en la línea de partición y en las regiones que llenan al último.

4.5. Material del molde

Un factor importante en relación al enfriamiento de la pieza moldeada es el material con el cual esta fabricado el molde. Lo ideal, en este sentido, sería construir el molde de alguna aleación de cobre con una conductividad térmica casi 10 veces más alta que el acero. Sin embargo, no debe olvidarse que, aparte de la función de enfriar la pieza, el molde debe darle forma a la pieza y contenerla dentro, soportando las altas presiones que se generan en el proceso. Por otra parte, muchas de las resinas usadas hoy en día contienen materiales abrasivos que al fluir, producen desgaste sobre las paredes de los conductos y cavidades por donde pasan.

Por lo anterior se concluye que el molde debe ser hecho de un material que sea resistente y con las paredes de los conductos y cavidades con alta dureza para resistir la abrasión producida por algunos materiales plásticos. Materiales con estas características, como las aleaciones de acero, no tienen, como ya se mencionó, una conductividad muy alta, por lo que, dependiendo de la geometría de la pieza, la razón de disipación de calor, en algunas áreas, no es suficiente

para obtener un enfriamiento uniforme de la pieza. Deben utilizarse técnicas de enfriamiento más sofisticadas, sobre todo en aquellas partes como esquinas, corazones y pernos, en donde se necesita una disipación más rápida del calor. Algunas de estas técnicas son, la utilización de núcleos de aleaciones de cobre dentro de los corazones o pernos del molde y los así llamados “heat pipes”, que utilizan la evaporación y condensación de un refrigerante dentro de un tubo sellado para obtener conductividades cientos de veces más altas que las del cobre y sus aleaciones.

5. VARIABLES DEL PROCESO

5.1. Variables del proceso

De acuerdo a Tobin⁽¹⁰⁾, son 4 las variables de proceso que controlan el proceso de inyección y que por lo tanto afectan la calidad de una pieza. Estas variables son: Temperatura, Presión, Tiempo y Velocidad. En cada una de las etapas del ciclo de moldeo, los valores de estas variables deben ser monitoreados y controlados. El control de estas variables es de vital importancia en la determinación de las características de la pieza inyectada, entre ellas, las relacionadas con la contracción, dimensiones y alabeo de la pieza. En el inicio del ciclo, después de que el molde se ha cerrado, se inyecta el plástico fundido dentro del molde. En esta etapa, los parámetros importantes son la temperatura del fundido, la temperatura del molde, la velocidad y la presión de inyección. Al terminar la inyección sigue la etapa de compactación y enfriamiento de la pieza dentro del molde. En esta etapa, los parámetros a controlar son la presión y tiempo de sostenimiento, el tiempo de enfriamiento y la rapidez y uniformidad del enfriamiento de la pieza. Mientras la pieza se enfría y solidifica, se produce la plastificación y acumulación del fundido en la parte delantera del barril de plastificación para un nuevo disparo de inyección. En esta parte del ciclo es importante el control de la velocidad del husillo, de la temperatura del barril y de la contrapresión sobre el husillo. Una vez solidificada la pieza se abre el molde y se extrae la pieza. Aquí es importante la temperatura con que la pieza es extraída del molde.

5.2. Temperatura

En el caso del problema de contracción excesiva y alabeo de las piezas plásticas, los valores de temperatura que deben ser monitoreados y controlados son la temperatura del material plástico fundido, la temperatura del molde y la temperatura de desmolde. La temperatura del fundido y la del molde, determinan el tiempo de enfriamiento y, por lo tanto, la mayor o menor oportunidad para que las moléculas poliméricas, dependiendo del tipo de material, se relajen y/o se ordenen en una estructura cristalina.

5.2.1. Temperatura de inyección del fundido

Alta o baja temperatura del fundido puede dar lugar a valores altos de contracción. Si la temperatura del fundido es baja, la viscosidad es alta y el plástico inyectado no alcanza a llenar adecuadamente la cavidad y la compactación del mismo es insuficiente antes de que solidifique la compuerta de inyección. La presión de compactación será baja al final del recorrido del plástico en la cavidad dando por resultado alta contracción al enfriar. Con temperaturas altas del fundido, el tiempo de enfriamiento será mayor y habrá más oportunidad de que las moléculas relajen o cristalicen, dando por resultado mayor contracción. Por otra parte, si la temperatura del fundido es aumentada sin aumentar el tiempo de la presión de sostenimiento, ésta puede cesar antes de que solidifique la entrada, dando lugar a que el plástico regrese por la entrada de inyección y la pieza dentro del molde no quede debidamente compactada dando lugar a rechupes y contracción excesiva.

De todo lo anterior, puede decirse que una regla general en relación a la temperatura optima del fundido para reducir al mínimo la contracción, es utilizar la temperatura mínima que permita un buen llenado y compactación de la pieza y, por lo tanto, una pieza con buena definición de moldeo. Esto permitirá disminuir al mínimo el tiempo de enfriamiento y la contracción por relajación o cristalización de las moléculas poliméricas.

5.2.2. Temperatura del molde

La temperatura del molde afecta la razón de enfriamiento de la pieza, ya que entre mas alta sea esta temperatura, menor será la diferencia entre la temperatura del fundido y la temperatura del molde, por lo que la razón de transferencia de calor entre el molde y la pieza será menor. Por el contrario, un molde más frío aumenta el gradiente térmico entre la pieza y el molde y, con ello, la razón de transferencia de calor.

La consecuencia inmediata de esto es que entre mayor sea la temperatura del molde se tendrá un tiempo de enfriamiento mas largo. A mayor tiempo de enfriamiento, las moléculas poliméricas tendrán mas tiempo disponible para relajar, en el caso de los amorfos, o para

cristalizar en el caso de los semicristalinos. En cualquiera de los dos casos, el resultado será un mayor porcentaje de contracción, aunque esto repercutirá en una menor posibilidad de contracción postmoldeo y una mayor estabilidad dimensional. Por otra parte, un molde caliente permite una mejor definición superficial de la pieza, aunque, debido al mayor tiempo de enfriamiento se tendrá un ciclo más largo y menor productividad

Un molde frío produce una razón de enfriamiento más rápido y, en consecuencia, las cadenas poliméricas tendrán menos posibilidad de relajar, en el caso de los amorfos, o de cristalizar, en el caso de los cristalinos, antes de que la pieza solidifique. En cualquiera de los dos casos, el resultado es una menor cantidad de contracción, aunque existe una mayor posibilidad de contracción postmoldeo debido a la relajación de esfuerzos congelados o a una cristalización postmoldeo en los materiales semicristalinos, los cuales tratan de seguir cristalizando si son sometidos a temperaturas altas durante su vida funcional.

5.2.3. Temperatura de desmolde

La temperatura de desmolde es la temperatura a la que la pieza pueda ser expulsada del molde sin riesgo de distorsión por falta de rigidez. Si los pernos de expulsión dejan marcas en la pieza, es probable que la pieza se este desmoldando antes de tiempo o bien que la cantidad de expulsores no sea suficiente o están mal distribuidos. Muchos de los proveedores de resinas recomiendan la temperatura deseable de desmolde para las diferentes resinas que tienen en el mercado. La Temperatura de Transición Vitrea (para el caso de los amorfos), La Temperatura de Deflexión Bajo Carga⁽¹¹⁾ y la Temperatura Vicat de Ablandamiento⁽¹²⁾, son comúnmente usadas como indicadores de la temperatura máxima de la pieza durante el desmolde

El tiempo total del ciclo depende fuertemente de la temperatura de desmolde considerada. En muchas ocasiones el moldeador toma una temperatura de desmolde muy baja, dejando la pieza mas tiempo de lo necesario dentro del molde para asegurar que no haya distorsión, alargando innecesariamente el ciclo de trabajo.

5.3. Velocidad o razón de inyección

La rapidez con que el material plástico fundido es inyectado dentro del molde, afecta las características de la pieza moldeada de diferentes formas. Si la velocidad de inyección es alta, se genera calor por fricción en la restricción de la entrada de inyección y dentro del molde por la fricción entre material fluyendo en el centro de la cavidad y el material ya solidificado adherido a las paredes del molde. A mayor velocidad de inyección mayor la temperatura del fundido, lo cuál permite un llenado más efectivo y una mejor definición de la parte moldeada. Por otra parte, una excesiva velocidad de inyección puede producir altos esfuerzos cortantes y la degradación del material o bien provocar la apertura del molde y la aparición de rebaba.

Una velocidad de inyección baja permite que el material solidifique en las paredes del molde antes de que se termine el proceso de llenado, creando un estrechamiento en el flujo del material y aumentando los requerimientos de presión para poder llenar el molde. Esto también causa un mayor gradiente de presión a través de la pieza durante la fase de presión de sostenimiento disminuyendo la efectividad del empacamiento y dando por resultado una contracción total mayor, una contracción diferencial y un posible alabeo.

5.4. Presión

Una de las variables del proceso de inyección que tiene gran influencia sobre la contracción de la pieza es la presión, principalmente en la fase de sostenimiento y empacamiento del plástico fundido dentro del molde y en menor escala en la fase de llenado del molde.

5.4.1. Presión de inyección

La presión de inyección debe ser lo suficientemente alta para llenar la cavidad, forzando al material para que llegue a las partes más recónditas del molde. Lo ideal es que la presión se mantenga igual en todas las partes del molde. Esto no es posible debido a que los materiales plásticos en estado fundido son compresibles y altamente viscosos, de tal forma que, al ir fluyendo por un conducto o cavidad, se produce una caída de la presión. El resultado de esto

es una variación de la presión dentro de la cavidad, con la presión más alta cerca del punto de entrada del molde y la más baja en el último punto en llenar. Esta variación de presión coincide con una variación de temperatura con la misma orientación, más caliente cerca de la entrada y más frío en el último punto en llenar. La parte mas alejada de la entrada del molde solidifica primero, a menor presión y con menos tiempo para contraer, que la parte más cercana a la entrada, que se mantiene mas caliente y a mayor presión, dando por resultado una contracción diferencial y alabeo. La variación en la presión dentro de la cavidad del molde disminuye si se aumenta el espesor de la pieza, la presión de inyección y sostenimiento o la velocidad de inyección o si se disminuye la viscosidad del fundido.

5.4.2. Presión de sostenimiento.

Patel⁽¹³⁾ en un estudio hecho con una pieza moldeada en polipropileno homopolímero,

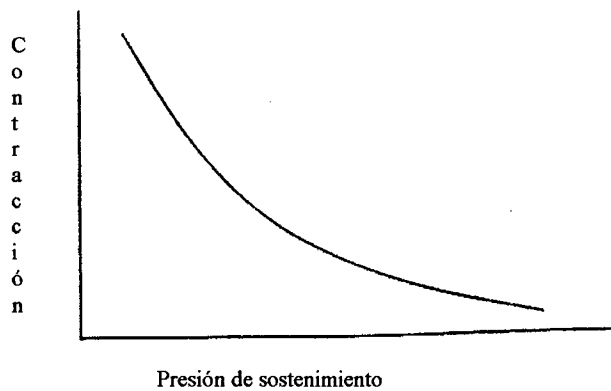


Fig. 5.1. Efecto de la presión de sostenimiento sobre la contracción (Ref. 13)

encontró que la presión de sostenimiento es, en forma muy aproximada, inversamente proporcional a la contracción, como lo muestra la figura 5.1., y que su influencia en la contracción es mayor que la de cualquier otra variable del proceso. En la figura 5.2, se muestra que un aumento en la presión de sostenimiento

disminuye la contracción significativamente mientras que el aumento en la velocidad de inyección no tiene un efecto significativo comparado con el de la presión de sostenimiento. Un resultado similar es obtenido por Liao⁽¹⁶⁾ en una investigación sobre condiciones optimas de proceso para partes de pared delgada. Estos resultados muestran que aumentando la presión de sostenimiento se disminuye la contracción, pero debe tenerse en mente que, un exceso de presión de sostenimiento, puede provocar que la compresión sobrepase a la contracción dando

por resultado una pieza difícil de remover del molde, ya que la pieza es más grande que la cavidad.

En materiales semicristalinos, la presión de sostenimiento, junto con otros factores como el tiempo de sostenimiento y la temperatura del molde, tiene un gran efecto sobre el grado y uniformidad de cristalización, ya que una alta presión de sostenimiento hace que las moléculas poliméricas se mantengan más juntas y con mayores posibilidades de empacarse en estructuras cristalinas.

5.5. Tiempo

El tiempo es un factor muy importante durante el proceso de moldeo por inyección, ya que

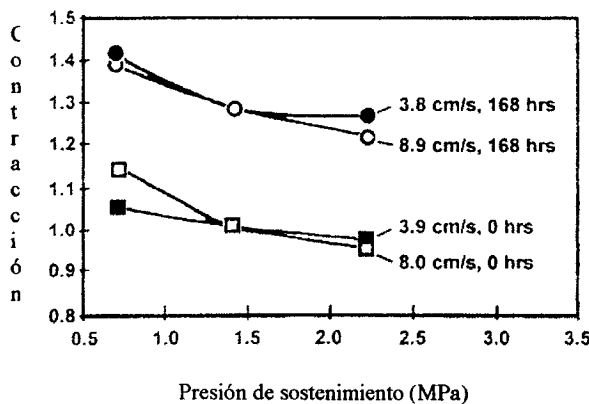


Fig. 5.2. Comparación del efecto de la velocidad de inyección y de la presión de sostenimiento sobre el porcentaje de contracción (Ref. 13)

además de impactar en las características del producto, la suma de todos los tiempos de las diferentes etapas determina el tiempo total del ciclo y por lo tanto la productividad del proceso. La etapa que consume más tiempo dentro del ciclo de inyección es la de enfriamiento y es precisamente en esta etapa donde la pieza solidifica y se determina en gran

parte el comportamiento de la pieza en relación con la contracción. En esta etapa es cuando se aplica la presión de sostenimiento para compactar el material dentro del molde y esta presión junto con el tiempo durante el cual se aplica determinan en gran medida el grado de contracción de la pieza.

5.5.1. Tiempo de sostenimiento

El tiempo de sostenimiento es el tiempo durante el cuál se aplica la presión de sostenimiento

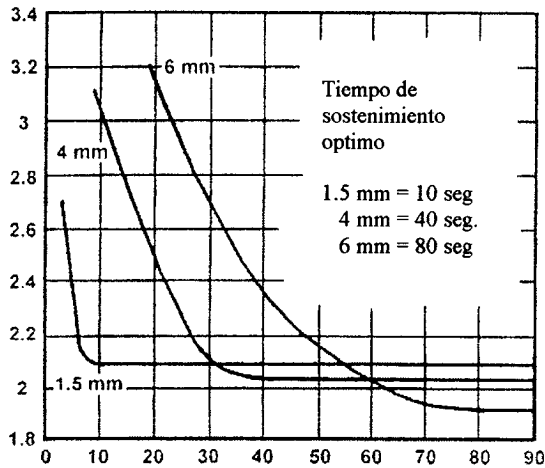


Fig. 5.3. Efecto del tiempo de sostenimiento sobre la contracción en un acetal para diferentes espesores de pared (Ref. 14)

con el fin de empaçar el material en el molde. A mayor tiempo de sostenimiento menor contracción. Esto es valido hasta un cierto instante, que es el instante en que la entrada de inyección solidifica, mas allá de este instante, la aplicación de la presión de sostenimiento es inútil. Este comportamiento es mostrado en la figura 5.3, en donde además se marca el tiempo óptimo de sostenimiento como aquel a partir del cuál la contracción se mantiene constante.

Si el tiempo de sostenimiento no es suficientemente largo para dar tiempo a que la compuerta de entrada al molde solidifique, parte del material plástico dentro del molde puede retroceder hacia los canales de alimentación dando por resultado un empaçado deficiente dentro del molde y, por lo tanto, un aumento en la contracción.

6. El medio ambiente

Dos variables del medio ambiente son importantes en el comportamiento de la contracción y el alabeo potencial de las piezas plásticas inyectadas, estas son la temperatura y la humedad del medio ambiente. Esto es especialmente válido en el caso de la contracción postmoldeo, aunque, en menor medida, afectan también la contracción en la etapa de solidificación en el molde.

6.1. Efecto de la temperatura ambiental

Cambios en la temperatura del medio ambiente pueden causar fluctuaciones en la temperatura del molde durante el proceso de inyección. Estas fluctuaciones en la temperatura del molde causan variaciones en el porcentaje de contracción en la pieza, dando por resultado variaciones en sus dimensiones. Si se utiliza una torre de enfriamiento, un aumento de la temperatura ambiental disminuye la eficiencia del sistema dando por resultado variaciones de temperatura en los diferentes sistemas de la máquina de inyección, incluyendo el molde.

Muchos talleres de inyección operan en un ambiente sin control de la temperatura, por lo que cambios en la temperatura del medio ambiente puede influenciar la eficiencia del sistema de enfriamiento de la máquina y del molde. La temperatura de los gránulos de plástico al entrar a la máquina a través de la tolva de alimentación, puede afectar los requerimientos de calor para fundir y procesar el plástico y, por lo tanto, puede influir la temperatura del fundido.

Cuando una pieza plástica es transportada dentro de un vehículo cerrado, altas temperaturas ambientales pueden hacer que la temperatura dentro del vehículo se eleve hasta un grado tal que permitan la relajación de las cadenas poliméricas y algo de cristalización adicional en el caso de los materiales semicristalinos. El resultado de esto es una contracción postmoldeo, que en materiales semicristalinos, como acetal y PBT, puede llegar hasta un 0.5%⁽¹⁾. En piezas planas esta contracción postmoldeo produce un alabeo de la pieza.

Cuando una pieza plástica es ensamblada con una pieza metálica, debido a que tiene una expansión y contracción térmica mayor que el metal, los constantes cambios en temperatura provocan cambios en el esfuerzo de tensión y contracción de la pieza llegando a provocar la falla o incluso la fractura de la misma.

6.2. Efectos de la humedad

La humedad afecta la eficiencia de los intercambiadores de calor y la humedad contenida en los gránulos de material plástico. Como el contenido de humedad en el plástico aumenta, los requerimientos de calor para eliminarla durante el proceso de moldeo también aumentan. Esto puede influenciar la temperatura y las condiciones del fundido al entrar al molde, ya que en algunos materiales el contenido de humedad y la alta temperatura pueden provocar el rompimiento de las cadenas poliméricas, dando lugar a un cambio en sus propiedades reológicas

Algunos materiales, como los acetales y el nylon, son higroscópicos. Algunas veces, al absorber humedad, el material se vuelve menos frágil y aumenta sus dimensiones, y si la exposición al agua no es uniforme se producen problemas de alabeo. Por ejemplo los nylon son materiales fuertes y con buena resistencia química, pero absorben grandes cantidades de agua si son sumergidos en la misma, por lo que no son una buena opción para aplicaciones en donde la parte plástica esté en contacto con el agua.

La presencia de humedad durante el moldeo es un factor que inhibe un buen acabado superficial ya que no permite un buen contacto entre el plástico y las paredes de la cavidad, dando lugar a imperfecciones superficiales.

7. Control de la contracción y el alabeo

Como se ha visto en líneas anteriores, el problema de una contracción inadecuada que puede dar lugar a una falta de estabilidad dimensional o al alabeo, puede tener muy diversas causas que pueden ser atribuibles al material, al diseño de la pieza, al molde, al proceso o al medio ambiente. Al presentarse un problema de este tipo en el proceso, el primer paso antes de intentar corregirlo es identificar la causa o causas del mismo, ya que el hacer cambios en el proceso sin entender lo que está pasando, puede empeorar el problema.

Una vez identificada la posible causa o causas, el siguiente paso es buscar corregir el problema con medidas que sean lo menos costosas posibles. Una buena práctica es intentar con medidas de acuerdo al siguiente orden, que va de las medidas menos costosas a las más costosas

- Revisar los parámetros del proceso
- Intentar con una formulación diferente
- Hacer modificaciones al molde
- Rediseñar la parte

Algunas veces, el ajuste de alguno de los parámetros de moldeo es suficiente para corregir el problema, además que esta es la medida de corrección menos costosa. En caso de que esto no sea posible se puede intentar la reformulación del material, ya que como se vio en líneas anteriores, el uso de algunos tipos de reforzantes o rellenos puede servir para controlar la contracción. En algunos casos es posible intentar corregir el problema cambiando el material, sobre todo en aquellos casos en que se utiliza un material semicristalino que está contrayendo en forma excesiva.

La modificación del molde o el rediseño de la pieza son medidas extremas ya que, generalmente, y sobre todo en el rediseño de la pieza, este tipo de medidas causa pérdidas considerables.

7.1. Identificación de las causas del problema

Con el fin de identificar las posibles causas de un problema de contracción inconveniente o de alabeo, se recomienda hacer una lista de chequeo (checklist) con el fin de ir eliminando en forma metódica las posibles causas. Un ejemplo de checklist es el siguiente:

- Verificar si el molde está montado en la misma máquina en la que usualmente se ha corrido, ya que de una máquina a otra puede haber variaciones en los valores reales de los parámetros del proceso, aunque aparentemente estén establecidos, en el tablero de control, los mismos valores que usualmente se han usado
- Verificar si el molde no tiene algún daño que pueda provocar el problema.
- Examinar si los valores de los parámetros del proceso, temperaturas, presiones, tiempo de presión de sostenimiento, velocidad de inyección, etc., son los adecuados para el material y la pieza que se está moldeando.
- Verificar que la temperatura del molde sea la adecuada
- Verificar que las líneas de enfriamiento del molde estén conectadas correctamente y que el flujo de refrigerante sea sin obstáculos.
- Comprobar que el material utilizado tenga la formulación adecuada, ya que, como ya se vio, el tipo de material, cristalino o amorfo, las cargas, pigmentos y refuerzos influyen en la forma que el material contrae.
- Verificar si la pieza tiene cambios de espesor de pared, costillas, refuerzos que puedan estar provocando una contracción desigual.

7.2. Soluciones para una incorrecta contracción o alabeo

Fischer⁽¹⁾ en su Handbook sobre contracción y alabeo, Tobin⁽⁸⁾ en su libro sobre solución a problemas en inyección y Pichon⁽¹⁵⁾, ofrecen en sus trabajos una guía para la solución de los diferentes problemas en proceso de inyección, en particular para problemas de contracción y alabeo. Las propuestas que se dan a continuación están basadas en estos autores.

7.2.1. Contracción excesiva

Contracción excesiva puede ocurrir cuando el material fundido es empacado dentro del molde de manera inadecuada o cuando la temperatura del material fundido o del molde es muy alta. Un inadecuado empacamiento puede producirse por una baja presión de inyección, baja velocidad de inyección o una presión y tiempo de sostenimiento insuficiente. Esto último se puede dar cuando se aumenta la temperatura del fundido sin aumentar el tiempo de sostenimiento, dando lugar a que la presión de sostenimiento deje de aplicarse aun cuando la entrada de inyección todavía no solidifica lo que produce que el material regrese hacia los canales de alimentación, produciendo una pieza incompleta, con rechupes y exceso de contracción. Alta temperatura del fundido o del molde permiten un mayor tiempo de relajación o de cristalización, en el caso de los semicristalinos, dando lugar a una mayor contracción que puede resultar excesiva.

Las posibles soluciones para este problema son:

- Disminuir la temperatura del fundido hasta el valor mínimo posible que permita un llenado y empacado adecuado del material en el molde, ya que un fundido demasiado frío puede hacer que la entrada de inyección solidifique antes de que el material quede debidamente empacado. Una forma de optimizar la temperatura del fundido es en forma experimental. El procedimiento consiste en empezar con la temperatura mas alta dentro del rango establecido por el fabricante de la resina e ir bajando esta temperatura, manteniendo fija la presión de sostenimiento. El control de

las dimensiones de la pieza, permite decidir cual es la temperatura más baja que se puede utilizar sin que la pieza este fuera de especificaciones dimensionales.

- Disminuir la temperatura del molde lo más posible, tomando en cuenta que un molde muy frío puede ocasionar esfuerzos residuales y, posteriormente, problemas de contracción postmoldeo.
- Aumentar la presión de inyección, cuidando que su valor multiplicado por el área proyectada de la pieza no sobrepase la máxima fuerza de cierre de la unidad de cierre del molde
- Aumentar la presión y tiempo de sostenimiento
- Utilizar un material con mayor índice de fluidez
- No utilizar agente nucleante, ya que el agente nucleante aumenta el índice de cristalinidad y, por lo tanto, la contracción.
- Si es posible, utilizar un material amorfo en lugar de un semicristalino

7.2.2. Variación en las dimensiones e la pieza

Esto puede deberse a variación en los parámetros que afectan el porcentaje de contracción. Esta variación puede deberse a un mal funcionamiento de la maquina de inyección o del sistema de control de temperatura del molde. Otra causa puede ser la temperatura y humedad ambiental, que como ya se dijo, pueden afectar las temperaturas del molde o del fundido. Las posibles soluciones son:

- Mantener control de los parámetros de proceso, principalmente la temperatura del molde y del fundido y las presiones de inyección y de sostenimiento

- Mantener controladas la temperatura y humedad ambiental, ya que afectan la temperatura del molde y del fundido, así como la homogeneidad del plástico fundido

7.2.3. Alabeo

El alabeo en piezas moldeadas por inyección no puede ser totalmente eliminado, pero es posible minimizar sus efectos adversos. Son varias las causas que pueden provocar este problema y algunas de ellos pueden producir efectos contrarios. Por ejemplo, una presión de inyección baja disminuye los esfuerzos sobre las cadenas poliméricas durante el moldeo, disminuyendo la posibilidad de deformación debida a estos esfuerzos. Por otra parte, una presión de inyección baja puede producir un llenado inadecuado del molde y, por lo tanto, una mayor contracción durante el enfriamiento.

Una presión de inyección alta, además de producir grandes esfuerzos durante el llenado de la pieza, puede producir un exceso de orientación en las cadenas poliméricas, provocando con esto una contracción diferencial entre la dirección del flujo y la dirección transversal al flujo y, por lo tanto, alabeo

Alta temperatura del fundido permite un tiempo de enfriamiento mas largo y por lo tanto mas oportunidad para que los esfuerzos debidos al proceso de llenado del molde se relajen y si además se tiene un enfriamiento uniforme de la pieza, se reducirá la tendencia a producir esfuerzos diferenciales y por lo tanto la deformación. El enfriamiento del molde es crítico, sobre todo en piezas que por su geometría, tienen tendencia a la deformación. Para que la pieza pueda enfriar uniformemente, es necesario que la razón de enfriamiento del molde sea mayor en los puntos calientes, como son la entrada de inyección, las esquinas internas y los pernos del molde.

Si la razón de llenado del molde es alta, el tiempo de llenado será corto y el molde se llenara antes de que los extremos de la pieza mas alejados de la entrada de inyección puedan enfriar demasiado, dando oportunidad de que la pieza completa enfríe de una manera mas uniforme, lo cuál tiende a disminuir el alabeo. Debido a que el fundido va enfriándose a medida que

fluye llenando el molde, su viscosidad aumenta provocando una pérdida de presión, de tal forma que la parte mas caliente a la entrada el molde es mejor empacado que las partes mas alejadas, lo que provoca una contracción diferencial y el alabeo.

De acuerdo a todo lo anteriormente expuesto, las posibles soluciones al problema del alabeo son:

- Reducir los efectos de una orientación excesiva, minimizando la presión necesaria para llenar el molde, optimizando la razón de llenado.
- Llenar el molde lo más rápido posible, de tal forma que la temperatura sea lo más uniforme posible a través de la cavidad y así mismo el empacamiento.
- Usar temperaturas altas en el molde con el fin de permitir un llenado más fácil y dar más tiempo para la relajación de esfuerzos.
- Controlar las temperaturas del molde de tal forma que el enfriado de la pieza sea uniforme
- Controlar el tiempo de sostenimiento, ya que un tiempo insuficiente o excesivo puede producir alabeo.
- Si es posible, utilizar un material con menor cristalinidad o un amorfo.
- Reemplazar, parcial o totalmente, refuerzos en forma de fibras por hojuelas o por esferas.
- Si no es posible reemplazar las fibras de refuerzo, usar fibras mas cortas.
- Diseñar piezas con espesor de paredes lo mas uniforme posible, para evitar enfriamiento diferencial.

- Poner costillas o perfiles de refuerzo en la pieza para aumentar la rigidez de la misma.
- Relocalizar y/o aumentar los puntos de inyección con el fin de mejorar las condiciones de flujo, principalmente relacionadas con la orientación excesiva o no homogénea.
- Reducir la orientación utilizando alta temperatura del fundido y baja velocidad de inyección.
- Utilizar un número adecuado de expulsores con el fin de evitar deformaciones producidas por esfuerzos durante la expulsión de la pieza.

La tabla 7.1 muestra un resumen de las causas y posibles soluciones al problema de contracción inadecuada o alabeo en piezas plásticas moldeadas por el proceso de inyección.

Tabla 6.1. Resumen de los problemas relacionados con la contracción y el alabeo, sus causas y sus posibles soluciones.

Problema	Causa	Solución
Contracción excesiva	Alta temperatura del fundido	Disminuir temperatura del fundido
	Alta temperatura del molde	Disminuir la temperatura del molde cerca de la entrada y aumentarla lejos de la entrada
	Presión de inyección y de sostenimiento baja	Aumentar presión de inyección y de sostenimiento
	Tiempo insuficiente de sostenimiento	Aumentar el tiempo de sostenimiento
	Material con índice de fluidez bajo	Cambiar material
	Entrada de inyección muy pequeña	Aumentar el tamaño de la entrada
	Correderas con diámetro pequeño	Rediseñar las correderas
Variación en las dimensiones de la pieza	Variación de las variables temperatura y presión	Buscar la causa de la variación y corregir
	Variación de los tiempos y temperaturas de llenado de diferentes cavidades en un molde multicavidades	Rediseñar el sistema de alimentación para balancear el llenado
Alabeo	Orientación excesiva de las moléculas poliméricas	Optimizar la velocidad de llenado del molde para minimizar la presión de llenado
		Relocalizar las entradas de inyección o aumentar el número de entradas para disminuir orientación
		Remplazar refuerzos en forma de fibras por hojuelas o esferas
	Altos esfuerzos de moldeo por una presión de inyección muy alta	Disminuir la presión de inyección Aumentar la temperatura del molde para dar mas tiempo de relajación a los esfuerzos de moldeo
		Llenar el molde lo mas rápido posible y aplicar la presión de sostenimiento lo antes posible Aumentar la temperatura del fundido que permita un llenado rápido sin presiones muy altas
	Presión diferencial de la entrada al final del recorrido	Reducir al mínimo el recorrido del fundido Disminuir la temperatura en la entrada y aumentar en las partes mas alejadas de la entrada Diseñar la pieza con el espesor de pared lo mas uniforme posible Controlar la razón de enfriamiento del molde para que la pieza enfríe uniformemente
	Enfriamiento diferencial de la pieza	Aumentar el tiempo de enfriamiento Aumentar el número de expulsores Diseñar la pieza con costillas o refuerzos
	Deformación durante la expulsión	Cambiar aun material amorfo
	Material con un alto índice de cristalinidad	

8. Estado actual del Arte

Como ya se ha mencionado anteriormente, no se puede eliminar por completo el problema de contracción indeseada, inestabilidad dimensional o alabeo, pero es posible aplicar acciones tendientes a minimizar este problema. En la actualidad se siguen buscando soluciones encaminadas a este fin, ya sea mediante el diseño de nuevos sistemas de alimentación, enfriamiento, etc., o mediante la utilización de herramientas matemáticas y computacionales que permitan modelar el proceso con el fin de optimizar los parámetros del mismo. Se han encontrado reportados avances en la búsqueda de soluciones al problema de contracción, alabeo y estabilidad dimensional.

Liao Sj y colaboradores⁽¹⁶⁾ investigaron las condiciones óptimas de proceso en partes reales de pared delgada, en este caso, la cubierta de un teléfono celular. En las pruebas experimentales, utilizando el método de Taguchi, se consideraron los efectos de interacción entre los parámetros de proceso. Llevaron a cabo pruebas experimentales a partir de las cuáles midieron la contracción y el alabeo en una pieza delgada moldeada por inyección. Basados en los resultados del análisis de variables determinaron los efectos de interacción de cada parámetro. Los resultados indican que la presión de sostenimiento es el parámetro de proceso más importante en relación al alabeo y contracción. Comparando sus resultados con los obtenidos con partes simplificadas de pared delgada reportados en la literatura, concluyeron que la geometría de un parte comercial real afecta las condiciones óptimas de proceso. Las condiciones óptimas de proceso determinadas por el método de Taguchi fueron verificadas experimentalmente en este trabajo

Dai y colaboradores⁽¹⁷⁾ investigaron el efecto que produce la utilización de una compuerta de entrada, llamada compuerta gemela, sobre la contracción en dirección transversal al flujo y las propiedades mecánicas, Este tipo de entrada de inyección divide el flujo en 2 partes a la entrada de la cavidad, produciendo una auto interferencia de los dos corrientes del fundido. En este artículo se discute el efecto de este flujo sobre las propiedades mecánicas, la distribución de espesores y la contracción transversal, en piezas moldeadas en polipropileno isotactico.

Uno de los resultados obtenidos es que este tipo de entrada de inyección trae una mejor distribución de espesor y una menor contracción en dirección transversal.

La influencia de los parámetros de proceso sobre la distribución espacial de la orientación molecular, en el proceso de inyección de piezas planas de polipropileno, fue estudiado por Mendoza y colaboradores ⁽¹⁸⁾. Se encontró que la orientación de la fase amorfa fue baja mientras que la de la fase cristalina alcanza un máximo en la capa de esfuerzo cortante que solidifica durante la etapa de llenado. Otro resultado es que el espesor de la pieza gobierna el nivel global de máxima orientación y que la velocidad de inyección determina el espesor de la capa de esfuerzo cortante sin cambiar el máximo de orientación. Los cambios de la temperatura del molde de 20 a 40 grados no modifican la orientación molecular.

Una formulación térmica y visco elástica para la simulación de esfuerzos residuales inducidos térmicamente y mediante presión, en termoplásticos reforzados con fibras cortas, moldeados por inyección, ha sido presentado por Zheng, R y colaboradores ⁽¹⁹⁾. Los esfuerzos residuales calculados permiten predecir la contracción y el alabeo en productos terminados. En este trabajo, los autores aplicaron una ecuación de difusión rotatoria para calcular la distribución, inducida por el flujo, de la orientación de la fibra.

En el trabajo “ Tuning and control of dimensional consistency in molded products” ⁽²⁰⁾, los autores exploran la validez de la aproximación 6 sigma para tolerancias y optimización de proceso para dimensiones múltiples de la pieza. Esto se refiere a que el intervalo entre el límite inferior de la tolerancia para la contracción y el límite superior, contenga el intervalo $x_m \pm 3\sigma$, donde x_m la media de las contracciones y σ es la desviación estándar de la distribución de contracciones. Superficies de respuesta para el peso y dos dimensiones de la pieza son desarrolladas como una función de variables múltiples del proceso, para una pieza rectangular moldeada en polipropileno isotáctico. Las capacidades del proceso en relación a la consistencia dimensional y el peso de la pieza son obtenidas usando análisis de Monte Carlo.

9. Áreas de oportunidad

El proceso de moldeo por inyección, en sus inicios, se utilizó en la producción de piezas con muy pocos requisitos técnicos, como por ejemplo juguetes, utensilios para el hogar, piezas utilizadas en la práctica de algún deporte o actividad recreativa, etc. En la actualidad, y desde hace algunos años, los avances tecnológicos en esta área han provocado, como ya se mencionó al principio, una tendencia hacia la sustitución de algunos materiales como los metales, el vidrio, el papel, la madera y otros, por materiales poliméricos, en la fabricación de piezas con requisitos técnicos más estrictos.

En la industria automotriz se utilizan materiales plásticos en piezas como las facias para las defensas del auto, partes de la carrocería, cubiertas para las puertas y otras piezas, que por su gran superficie y su complejidad están más propensas a problemas de estabilidad dimensional y alabeo. Otras piezas como conductos de aire, el manifold de alimentación, cubiertas del motor y otras, están sometidas a grandes variaciones de temperatura que pueden provocar deformaciones o condiciones de esfuerzos intermitentes que pueden llegar a provocar la falla o incluso la fractura de la pieza.

En otras aplicaciones, las piezas plásticas pueden formar parte de una estructura o un componente en donde están ensambladas con piezas metálicas. La diferencia del coeficiente de expansión térmica y, por lo tanto, de la contracción entre las piezas de plástico y las metálicas pueden producir esfuerzos diferenciales entre el plástico y el metal que puede provocar deformaciones, fallas por cambio en las dimensiones o la fractura de la parte plástica.

Los ejemplos anteriores son algunos en los que es evidente la existencia de problemas de estabilidad dimensional o deformación de piezas plásticas moldeadas por inyección. Todas estas situaciones presentan áreas de oportunidad para la aplicación de los conocimientos y los avances tecnológicos en esta área del conocimiento, en la solución de problemas específicos o en la mejora tanto en el diseño de la pieza, como del herramental y en la

optimización del proceso, para obtener piezas plásticas que respondan a las exigencias crecientes de los consumidores ya sea intermedios o finales.

El conocimiento y comprensión de los fenómenos que dan lugar al problema, permiten la utilización de herramientas computacionales, como los simuladores computacionales del proceso (CAE), y estadísticas, como Diseño de Experimentos, que permiten la visualización y predicción del comportamiento del proceso al cambiar las condiciones del mismo.

10. Conclusiones y recomendaciones

Como se ha visto a lo largo de este trabajo, el problema de la contracción inadecuada y el alabeo de una pieza plástica producida por inyección es bastante complejo por el gran número de factores que intervienen en el problema. Se puede incluso encontrar casos en que el aumento o disminución de una variable de proceso puede provocar efectos contrarios. Por ejemplo, la disminución de la presión de inyección produce, por un lado, una disminución en la orientación de las moléculas poliméricas y una disminución de los esfuerzos a que son sometidas, lo que da por resultado una contracción diferencial más baja y, por lo tanto, menor posibilidad de alabeo. Por otra parte, una baja presión de inyección puede provocar un llenado incompleto o altos esfuerzos diferenciales, ya que el material se encuentra muy cerca de solidificar antes que se complete el llenado del molde, lo que puede llevar a problemas de alabeo.

Es por esto que se recomienda usar con mucho cuidado las recomendaciones que, se espera, conduzcan a la solución del problema y analizar todas las implicaciones colaterales que puede producir la aplicación de la medida recomendada.

La utilización de programas de cómputo que simulan el proceso de llenado del molde puede ser de gran utilidad como una guía para predecir los efectos que un cambio puede producir en la pieza moldeada. Sin embargo, estos programas no pueden tomar en cuenta todas las variables del problema, pues ellos no son más que la traducción, al lenguaje de la computadora, de un modelo matemático de los fenómenos físicos que se producen en el proceso. Este modelo matemático tiene muchas simplificaciones de estos fenómenos. Es por esto que el uso de estos programas de cómputo debe tomarse como una guía y no como algo definitivo.

Por todo lo anterior, se concluye que para comprender mejor toda esta problemática y poder resolver problemas que se presenten durante un proceso productivo que utilice el proceso de inyección de plástico, es necesaria una gran experiencia, y esta, solo puede darla el contacto continuo con los problemas en la industria.

Por otra parte, en la actualidad, los avances tecnológicos que se dan en cualquier área del conocimiento, se dan a un ritmo muy acelerado y la tecnología de los polímeros no es la excepción, por lo que es recomendable mantenerse al día en estos avances y poder aplicarlos en la solución de los problemas prácticos que se dan en la industria del plástico.

Referencias bibliograficas

1. Fischer, J. M., Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage, Plastic Design Library, 9
2. Trotignon, J. P., Verdu, J., Dobraczynski, A. y ,Piperaud, M., Matières Plastiques, AFNOR NATHAN, 2, (1996)
3. Whelan, A., Injection Molding Material, Applied Science Publisher, 168 (1982)
4. McIlvaine, J., Effects of Filler, Wall Thickness and Geometry on Shrinkage and Warpage of Engineering Plastics, SPE (Structural Plastics 96)
5. Johannaber, F., Injection Molding Machines, A User's Guide, Hanser Publishers, 291-292, (1994)
6. Malloy, R., Plastic Part Design for Injection Molding, Hanser Publishers, 83, (1994)
7. Xia, Z., and Mallick, P., Control of Dimensional Variability in Injection Molded Parts, SPE (Antec 97)
8. Injection Molding Tenite Cellulosic Plastics, Publ. # PC – 2a (11 – 75) ECP 2549 Eastman Chemical Products Inc.
9. Beaumont, J. P., Revolutionizing Runner Designs in Hot and Cold Runner Molds, Proceedings Antec, Tech Paper # 3680SPE (Antec 2001)
10. Tobin, W., Troubleshooting Injection Molded Parts, WJT associates, 39-40, 60-62, (1996)

11. ASTM D648, Standard Test Method for Deflection Temperature Under Flexure Load, Annual Book of ASTM Standards, 8.01 (1991)
12. ASTM D1525, Standard Test Method for Vicat Softening Temperature of Plastics, Annual Book of ASTM Standards, 8.01 (1991)
13. Patel, P., Effect of Processing Conditions on the Shrinkage and Crystallinity of Injection Molded Parts, SPE (Antec 97)
14. Delerín Molding Manual, Molding Manual TRD 30 Part, DuPont (Web Document)
15. I Pichon, J-F., INJECTION DES MATIERS PLASTIQUES, DUNOD, Paris, 2001
16. Liao, S., Chang, D. Y., Chen H., Tsou, L., Ho, J., Yau, H., Hsieh, Wang, J., Su, Y., Optimal process conditions of shrinkage and warpage of thin-wall parts, Polymer Engineering and Science, 44(5), 917-928, May., 2004
17. Dai, WL, Liu PS, Wang XY, Self-interference flow of an isotactic Polypropylene melt in a cavity during injection molding, Journal of Applied Polymer Science, 88(12), 2784-2790 Jun. 2003.
18. Mendoza, R., Regnier, G., Seiler, W., Lebrun, JL, Spatial distribution of molecular orientation in injection iPP: influence of processing condition, Polymer 44(11), 3363-3373, May 2003.
19. Zheng, R., Kennedy, P., Phan-Tien, N., Fan, XJ Thermoviscoelastic simulation of thermally and pressure-induced stresses in injection moulding for the prediction of shrinkage and warpage for fibre-reinforced thermoplastics, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 84(2-3), 159-190 Aug. 1999.

20. Kazmer, ., Lotti, C., Bretas, RES., Zhu, L. Tuning and control of dimensional consistency in molded products, *Advances in Polymer Technology*, 23(3) 163-175, 2004.