

# Análisis del moldeo por inyección de piezas de pared gruesa con el sistema de medida de presión en cavidad Cavity Eye

*András Szűcs PhD\** adjunto a la universidad, *Károly Belina PhD\** profesor

## 1. Introducción

Los requisitos de calidad de las piezas fabricadas mediante moldeo por inyección son cada vez mayores, basta pensar en los productos para automoción o para telecomunicaciones, cuyas propiedades mecánicas, precisión dimensional y aspecto han evolucionado mucho en los últimos años gracias a la aparición en el mercado de máquinas de moldeo por inyección más precisas junto con moldes y polímeros más específicos. Una de las piedras angulares de la producción en continuo de una pieza de calidad adecuada es una tecnología de moldeo por inyección optimizada adecuadamente. Por supuesto, el ajuste de la máquina no sólo se refiere a los parámetros del ciclo de inyección, sino a la correcta preparación y secado de la materia prima, el templado del molde y otros ajustes diversos. La repetitividad de la producción se ve dificultada cuando se trabaja con moldes de varias cavidades debido a la heterogeneidad en el proceso de llenado. Para verificar la repetitividad y la estabilidad de la tecnología podemos utilizar las herramientas de control de la máquina de moldeo por inyección. Este método puede ser eficaz, pero tiene limitaciones, ya que no permite medir los parámetros directamente en la zona donde se produce el conformado, limitándose así su efectividad. La medida de la presión en cavidad es la única técnica que proporciona una retroalimentación cerrada para el funcionamiento del sistema. La conmutación basada en la presión en cavidad aumenta la estabilidad del sistema, la separación del producto basada en las curvas de presión -mediante el establecimiento de tolerancias de pieza correcta- garantiza una producción sin desechos, y el almacenamiento de los valores medidos proporciona control de calidad y trazabilidad. Desgraciadamente, estos sistemas no están muy extendidos en el entorno industrial, por lo que en la Facultad GAMF de la Universidad de Kecskemét hemos desarrollado un nuevo sistema para la medida de presión en cavidad, que abre nuevas posibilidades a los usuarios. En nuestro artículo mostramos el potencial del sistema de medida con ayuda de un molde para fabricar piezas de pared gruesa, desde un punto de vista práctico.

## 2. Descripción del experimento

Para las pruebas se utilizó polipropileno del tipo Tipelin R-959A (TVK Nyrt.), recomendado para el moldeo por inyección, que tiene una baja viscosidad y cuyo índice de fluidez es de 45g/10 min medido a 230°C y con una carga de 2,16 kg.

Los experimentos se realizaron en una máquina de inyección Allrounder 470A de ARBURG con sistema de control. Durante las etapas de prueba/producción, el soporte electrónico de datos almacena continuamente los valores medidos (presión de inyección, tiempo de inyección, etc.), pudiéndose analizar posteriormente de forma bastante sencilla y rápida.

Para las medidas se utilizó el molde de una muestra estándar alterada. El molde puede equiparse con insertos, por lo que se pueden fabricar productos con puerta lateral, de película, y puerta unilateral y bilateral. El espesor de la cavidad es de 4 mm. En ambas cavidades se han colocado pines expulsores al principio y al final del recorrido del flujo, a través de los cuales se puede obtener la medida indirecta. Debajo de los expulsores, se han instalado los sensores de presión de desarrollo propio. El rango de medida de los sensores es de 15 kN, suficiente ya que la fuerza transmitida es de aproximadamente 7850 N en el caso de un expulsor de 10 mm de diámetro y 1000 bar de presión en la cavidad. Gracias a la minimización de la relación señal/ruido, los valores medidos se muestran con una resolución elevada, por lo que incluso unos pocos N de carga pueden medirse con precisión, y linealidad para todo el rango de medida. Los sensores no son sensibles a los cambios de temperatura. Las señales fueron procesadas por el sistema de



Figura 1. Sistema de medida de presión "Cavity Eye".

medición "Cavity Eye" (Figura 1) y el software, que fueron desarrollados específicamente para el entorno industrial, pero que también son adecuados para las mediciones en laboratorio. La versión estándar del sistema maneja 8 canales -sensores- y puede ampliarse indefinidamente. Contiene muchas funciones automatizadas, por ejemplo, acceso, almacenamiento y compresión de todos los resultados de las medidas, evaluación estadística, identificación automatizada del molde, etc.

### Análisis del proceso de moldeo por inyección

Las curvas de presión en la cavidad y de presión hidráulica están relacionadas. La presión de inyección influye directamente en la presión en cavidad, pero el moldeo se produce en la cavidad, por lo que sólo podemos obtener información de alto valor sobre el proceso de producción si se examina la presión en la cavidad del molde. En la figura 2 se muestra una curva general de presión en la cavidad y de presión hidráulica. La curva puede dividirse en varias secciones distintas, que son:

- llenado,
- compactación
- mantenimiento de presión
- enfriamiento [1].

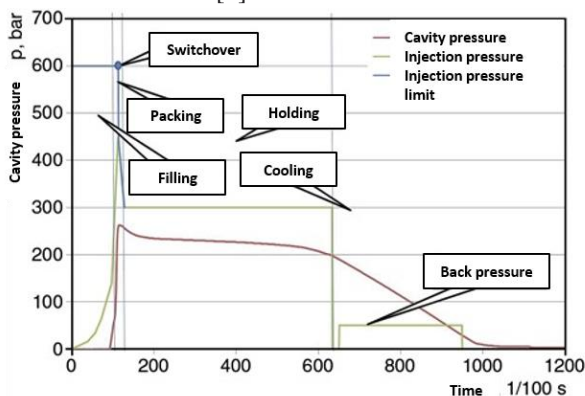


Figura 2. Presión en cavidad y presión de inyección en función del tiempo

Durante la fase de llenado, el material fluye libremente en la cavidad. La presión necesaria para mantener el flujo es relativamente pequeña y depende principalmente de la viscosidad del material, la velocidad de avance y la sección transversal del flujo. Existen diferencias fundamentales entre las piezas de paredes finas y gruesas. El llenado de piezas de paredes finas con un largo recorrido de flujo es más complicado al haber menos tiempo disponible, y en el llenado se produce una mayor

presión en la cavidad, mientras que por su parte, el tiempo de enfriamiento también es significativamente más corto.

En la fase de compresión, la cavidad del molde se llena completamente de polímero fundido. El material no fluye, por lo que una ligera compresión, implica un incremento en la presión en cavidad durante 0,01...0,1 segundos. La compresión implica básicamente introducir en la cavidad del molde cierto porcentaje adicional de material respect al que podría contener a presión atmosférica. (La compresibilidad del material puede determinarse mediante la curva p-v-T.) Después de la compresión se produce la conmutación a presión de mantenimiento, lo que significa que la presión de inyección real acumulada se reduce momentáneamente o dentro de un tiempo de "rampa" especificado hasta el valor de la presión de mantenimiento. La "rampa" se puede ajustar siempre en una máquina de moldeo por inyección moderna, lo que afecta en gran medida al proceso, ya que la electrónica de control PID no es capaz de manejar cambios momentáneos constantes. La conmutación es uno de los parámetros más sensibles del proceso de moldeo por inyección.

Durante el enfriamiento del material, el volumen específico disminuye, lo que se compensa con el material inyectado en la fase de mantenimiento. Durante la fase de mantenimiento se pueden utilizar perfiles de presión decrecientes, crecientes o pulsantes. No controlar la presión de mantenimiento o ajustarla incorrectamente puede dar lugar a surcos en la superficie de la pieza o a poros en el interior. El tiempo de mantenimiento es útil hasta que se produce el sellado, es decir, cuando la temperatura del material en la sección transversal disminuye por debajo de la temperatura de fluencia o de cristalización, solidificando e impidiendo el flujo de material.

En la fase de enfriamiento, el material continúa enfriándose y la presión en la cavidad del molde disminuye, pero debido al sellado el material no fluye. Por lo tanto, la disminución de la presión es aproximadamente proporcional a la disminución del volumen específico, es decir a la contracción de la pieza. La pendiente negativa en la fase de enfriamiento es proporcional a la velocidad de enfriamiento.

Uno de los parámetros más importantes de la máquina es la conmutación. En el entorno industrial, lo más habitual es establecer la conmutación en función del recorrido, lo cual implica que el paso entre las fases de control por velocidad y control por presión se produce en una posición determinada del husillo. En el caso de las máquinas modernas, esta posición puede determinarse con una precisión de 0,001-0,01 mm. Sin embargo, el

sistema no tiene en cuenta los efectos externos en el proceso de llenado. En caso de fallo o ligero desgaste de la válvula antirretorno, la posición de conmutación será constante, pero la cantidad de material inyectado fluctuará en cada ciclo. El método menos empleado es la conmutación por tiempo. Tiene la ventaja de emplear una medida de tiempo de elevada precisión, lo que permite su uso para el control. El método más eficaz en términos de estabilidad es el basado en la medida de presión en cavidad. El sensor de presión puede situarse cerca o lejos de la entrada del material. Si está situado cerca de la entrada, puede monitorizarse la totalidad del proceso de llenado, mientras que si está al final del recorrido del material, se puede verificar el llenado total de la pieza. Se obtendrá la mayor información si hay sensores tanto al principio como al final del recorrido del material. Esto es especialmente importante en piezas de paredes finas. Dado que el objetivo es obtener la misma calidad de pieza en cada ciclo, la mayor estabilidad puede alcanzarse mediante la conmutación basada en la presión en cavidad, lo que implica una retroalimentación cerrada [3]. La figura 3 muestra el proceso de fabricación de la pieza.

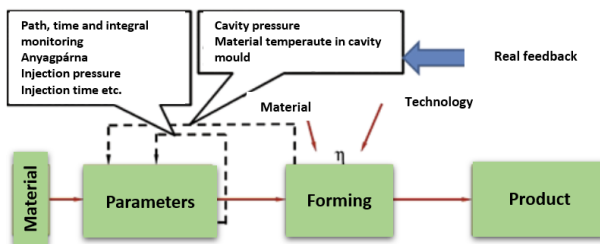


Figura 3. Diagrama de flujo de la fabricación de la pieza

### 3. Resultados de las medidas

Para la realización del experimento se fijó una situación estable (tabla 1.), frente a la cual se modificaron los siguientes parámetros:

- velocidad de inyección ( $v_{fröccs}$ ),
- temperatura del material ( $T_a$ ),
- temperatura del molde ( $T_{sz}$ ),
- punto de conmutación ( $sát$ ),
- presión de mantenimiento ( $p_{pi}$ ),
- tiempo de mantenimiento ( $t_u$ ).

La figura 4 muestra las curvas de presión de la cavidad medidas en un ciclo. Se instalaron dos sensores por cavidad, por lo que en total las 4 curvas mostradas pertenecen a las dos cavidades. Los sensores fueron calibrados, por lo que las diferencias experimentadas en los picos de presión pueden deberse a diferencias en la geometría del molde. Las cuatro fases mencionadas anteriormente pueden diferenciarse bien.

Al ampliar la sección ascendente de la curva, se hacen visibles las fases de llenado y compresión (figura 5).

**Tabla 1.**  
**Parámetros técnicos**

Temperatura del material	200°C (240°C)
Temperatura del molde	30°C (90°C)
Velocidad de inyección	80 mm/s (40, 60, 100, 120, 140 mm/s)
Punto de conmutación	10 mm (11, 9, 8, 7, 6 mm)
Presión de inyección	1500 bar
Tiempo de mantenimiento	5 s (1, 2, 3, 4 s)
Presión de mantenimiento	300 bar (100, 200, 400, 500, 600 bar)

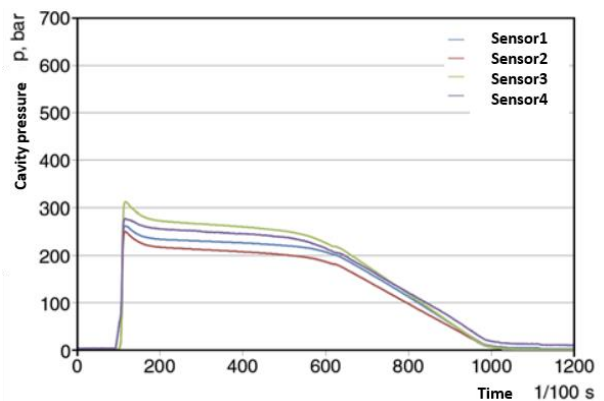


Figura 4. Curva de presión en cavidad en función del tiempo

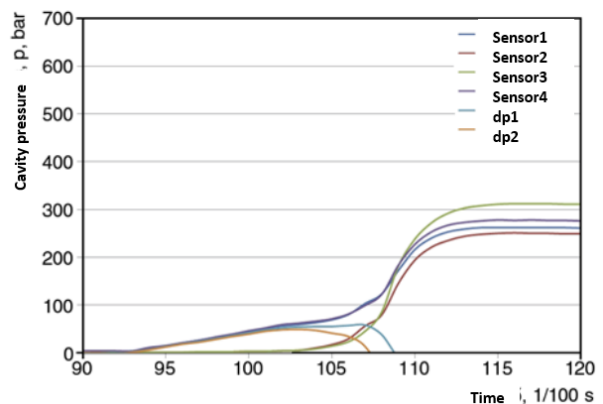


Figura 5. Curva de presión en cavidad en función del tiempo

El flujo de material llega a los sensores situados cerca de la entrada en aproximadamente 85ms, aunque la presión medida sólo se muestra al final del recorrido, después de 100ms. La diferencia de presión medida entre los sensores ( $dp_1$  y  $dp_2$ ) en la fase de llenado es casi constante en un tramo corto y proporcional a la viscosidad del material, mientras que el tiempo transcurrido entre el incremento de dos señales es

proporcional a la velocidad de inyección (velocidad de cizalladura).

El cuadro 2 resume los valores de  $\Delta p$  y de la presión de inyección.

Las curvas que se observan en la figura 6 son similares a la curva de flujo [3]. La explicación es que el esfuerzo de cizalladura viene determinado por la caída de presión y la geometría del flujo, mientras que la velocidad de cizalladura está relacionada con el volumen y la geometría del flujo. Al aumentar la velocidad de inyección, la diferencia de presión medida entre los sensores varía de forma no lineal, por lo que la viscosidad del material disminuye lo cual puede medirse en tiempo real con el sistema. El efecto de la temperatura del material sobre la viscosidad es evidente. Se requirió una menor presión para el llenado de la cavidad del molde con plástico a temperatura más elevada. La presión de inyección registrada muestra una tendencia similar, que tiene una explicación totalmente diferente. El límite de la presión de inyección fijado en la máquina es de 1500 bar.

**Tabla 2.**  
 **$\Delta p$  y presión de inyección en función de la velocidad de inyección**

Temperatura	200°C		240°C		
	$v_{fröccs}$ [mm/s]	$p_{fröccs}$ [bar]	$p1-p2$ [bar]	$p_{fröccs}$ [bar]	$p1-p2$ [bar]
	40	380	40	334	34
	60	426	45	384	41
	80	462	54	391	45
	100	495	60	415	48
	120	523	61	438	50
	140	548	63	458	54

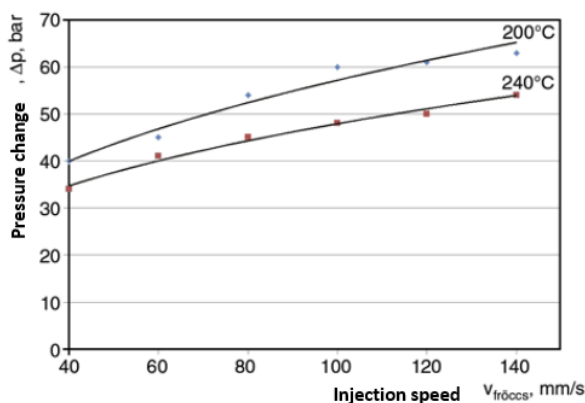


Figura 6. Valores de  $\Delta p$  en función de la velocidad de inyección

La presión medida en la fase de inyección es significativamente inferior a ésta, lo que significa que este parámetro no juega un papel esencial en el conformado, y la presión real de inyección puede evolucionar libremente. La diferencia se explica más por el tiempo de reacción de la máquina, que varía entre 0,01 y 0,1s según el modelo. Al aumentar la velocidad del pistón del husillo, la inercia aumenta, es decir, se detendrá más tarde. La conmutación se produjo a 10 mm en todas las configuraciones, pero el husillo se detuvo más tarde cada vez. La figura 7 muestra la curva de presión del sensor 1. en función de la velocidad de inyección. (Para facilitar la comparación de las curvas, en lo que sigue utilizamos los resultados obtenidos con el sensor 1.)

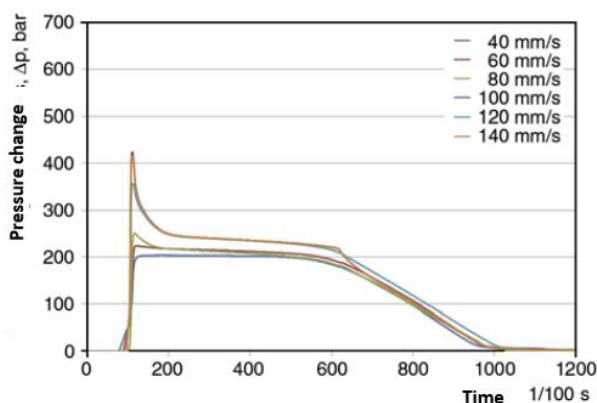


Figura 7. Presión en cavidad en función de la velocidad de inyección

Con exactamente los mismos parámetros, la velocidad de inyección tiene un efecto significativo en la presión en cavidad. Las muestras inyectadas a una velocidad de 120 y 140 mm/s presentan rebabas, lo que puede explicarse por la elevada presión de la cavidad. En el caso de las rebabas, hay que considerar si se formaron en la fase de llenado o en la de mantenimiento. En este caso, el aumento de presión tiende a abrir ligeramente el molde y la masa fundida de baja viscosidad forma la rebaba. En estos casos, la rebaba puede evitarse de un modo seguro disminuyendo la velocidad de inyección, ya que la presión de mantenimiento no estaría relacionada.



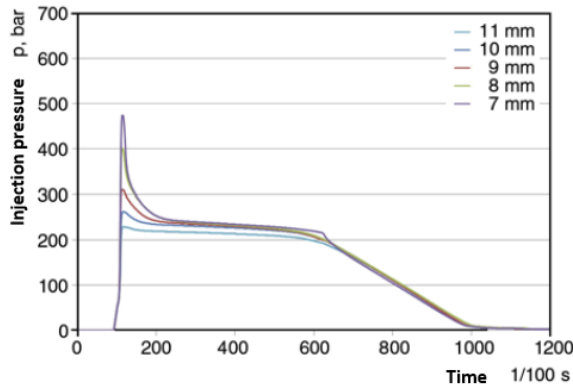


Figura 8. El efecto del punto de conmutación en la presión de inyección

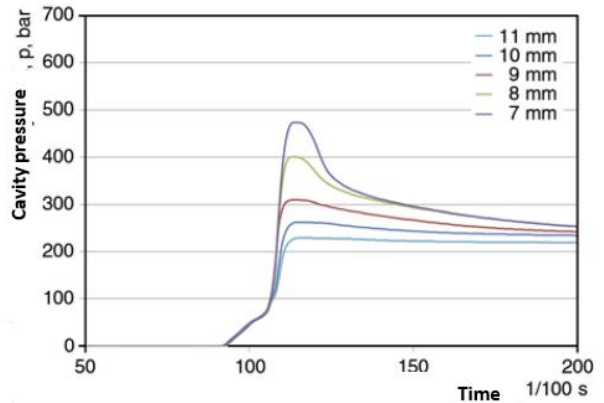


Figura 9. Efecto de la conmutación en la presión de la cavidad

Al variar el punto de conmutación se obtuvieron resultados similares. En el ajuste básico, la conmutación entre la presión de inyección y la presión de mantenimiento se produce en la posición de 10 mm. Si la conmutación se produce antes, es decir, a los 11 mm, sólo se reduce ligeramente la presión de mantenimiento. Esto significa que la compresión se produjo en la fase de mantenimiento. Si la conmutación se produce más tarde, la velocidad de inyección muestra el mismo fenómeno que antes. Como el límite superior de la presión de inyección es de 1500 bar, la máquina de inyección no limitó la presión de inyección real. Debido a la conmutación tardía, se formó rebaba en la pieza (figura 8).

Para analizar un proceso más rápido, es necesario examinar más detenidamente las fases de llenado y compresión (figura 9.). Las curvas de presión obtenidas en la fase de llenado son las mismas y las líneas se superponen. La conmutación de 11 y 10 mm se curva ligeramente debido a la conmutación relativamente temprana. Las curvas discurren juntas incluso en la fase de compresión, mientras que la velocidad de inyección hizo que los recorridos de las curvas fueran más pronunciados o más planos. Después de la conmutación, utilizamos una presión de mantenimiento de 300 bares en todos los ajustes. La disminución del pico de presión en cavidad con el tiempo puede explicarse por el refluo del material. Existe una presión en cavidad de 200...250 bar hasta el sellado. Esta diferencia puede explicarse por la compresibilidad del polímero, el flujo no newtoniano y los cambios estructurales en la sección transversal del flujo durante el enfriamiento [4].

El tiempo de mantenimiento suele determinarse mediante la medida de la masa de la pieza. Con el sistema de medición de presión en cavidad, el tiempo de mantenimiento efectivo puede determinarse con mayor rapidez y precisión (figura 10). Dado que todos los parámetros son constantes, las curvas discurren juntas hasta el final del período de mantenimiento. Si el tiempo de mantenimiento es más corto que el de sellado, puede producirse una rotura repentina, que también es resultado del flujo libre de material. Si el tiempo de mantenimiento es más largo que el de sellado, no se refleja en la curva, porque las partes de material solidificadas en la cavidad no permiten ni la entrada ni la salida del material. Después del sellado -en la fase de enfriamiento- la inclinación de las curvas es aproximadamente constante, lo cual se analiza en el ensayo de enfriamiento.

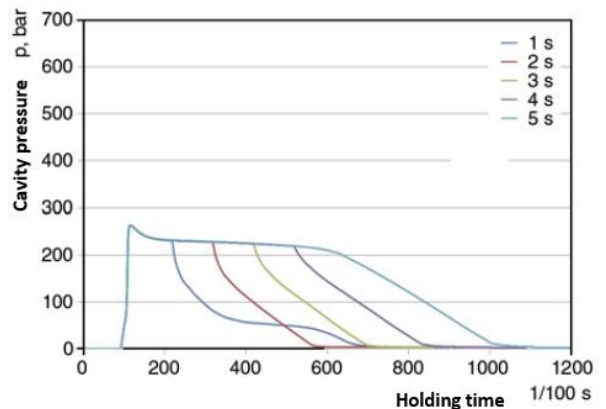


Figura 10. El efecto del tiempo de mantenimiento en la presión en cavidad

El ensayo de presión de mantenimiento arrojó resultados muy interesantes (figura 11). La presión en cavidad es ligeramente inferior al valor establecido. La razón de esto se explicó anteriormente. Cuando la presión

de mantenimiento es inferior a la presión en cavidad, se forma un reflujó en la cavidad y la presión disminuye. Pero cuando es más alta, entonces la compresión se produce debido a la presión de mantenimiento, y una vez alcanzando el pico de presión se vuelve más lenta, y se mantiene en el mismo valor hasta el sellado.

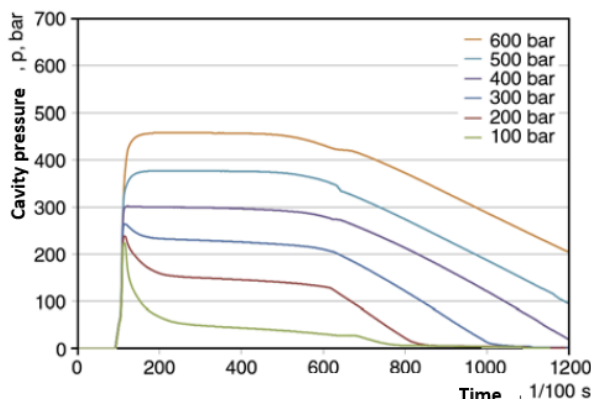


Figura 11. Efecto de la presión de mantenimiento en la presión en cavidad

En cualquiera de los dos ajustes, la muestra presenta rebabas, aunque la presión en cavidad fue significativamente mayor que durante el cambio de velocidad de inyección. La razón de esto es que la capa exterior de la pieza se enfría continuamente durante el llenado. Cuando la temperatura de la capa exterior disminuye por debajo de la temperatura de cristalización, entonces una capa sólida rodea la masa fundida. En consecuencia, el material fundido no puede atravesar la capa, fluir hacia el plano divisorio y formar la rebaba. Por lo tanto, en fabricación de piezas de pared gruesa, el valor de la presión de mantenimiento debe ser ajustado para reducir los surcos, y se recomienda elevarlo con el tiempo.

La figura 12 muestra el efecto de la temperatura del material sobre la presión en cavidad. Se observa inmediatamente que al aumentar la temperatura del plástico, la presión en cavidad aumenta, y el sellado también se produce cada vez más tarde. Por encima de 230°C, los 5 segundos de mantenimiento de presión se quedan cortos, la razón de esto es que una temperatura de fusión más alta produce un sellado más tarde.

La función de la figura 13 representa la primera derivada en el tiempo de las curvas de la figura 12. Contiene muchos puntos interesantes en términos de análisis del proceso.

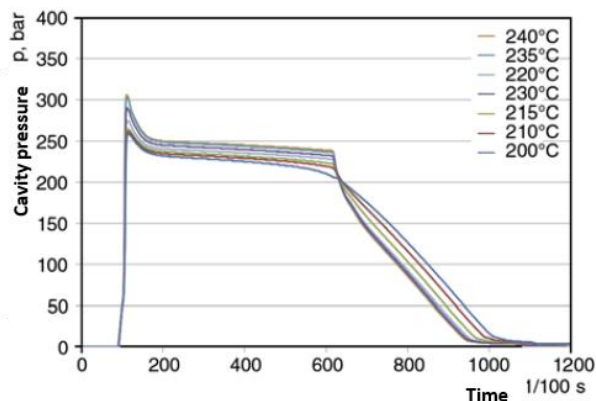


Figura 12. Efecto de la temperatura del material en la presión en cavidad

Muestra bien la influencia de la temperatura del material en el proceso de moldeo. En la fase de compresión se observa el primer y mayor pico en sentido positivo, al que sigue un pico negativo, que es proporcional a la velocidad de salida del material. En la fase de mantenimiento se puede apreciar una pendiente negativa, ya que la presión disminuye ligeramente. El siguiente pico negativo da lugar a un cambio más significativo en función de la temperatura. Se aprecia una transición continua entre la conmutación y el enfriamiento, cuando se produce el sellado, si el tiempo de mantenimiento es corto, entonces hay un pico negativo de nuevo. En la fase de enfriamiento la pendiente es constante, ya que después del sellado la velocidad de enfriamiento no cambia sustancialmente.

**CAVITYEYE**  
SENSOR INFO EVERY MOULD

SCRAPFREE PRODUCTION AND  
 ONLINE QUALITY CONTROL WITH  
 CAVITY EYE CAVITY  
 MEASUREMENT SYSTEM

PRODUCTION AND DISTRIBUTION  
 MEASURING INSTRUMENTS AND  
 SENSORS

YOU CAN FIND FURTHER  
 INFORMATION ON OUR WEBSITE  
[WWW.CAVITYEYE.COM](http://WWW.CAVITYEYE.COM)



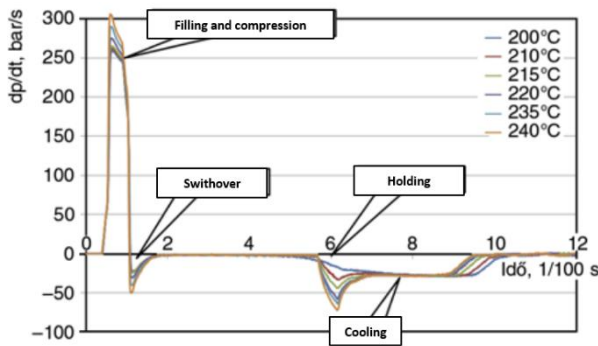


Figura 13. Primera derivada en el tiempo de las curvas de presión en cavidad a diferentes temperaturas del material

La temperatura del molde influyó en las curvas de forma similar a la temperatura del material, pero no aumentó el pico de presión en la misma medida (figura 14). Al aumentar la temperatura del molde, el tiempo de sellado se desplaza de nuevo hacia un punto posterior. A 53°C el tiempo de mantenimiento de 5s no es suficiente, y el material sale de la cavidad incluso antes de que se produzca el sellado. En la fase de mantenimiento, la presión disminuye menos a una temperatura de molde más elevada. Esto puede explicarse por el enfriamiento más lento y la disminución más lenta del volumen específico.

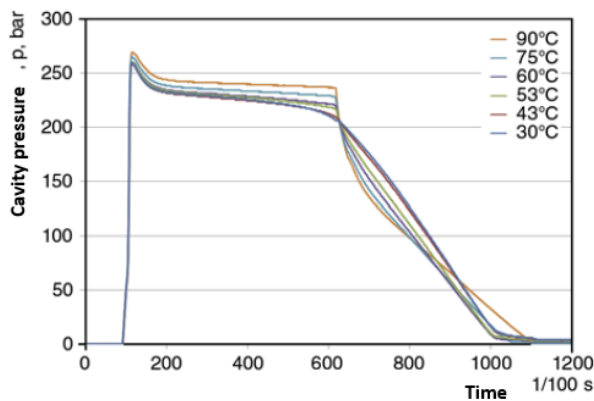


Figura 14. El efecto de la temperatura del molde en la presión en cavidad

Evaluando la derivada de la figura 14, se puede comprobar el tiempo de mantenimiento efectivo y la

velocidad de enfriamiento (figura 15). A mayor temperatura del molde, el enfriamiento es más lento, lo que se muestra bien en el diagrama. El análisis de la función derivada se emplea en el algoritmo del proceso de control de Cavity Eye, actualmente en desarrollo.

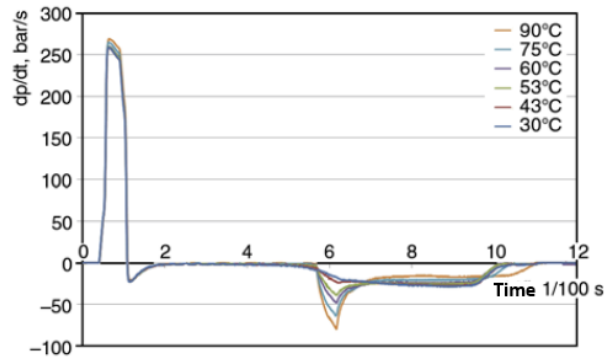


Figura 15. Primera derivada en el tiempo de las curvas de presión en cavidad a diferentes temperaturas del molde

#### 4. Resumen

Como resultado de la investigación de los últimos años, hemos desarrollado un sistema de medición de la presión en cavidad, que incluye el desarrollo de los sensores, los componentes de hardware y el software. El sistema fue creado de acuerdo a los requisitos industriales, pero también es adecuado para las medidas en laboratorio. En nuestro artículo presentamos las posibilidades de la medida de la presión y las condiciones del proceso de moldeo por inyección. Los resultados de las medidas muestran adecuadamente cómo afecta cada parámetro tecnológico a las cuatro fases del moldeo por inyección. El análisis y el control del proceso de moldeo por inyección en base a las curvas de llenado y a la primera derivada de las mismas garantiza otras posibilidades de automatización. El uso del sistema puede facilitar y acelerar el lanzamiento de la producción. En caso de fabricación de productos defectuosos, ayuda a determinar la causa del problema y a clasificar y separar los desechos producidos por la falta de estabilidad de la tecnología de inyección.

## **Bibliografia**

- [1] Ming-Shyan Huang: Cavity pressure based grey prediction of the filling-to-packing switchover point for injection molding, *Journal of Materials Processing Technology*, 183, 419-424 (2007).
- [2] Ho Yin Wong, Ka Tsai Fung, Furong Gao: Development of a transducer for in-line and through cycle monitoring of key process and quality variables in injection molding, *Sensors and Actuators, A* 141, 712-722 (2008).
- [3] Sz "cs, A.: Rheological and thermal analysis of the filling stage of injection moulding, *eXPRESS Polymer Letters*, 6/8, 672-679 (2012).
- [4] Pantani, R.; Coccorullo, I.; Speranza, V.; Titomanlio, G.: Morphology evolution during injection molding: Effect of packing pressure, *Polymer*, 48, 2778-2790, (2007)