

**CENTRO DE INVESTIGACION EN QUIMICA APLICADA**



**PROCESO DE RESPUESTA TERMICA RAPIDA EN EL  
PROCESO DE MOLDEO POR INYECCION**

**CASO DE ESTUDIO**

**PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**ESPECIALIZACION EN QUIMICA APLICADA**

**OPCION: PROCESOS DE TRANSFORMACION DE PLASTICOS**

**PRESENTA:**

**JESUS GUSTAVO SORIA MATA**



**CENTRO DE INFORMACIÓN**

**SALTILLO, COAH.**

**AGOSTO 2006**

**13 OCT 2006**

**RECIBIDO**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**



**“PROCESO DE RESPUESTA TÉRMICA RÁPIDA EN EL  
PROCESO DE MOLDEO POR INYECCIÓN.”**

**CASO DE ESTUDIO.**

**PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:**

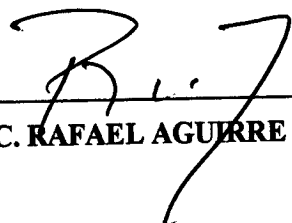
**ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**

**OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS.**

**PRESENTA:**

**JESÚS GUSTAVO SORIA MATA**

**ASESOR:**

  
\_\_\_\_\_  
**M. C. RAFAEL AGUIRRE FLORES**

**SALTILLO, COAHUILA**

**AGOSTO 2006**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**



**“PROCESO DE RESPUESTA TÉRMICA RÁPIDA EN EL  
PROCESO DE MOLDEO POR INYECCIÓN.”**

**CASO DE ESTUDIO.**

**PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:**

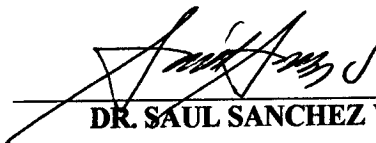
**ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA**

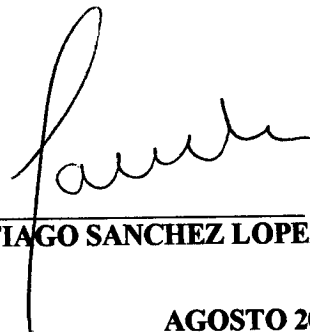
**OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS.**

**PRESENTA:**

**JESÚS GUSTAVO SORIA MATA**

**EVALUADORES:**

  
\_\_\_\_\_  
**DR. SAUL SANCHEZ VALDES**

  
\_\_\_\_\_  
**M.C. SANTIAGO SANCHEZ LOPEZ**

**SALTILLO, COAHUILA**

**AGOSTO 2006**

## INDICE.

### INTRODUCCION.

1.	INTRODUCCION A RESPUESTA TERMICA RAPIDA.	1
----	--	---

### REVISION BIBLIOGRAFICA.

2.	CARACTERIZACION DEL PROCESO DE MOLDEO POR INYECCION.	6
2.1	PRESION.	6
2.1.1	PRESION HIDRAULICA EN LA INYECCION.	7
2.1.2	PRESION EN LA CAVIDAD.	10
2.1.3	PRESION DE SOSTENIMIENTO.	16
2.2	TEMPERATURA.	17
2.2.1	TEMPERATURA DEL ACEITE HIDRAULICO.	17
2.2.2	TEMPERATURA DEL FUNDIDO.	17
2.2.3	TEMPERATURA DEL MOLDE.	18
2.3	VELOCIDAD.	18
2.4	EFFECTO DE LA TECNICA DE MOLDEO EN LAS PROPIEDADES.	20
2.4.1	ESTABILIDAD DIMENSIONAL.	20
2.4.2	PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS.	21
2.4.2.1	ORIENTACION MOLECULAR.	21
2.4.2.2	ESFUERZOS RESIDUALES.	23
2.4.3	CRISTALINIDAD Y ESTRUCTURA.	25
3.	TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL MATERIAL PLASTICO EN LA CAVIDAD.	26
3.1	INTERCAMBIO DE CALOR.	31
3.1.1	PRINCIPIOS BASICOS DE CALOR TEMPERATURA Y ENERGIA.	33
3.2	MATERIALES DE CONSTRUCCION DE MOLDES.	37
3.2.1	ACEROS.	38

3.3	ELEMENTOS COMERCIALES DE ALTO RENDIMIENTO PARA TRANSFERENCIA DE CALOR.	44
3.4	FLUIDOS EFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR.	44
4.	SISTEMAS DE CONTROL DEL DE MOLDEO POR INYECCION.	47
4.1	SISTEMAS DE CONTROL DE TEMPERATURA EN EL MOLDE.	49
4.2	SISTEMAS DE CONTROL DE FLUJO DE FLUIDOS DE TRANSFERENCIA EN EL MOLDE.	50
4.3	EQUIPOS COMERCIALES DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA LIQUIDOS.	51
	<b>ESTADO DEL ARTE Y ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO.</b>	
5.	RESPUESTA TERMICA RAPIDA.	53
	<b>AREAS DE OPORTUNIDAD.</b>	
6.	AREAS DE OPORTUNIDAD EN RTR.	60
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	61
8.	NOMENCLATURA.	62
9.	REFERENCIAS.	63

## **INTRODUCCIÓN.**

### **1. INTRODUCCIÓN A RESPUESTA TÉRMICA RÁPIDA.**

El presente caso de estudio pretende visualizar el desarrollo del proceso de Respuesta Térmica Rápida, hacia sistemas de calentamiento y enfriamiento, que faciliten el cambio de la temperatura de la superficie del molde y por lo tanto promover cualidades en las partes moldeadas, buscando esto como una primicia, después, observando el ahorro energético y la disminución probable de los ciclos de moldeo.

La calidad de la parte moldeada depende grandemente del ajuste de los parámetros del proceso de moldeo por inyección, que generan el historial termo-mecánico de dicha pieza; además de esto, verificar la posibilidad de controlar el proceso de enfriamiento en función al llenado de la pieza, visualizando el comportamiento termo-mecánico, para convertir esto en una gran ventaja en el proceso, que nos permita controlar en mayor medida la calidad y características deseadas de la pieza moldeada.

La cantidad de defectos que se pueden manejar y predecir con la utilización de esta herramienta son por mencionar algunos, esfuerzos residuales, contracciones en secciones de gran volumen (comparadas con el espesor nominal de la pieza) en la pieza a llenar, en el caso de los defectos, pero su mayor área de aplicación es la correcta orientación del material plástico en función al enfriamiento con lo que se pueden lograr piezas plásticas inteligentes, por ejemplo, ensambles de piezas después de un determinado tiempo de post-proceso.

Los moldes con cavidades de recorrido de flujo grandes y de pared delgada, son los que en mayor porcentaje presentan un desequilibrio constante e impredecible y mucho menos detectable de la calidad de los productos que se manufacturan, RTR es una herramienta que permite establecer un control sobre zonas de riesgo y monitorearlas.

En algunos reportes que se refieren al principio de utilidad de RTR, visualizaron que el comportamiento del molde a choques térmicos, es una alternativa y suponiendo que

existiera un metal que pudieran soportar choques térmicos de 25 a 250°C en dos segundos y después enfriarlo a 50 °C en diez segundos sería muy utilizado en la industria plástica. La realidad es que no existe este material y de ser así sería muy costoso, y con la posibilidad de perder sus cualidades en el momento del maquinado y tratamientos térmicos.

Lo que busca el monitoreo de RTR, es primero identificar las zonas de necesidad y después con calentamiento abruptos y enfriamientos del mismo tipo en insertos (para moldes ya construidos) fomentar el fenómeno de flujo térmico. Ahora bien con la posibilidad de conocer las capacidades de flujo de material en estado fundido a una determinada temperatura (viscosidad en fundido) sobre secciones conocidas, tenemos la opción de dosificar el calor necesario en el momento que el material sufra cambios debidos a suministros distintos o variaciones en el peso molecular.

Otros de los puntos a identificar para entender el proceso de RTR son los principios termodinámicos que gobiernan el moldeo por inyección. Los termoplásticos son inyectados en una maquina en la cual los gránulos de plástico son fundidos dentro de un barril caliente. En este barril, un tornillo transporta el plástico hacia el frente a lo largo del barril dentro de un espacio, mientras que la pieza inyectada previamente se enfría. Los gránulos de plástico son llevados desde temperatura ambiente a un estado fundido en unos cuantos segundos. Después el material fundido es almacenado y desarrolla un historial térmico hasta que la pieza moldeada anteriormente es enfriada y extraída del molde<sup>1</sup>.

Antes de que el material sea inyectado en el molde, este es cerrado con un tonelaje adecuado para resistir la fuerza ejercida por la presión de inyección. Una vez que la señal de inyección es dada, el tornillo avanza hacia el frente y empuja al plástico fundido a través de la boquilla de inyección hacia el sistema de entrada y corredores, dentro de la cavidad. En este punto, en el plástico fundido y en el molde se observan presiones de hasta 1360 bar (20,000 psi)<sup>2</sup>. El proceso de llenado con frecuencia impone un alto nivel de esfuerzos mecánicos y térmicos en el fundido. Los principales parámetros que afectan estos esfuerzos son la geometría de la boquilla de inyección, las entradas y los corredores,

el espesor de pared de la pieza moldeada, la velocidad de llenado, la temperatura del fundido y la temperatura de la pared del molde.

La presión que actúa sobre el fundido para que este sea movido a través del sistema, causa fricciones internas mientras el material fluye a través de las restricciones y las esquinas, esta fricción aumenta la temperatura en la masa fundida. Pruebas experimentales han mostrado que el aumento de la temperatura debido a la fricción es aproximadamente igual a la energía dada por la pérdida de presión cuando el plástico fluye dentro del molde<sup>3</sup>.

Cuando el plástico fluye dentro de la cavidad, este entra en contacto con las paredes del molde y empieza a enfriarse inmediatamente. El espesor del material pegado al molde que se enfría, depende de la velocidad del flujo y de la temperatura en la pared del herramental. Entre mas rápido fluya el plástico y más caliente este la pared, más delgada será la capa de material pegado a la pared que solidifique y se generara mas calor por fricción. Puede haber un incremento en la temperatura del plástico cercano a la pared estable debido al calentamiento por fricción, entonces, existe un pico de temperatura adyacente a la pared de plástico solidificada de forma estable que es mayor que la temperatura base del flujo del plástico fundido.

Otro fenómeno que se presenta durante el proceso de llenado del molde es que las moléculas del polímero se orienten parcialmente y estén empalmadas en la dirección del flujo. Las moléculas trataran de recuperarse, por lo que esta orientación puede causar un gran encogimiento o piezas sin llenar en la dirección del flujo<sup>4</sup>.

Los materiales amorfos se contraen ligeramente menos cuando son enfriados rápidamente que cuando enfrían más lento<sup>5</sup>. El tiempo y la exposición al calor podrían provocar un encogimiento adicional. En un cierto tiempo, especialmente a elevadas temperaturas, el último cambio de tamaño es casi el mismo. El material amorfo se comporta como un bote lleno de palomitas de maíz, su forma es tal que no están situadas lo suficientemente cerca una de la otra. Cuando se sacuden violentamente y repentinamente se detiene, el volumen aparente en el bote es mayor que si la sacudida se hubiera reducido gradualmente,



permitiendo a las palomitas situarse mas cerca una de la otra. Los materiales amorfos, no se sitúan tan cercanamente como una estructura cristalina.

En el caso de plásticos semicristalinos, las cadenas de polímero a menudo están dobladas sobre si mismas formando capas, lo que permite la formación de cristales. Otras cadenas moleculares son incorporadas normalmente, de modo que cualquier cristal contiene fragmentos de diferentes cadenas. El proceso de cristalización tiende a empaclar las cadenas de moléculas una al lado de la otra, formando una estructura mas compacta a través de la dirección del flujo. Esto normalmente da como resultado un mayor encogimiento en la dirección transversal que en la dirección del flujo<sup>6</sup>.

Una vez que el molde es completamente llenado con plástico inicia la fase de sostenimiento del ciclo. La presión es mantenida sobre el plástico en la cavidad hasta que la entrada solidifica o hasta que la presión es liberada del material que aun esta en el barril. Durante esta fase, una pequeña cantidad de material deberá fluir dentro del molde hasta que el material dentro del molde enfrié y se contraiga. Este tiempo de sostenimiento y la presión de sostenimiento tiene un efecto significativo en la contracción dentro del molde.

Después de la fase de sostenimiento, el plástico continúa enfriando hasta que alcanza una temperatura en la cual es lo suficientemente rígido para ser extraído del molde y que permanezca adecuadamente estable. Un tiempo de enfriamiento muy corto da como resultado una pieza con contracción o alabeamiento excesivo; por otro lado un tiempo de enfriamiento muy largo da como resultado esfuerzos congelados (y posibles fracturas), así como un tiempo de ciclo económicamente poco rentable.

La temperatura del material no es uniforme cuando es extraída del molde debido a que el plástico es un mal conductor de calor; la temperatura del núcleo de la pieza es mayor que la temperatura de la superficie cuando la pieza es extraída del molde. El centro de la pieza tarda más en enfriar y por lo tanto se contrae más que la superficie. Es por eso que siempre hay esfuerzos residuales provocados por ese enfriamiento diferencial, entre mayor sea el espesor de pared de la pieza, mayor será el diferencial de enfriamiento y los esfuerzos

residuales. Para espesores de pared muy delgados, la temperatura del núcleo puede ser tan alta que aunque la pieza parezca que esta correcta cuando es extraída del molde, la temperatura del núcleo puede reblandecer la superficie y causar defectos. Por esta razón algunas veces es apropiado colocar piezas de espesor de pared delgado dentro de un fluido de enfriamiento para mantener la superficie rígida hasta que el núcleo sea completamente enfriado.

Debe ser evidente entonces, que el molde tiene varias funciones. Proporciona la forma correcta a la pieza moldeada y la fuerza necesaria para soportar las presiones de inyección. El molde después remueve el calor de la pieza moldeada de forma eficiente y uniforme, por lo tanto, funciona como un intercambiador de calor.

El encogimiento de la pieza moldeada después de que es extraída del molde es más complicado que una simple contracción térmica, una contracción térmica no considera las condiciones del material fundido, como se hace en las condiciones del proceso, además la mayoría de los materiales no tienen la longitud de cadena que tienen los plásticos. Esta estructura favorece una relajación de esfuerzos adicional y cristalización a una temperatura a la cual la pieza es normalmente utilizada.

Respuesta Térmica Rápida, busca promover la más eficiente interacción termodinámica del material y el molde en la fase de llenado y enfriamiento. Como se menciono en los párrafos anteriores, con la herramienta de RTR se busca minimizar los efectos de los cambios de temperatura en el proceso para evitar los defectos, esto a través de cambios abruptos de temperatura ya sea en toda la cavidad o en una sección de esta, con lo que se podría tener un mayor control de la calidad de las piezas.

Además de asegurar la calidad de las piezas moldeadas ciclo tras ciclo, en el proceso de RTR se pretende también, reducir los tiempos de ciclo, de tal forma que se tenga un proceso mas eficiente y con una mayor productividad, lo que nos lleva a una posible reducción del costo de producción.

## **REVISIÓN BIBLIOGRAFICA.**

### **2. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO POR INYECCIÓN.**

Una descripción general del proceso de moldeo por inyección fue dada en el capítulo anterior, de tal forma que uno pueda entender mejor la relación entre las propiedades físicas de la pieza moldeada y los componentes de la maquina, el sistema total de moldeo por inyección, difícilmente tendría esta aplicación si un molde. En principio, el molde puede ser considerado como una parte imprescindible, aunque como una variable desconocida en muchas de sus múltiples utilidades.

Diversos parámetros de proceso afectan la formación de la pieza moldeada, la presión la temperatura y el tiempo. En esta sección se trataran a detalle.

La presión de inyección es comparada frecuentemente con la presión hidráulica o confundida con la presión de sostenimiento, algunas veces es considerada como un valor constante y también como una variable, todo ello relacionado con el tipo de proceso que se maneje, pero asociado incorrectamente con tiempo y localización; en muchos casos se asume que la presión de inyección puede ser programada en la maquina<sup>7</sup>. Esto no es practico, porque la presión de inyección depende de la resistencia al flujo en el sistema de corredores, la entrada y la cavidad, de tal forma que no es constante a través del ciclo de moldeo, pero aumenta de la presión normal del aire (alrededor de 100 kPa) hasta un máximo que no puede ser determinado. Para una descripción de la presión de inyección que sea más exacta, se deben incluir atributos como presión de inyección mínima, presión de inyección máxima o presión de inyección disponible.

#### **2.1 PRESION.**

Varios tipos de presión son aplicados durante el proceso de moldeo por inyección, y pueden ser diferenciados de acuerdo al lugar y el tiempo de acción en el ciclo de moldeo.

### 2.1.1 PRESIÓN HIDRÁULICA EN LA INYECCION.

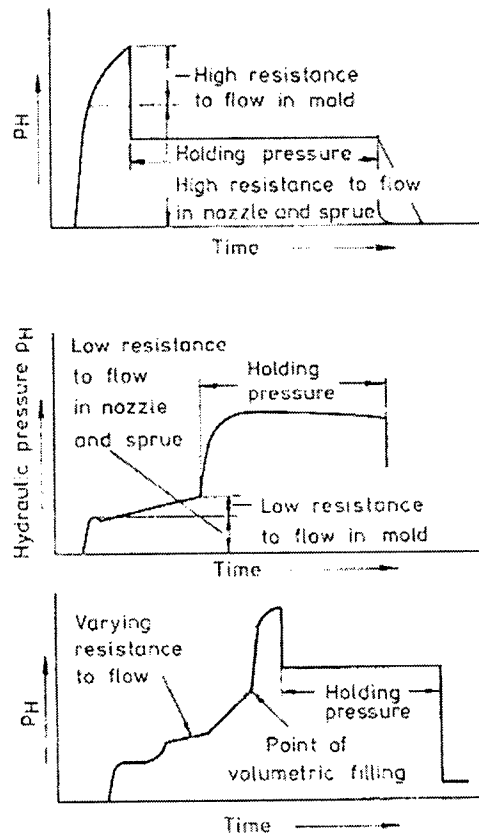
La presión hidráulica tiene que ser proporcionada por la unidad de potencia de la maquina para vencer la resistencia al flujo del material en la boquilla, el sistema de corredores y la cavidad. Esta característica es muy parecida a la presión del fundido en el frente del tornillo. Esta generalmente incrementa en un periodo corto de tiempo, de una presión mínima a una magnitud que corresponde con la resistencia al flujo del fundido desde la boquilla hasta la cavidad<sup>8</sup>.

Una alta resistencia al flujo da como resultado una rápida acumulación de alta presión, la cual apenas permite ver el inicio de la etapa de sostenimiento después del llenado de la cavidad. Por otro lado, el inicio de esta etapa puede ser reconocido fácilmente si la resistencia del flujo es baja. En una grafica de presión vs. tiempo (**fig. 1**), se puede observar que los cambios de presión resultan en variaciones de secciones transversales, lo cual puede ser mas notorio en sistemas de corredores de llenado largos. Dependiendo de la geometría del sistema de corredores, la presión requiere compensar la resistencia del flujo que puede ser considerablemente mayor que la presión aplicada en la cavidad.

También existen otros factores y por lo tanto efectos en la presión hidráulica. Mientras que la influencia de la velocidad axial del tornillo es conocida, los efectos del aceite hidráulico y la temperatura del fundido son frecuentemente subestimados. La viscosidad del fluido hidráulico, la cual es dependiente de la temperatura, tiene efectos en la presión; uno de ellos es familiar con esta relación, el cual afecta la constancia de la producción en muchos de los casos, particularmente durante el arranque con aceite frío.

El efecto de la temperatura del molde es comúnmente despreciado. Debido a que el perfil de presión hidráulica puede ser afectado por el proceso de

enfriamiento en el molde, se espera un efecto diferente en el tiempo de inyección si la operación de la unidad de inyección es dependiente de la temperatura, lo que influencia los resultados de la producción.



**FIG. 1**

Algunas otras variaciones características en el perfil de presión hidráulica indica irregularidades durante la inyección, como por ejemplo, un mal acabado de la superficie de la cavidad del molde, puede dar como resultado pulsaciones irregulares de la presión hidráulica, las cuales son menos frecuentes después de cambios de etapas abruptos (de presión de inyección a presión de sostenimiento, (**fig. 2**).

Es por eso que el perfil de presiones nos proporciona información sobre la operación real del sistema hidráulico de la máquina.

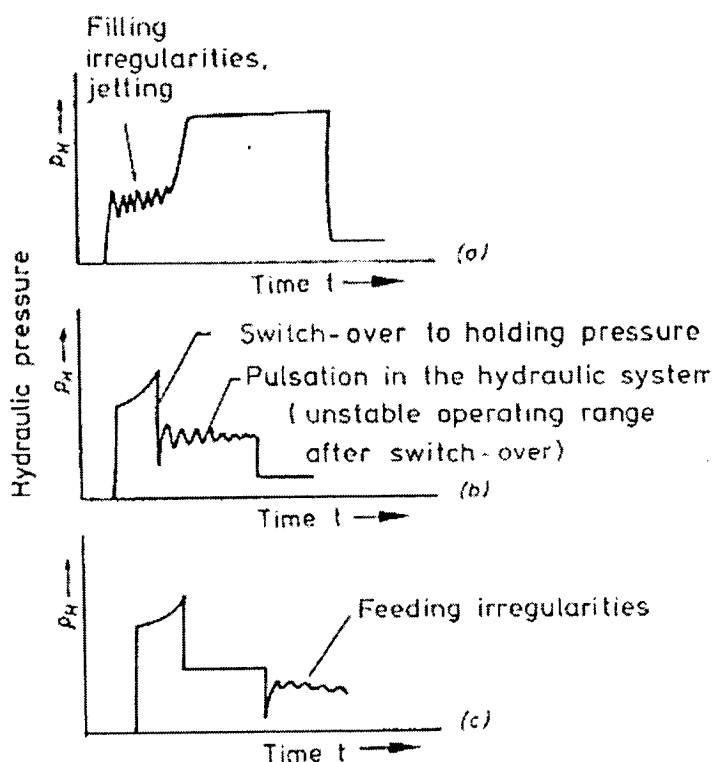


FIG. 2

Se recomiendan mediciones de la presión hidráulica porque son simples de realizar y nos proporcionan información importante sobre las etapas de plastificación e inyección. La capacidad de controlar realmente la unidad de plastificación durante las etapas importantes del proceso es la recompensa por un esfuerzo pequeño.

La presión al frente del tornillo nos muestra cualitativamente la misma tendencia que la presión hidráulica, aunque no durante la etapa de sostenimiento. La conversión de la presión hidráulica por medio de la relación entre la sección transversal del pistón hidráulico y la sección transversal del tornillo es suficiente.

Se debe asumir una pérdida por fricción del 5% en el rango de operación, solo con presiones muy bajas esta pérdida puede aumentar hasta 10%. La medición de la presión hidráulica es preferible, sobre la lectura de la presión

del fundido caliente, la cual no puede ser hecha realmente durante la operación continua. Esto también nos permite sacar conclusiones sobre el incremento de la temperatura del fundido el cual puede ser esperado debido a la fricción<sup>9</sup>.

Las lecturas de la presión hidráulica como sea, no nos proporcionan las bases para hacer conclusiones sobre las etapas de sostenimiento y el perfil de presiones en la cavidad, para lo cual requerimos las curvas de la presión hidráulica y de la cavidad con respecto al tiempo (fig. 3), en ellas se puede reconocer la influencia de la resistencia al flujo en la boquilla y el sistema de corredores y en algunos casos el inicio del llenado de la cavidad, así como el momento del llenado completo de la cavidad con un incremento repentino de la presión. Esto es correcto solamente si antes de hacerlo la presión de inyección no ha sido cambiada a presión de sostenimiento. Iniciando con la etapa de compresión, la presión de inyección solo nos proporciona información incompleta sobre el proceso, ya que la presión en la cavidad solo corresponde a la presión de inyección en casos muy raros.

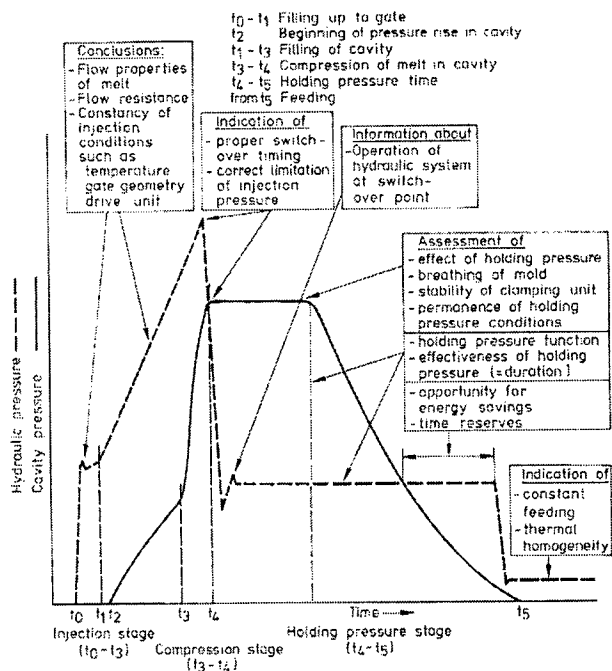


FIG. 3

## 2.1.2 PRESIÓN EN LA CAVIDAD.

El análisis del proceso de molde por inyección ha contribuido substancialmente a progresar en el control del proceso. La presión en la cavidad juega un papel central en este sentido. El método de registro de la presión ha logrado un mayor nivel con el uso de transductores de presión basados en láminas de tensión o cristales piezoeléctricos. El registro bajo condiciones de producción severas se ha hecho posible y son conocidos ciertos requisitos; para evitar daños, todos los sensores en el molde deben ser instalados de tal forma que ningún conector quede fuera del contorno de la línea de partición.

En la información proporcionada por la curva de presión de la cavidad es posible diferenciar tres etapas fundamentales: llenado de la cavidad (etapa de inyección), compresión del fundido (etapa de compresión) y llevar a cabo la solidificación del material bajo presión (etapa de sostenimiento) (fig. 4).

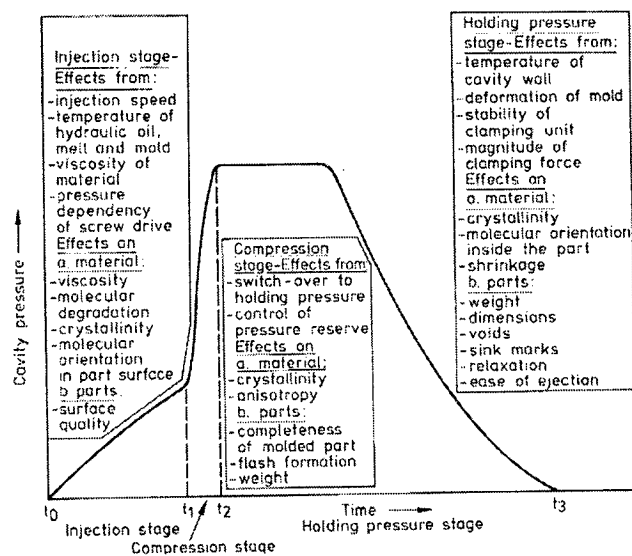


FIG. 4

Estas tres etapas pueden ser relacionadas a ciertos efectos así como a criterios de calidad<sup>10</sup>. La etapa de inyección primeramente afecta la apariencia de la



pieza moldeada, mientras que la presión de sostenimiento controla sobre todo las dimensiones. En una grafica de presión contra tiempo, se puede ver que la presión de inyección tiene la función de vencer la resistencia del flujo desde la boquilla hasta la cavidad, pero es poco importante para la calidad de la pieza moldeada, solo en función al direccionamiento de la estructura molecular. La compresión y la presión de sostenimiento son considerablemente mas significantes y efectivas sobre todo para materiales de larga longitud de flujo y materiales cristalinos.

El perfil de presiones también proporciona información sobre posibles errores en el proceso (fig. 5). Un pico de presión muy alto en la etapa de compresión puede causar serias dificultades y esto puede ser resultado de una programación incorrecta o de un funcionamiento poco confiable del cambio de presión de inyección a una presión de sostenimiento muy baja, lo que podría causar rebaba o sobreempaquetamiento; esto nos lleva a tener diferencias considerables en el peso y las dimensiones de las piezas moldeadas principalmente en la dirección de apertura del molde y no hay una forma confiable de controlar el pico de presión, por lo que esto debe ser evitado con la selección apropiada del punto de cambio de presión de inyección a presión de sostenimiento.

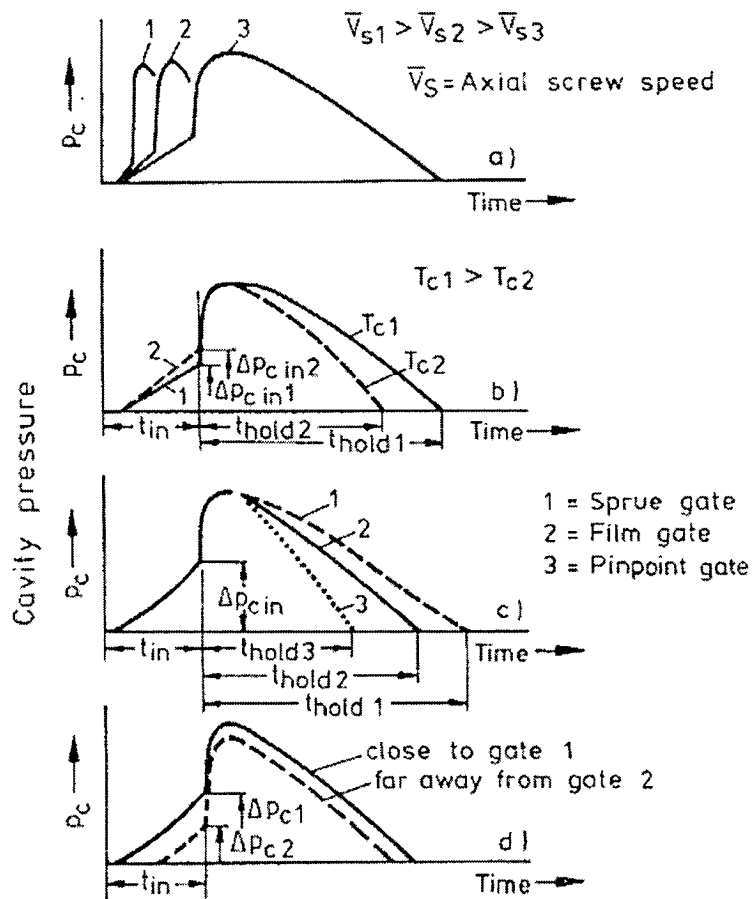
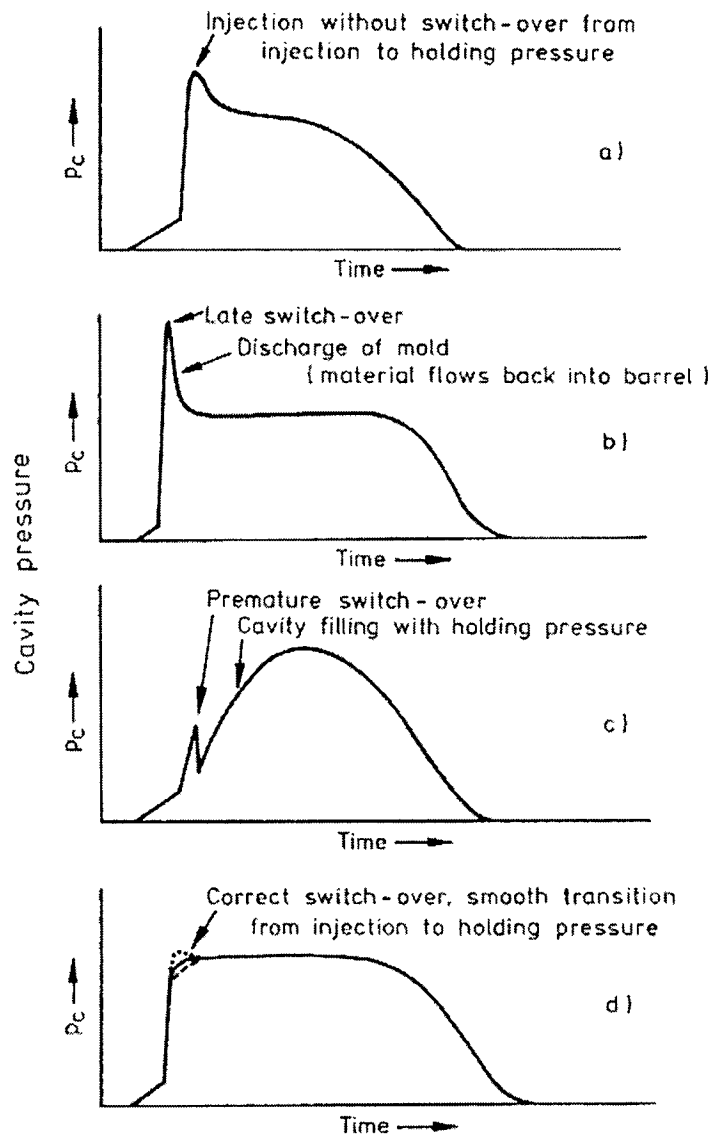


FIG. 5

En una curva de presiones se puede observar los efectos de diferentes parámetros de proceso en la presión de la cavidad (fig. 6). Diferentes velocidades axiales de tornillo dan como resultado cambios notables en la acumulación de presión durante la etapa de compresión; una temperatura del molde alta mejora la propagación de la presión en el molde; el diseño de la entrada tiene una influencia significativa en la presión de sostenimiento durante la etapa de enfriamiento; y por supuesto existe un diferencial de presión en la cavidad entre las áreas cercanas a la entrada y cerca del extremo de la trayectoria del flujo<sup>11</sup>.



**FIG. 6**

La operación sin el cambio de presión de inyección a presión de sostenimiento es práctica si la presión final necesaria es muy cercana a la presión de llenado, lo cual es un caso común para entradas pequeñas y con partes que tienen una relación longitud/espesor grande.

Con entradas grandes, usualmente se utiliza una velocidad de inyección relativamente grande, por lo que aumenta el riesgo de un cambio de presiones retardado con el subsiguiente sobreempaquetamiento; además del efecto adverso en las dimensiones y en la formación de rebaba, el cambio de

presiones retardado es la principal causa de los daños al molde por deformación de la cavidad, las entradas y de sobrecargar la unidad de cierre, el retraso puede dar como resultado en un daño permanente de las barras guía e incluso una falla en la longitud de la carrera.

Una orientación indeseada y desfavorable puede ser causada por un flujo de retroceso del fundido después de una transición retardada a una presión de sostenimiento baja, lo mismo ocurre si la presión de sostenimiento es retirada antes de que la entrada haya solidificado.

Un retroceso de la presión nos indica un cambio de presiones adelantado, debido a que el balance del proceso de llenado se lleva a cabo bajo la presión de sostenimiento, la cual es demasiado baja para un llenado apropiado y en consecuencia se reduce la velocidad de inyección. Al momento del cambio de presiones el flujo puede estancarse brevemente lo cual produce marcas superficiales.

Los cuatro métodos principales para determinar el cambio de presión de inyección a presión de sostenimiento son dependientes de: el tiempo, el recorrido del flujo, la presión de la cavidad y la fuerza de cierre<sup>12</sup>.

En el cambio de presiones dependiente del tiempo, se da una señal para que sea lanzada en un tiempo predeterminado después del inicio de la inyección; este método no toma en cuenta la presión del fundido al frente del tornillo ni su viscosidad, la exactitud de la alimentación o las variaciones en la presión hidráulica, lo cual puede dar como resultado cambios en la posición del tornillo y consecuentemente en los movimientos correspondientes, así como la variación en la velocidad axial del tornillo. El resultado final es una gran variación de los criterios de calidad, particularmente en las dimensiones y el peso de la pieza moldeada; por esta razón como un principio general no es

recomendable un cambio de presiones dependiente del tiempo ya que sin lugar a duda es la peor de las opciones.

El cambio de presiones dependiente del recorrido de flujo es el método mas utilizado y que ha probado ser de utilidad. La señal para el cambio de presiones es lanzada por el limite del cambio de la posición de la presión de sostenimiento; en cuanto al movimiento de la inyección, este es en gran parte constante, por lo tanto el cambio de presiones puede ser tomado para llevarse a cabo cada vez al mismo nivel de llenado de la cavidad. Este método puede llegar a ser problemático si el movimiento de la presión de sostenimiento es extremadamente corto, aquí se corre el riesgo de que las pequeñas variaciones puedan evitar que el cambio actué; en estos caso es mejor no planear un cambio de presiones. Las variaciones en la alimentación, las inconsistencias en los límites de los cambios, el mal funcionamiento de la válvula antiretorno y las diferencias en la viscosidad del fundido también causan problemas con este método.

En años recientes, el cambio de presiones dependiente de la presión ha sido utilizado satisfactoriamente<sup>13</sup>, aun bajo condiciones de producción extremas. La presión en la cavidad realiza el cambio de presiones tan pronto como la presión preseleccionada ha sido alcanzada. La ventaja esta basada en que se proporcione una señal confiable de una magnitud absoluta de presión a la cual el cambio de presiones es más efectivo. La influencia del movimiento del tornillo y la función de la válvula antirretorno son eliminadas; este método de todas formas, como los dos métodos anteriores no pude compensar las variaciones del fluido hidráulico, del fundido y del molde, o los cambios en la velocidad de inyección.

Entre mas rápido sea el incremento de la presión durante la etapa de compresión, mas efectivo será el método, porque en cada caso un cambio de presiones exacto y oportuno es obligatorio para evitar el pico de presión.

Desarrollos recientes<sup>13</sup> indican que la acumulación de presión en la cavidad durante las etapas de compresión y sostenimiento pueden medirse indirectamente. El método de cambio de presiones dependiente de la fuerza de cierre, esta basado en determinar las fuerzas reactivas en las platinas de la maquina o en las barras guía de la unidad de cierre al inicio de la etapa de inyección. El ajuste del molde es tomado como totalmente rígido. La fuerza de cierre puede ser medida en las barras guía o en las tuercas de las barras guía. Si se instalan dispositivos de medición permanentemente, se ha encontrado un método rentable para determinar el punto de cambio de presiones preciso, el intercambio frecuente de transductores de presión de un molde a otro puede ser eliminado y la posibilidad de dañarlos se hace mas remota.

### **2.1.3 PRESION DE SOSTENIMIENTO.**

La presión de sostenimiento es la presión ejercida en la pieza moldeada durante una etapa de presión secundaria. Como ya se ha mencionado, raramente se encuentra una relación entre la programación de la presión hidráulica y la presión efectiva en el molde<sup>14</sup>.

La magnitud y duración de la presión de sostenimiento son de mayor importancia para la exactitud dimensional y la calidad del acabado de la pieza moldeada, ellas determinan que tan bien es duplicada la superficie de la cavidad; mientras que el nivel de presión óptimo puede ser fácilmente establecido controlando las dimensiones u observando que desaparezcan las marcas. La presión de la cavidad podría proporcionar información real, aunque solo si esta puede ser medida; mientras que el bebedero, la entrada o cualquier otra restricción no ha solidificado, los cambios en magnitud y duración de la presión de sostenimiento podrían tener un efecto en la presión de la cavidad, ya que después de que la entrada ha solidificado no se ejerce ninguna influencia. Por ejemplo para un cierto material y molde la entrada

solidifica después de ocho segundos, por lo que extender la presión de sostenimiento mas allá de este tiempo no afecta la calidad de la pieza, pero si en una pérdida de energía.

Sin la capacidad de medir la presión de la cavidad, hay otra forma de determinar el tiempo de presión de sostenimiento máximo efectivo monitoreando sistemáticamente el peso de la pieza moldeada con respecto al tiempo de presión de sostenimiento ya que después del tiempo máximo efectivo ya no hay incremento en el peso de la pieza. La presión de sostenimiento en el molde difiere por supuesto de lugar a lugar, porque hay una perdida de presión a lo largo de la trayectoria del flujo.

## **2.2 TEMPERATURA.**

La temperatura del fundido, del fluido hidráulico y sobre todo del molde, son de gran importancia para mantener propiedades y dimensiones constantes de las piezas moldeadas.

### **2.2.1 TEMPERATURA DEL ACEITE HIDRAULICO.**

La perdida de energía en las válvulas, así como la eficiencia de la bomba dependen de la viscosidad del fluido hidráulico, por lo tanto todos los movimientos de la maquina de moldeo por inyección, los cuales no tienen una presión compensada, son influenciados por la temperatura del aceite; consecuentemente es necesario tener un control que prevenga un aumento de temperatura, una vez que la temperatura de operación ha sido alcanzada, y si se tiene control de la temperatura del aceite, se moldearan partes de calidad.

### **2.2.2 TEMPERATURA DEL FUNDIDO.**

Las propiedades termodinámicas de plástico fundido como viscosidad, entalpía y volumen específico, cambian de forma simultánea con la temperatura del fundido. Veamos principalmente que es lo que pasa en el molde, la presión en el molde disminuye con el aumento de la temperatura del fundido, la solidificación de la entrada cambia a periodos de tiempo mas cortos, esto significa que el tiempo durante el cual la formación de la pieza puede ser influenciada es acortado, pero esto también significa una reducción en el tiempo de ciclo. Dependiendo de la viscosidad del fundido se puede dar un incremento en el tiempo de inyección, si esto puede ser evitado, podría ser usado un incremento automático o controlado de la presión hidráulica. Este ejemplo debería soportar la necesidad de una temperatura del fundido constante, aun si solo se puede encontrar un pequeño efecto con plásticos cristalinos.

### **2.2.3 TEMPERATURA DEL MOLDE.**

La temperatura de la pared de la cavidad es de mayor importancia para la calidad de la pieza moldeada, la economía del proceso, la exactitud de las dimensiones y la repetitibilidad<sup>15</sup>. Es esta temperatura la que, además de las características térmicas del material, determina el tiempo de enfriamiento; cabe mencionar que la temperatura de la superficie de la pared del molde es la que se toma en cuenta cuando se menciona la temperatura del molde. Con piezas delgadas menores a 2.5 mm de espesor de pared, se nota un claro incremento en la presión hidráulica de forma temprana durante la etapa de inyección, esto se puede atribuir a un incremento en la viscosidad por el efecto del enfriamiento de la pared de la cavidad y la disminución del espesor del núcleo caliente del fundido. La magnitud de la presión máxima de la cavidad cerca de la entrada es altamente afectada por la temperatura del molde, pero la presión de sostenimiento es como un resultado de los cambios en el proceso de enfriamiento.

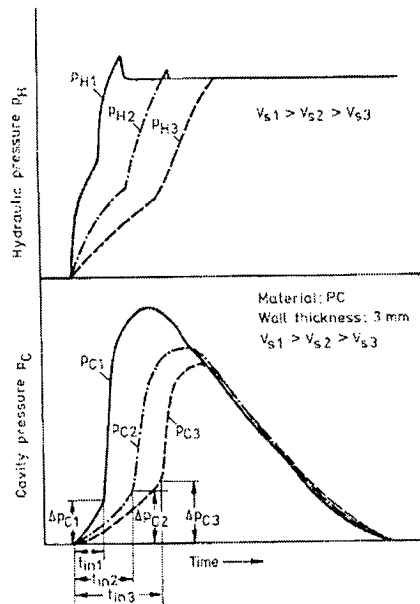


### 2.3 VELOCIDAD.

La única velocidad que es importante en el proceso de moldeo por inyección es la velocidad de avance del tornillo<sup>16</sup>, la velocidad axial del tornillo, la cual solo es efectiva durante la etapa de inyección. Las diferentes reacciones entre de las presiones hidráulica y de la cavidad nos hacen ver mas claro la poca información que proporciona la presión de hidráulica sobre el proceso. En una curva de presión contra tiempo, a diferentes velocidades del tornillo, se puede observar que el tiempo de inyección es inversamente proporcional a la velocidad del tornillo y también se puede ver que la presión hidráulica incrementa rápidamente con el aumento de la velocidad del tornillo (fig. 7); esto es debido al aumento de la resistencia al flujo en la boquilla y en la entrada. Por otro lado la pérdida de presión al llenar la cavidad, que es medida cerca de la entrada, incrementa con la disminución de la velocidad de inyección, reflejando el efecto del proceso de enfriamiento, esto ultimo causa un incremento en la viscosidad del fundido en la cavidad durante la inyección y una formación más rápida de la superficie sólida, lo que reduce el espesor de canal disponible; esto a su vez impide la transmisión de presión, lo que se refleja por diferentes niveles de presión máxima en la cavidad. Si esto afecta la adaptación de la superficie de la cavidad, entonces la presión de sostenimiento deberá ser aumentada considerablemente para compensar una inyección lenta.

Los parámetros mencionados anteriormente son los que producen las variaciones o que tienen un efecto sobre las piezas moldeadas.

Dicho efecto trata de ser disminuido con el uso del proceso de Respuesta Térmica Rápida.



**FIG. 7**

## **2.4 EFECTO DE LA TECNICA DE MOLDEO EN LAS PROPIEDADES.**

### **2.4.1 ESTABILIDAD DIMENSIONAL.**

Los parámetros del proceso de moldeo por inyección, en mayor o menor medida tienen un efecto en las dimensiones de la pieza moldeada, pero si modificamos uno o más de estos parámetros simultáneamente, el efecto tiende a tener una significancia mayor. Es por eso que cuando tratamos de corregir una falla, dichos parámetros se deben modificar individualmente y de forma progresiva, a fin de detectar el parámetro que está causando el mayor efecto en la pieza moldeada. Por ejemplo, si se aumenta la temperatura del molde, al final del ciclo la temperatura que tiene que ser liberada de la pieza será mayor y el ciclo tendrá que aumentarse; si el tiempo de ciclo no se incrementa, el calor atrapado dentro de la pieza será demasiado, por lo que al irse eliminando ese calor hacia el medio ambiente, la pieza tenderá a encogerse.

Todos los parámetros mencionados anteriormente tienen un efecto directo o indirecto en las dimensiones de la pieza moldeada, su influencia en términos generales ha sido indicada en la siguiente tabla:

**TABLA 1. Efecto de los parámetros del proceso en las dimensiones de la pieza.**

PARAMETRO DE PROCESO	EFECTO	DIMENSIONES DE LA PIEZA
INCREMENTO DE LA TEMPERATURA DEL FUNDIDO	(a) INCREMENTO DEL VOLUMEN (b) MEJOR TRANSMISION DE LA PRESION	(a) ↓ (b) --
INCREMENTO DE LA TEMPERATURA DEL MOLDE	MAYOR LIBERACION DE TEMPERATURA	↓
INCREMENTO DE LA VELOCIDAD DE INYECCION	MEJOR TRANSMISION DE LA PRESION DURANTE LA ETAPA DE SOSTENIMIENTO	↑
INCREMENTO DE LA PRESION DE SOSTENIMIENTO	MEJOR COMPENSACION DE LA CONTRACCION DURANTE LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO; MEJOR COMPRESION DEL FUNDIDO	↑
INCREMENTO DEL TIEMPO DE SOSTENIMIENTO	LO MISMO QUE EL ANTERIOR ANTES DE QUE LA ENTRADA HAYA SOLIDIFICADO	↑
	DESPUES DE QUE LA ENTRADA HA SOLIDIFICADO	---
INCREMENTO DE LA DEFORMACION DEL MOLDE POR LA PRESION EN LA CAVIDAD	EMPACAMIENTO EN AREAS DE GRAN DEFORMACION AFECTANDO LAS DIMENSIONES POR LOS VENTEOS	↑
GEOMETRIA DE LA ENTRADA: INCREMENTO DE LA SECCION TRANSVERSAL DE LA ENTRADA	EFECTOS INDIRECTOS, (COMO VELOCIDAD DE INYECCION, PRESION DE SOSTENIMIENTO, TEMPERATURA DEL FUNDIDO)	↑

#### 2.4.2 PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS.

Las propiedades físicas y mecánicas de las piezas moldeadas, particularmente de las hechas con termoplásticos, no solo dependen de la estructura química

del material y de sus correspondientes propiedades. Las condiciones del proceso ejercen una influencia considerable como un efecto inevitable o seleccionado. Propiedades de uso como la dureza, resistencia a la tensión, rigidez, distorsión por temperatura, estabilidad dimensional, o la tendencia a la fractura por esfuerzo pueden variar en mayor o menor medida en el mismo material, o puede ser modificado selectivamente dependiendo de la técnica de moldeo. Estos factores, los cuales determinan la calidad de la pieza, con frecuencia no se pueden ver de forma exterior, pero son reflejados en la estructura interna de la pieza moldeada<sup>18</sup>.

Las características estructurales más importantes del termoplástico dependiente de las condiciones de moldeo son:

- Orientación molecular
- Esfuerzos residuales
- Estructura cristalina y grado de cristalinidad
- Orientación de las cargas

Los cambios posibles en la estructura molecular por reducción de la longitud de cadena o degradación no serán tratados aquí.

#### **2.4.2.1 ORIENTACION MOLECULAR.**

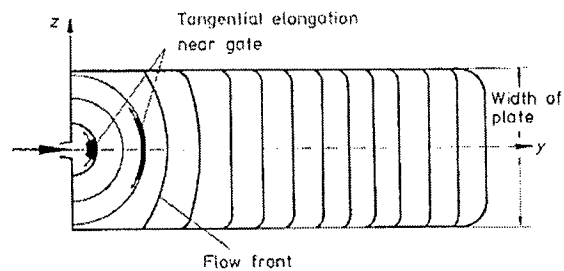
La orientación molecular es la alineación de las cadenas de polímero en una dirección en particular. En el plástico fundido, los segmentos de cadena se mueven al azar quedando de forma irregular. Cuando el fundido fluye durante la inyección las cadenas son forzadas en una dirección y toman una orientación en particular.

La velocidad de corte en los plásticos fundidos es especialmente alta en canales estrechos y en las áreas cercanas a la pared de la cavidad<sup>19</sup>.

El fundido tiende a pegarse a la pared de la cavidad mientras que la parte del centro fluye rápidamente, cuando el fundido comienza a detenerse, las cadenas tratan de recuperar su acomodo irregular al azar, este proceso es llamado relajación; la velocidad de relajación depende de la estructura del material, sus propiedades y el uso de aditivos, así como de la temperatura y la presión. Un peso molecular bajo, una alta temperatura y una baja presión promueven velocidades de relajación rápidas.

De cualquier forma, el plástico fundido se relaja en unos cuantos segundos a la temperatura normal del proceso de inyección. Por otro lado, usualmente solo le toma al material una fracción de segundo solidificar, especialmente en las capas superficiales y una parte considerable de la orientación producida durante la inyección queda congelada dentro. Con la disminución de la temperatura, la velocidad de relajación disminuye rápidamente. Debajo de la temperatura de transición vítrea prácticamente no existe relajación, siempre y cuando las piezas no sean expuestas de nuevo a altas temperaturas.

Debido a que el proceso de relajación de piezas de plástico orientadas siempre es acompañado por una contracción, el grado de contracción sirve como una medida del grado de orientación. Alrededor del punto de inyección, el fundido es sometido a esfuerzos de corte radiales y a elongación tangencial del frente de flujo (fig. 8)<sup>20</sup>. La dirección radial es llamada generalmente dirección del flujo, la cual no es idéntica a la trayectoria real de una partícula del fundido, pero describe la dirección principal del flujo de material. A cierta distancia desde la entrada no hay elongación tangencial en el caso mostrado en la figura, y las partículas del fundido son orientadas principalmente por esfuerzos de corte en la dirección del flujo.



**FIG. 8**

### 2.4.2.2 ESFUERZOS RESIDUALES.

Los esfuerzos residuales o esfuerzos internos son esfuerzos mecánicos que están presentes en una pieza moldeada en ausencia de una carga externa; son resultado de los cambios de la posición de equilibrio de los átomos y la distorsión de los ángulos de valencia en las cadenas, así como de los cambios de distancia entre segmentos de cadena<sup>21</sup>. Las deformaciones que causan los esfuerzos residuales son de una naturaleza elástica, el esfuerzo relacionado con ellas es menor al esfuerzo de cedencia si no se ha alcanzado el esfuerzo de ruptura.

Los esfuerzos en una pieza moldeada están normalmente en equilibrio, si hay esfuerzos de compresión en un lado, debe haber esfuerzos de tensión en el otro, si los esfuerzos residuales no están balanceados todavía después del enfriamiento en el molde, la pieza se deformará.

En contraste con la orientación, los esfuerzos residuales pueden causar fallas (distorsión, fractura) en una pieza sin una carga externa; en complemento, el valor de la carga permisible tiene que ser correcto ya que el esfuerzo residual actúa en la misma dirección que la carga.

Los esfuerzos residuales son causados generalmente por velocidades de enfriamiento diferentes en las diferentes capas de la pieza, el

enfriamiento y solidificación rápido de la capa superficial forma una cáscara rígida la cual retiene todavía calor en el interior durante el proceso de enfriamiento, esto da como resultado esfuerzos de tensión en el interior y esfuerzos de compresión en la capa externa.

Un pico de presión durante la compresión y una presión de sostenimiento excesiva puede causar empaquetamiento y sobrecarga en la sección central de la pieza, especialmente si una entrada grande permite a esta presión actuar durante más tiempo<sup>22</sup> y después la pieza es extraída bajo presión interna, esto causa altos esfuerzos de tensión en la superficie los cuales pueden tener como consecuencia una fractura de la pieza, aunque en muchos de los casos la fractura puede venir después, particularmente bajo la influencia de un medio químico adverso; un efecto similar se puede dar por un molde que haya sido deformado durante la etapa de sostenimiento, durante el enfriamiento esta presión retrocede pero la pieza moldeada continua bajo presión, la contracción es totalmente compensada o sobre compensada y se puede dar el agrietamiento.

### **2.4.3 CRISTALINIDAD Y ESTRUCTURA.**

Los plásticos cristalinos poseen la característica de formar una estructura ordenada de cadenas de tamaño microscópico, los cuales no pueden ser observados bajo un microscopio de luz, pero fácilmente forman superestructuras de forma esferulítica, las cuales pueden ser reconocidas con el aumento adecuado. Un alto grado de cristalinidad de un plástico da como resultado una gran dureza, resistencia y fragilidad; el grado de cristalinidad depende principalmente de la estructura molecular pero también puede ser influenciado por el procesamiento y el tratamiento post-moldeo. La temperatura de la superficie de la cavidad tiene el mayor efecto ya que las velocidades de enfriamiento altas dan como resultado una menor

cristalinidad. Las piezas enfriadas rápidamente tienen una transparencia regular, en esos casos es de esperarse que se de una cristalización posterior, lo cual causa un cambio en las propiedades y las dimensiones después de un cierto tiempo; exponer las piezas a una temperatura elevada puede acelerar la cristalización posterior y someter el fundido a esfuerzos de corte a baja temperatura también afecta la cristalinidad. La orientación resultante promueve la formación de esferulitas, como consecuencia, un molde con una baja temperatura por un lado y un fundido sometido a esfuerzos de corte a baja temperatura por el otro puede dar como resultado una estructura muy heterogénea y estas diferencias pueden estar relacionadas a las áreas cercanas o lejanas de la entrada.<sup>23</sup>

Como los efectos nocivos del proceso son generalmente la causa de piezas defectuosas, se tiene que tomar como regla general que entre mas homogéneo sea la estructura mejor será el comportamiento mecánico.

El proceso de RTR nos puede servir para disminuir o eliminar los efectos causados por las variaciones en los parámetros del proceso, en este capítulo fueron descritos cada uno de los parámetros que intervienen en el proceso de moldeo por inyección y su influencia sobre las características que va a presentar la pieza moldeada en cuanto a dimensiones y propiedades mecánicas.

Las variaciones en los parámetros de proceso van a provocar variaciones en las características de la pieza moldeada, por lo que se va a ver afectada la calidad de la misma lo que podría provocar rechazos. Una de las bondades del proceso de RTR es que proporciona uniformidad a las piezas, con lo que se garantiza una repetitibilidad de las piezas moldeadas, evitando variaciones. El proceso de RTR proporciona esta uniformidad a las piezas debido a que en cada ciclo realiza el mismo calentamiento y enfriamiento del molde.



### **3. TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA ETAPA DE ENFRIAMIENTO DEL MATERIAL PLASTICO EN LA CAVIDAD.**

Para calentar el plástico desde que está en forma de gránulos hasta la temperatura a la cual es convertido en un fluido viscoso para que pueda ser inyectado, se tiene que agregar una cierta cantidad de energía, lo cual se realiza en el barril de la maquina de inyección. La energía es suministrada principalmente por el trabajo del tornillo, el cual transforma la energía mecánica en calor y por el calor proporcionado por los calentadores alrededor del barril.

El calor proporcionado al plástico durante la plastificación debe ser removido dentro del molde, esto se lleva a cabo por el enfriamiento del molde durante el ciclo.

El calor es extraído del molde durante todo el tiempo del ciclo, no solo durante el tiempo de enfriamiento, lo que puede ser explicado como sigue<sup>24</sup>: cuando el molde esta montado sobre la maquina y conectado a los servicios se encuentra a temperatura ambiente, conforme la alimentación del enfriamiento es encendida, antes de que inicie la inyección, el molde alcanzará gradualmente la temperatura del refrigerante (mas frío o mas caliente que la temperatura ambiente) y después se mantiene a esta temperatura hasta que el plástico caliente se inyecta.

Durante el ciclo de inyección la temperatura del molde incrementara mientras que el enfriamiento continúe removiendo calor del mismo; hasta que la inyección sea completada, no se dejara de agregar calor al molde, pero el enfriamiento continua removiendo calor hasta que se de la siguiente inyección. Es importante ver que una vez que el molde esta en ciclo, la cantidad de calor entrando al molde es la misma que el calor removido de el.

El calor no solo es removido por el enfriamiento, si no que en parte también por los productos, ya que estos dejan el molde mientras aun se encuentran calientes, con lo que se

llevan una cierta cantidad de calor, el cual será radiado al medio ambiente, de igual forma una pequeña cantidad de calor es radiada por la superficie del molde<sup>25</sup>.

Si el tiempo de ciclo es demasiado corto para remover el calor, la temperatura del molde irá incrementando gradualmente y eventualmente estará demasiado caliente, provocando piezas defectuosas, por lo que deberá ser agregado un mayor tiempo de enfriamiento.

Si el tiempo de ciclo es demasiado largo, desperdicia tiempo por lo que el ciclo estará operando de forma ineficiente y el tiempo de enfriamiento deberá ser reducido.

Para acortar el tiempo de ciclo existen varias opciones disponibles las cuales son ilustradas en las figuras 9 a 12 las cuales son descritas en ejemplos esquemáticos de cuatro casos de ciclos de moldeo. La temperatura de enfriamiento es la misma para los cuatro ejemplos, en donde se emplean las siguientes variables:

t Tiempo total de ciclo

A Tiempo de cierre del molde

B Tiempo de inyección

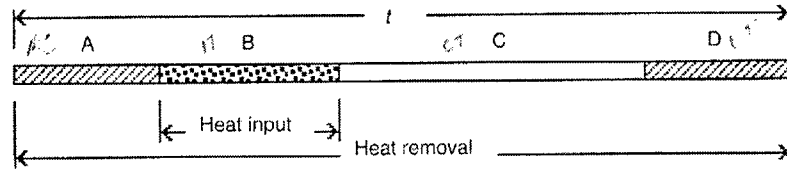
C Tiempo de enfriamiento

D Tiempo de apertura del molde y extracción de la pieza.

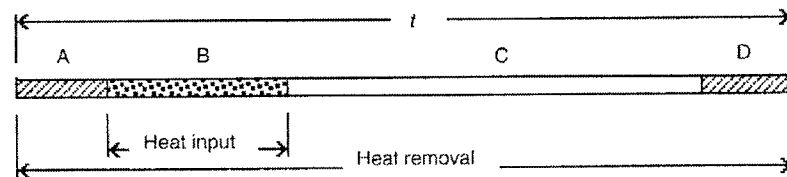
Dependiendo de la maquina o de la velocidad de cierre programada, B depende del material plástico, de la máquina y del molde. C depende del molde (distribución del enfriamiento, selección de los materiales del molde) y del plástico moldeado. D depende de la velocidad programada en la maquina y del método de extracción. En las figuras se asume que la extracción se completa durante la apertura del molde.

En la figura 9, A y D se muestran relativamente largas en una máquina de menor velocidad, B y C se muestran a cierta longitud seleccionada. En la figura 10 se muestra el mismo molde pero en una maquina de mayor longitud, A y D son mas cortos, el tiempo de enfriamiento C debe ser extendido para permitir un tiempo suficiente para remover el calor

durante la duración del ciclo, el cual debe permanecer sin cambios, vemos que no hay una ganancia en el tiempo de ciclo por seleccionar una maquina mas rápida.

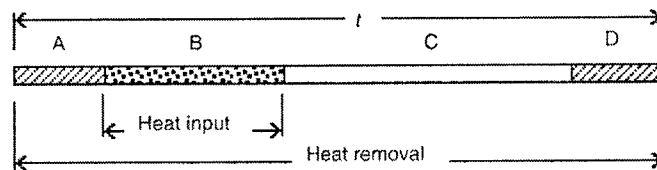


**FIG. 9**



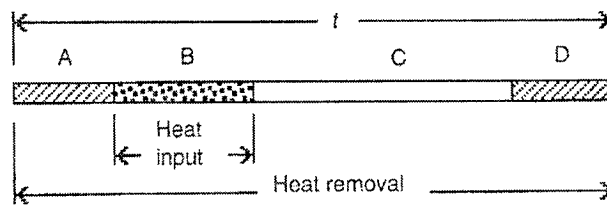
**FIG. 10**

En la figura 11 se muestra de nuevo el mismo molde pero con una distribución del enfriamiento mejorada, C es mas corto que en la figura anterior lo que da como resultado una mayor eficiencia de enfriamiento por lo que  $t$  es reducido.



**FIG. 11**

En la figura 12 se sigue mostrando el mismo molde, colocado ahora en una maquina con una mejor unidad de inyección, la cual permite inyectar a temperaturas mas bajas, debido a esto el calor requerido es menor y por consiguiente el enfriamiento necesario es reducido en gran medida por lo que C y  $t$  son reducidas<sup>26</sup>.



**FIG. 12**

Los comentarios generales sobre las figuras incluyen los tiempos de cierre y apertura, tiempo de inyección y tiempo de enfriamiento. Los tiempos de cierre y deben ser los menores posibles, como sea, el tiempo de apertura esta limitado por el tiempo requerido por la pieza para ser extraído y para limpiar el molde.

El tiempo de inyección es afectado por el tamaño del disparo, la viscosidad del plástico, la unidad de inyección utilizada y el sistema de corredores. El tamaño de disparo depende de la masa del plástico, entra mayor sea la masa, mas tiempo será necesario para inyectarlo. La viscosidad y otras características difieren entre plásticos y aditivos, la selección de un grado diferente y/o suministro del mismo material permite la reducción de la temperatura de inyección.

Debe ser seleccionada la unidad de inyección que mejor satisfaga a cada molde, las presiones y velocidades de inyección altas ayudan a disminuir el tiempo de inyección. Un diseño apropiado del tornillo permite una plastificación con mayor eficiencia y rapidez.

También debe ser seleccionado el sistema de corredores más eficiente y económico, el sistema de colada fría necesita mas tiempo porque una mayor cantidad de material entra al molde y por lo tanto tiene que ser removido mas calor; además, la resistencia al flujo del material en los corredores reduce la presión que lo empuja a través de la entrada cuando se llena la cavidad. Siempre que la configuración de una pieza y los materiales para moldes lo permitan, son utilizados los sistemas de corredores calientes, permitiendo economías.

Desde el principio de este capítulo, a quedado claro que mientras los tiempos de cierre y apertura del molde y los tiempos de inyección sean reducidos, se mejora la eficiencia del

sistema de enfriamiento debido a que comparativamente esta disponible un tiempo de ciclo menor en relación con el tiempo de inyección. Esto es crítico en el moldeo de artículos de pared delgada, en donde se utilizan máquinas de alta velocidad que tienen un tiempo de inyección pequeño, aunque estos productos son normalmente muy ligeros, la masa total por unidad de tiempo es muy alta, por lo que el molde requiere un enfriamiento alto<sup>27</sup>.

En algunas aplicaciones, los tiempos de ciclo muy largos pueden ser compensados cambiando una parte del tiempo de enfriamiento como la carrera simultáneamente con el siguiente ciclo. En máquinas con platinas oscilatorias o con torretas, la pieza moldeada es enfriada donde puede ser removido de la cavidad, pero todavía no lo suficiente para ser extraído por el núcleo; el núcleo del plato que todavía tiene la pieza es movido a otra posición y un plato alternativo con un núcleo idéntico se coloca en el molde por lo que el siguiente ciclo de moldeo puede empezar, el enfriamiento de la pieza en el núcleo del plato fuera del molde continúa durante el ciclo hasta que la pieza puede ser extraída.

En un equipo multiestaciones varias cavidades y núcleos continúan cerrados juntos, se mueven de la estación de inyección mientras que un nuevo conjunto de cavidades y núcleos entran a esta estación, el molde se abre al final del ciclo de enfriamiento y la pieza es extraída; esto requiere un cierto número de moldes, algunas veces llegan a ser treinta organizados de forma circular.

Existen otros métodos de post-moldeo, en donde las piezas son extraídas todavía calientes (pero que se pueden manipular), algunos funcionan retirando la pieza moldeada con un extractor y colocándola en un enfriador o el extractor por sí mismo puede proporcionar el enfriamiento adicional.

### **3.1 INTERCAMBIO DE CALOR.**

El problema del enfriamiento de un molde está determinado por:

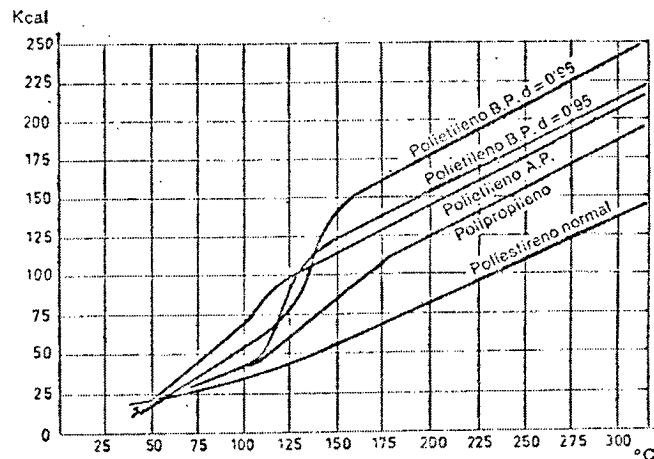
- a) Un intercambio de calor entre el material plástico y el acero del molde.

- b) Un intercambio de calor entre el acero y el líquido refrigerante.
- c) Disipación del calor hacia la atmósfera.

El intercambio de calor entre el material plástico y el molde depende de:

1. La masa de la pieza que se va a moldear.
2. la diferencia de temperaturas entre la materia plástica y la superficie del molde.  
Teóricamente, la temperatura final del material es igual a la del molde.
3. De la naturaleza de la materia a moldear, es decir, de su peso específico, calor específico y calor de solidificación.

En la grafica de la figura 13 se puede determinar para varios de los polímeros más comunes la cantidad de calor perdida durante su enfriamiento entre dos temperaturas determinadas. En ella podemos observar la existencia de un gran calor de solidificación para el polietileno de baja presión.



**FIG. 13**

El poliestireno, por ser un material amorfo, no presenta calor de fusión. Los puntos marcados en el gráfico limitan aproximadamente los intervalos de temperatura a la cual se transforma el material por inyección.

Fuera de la zona de solidificación, la variación del calor en función de la temperatura esta representado por una recta, pero los puntos son diferentes antes y después de la zona de fusión o de solidificación, debido a la variación de calor específico con la temperatura.

El intercambio de calor entre el material plástico y el acero del molde es rápido, ya que generalmente los objetos moldeados tienen un espesor reducido. Sin embargo, el tiempo de enfriamiento depende del espesor de la pieza y de la naturaleza del material.

La temperatura de la superficie no puede ser constante. En el momento de la inyección aumenta rápidamente en contacto con el material caliente, después desciende según la eficacia del fluido refrigerante. La temperatura de la superficie del molde disminuye aun más durante los periodos de apertura y cierre, volviendo a subir en el siguiente ciclo. Por lo tanto, si representamos estas oscilaciones en una grafica el perfil del mismo tomara un aspecto de sierra dentada (fig. 14) y la temperatura del molde será la media de los máximos y mínimos hallados. Para el estudio de las condiciones de refrigeración del molde, esta temperatura media deberá ser considerada como una constante en la superficie de la cavidad del molde.

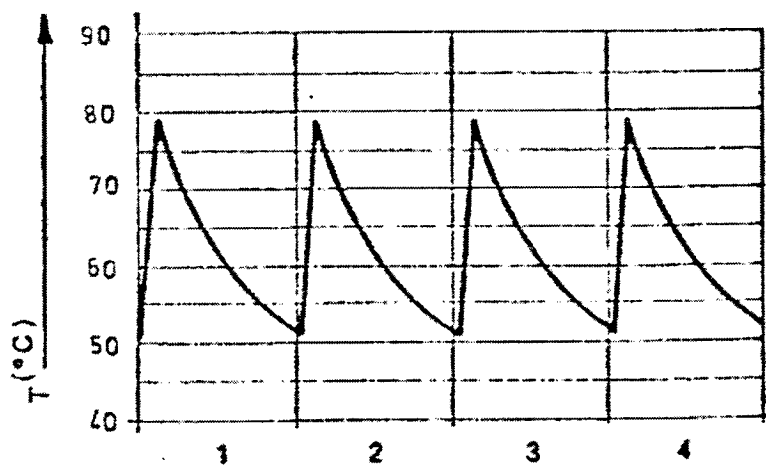


FIG. 14

### 3.1.1 PRINCIPIOS BASICOS DE CALOR, TEMPERATURA Y ENERGIA.

#### CALOR

El calor es la energía en movimiento de un cuerpo caliente a uno frío, la temperatura es la propiedad de un cuerpo que determina la dirección del flujo de calor desde o hacia el cuando es puesto en contacto con otro cuerpo<sup>28</sup>.

El calor es medido en calorías (cal) o en unidades térmicas británicas (BTU por sus siglas en ingles); una caloría es la cantidad de calor requerida para incrementar la temperatura de un gramo de agua en un grado centígrado a presión atmosférica. La temperatura es medida en grados, de preferencia centígrados (°C), por lo que la cantidad de calor medido en calorías no se debe confundir con temperatura, la cual es medida en grados, en otras palabras, se incrementa la temperatura desde un valor bajo  $T_1$  hasta un valor mas alto  $T_2$  agregando calor (un cierto numero de calorías).

La diferencia de temperaturas es expresada como  $\Delta T$  en °C, lo mismo pasa con el enfriamiento el cual retira un numero de calorías del plástico (transfiriéndolo al molde y al refrigerante) para reducir su temperatura, esta cantidad de calor incrementa la temperatura del refrigerante y el aire alrededor del molde y de la maquina.

La energía es la capacidad de hacer trabajo y el calor es una forma de energía, algunas formas de medirla son hp/hora, kw/hora etc.

La cantidad de calor (q) fluyendo de un lugar a otro es proporcional a 1)  $\Delta T$ , 2) la conductividad térmica y 3) el área de sección transversal a través de la cual fluye y es inversamente proporcional a la distancia del flujo, esto se puede expresar en la ecuación siguiente:

$$q = f \text{ ;Error!}$$



En un molde, el calor fluye del plástico fundido hacia el molde, del molde hacia el refrigerante y en menor cantidad hacia el aire y hacia las platinas.

### **DIFERENCIAS DE TEMPERATURA.**

El diseñador de moldes se concentra sobre tres diferentes  $\Delta T$ 's: la del plástico desde la inyección hasta la extracción, la del agua de enfriamiento desde que entra hasta que sale del molde y la que hay entre el plástico y el medio refrigerante hasta que el enfriamiento termina<sup>29</sup>.

La  $\Delta T$  del plástico desde la inyección hasta la extracción depende del material, la forma de la pieza y de las condiciones de moldeo. Por ejemplo, secciones transversales pequeñas pueden requerir que el plástico sea calentado a una mayor temperatura para reducir su viscosidad y para permitir que el material fluya más fácilmente.

La  $\Delta T$  del agua de enfriamiento desde la entrada hasta la salida ocurre cuando el refrigerante fluye a través del molde, absorbe calor y su temperatura se incrementa; para moldes de propósito general esta  $\Delta T$  debe mantenerse a no más de 5 a 6 °C, un cambio mayor daría como resultado un enfriamiento inadecuado del molde y un mayor tiempo de ciclo.

En moldes de alta producción, como los moldes para preformas de botella soplada, el  $\Delta T$  debe de mantenerse por debajo de 3 °C o mejor aun entre 1 y 2 °C; esto debe ser considerado críticamente porque para permitir esos  $\Delta T$ 's tan pequeños, debe pasar una gran cantidad de refrigerante de forma uniforme a través del molde para que sea efectivo. Puede ser que la energía para mantener este flujo y las bombas y tubos requeridos no valga la pena para las ventajas que son alcanzadas; para aplicaciones especiales

particularmente si están implicadas grandes cantidades de producción, debe ser cuidadosamente analizado con una simulación computarizada.

Finalmente, debe ser considerado el  $\Delta T$  entre el plástico y el medio refrigerante, entre mayor sea este  $\Delta T$  mayor será el flujo de energía que pasara de uno a otro en un cierto tiempo; si la diferencia es grande el plástico enfriara mas rápido que si la diferencia es pequeña.

### **CONDUCTIVIDAD TERMICA**

La conductividad térmica es una medida de la velocidad a la cual un material conduce el calor de caliente a frío. Esta velocidad es diferente para varios materiales, por lo que el diseñador de moldes deberá tomar en cuenta la conductividad térmica del plástico y de los materiales del molde.

Es importante para el diseñador tomar en cuenta que la capa de plástico que toca las paredes de la cavidad tiene una muy baja conductividad térmica comparada con la del material del molde, esto forma una capa de aislamiento entre la masa de plástico y el acero del molde frío. Esto influencia la velocidad de enfriamiento en un mayor grado que la temperatura del molde o del material de la cavidad; esto tiene un mayor efecto cuando el diseño del molde es para productos de pared gruesa, o cuando hay áreas aisladas en el producto que son gruesas y no pueden ser enfriadas apropiadamente.

Con lo anterior, nos damos cuenta que la conductividad térmica de los materiales del molde es importante, por razones practicas (costo, resistencia a la humedad, fácil maquinado, resistencia mecánica) los moldes son hechos generalmente de acero. Esto también nos representa diferencias en la conductividad de los diferentes tipos de aleaciones de acero que son usadas en los moldes, pero a excepción de algunas aplicaciones especiales las diferencias no son significativas.

Las piezas de pared delgada se pueden considerar como aplicaciones especiales, el espesor es tan delgado que el efecto del aislamiento cuando el plástico se enfría se vuelve insignificante, esto hace importante que la extracción de calor fuera de la cavidad sea eficiente. Esto implica utilizar materiales con una mayor conductividad que el acero como las aleaciones de cobre-berilio. Alternativamente, el número y/o el tamaño de los canales de enfriamiento pueden ser incrementados por encima de los que se consideran apropiados, o los canales deben ser llevados más cerca de la superficie del molde de lo que normalmente están; cualquiera de estas soluciones incrementará el costo del molde pero esto será bien recompensado por el incremento de la productividad.

#### **CONTENIDO DE CALOR.**

Para incrementar la temperatura de cualquier material se requiere que le sea proporcionada una cantidad de calor, la cantidad de energía es diferente dependiendo del material, para llevar el plástico a su temperatura de moldeo, debe proporcionarse al plástico una cantidad de energía determinada, esta cantidad de calor fluye con el material dentro de la cavidad del molde y después es removida, por lo que el plástico regresa a su estado rígido para su extracción.

Esta extracción de calor se lleva a cabo a través de las paredes de la cavidad, mayormente por el medio refrigerante, un poco como radiación hacia el aire y otro poco hacia la propia máquina. Para propósitos prácticos, serán ignoradas las últimas dos opciones y solo tomaremos en cuenta la del refrigerante.

Debemos entender que la cantidad de calor requerida para fundir el plástico es directamente proporcional a la masa del mismo<sup>30</sup>, la cantidad de calor que

tiene que ser removida de la pieza moldeada por el enfriamiento es la misma que fue agregada, por lo que se asume que la temperatura del material en crudo es la misma que la de la pieza extraída; pero la mayoría del tiempo las piezas son extraídas bastante calientes y todavía contienen algo del calor que fue agregado durante la plastificación, este calor será radiado por la pieza al aire alrededor de la planta.

El diseñador también debe contemplar que los plásticos amorfos, como el PS, vinil, ABS, etc., incrementan su temperatura (y empiezan a reblandecer) proporcionalmente con el calor agregado y de igual forma se enfrían proporcionalmente con el calor removido. Los materiales cristalinos como el PE, nylon, PET, etc., requieren una cierta cantidad de calor a un cierto nivel de temperatura justo para fundir los cristales sin incrementar la temperatura del plástico. Después de que los cristales han sido fundidos, se incrementa la temperatura del plástico que ahora esta amorfo.

### **3.2 MATERIALES DE CONSTRUCCION DE MOLDES.**

Para la elaboración de polímeros por medio del proceso de inyección, es indispensable contar con moldes de alta calidad, con una elaboración precisa y que tengan un tiempo de vida útil prolongado. En la actualidad estos moldes se fabrican de acero, materiales no ferrosos y materiales de colada no metálicos obtenidos galvanicamente.

El tipo de molde que hay que elegir para una pieza a fabricar esta determinado esencialmente por condiciones de rentabilidad que dependen de las exigencias impuestas a la pieza fabricada, de los costos de fabricación del molde, del tiempo de ciclo y del numero de piezas a fabricar con el molde, es decir, de su duración<sup>31</sup>.

Estas condiciones no van unidas incondicionalmente con las propiedades térmicas y mecánicas, ni tampoco con la facilidad de elaboración de los materiales. Así, por

ejemplo, los materiales con buenas propiedades térmicas presentan generalmente propiedades mecánicas menores. Los tiempos de ciclo cortos con estos materiales significan duraciones de vida menos elevadas. Así pues, al elegir los materiales, deben aceptarse ciertos compromisos. Si un artículo está sometido a exigencias especiales como por ejemplo buen acabado superficial, exactitud dimensional, alta velocidad de producción, número de piezas elevado, etc., los moldes se elaboran, casi exclusivamente, por arranque de viruta o por troquelado en frío. Como consecuencia, solamente se emplean para estos moldes bloques de acero refinado, forjado o laminado, bloques de metales no ferrosos o materiales cerámicos. En estos casos se aceptan los mayores costos de fabricación para el molde, en comparación con los moldes colados. Sin embargo, si solo se quieren efectuar algunas inyecciones de ensayo para obtener muestras de una pieza, se eligen materiales más económicos y métodos de fabricación más sencillos para el molde; en tal caso, se emplean particularmente resinas de colada y metales colados. A continuación se presentan diversos materiales, sus propiedades, su elaboración y su campo de aplicación.

### **3.2.1 ACEROS.**

Las exigencias que debe satisfacer un acero para la construcción de moldes destinados a la inyección de plásticos están dadas por las condiciones impuestas a la pieza terminada y por los esfuerzos a que está sometido el molde. De esto se desprende que los aceros deben poseer las siguientes propiedades: buenas condiciones para su elaboración (posibilidad de ser maquinado, facultad de troquelado en frío, templabilidad), resistencia a la compresión, temperatura y abrasión; aptitud para el pulido, resistencia a la tensión y tenacidad, tratamiento térmico sencillo, deformación reducida, buena conductividad térmica y resistencia a los ataques químicos.

El vaciado del bloque, para obtener el molde, se realiza en un 90% de los casos por arranque de viruta. Actualmente pueden ser maquinados por arranque de viruta incluso los aceros de alta resistencia. Sin embargo, la

gama de resistencias más favorable para el maquinado de aceros recocidos o bonificados se sitúa un poco mas abajo.

En el troquelado en frío se debe considerar la magnitud de los contornos a troquelar. Del material se exige entonces que, tras el conformado en frío, pueda conferírsele una dureza inferior y una buena plasticidad mediante un tratamiento térmico (recocido suave o normalizado).

Como apenas se produce un esfuerzo prolongado de los moldes a temperaturas elevadas, puede despreciarse el esfuerzo térmico para la elección de los aceros.

La mejor forma de satisfacer los esfuerzos de compresión y la abrasión es mediante una elevada dureza. Los mejores resultados de dureza se consiguen con aceros exentos de grietas internas y oclusiones, que tengan la máxima pureza y uniformidad en su estructura. Por otra parte, los aceros especialmente puros, que carecen prácticamente de oclusiones y rechupes, de dejan pulir muy bien. Las superficies blandas son dañadas por las posibles puntas opresoras originadas por las rebabas endurecidas.

Sin embargo, el factor decisivo para la elección del acero no es el esfuerzo de compresión sino el esfuerzo de flexión<sup>32</sup>, que deben resistirlo en particular los moldes grandes. Los esfuerzos de flexión pueden ser tales que produzcan la ruptura de los elementos del molde construido a base de acero de temple total. Por ello, se recomienda usar aceros de cementación con núcleo tenaz y superficie endurecida, resistente a la abrasión. Sin embargo, los aceros de cementación presentan las máximas exigencias en cuanto al tratamiento térmico y su elaboración exige mucho tiempo. El temple y revenido de los aceros de temple total son mucho más sencillos, pero tienen un campo de aplicación mas limitado. Las variaciones en las dimensiones y las deformaciones que pueden producirse como consecuencia de un tratamiento

térmico, que exigen un costoso trabajo posterior, quedan eliminadas al emplear aceros recocidos o bonificados.

Puede actuarse contra la sensibilidad a la entalladura, mediante el temple por cementación o la nitruración<sup>33</sup>.

La resistencia a los ataques químicos se consigue mediante un revestimiento galvánico protector (cromado, niquelado), o mediante el empleo de aceros inoxidable y resistentes a los ácidos. La capa protectora, en los revestimientos galvanicos, alcanza en el cromado unos 0.2 mm. Para evitar tensiones internas en la capa protectora, es indispensable una capa uniforme y no excesivamente gruesa de cromo. Además, deben evitarse las esquinas o cantos muy agudos en el molde.

Se comprende que un acero no puede presentar todas estas propiedades. Por ello, antes de fabricar un molde, es preciso establecer las propiedades indispensables impuestas por su aplicabilidad. Estas pueden estimarse según los cuatro puntos de vista siguientes<sup>34</sup>:

- Tipo de la masa de moldeo a elaborar (exigencias relativas a corrosión, abrasión, conductividad térmica, y viscosidad)
- Tipo y magnitud de esfuerzo mecánico permisible (tamaño de la cavidad, presión de inyección, variaciones de forma en el molde, presión residual)
- Método de obtención de vaciado del bloque (arranque de viruta, estampado en frío, electro erosión)
- Tratamiento térmico necesario, con sus correspondientes variaciones en las dimensiones.

De acuerdo con estas consideraciones, se procederá a la elección del acero apropiado entre todas las gamas disponibles. Los aceros se pueden clasificar en:

- Aceros de cementación

- Aceros de temple total
- Aceros bonificados
- Aceros resistentes a la corrosión
- Aceros de nitruración
- Aceros de segunda fusión

Dependiendo de la aplicación específica, se debe entender qué demandas de calidad y comportamiento se imponen sobre los aceros de los moldes.

En una época en la que se exige alta productividad en manufactura, no existe un sustituto para la alta calidad de los moldes cuando se trata de inyección o de otros procesos de moldeo. Dada la gran variedad hoy disponible de aceros para moldes, una selección apropiada debe tener en cuenta no solamente el precio y la práctica tradicional sino, también, para qué y por qué se utilizan. Esto quiere decir que, dependiendo de la aplicación específica, se debe entender qué demandas de calidad y comportamiento se imponen sobre los aceros de los moldes. Existen dos categorías principales de exigencias que juntas conforman doce características deseables de calidad.

#### **Exigencias de los usuarios de moldes:**

1. *Resistencia al desgaste.* Es una consideración importante en referencia a los componentes de las cavidades si el material plástico es abrasivo; esto es, si está relleno con fibra de vidrio o con minerales.
2. *Tenacidad.* Puede ser un factor importante para los costos de reparación o de reemplazo de componentes.
3. *Resistencia a la compresión.* Se necesita para que el molde pueda resistir las fuerzas de prensado y minimizar los daños en las áreas de cierre.



4. *Dureza en caliente.* Se requiere en aquellos moldes que operan a temperaturas elevadas.

5. *Resistencia a la corrosión.* Muy importante bajo dos puntos de vista: primero, cuando se usan plásticos o aditivo corrosivo y, segundo, cuando los moldes operan en áreas de alta humedad o en regiones donde el agua es particularmente corrosiva.

6. *Conductividad térmica.* Puede tener un impacto en el tiempo del ciclo de moldes de alta productividad y, a pesar de que éste no es un factor primordial para escoger entre aceros, en algunos casos sí puede ser una razón para decidirse por una aleación cobre-berilio en lugar del acero.

#### **Exigencias de los fabricantes de moldes:**

1. *Facilidad de tallado.* Permite la producción de un número de cavidades intrincadas mediante el uso de EDM (Máquina de descarga electrostática). La facilidad de tallado ha perdido preponderancia recientemente.

2. *Facilidad de maquinado.* Es de gran importancia económica para el fabricante de moldes.

3. *Facilidad de pulido.* Las cavidades que requieran un acabado de espejo deben fabricarse con tipos especiales de aceros para moldes.

4. *Estabilidad dimensional en tratamientos térmicos.* Se debe seleccionar un acero de buena estabilidad dimensional.

5. *Facilidad de soldadura.* Se debe escoger un acero para facilitar el diseño e ingeniería de partes o reparaciones ocasionadas por daños en el molde.

6. *Habilidad de nitruración.* La nitruración provee al acero de una capa superficial muy dura y resistente a la abrasión y corrosión. Sin embargo, la capa nitrurada (de 2 a 10 milésimas de espesor) es muy frágil y fácilmente se fractura con golpes, cambios bruscos de temperatura y presiones desiguales.

Es interesante comparar los diferentes tipos de aceros y la aleación de cobre-berilio; indicando la dureza de cada uno y su comportamiento con respecto a las varias características de calidad que son deseables tanto por los usuarios de los moldes como por sus fabricantes.

Por último se citan algunos de los tipos más comunes de aceros comerciales y se indican sus aplicaciones más recomendables, de acuerdo a la función y la localización previstas en el molde:

**TABLA 2. Tipos de aceros comerciales.**

<b>TIPO DE ACERO</b>	<b>USO TIPICO EN MOLDES DE INYECCION</b>
4130, 4140	Placas base para moldes en general
P-20	Placas base de alta resistencia mecánica para moldes especiales surtidores de canales calientes y para cavidades y centros grandes.
414SS, 420SS	Placas de mejor calidad
P5, P6	Cavidades talladas
O1	Pasadores, compuertas deslizantes y placas de desgaste
O6	Pasadores, compuertas, placas de desgaste y anillos de despojo
H13	Cavidades, centros, insertos, clavijas eyectoras
S-7	Cavidades, centros, insertos y anillos de despojo
A-2	Insertos pequeños en áreas de alto desgaste
A-6	Cavidades, centros, insertos en áreas de alto desgaste
A-10	Excelente para áreas de alto desgaste, pasadores, partes encajadas y cuñas
D-2	Cavidades, centros e insertos de canales y compuertas destinadas a ser usadas con plásticos abrasivos
<b>TIPO DE ACERO</b>	<b>USO TIPICO EN MOLDES DE INYECCION</b>
420SS	El mejor acero para todas las partes de las cavidades, centros e insertos. Ofrece las mejores posibilidades de pulido
440 C SS	Para cavidades, centros, insertos y anillos de despojo

	pequeños o medianos
250, 350	Ofrece la mayor tenacidad para cavidades, centros e insertos no apoyados
455M 55	Alta tenacidad para cavidades, centros e insertos
M-2	Apropiado para clavijas de centros, eyectores y cuchillas
ASP30	El mejor de los aceros de alta resistencia para centros no apoyados altos y sus clavijas

### 3.3 ELEMENTOS COMERCIALES DE ALTO RENDIMIENTO PARA TRANSFERENCIA DE CALOR.

**TABLA 3. Elementos comerciales de transferencia de calor.**

PROPIEDADES MECANICAS	TM 72H	TM 72L	TM 75	P-20	TM 180	ALUM.	TM 65X	H-13
Resistencia a la tensión (KSI)	185	170	115	140	100	85	100	210
Esfuerzo de cedencia (KSI)	155	140	90	110	75	78	55	185
Resistencia al impacto (ft/lb)	4	12	50	25	35	30	---	14
Elongación (%)	6	10	18	20	12	7	1	15
Dureza Rockwell	38C	28C	96B	30C	96B	96B	29C	45C
Conductividad térmica	60	75	145	17	130	91	27	15
Coefficiente de expansión térmica	9.7	9.7	9.8	7.1	9.7	12.8	9.0	7.1
Densidad (lb/cu.in.)	.302	.302	.320	.283	.320	.101	.260	.283

### 3.4 FLUIDOS EFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

Existen varios factores que afectan el flujo del refrigerante a través del molde, la cantidad de calor removida del molde es proporcional a la diferencia de temperaturas entre la temperatura del plástico y la del refrigerante; a menos que el refrigerante calentado sea retirado y reemplazado con refrigerante fresco, no habrá enfriamiento del molde. Generalmente los factores que afectan el flujo son<sup>35</sup>.

1. Diferencial de presiones ( $\Delta p$ ) del refrigerante entre el suministro y las líneas de retorno.
2. Sección transversal de los pasos.
3. Longitud de los pasos y su ubicación.
4. Viscosidad del refrigerante.

5. Condición de los canales de enfriamiento.
6. Numero de Reynolds.

A continuación, se mencionaran algunos de los fluidos de transferencia de calor usados comercialmente los cuales son distribuidos por la empresa Paratherm Corporation:

#### **PARATHERM HE**

Este fluido esta clasificado en un rango de servicio optimo que a desde 66 hasta 316 °C. esta diseñado para tener una alta estabilidad térmica y oxidativa. Su alta pureza le permite tener una gran resistencia a la degradación, mientras que mantiene sus propiedades térmicas y su eficiencia. Esto le permite tener un bajo mantenimiento y un desempeño sólido operando durante un largo tiempo.

#### **PARATHERM NF**

Este fluido de transferencia es altamente eficiente y térmicamente estable. No es toxico y es excepcionalmente fácil de usar. Pude ser utilizado con aceites lubricantes en forma segura.

#### **PARATHERM OL**

Este fluido es altamente resistente a los residuos de oxidación y un tiempo de vida útil prolongado. Proporciona un control de temperatura uniforme a 550 °C en sistemas de circuito cerrado. El fluido OR esta compuesto por una base altamente estable y un inhibidor de oxidación de alto desempeño. El funcionamiento de este fluido es impresionante bajo las mismas condiciones que causan oxidaciones severas y formación de lodos en fluidos de transferencia de calor convencionales.

#### **PARATHERM MR**

Este fluido de transferencia de calor esta colocado en un rango intermedio de servicio entre 30 y 550 °C y es eficiente dentro de su rango de operación. No es

toxico ni tiene olor. Puede ser combinado con fluidos usados o contaminados en forma segura ya que una de sus ventajas es que es resistente y durable, tiene un excelente desempeño en condiciones extremas.

Debido a que la principal función del proceso de RTR es realizar calentamientos y enfriamientos abruptos, es importante conocer lo que pasa con el calor generado dentro del proceso de moldeo por inyección y la forma en que debe ser eliminado. En este capítulo se mencionaron las etapas que pasa el material desde que esta en forma de granulo hasta que es llenado en la cavidad como material fundido. Dependiendo de las características del proceso el calor generado en este es eliminado de diferentes formas.

En el proceso de RTR además de realizar un calentamiento rápido del molde, se trata de eliminar ese calor generado de la forma más rápida y eficiente. Para poder lograr esto es necesario contar con materiales que soporten este intercambio de temperatura durante un número considerable de ciclos además de que cuenten con una alta conductividad térmica que permita remover el calor de la pieza en forma rápida.

Para ello es necesario que en un proceso de RTR se cuente con un fluido que permita la eficiente transferencia del calor de la pieza, hacia dicho fluido el cual debe de ser enfriado antes de ingresar a un nuevo ciclo.

La combinación de estas variables hace parecer que el proceso de RTR no es tan sencillo de aplicar, pero con los avances tecnológicos de nuestra época ya existen materiales para la construcción de moldes o insertos de RTR que permiten llevar a cabo calentamientos y enfriamientos abruptos además de que también hay en el mercado fluidos de transferencia de calor que permiten que se desarrolle el proceso de RTR.

#### 4. SISTEMAS DE CONTROL DEL PROCESO DE MOLDEO POR INYECCION.

El sistema de control de proceso de una maquina de moldeo por inyección comprende todo el equipo que controla las temperaturas de aceite y del barril, la fuerza de cierre, la presión de aceite y las velocidades de flujo, de tal forma que sean generados y estén disponibles en la magnitud y dirección requerida, en el momento correcto durante un ciclo de secuencia lógica o durante varios ciclos.

La calidad de una pieza inyectada esta determinada casi exclusivamente por dos parámetros del proceso, presión y temperatura, mientras que la velocidad de inyección (dependiente de la presión) solo ejerce una influencia limitada (figura 15)<sup>36</sup>. Además, el diseño de los sistemas de control tiene que tomar en cuenta la secuencia lógica de todas las funciones principales, como el cierre y apertura del molde, y las funciones secundarias como el cierre de la boquilla de inyección.

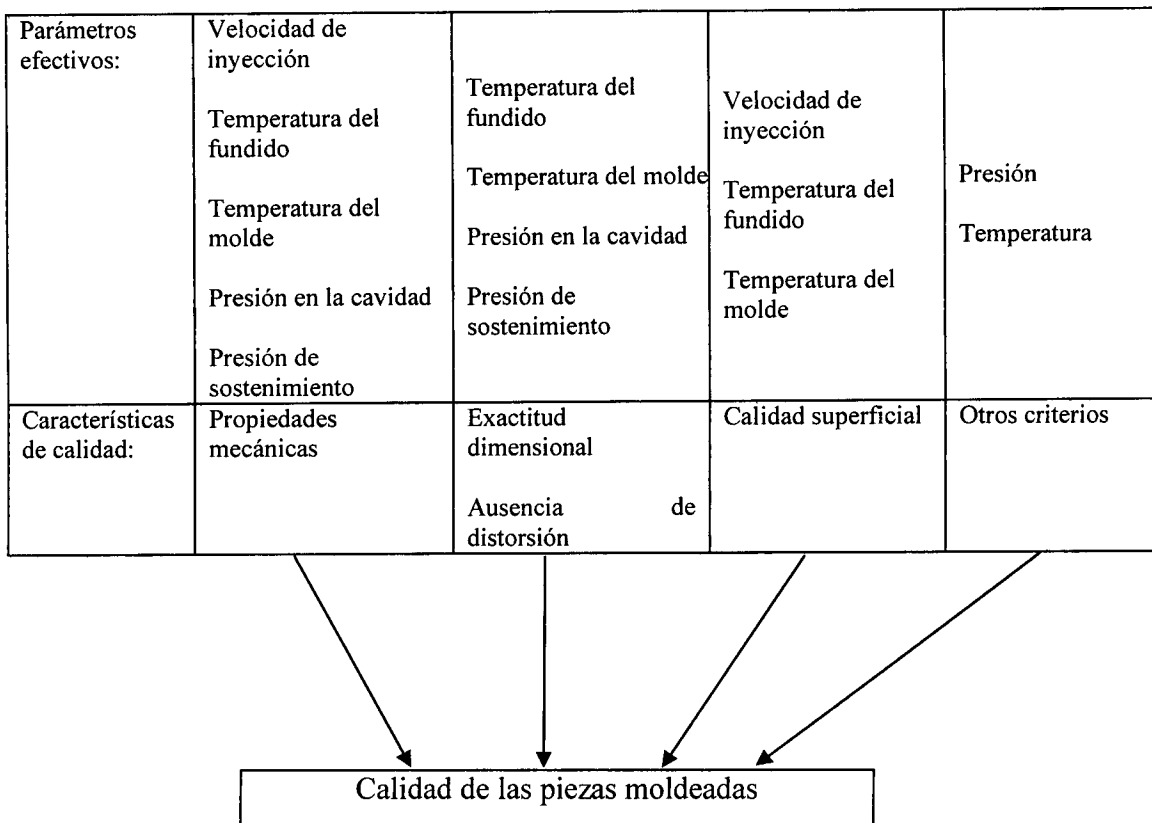


FIG. 15

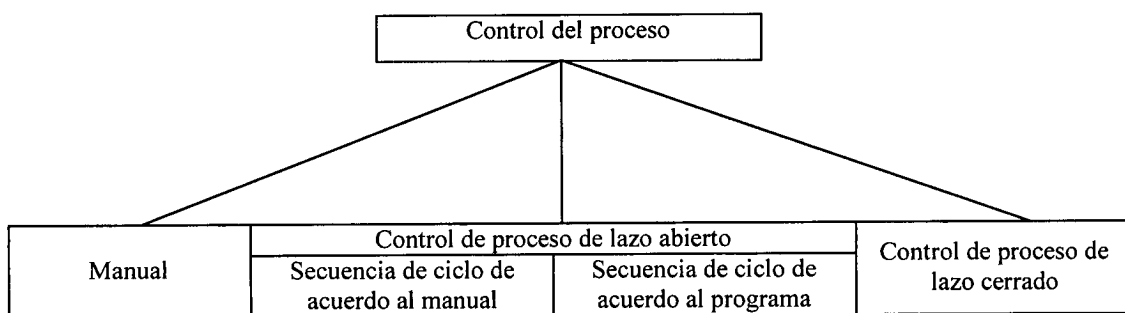
Todos los datos relevantes del proceso de inyección deben de ser registrados y almacenados, lo cual es realizado para documentar la calidad de la producción; por lo anterior, la correcta selección y apropiada instalación de los dispositivos de registro es de gran importancia.

Como consecuencia, el objetivo de los sistemas de control es la supervisión del proceso y como tarea adicional, el aseguramiento de la calidad requerida en el producto final.

Hay que ver que muchos dispositivos que desempeñan funciones de control, pueden tener un mecanismo de control interno, como las servo-válvulas y las válvulas proporcionales, las cuales son empleadas para controlar la velocidad del flujo.

La figura 16 muestra los métodos de control de proceso, en la actualidad los sistemas de control de proceso se pueden clasificar de la siguiente forma<sup>37</sup>:

- Control manual.
- Control por componentes electromecánicos después de una programación manual.
- Control por circuitos electrónicos y programación manual.
- Control por programas definidos.
- Controles de lazo abierto de algunos parámetros importantes (velocidad y presión) con un control de secuencia programado manualmente.
- Control de lazo abierto programado.
- Control de lazo cerrado.



**FIG. 16**

#### **4.1 SISTEMAS DE CONTROL DE TEMPERATURA EN EL MOLDE.**

La temperatura del molde (o de la cavidad) puede ser medida con termocoples o con detectores de la temperatura de la resistencia (RTD por sus siglas en ingles), los cuales son insertados por un orificio hasta donde la punta queda lo más cerca posible de la zona a medir. A menudo se pasa por alto que es primordial que debe haber un buen contacto ya que si el contacto entre las superficies es inadecuado, la medición que se obtenga será errónea por una deficiencia en la conducción térmica, esto es de especial importancia en los detectores de temperatura de las resistencias largos.

Entre mas lejos este ubicado el termocople, la opción mas recomendada es el termocople ANSI tipo J con hierro y una calibración constante de alambre de plomo y un error absoluto de alrededor de 2 °C y que soporte hasta 300 °C. la unión caliente esta al final del tubo protector de acero inoxidable y aislamiento galvanizado que evite la interferencia.

Los detectores de temperatura de la resistencia modernos están siendo usados cada vez mas, sus elementos de sensado están hechos de alambre de platino de alta pureza, la resistencia de estos alambres cambia rápidamente con la temperatura.

Esto da como resultado que solo la temperatura en el extremo del sensor sea independiente de la cantidad de calor proporcionada, adentro de la cavidad y en el fundido, la temperatura depende del flujo de calor alimentado, por lo tanto, los sensores de temperatura en las paredes deben estar montados relativamente cerca del fundido; por otro lado, el circuito de control puede caer en una oscilación incontrolable si la distancia de la superficie calentada es demasiado grande y la señal del incremento de la temperatura llega tarde, entonces el espesor de pared restante es sobrecargado con la energía del exterior.

Dependiendo del diseño y de las condiciones de instalación puede haber desviaciones entre la temperatura de pared mostrada y la real.



Otra forma de medir la temperatura de las paredes de la cavidad es con termopares con tubos de protección de acero de 1 mm de diámetro, los cuales son usados de manera frecuente; aquí también se debe tener mucho cuidado para minimizar la resistencia a la transferencia del calor con un montaje adecuado y el uso de una pasta conductora de calor; la soldadura no es recomendable porque existe el riesgo de que dañe el aislamiento entre el alambre de plomo y la tubería.

#### **4.2 SISTEMAS DE CONTROL DE FLUJO DE FLUIDOS DE TRANSFERENCIA EN EL MOLDE.**

Como hemos mencionado anteriormente, el calor que es proporcionado al plástico para ser fundido, debe de ser retirado una vez que la pieza sea moldeada, lo cual se hace en el molde y por medio del fluido de transferencia de calor durante la etapa de enfriamiento del ciclo de inyección. También ya hemos hablado de que al fluido de transferencia se le debe de extraer el calor después de que lo haya recibido del molde, para que pueda funcionar en un ciclo de inyección posterior.

Además del enfriamiento que se le debe proporcionar al fluido de transferencia de calor, una de las cosas mas importantes a tomar en cuenta es el flujo de este a través del molde, ya que es de suma importancia para la eficiencia del enfriamiento del molde y para eliminar el calor de la pieza moldeada; entre mas rápido se lleve a cabo la extracción de calor de la pieza, mas corto será el tiempo de ciclo y por consiguiente mas eficiente será el proceso.

Una de las formas de controlar el flujo del fluido de transferencia de calor es el empleo de caudalímetros o reguladores de flujo. Estos equipos nos permiten aumentar o disminuir la cantidad de fluido que deberá pasar por el molde de acuerdo a las necesidades del proceso que estemos llevando a cabo. Este control nos da la opción de regular el flujo del fluido de transferencia de calor para que este se realice de la forma mas optima posible, para no tener problemas de suministro del fluido

insuficiente o exceso de fluido en el molde y desperdicio de energía en su alimentación.

Los reguladores de flujo pueden ser automáticos (programables) o manuales y varían en capacidad dependiendo de las necesidades y de su aplicación. Algunas de las ventajas de utilizar reguladores de flujo pueden ser:

- Indicación instantánea de circuitos de enfriamiento del molde bloqueados, evitando con esto la producción de piezas defectuosas.
- Control repetitivo y preciso de la temperatura del molde.
- Permiten un ajuste práctico y rápido del flujo.

En la selección de un sistema de control de flujo de fluido de transferencia de calor se deben tomar en cuenta las condiciones del proceso, los materiales de construcción de los reguladores de flujo y la facilidad para su mantenimiento ya que de ello depende que los valores reportados en el regulador sean lo mas aproximados en comparación con los reales.

#### **4.3 EQUIPOS COMERCIALES DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA LIQUIDOS.**

La idea general de los equipos de control de temperatura es permitir crear una transferencia ideal del calor entre los elementos del sistema, molde-maquina-material. Cual más rápida sea la respuesta de cada una de las partes que componen al sistema de control más eficiente será el mismo. Comúnmente los sistemas de control de la temperatura ya sea para incluir calor, como son controladores de resistencias y controladores de flujo de líquidos calefactores, crean rampas al arranque, es decir inician con dosis de intercambio térmico fuertes y poco a poco las ajustan, disminuyéndolas, en función a la cercanía con la estabilidad del sistema o a la solicitud requerida por el usuario. Este ultimo puede llegar a ser la principal variable que genere problemas, debido a que el sistema molde-maquina-material de alguna u otra forma llega a la estabilización, pero si no se conocen las capacidad del equipo de

control que se esta utilizando es difícil que se tenga la seguridad de que el sistema ciclo a ciclo es repetible.

En la figura 17, se muestra un sistema comercial de control de la temperatura, este esquema es muy similar en todos los equipos comerciales, lo que varia entre unos y otros es la capacidad de control de cada elemento, si las válvulas son hidráulicas o neumáticas, la calidad de cada una de los componentes y últimamente un factor clave en la decisión del tipo de controlador es el gasto energético del mismo, ya que controladores como los CONAIR™, requieren de 1.1 wats para convertir caloríficamente 2.3 toneladas en el caso de refrigeración y para calentamiento 0.3 wats es lo requerido para general corriente calorífica.

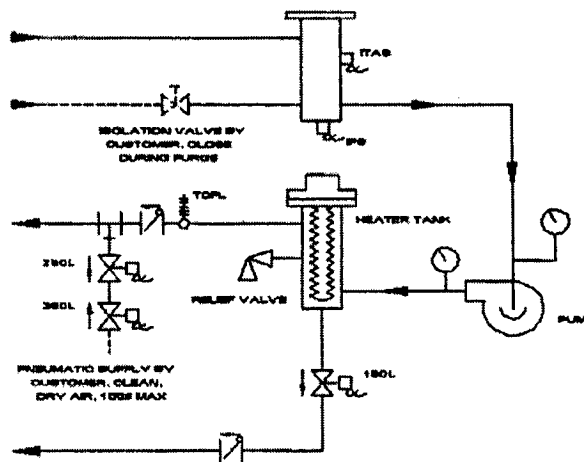


Figura 17, esquematización de un sistema de entradas y salidas para calentamiento y enfriamiento de líquidos.

Para poder disminuir el efecto de los parámetros del proceso en las piezas moldeadas por medio del proceso de RTR, es necesario contar con un sistema de control eficiente, que detecte las variaciones de temperatura del fundido y que permita que por medio de RTR se haga el ajuste correspondiente. Además, para que el proceso de RTR sea eficiente, debe de estar sincronizado correctamente con el ciclo de moldeo por inyección, ya que de otra forma no seria de gran ayuda.

De igual forma el flujo de los fluidos de transferencia debe de estar controlado de forma precisa, para que actúen en el momento correcto de forma eficiente. En el proceso de RTR los fluidos de transferencia de calor deben actuar en el instante que termina la fase de calentamiento (que dura aprox. 2 seg.) y debe ser a una velocidad de flujo adecuada que permita que el calor sea removido de la pieza y del molde.

## **ESTADO DEL ARTE Y ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO.**

### **5. RESPUESTA TÉRMICA RÁPIDA.**

Muchos han sido los trabajos generados para crear cambios en las características del producto moldeado como son, realizando ajustes en la distribución del sistema de enfriamiento del molde, localización de las estradas en la cavidad, numero de corredores por pieza moldeada, incluyendo las variables relacionadas con la permanencia del material en la cavidad hasta su enfriamiento, velocidades de inyección, tiempos de enfriamiento, tiempos de aplicación de las distintas presiones.

Un ejemplo de este tipo de trabajos son los realizado por Davidoff y colaboradores<sup>38</sup> en los que generaron un algoritmo mediante un proceso de simulación, para que con modificaciones en las características de moldeo (variables del ciclo de moldeo por inyección) predicen el tiempo de enfriamiento optimo en función al sistema de refrigeración utilizado en el molde, todo ello con la búsqueda de la calidad en la pieza optima.

Si bien es cierto que este tipo de trabajos son útiles para poder predecir la calidad aparente de la pieza plástica todo ello en función a los cambios en la distribución de enfriamiento en el molde, la idea de Respuesta Térmica Rápida va mas allá pudiendo encontrar primero la configuración ideal como primicia, y después buscando la áreas de oportunidad en las piezas como son secciones de desempeño mecánico menor, que permitan un control del tiempo de extracción de la pieza.

Por algunos años se busco el generar elementos que permitieran que el intercambio térmico fuera mucho mas rápido; elementos que se introducían entre la cavidad y el sistema de enfriamiento, como son aleaciones de cobre y berilio-cobre, las cuales eran incorporadas en los moldes con el fin de optimizar la transferencia de calor debido a que ya se tenia el sistema de enfriamiento optimo en cuanto a distribución, pero ahora tenemos que buscar que el flujo térmico entre el sistema de refrigeración y la superficie de la cavidad sean menores, en 1996, Paul Engelmann<sup>39</sup> y colaboradores publicaron trabajos en

los que se estudiaba la correlación de los distintos tipos de materiales para construcción de moldes y de insertos para los mismos, con la finalidad de generar un algoritmo que predijera las propiedades del producto final, en los resultados encontrados por ellos podemos observar como con el uso de aceros comerciales resistentes a los choques térmicos y que se utilizan para moldes para inyección de plásticos se tienen tiempos de enfriamiento de 10 segundos en piezas de 29 cm<sup>3</sup> y para las mismas piezas podemos encontrar que con aleaciones de cobre se tienen tiempos de enfriamiento de 6 segundos.

La idea general de este tipo de trabajos es la de poder crear piezas confiables controlando el tiempos de enfriamiento lo mas posible en función a las necesidades de producción.

Un problema en la utilización de aleaciones de este tipo es que no tienen buenas características de maquinabilidad, es decir, los acabados superficiales no son muy buenos, por otra parte cuando se trabaja con materiales plásticos que tienen altas temperaturas de fundido la posibilidad de condensación y/o evaporación en las uniones del molde son muy probables pudiendo generar tiempos de mantenimientos muy largos.

Como lo muestra el trabajo presentado por Kurt Hayden<sup>40</sup> y colaboradores la generación de condensaciones de este tipo de aleaciones es alta.

La idea entonces de poder generar sistemas en los que se pueda mandar el enfriamiento en el molde justo en el momento que se requiere es ideal para eliminar la formación de condensaciones y evaporaciones en el molde. Trina R. Carl y colaboradores<sup>41</sup> describen como es posible mediante enfriamiento en pulsos que además genera ahorros en energía y crea un ambiente de transferencia de calor ideal en el momento en que el material plástico toca la cavidad, en ese instante se crea una señal que es recibida por un controlador de calor que manda una ráfaga de refrigerante, este es conducido a través de material altamente conductor como lo son aleaciones de cobre berilio y el ciclo térmico es altamente eficiente.

En este trabajo comparan enfriamiento convencional contra enfriamiento por pulsos y el costo energético en cada 10,000 partes es de \$2.46 con enfriamiento convencional mientras que por pulsos es de \$0.37 dólares.

Por otra parte Owe Larsson y colaboradores<sup>42</sup>, crearon un sistema para enfriar moldes con CO<sub>2</sub>, al sistema se le conoce como sistema Toolvac, con el que según su publicación de difusión el sistema tiene la característica de reducir los tiempos de ciclo en un 50%, como idea de introducir un componente altamente conductivo y de capacidad de enfriamiento mucho mas grande es una buena aportación.

Cuando se trabaja con materiales plásticos que requieren de enfriamiento positivos es decir que el molde se encuentre a bajas temperaturas podemos trabajar con sistemas como los antes mencionados, Dong Hank KIM y colaboradores<sup>43</sup> realizaron un trabajo en el que para una aleación de PC/ABS y debido a la forma de la pieza plástica se requería que se calentara la superficie de la cavidad, por lo que incorporaron una serie de mecheros en el molde de tal forma que podían calentar con flama la superficie del mismo, sin lugar a dudas tubo una mejora la confiabilidad de la pieza en su llenado pero los tiempos de ciclo se alargaron demasiado ya que no se incluyo ningún sistema optimo de enfriamiento.

Indiscutiblemente B. Kim y N. Suh,<sup>44</sup> fueron los precursores del concepto de Respuesta Térmica Rápida, realizando investigaciones de bajo momento de inercia, es decir en que momento es necesario aplicar calor en función al ciclo de llenado de la cavidad, para ello utilizaban un equipo rudimentario de termocontroladores de agua y controladores de calor.

Esta investigación ayudo a entender el comportamiento de enfriamiento superficial con la entrada de material y la relación de contacto de la superficie con el mismo.

K.M.B. Jansen y colaboradores<sup>45</sup> en 1994 generaron un trabajo en el que introducían un componente eléctrico sobre la superficie de la cavidad de tal forma que este componente aislado transfería calor hacia esa sección de la cavidad justo en el momento del llenado. El

calentamiento de la superficie se llevaba a cabo en dos segundos de una temperatura de los 50 hasta los 100 °K.

En esta misma contribución mencionan una tabla en la que se presentan los trabajos que según los autores son más relevantes para el estudio de diferencias en el intercambio térmico hacia calentamiento del molde.

**TABLA 4. Efectos estudiados en diferentes experimentos.**

Año	$\Delta T$ (a 1 segundo)	Efectos estudiados	Referencia
1969	10	Flujo de fundido	53
1986	21	Velocidad de calentamiento	54
1988	11	Energía de fractura y birrefringencia	55
1988	10	Flujo de fundido y presión	56
1991	100	Velocidad de calentamiento y birrefringencia	45

En este mismo documento mencionan la resistencia superficial del componente calefactor, de hecho en esta evaluación se probó con 500 ciclos y la superficie del elemento sufrió desgaste.

M. Chen y colaboradores<sup>46</sup> en el 2001, estudiaron el efecto de la eliminación de esfuerzos inducidos en la etapa de enfriamiento, mediante respuesta térmica rápida, para ello crearon un sistema de control en el que una pc normal de escritorio, se encargaba de liberar una corriente al molde de inyección y este igualmente conectado a la pc, de tal manera que se pudiera generar la interfase del sistema, situaron un elemento conductivo en la cavidad del molde, esta tenía forma de lamina de 80x35x3mm, de forma que en el momento de la entrada de material este se reorientaba debido al diferencia de calor en esta zona, se utilizo PS con el fin de aplicar birrefringencia y así evaluar el cambio. Como resultante el nivel de refringencia en la pieza a la cual se le aplico RTR fue mas bajo.



D. Yao y colaboradores en el 2002<sup>47</sup>, generaron un trabajo para evaluar el cambio en el llenado y en la presión residual de la pieza con el uso de RTR, los resultados de dichas evaluaciones fueron mejores en 60% que los reportados para ciclos convencionales de moldeo por inyección.

En el año del 2002, Donggang Yao<sup>48</sup>, publica un documento enfocado al desarrollo de sistemas de rápido enfriamiento y calentamiento para moldeo por inyección, de los primeros artículos ya enfocados al estudio de las dos variables como proceso de respuesta térmica rápida, teniendo siempre en cuenta la calidad de la pieza moldeada.

Es esta trabajo el rápido calentamiento y enfriamiento es a través de una lamina aislada con un oxido, el diseño del dispositivo lleva a la cavidad de la pieza plástica de los 25°C a los 250°C en dos segundos y luego a los 50°C en 10 segundos. Las laminillas de material “conductor”, va de los 0.01 mm a 1 mm, y las cavidades de las piezas plásticas de 0.5mm a 4 mm, en cualquiera de las configuraciones de este diseño de experimentos la respuesta en el ciclo térmico fue mucho mas baja para respuesta térmica rápida en comparación con ciclos convencionales.

En la figura 15 podemos ver la respuesta de calentamiento y enfriamiento con una duración del calentamiento de 2 segundos a 70 W/cm<sup>2</sup>, los insertos en el molde fueron capaces de incrementar la temperatura de 25°C a 250°C en dos segundos y enfriar a 50°C en 9 segundos.

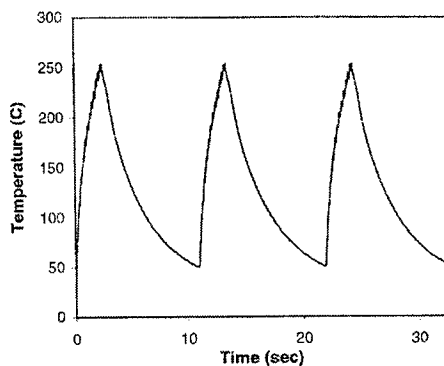


Fig. 13. Experimental surface temperature response of the RTR mold insert.

**FIG. 15**

Al comparar los autores la curva de calentamiento y enfriamiento de la parte experimental con la de la simulación se pudo observar que tienen un comportamiento muy similar, lo que indica que la simulación realizada y las suposiciones hechas fueron correctas, aunque de alguna manera el tiempo de enfriamiento experimental, fue mayor que el simulado.

Donggang Yao<sup>49</sup> en el mismo año reporta otro trabajo enfocado a el moldeo de componentes de tamaño micro, buscando que la etapa de calentamiento en respuesta térmica rápida facilite el llenado de la cavidad y por la configuración del microcomponente, el enfriamiento asista en que la pieza no cambie de forma, uno de los principales problemas que tiene el moldeo de componentes de tamaño micro es la replicación ya que se busca tener la menor variación estándar entre ellos, RTR (respuesta térmica rápida), aparece como una buena opción a estudiar en este trabajo. La pieza a moldear es de 400  $\mu\text{m}$  de ancho por 40  $\mu\text{m}$  de espesor, el material a moldear es HDPE, según las conclusiones del autor el moldeo de 576 piezas genero en ciclos convencionales una merma alta y el RTR todas las piezas dentro de especificaciones de repetitividad.

Por lo mencionado en el párrafo anterior el proceso de respuesta térmica rápida, favorece su utilización en componentes micro, por las características del componente y además por las características del inserto ya que recordaremos que sufre desgaste por los constantes ciclos de calentamiento y enfriamiento, que pueden verse reducidos en el moldeo de piezas de tamaño micro.

D. Yao<sup>50</sup> en 2003 con sus avances en sistemas eléctricos de calentamiento de secciones de superficie reporta un trabajo en el que el inserto es de grafito, elemento altamente conductivo, la posibilidad de calentar la superficie es alta, por desgracia la capacidad de retirar calor de la mismo es muy baja, por lo que para elevar la temperatura de 50 a 250 tomo 2 segundos pero el lo contrario de 23 a 25 segundos, una parte interesante de dicho reporte es la distribución de la temperatura a lo largo de toda la superficie entra y los tiempos en los que alcanza los valores máximos de las misma.

En el 2004, W. Liu, D. Yao y B Kim<sup>51</sup> incursionan el micromoldeo, realizan un molde en forma hexagonal en el que evalúan la deformación y el llenado de las múltiples cavidades además del efecto de la fatiga en ellas.

La demanda de partes de tamaño micro/nano, sugieren la sinergia del proceso de respuesta térmica rápida con equipos modernos de moldeo por inyección, proponiendo características de confiabilidad en el llenado de la parte, con el equipo de moldeo y características de flujo en el llenado de la cavidad con el enfriamiento del molde. Todo ello favorece la replicación de los productos moldeados. Weidan Liu<sup>52</sup> en el año del 2005 presenta una publicación en la que con los datos de Donggang Yao para generar una simulación del proceso de replicación teniendo buenos acercamientos por análisis de elementos finitos. En su estudio menciona también que el proceso de RTR mejora la birrefringencia, la resistencia de la línea de soldadura y la superficie final de las piezas.

Respuesta térmica rápida nace como una solución al problema de factibilidad de llenado en secciones de complejo flujo, y además para moldeo por inyección de componentes de tamaño micro/nano.

## ÁREAS DE OPORTUNIDAD

### 6. ÁREAS DE OPORTUNIDAD EN RTR.

Moldeo por inyección resulta ser el proceso que por sus características simples de alta repetitibilidad y múltiples inyecciones realizadas en el menor tiempo posible cubre las necesidades requeridas para diferentes tipos de piezas. El concepto de estandarización en piezas moldeadas requiere que la mayor cantidad de piezas se parezcan entre sí (igualdad de cualidades y calidades), pero como se demostró con las publicaciones en el capítulo de respuesta térmica rápida (RTR), los ciclos térmicos obligan al proceso a generar rampas que después de un determinado número de piezas hacen que las características de una o dos piezas cambien, después el proceso se estabiliza, esto es debido a la saturación térmica del mismo, entonces es donde los controles de los equipos lo ajustan de tal manera que se generan cambios que pudieran ser significativos para las piezas.

En un futuro RTR pretende ser una más de las herramientas del proceso de moldeo por inyección de tal manera que se controlen los cambios térmicos en el momento que la pieza plástica lo requiera.

Los avances en el área se concentran en ubicarla a piezas de tamaño micro debido a que la resistencia de los aceros para esta aplicación en específico es todavía pobre, pero suficiente para las necesidades de producción, además de que los costos de venta de las piezas terminales si pueden cubrir los costos de todos los insertos que se ocuparían.

En piezas de pared delgada y de altos recorridos de flujo se puede ocupar esta opción para mejorar las características de desempeño mecánico de la misma y además para generar que la pieza tenga una resistencia a cambios térmicos mucho mayor.

Indiscutiblemente RTR, es la alternativa de mejora en moldeo por inyección, por ahorro energético, por disminución en tiempo de ciclo, mejora en propiedades mecánicas de las piezas y de estética en la superficie de la misma.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El proceso de Respuesta Térmica Rápida RTR, demostró tener ventajas en las características de capacidad de flujo de llenado en comparación con el ciclo normal de moldeo por inyección, como se menciona en las investigaciones realizadas por en su mayoría por B. Kim, D. Yao y colaboradores. La idea general del proceso es primero tener una buena configuración del sistema de enfriamiento que facilite el flujo adecuado de los líquidos ya sean calientes o fríos que corran por el mismo y que sean capaces de disipar el calor extraído del molde en el menor tiempo posible, después ya localizada la sección en la pieza plástica que sea la cause problemas o defectos, o se busque la maximización de las propiedades mecánicas, adecuar el molde con un inserto de material altamente conductivo de tal forma que el líquido refrigerante maneje la extracción de calor del cuerpo del molde y el inserto la de la zona específica seleccionada, el mismo inserto funcionara como transmisor de calor en sus dos vertientes por conducción o por choque eléctrico (conducción acelerada), se debe generar un diseño de experimentos para evaluar la interacción del ciclo de moldeo (variables de procesamiento) con el inserto conductivo con lo que se encontrará la ventana de proceso que sea la mas adecuada para la pieza seleccionada.

Es muy importante visualizar los alcances del proceso, por el intercambio térmico al que se somete el inserto, el tiempo de vida medio del mismo es bajo, entonces se debe de ponderar la relación de este con la velocidad de fricción y el tipo de material plástico para tratar de aumentar el tiempo de uso.

El área de aplicación que se constituye mas rentable por la cantidad de piezas plásticas que se necesitan y además por el tiempo de vida del inserto es la de micromoldeo.

En un futuro, con el desarrollo de metales más resistentes mecánicamente, se podrán ver avances en RTR a piezas de volumen comercial.

## 8. NOMENCLATURA.

<b>ABS</b>	Acrilonitrilo butadieno estireno
<b>BTU</b>	Unidades Térmicas Británicas
<b>cal</b>	Calorías
<b>hp</b>	Caballos de fuerza
<b>kPa</b>	Kilopascales
<b>kw</b>	Kilowatts
<b>lb</b>	libras
<b>PC</b>	Policarbonato
<b>PE</b>	Polietileno
<b>PET</b>	Politereftalato de etileno
<b>plg</b>	Pulgadas
<b>PS</b>	Poliestireno
<b>RTR</b>	Respuesta Térmica Rápida
<b>T</b>	Temperatura
<b><math>\Delta T</math></b>	Diferencia de temperatura
<b><math>^{\circ}\text{C}</math></b>	Grados centígrados
<b><math>^{\circ}\text{K}</math></b>	Grados kelvin

## 9. REFERENCIAS.

- 1-6. Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage, Jerry M. Fischer, Plastics Design Library, 2003.
- 7-23. Injection Molding Machines, F. Johannaber, Hanser Publishers, 3rd. edition.
- 24-30. Mold Engineering, Herbert Ress, Hanser Publishers.
- 31-34. Moldes Para Inyección de Plásticos, Menges/ Mohren, ediciones G. Gili.
- 35 [www.paratherm.com](http://www.paratherm.com)
- 36-37. Injection Molding Machines, F. Johannaber, Hanser Publishers, 3rd. edition.
38. Hybrid Methods for Injection Mold Cooling Process Simulation and Mold Cooling System Analysis, Davidoff et al, ANTEC 1991.
39. Applying Copper Alloys Using New Mold Cooling Software, Dr. Paul Engelmann et al, ANTEC 1996.
40. Use of Copper Alloys to Reduce Mold Condensation Problems, Kurt Hayden et al, ANTEC 2001.
41. Comparison of Energy Consumption with Two Methods of Injection Mold Cooling, Trina R. Carl et al, ANTEC 2002.
42. The Toolvac Process—Cooling Injection Molds with CO<sub>2</sub> Gas, Owe Larsson et al, AGA AB.
43. Shiny Solid Surface Structural Foam Injection-Molded Parts With Rapid Mold Temperature Control By MmSH Process (Momentary Mold Surface Heating and Cooling Process), Doang-Hak Kim et al, ANTEC 2002.
44. Low Thermal Inertia Molding (LTIM), Byung Kim et al, Polymer Plastic Technology and Engineering, 25(1) (1986).
45. Construction of Fast-Response Heating Elements for Injection Molding Applications, K. M. B. Jansen et al, Polymer Engineering and Science, Mid-June 1994, Vol. 34, No. 11.
46. Eliminating Flow Induced Birefringence and Minimizing Thermally Induced Residual Stresses In Injection Molded Parts, Ming Chen et al, Polymer Plastic Technology and Engineering, 40(4) (2001).

47. Increasing Flow Length in Thin Wall Injection Molding Using a Rapidly Heated Mold, D. Yao et al, *Polymer Plastic Technology and Engineering*, 41(5) (2002).
48. Development of Rapid Heating and Cooling Systems for Injection Molding Applications, Donggang Yao et al, *Polymer Engineering and Science*, December 2002, Vol. 42, No. 12.
49. Injection Molding High Aspect Ratio Microfeatures, Donggang Yao et al, *Journal of Injection Molding Technology*, March 2002, Vol. 6, No. 1.
50. Developing Rapid Heating and Cooling Systems Using Pyrolytic Graphite, D. Yao et al, *Applied Thermal Engineering* 23 (2003).
51. Rapid Thermal Response (RTR) Hot Embossing of Micro-Structures, W. Liu et al, ANTEC 2004.
52. Rapid Thermal Response Mold Design, Weidan Liu et al, ANTEC 2005.
53. R. Zonneveld, Internal TNO report nr. KR1202/'69 (1969).
54. B.H. Kim and N.P. Suh, *Polymer Plastic Technology and Engineering*, **25**, 73 (1986).
55. B.H. Kim and C. Roth, *Polymer Plastic Technology and Engineering*, **27**, 467 (1988).
56. R. R. Wadhwa and B.H. Kim, *Polymer Plastic Technology and Engineering*, **27**, 509 (1988).