

Optimización de parámetros en procesos de moldeo por inyección: Instrumentación para industria 4.0

Juan Adrián Ruiz Sánchez^{*1}, Hugo Arcos Gutiérrez² y Isaías E. Garduño²

Posgrado CIATEQ A.C.¹, CONAHCYT-CIATEQ A.C.²

San Luis Potosí, S.L.P.¹, San Luis Potosí, S.L.P.²; México

Autor de correspondencia: juanadrianruizsanchez@gmail.com

Abstract—Monitoring and census-taking of processes are the cornerstone of technologies related to Industry 4.0, and for the injection molding process, it is imperative to have physical-digital integration that allows production to be kept under control with high effectiveness. The following research demonstrates how an injection mold was instrumented to assess feasibility by characterizing the process in real-time, generating a failure diagnosis, and subsequently optimizing the process. The methodology was based on obtaining and analyzing pressure variations within the mold cavity. The procedure included manipulating the process to induce common defects and failures. The results obtained, when compared with the process under normal conditions, provided information about the behavior of the filling phase graph. This allows for determining the factors to consider when defects such as burrs, short throws, and overpacking occur.

Keyword—Engineering and Technology, Instrumentation Technology, Automation Technology, Injection Molding, Cavity Pressure, Industry 4.0.

Resumen—El monitoreo y censado de los procesos son la piedra angular de las tecnologías relacionadas con la Industria 4.0, y para el proceso de moldeo por inyección es imperativo que exista una integración físico-digital que permita mantener bajo control la producción con alta efectividad. La siguiente investigación ejemplifica la instrumentación de un molde de inyección para demostrar la viabilidad al caracterizar el proceso en tiempo real, generando un diagnóstico de fallas y una posterior optimización del proceso. La metodología se basó en la obtención y análisis de las variaciones de presión dentro de la cavidad del molde. Dentro del procedimiento se contempló la manipulación del proceso para obtener defectos y fallas comunes. Los resultados obtenidos, al ser comparados con el proceso en condiciones normales, arrojaron información sobre el comportamiento de la gráfica de la fase de llenado; con esto, se puede determinar los puntos a tener en cuenta al presentarse un defecto como rebaba, tiro corto, y la sobre compactación.

Palabras claves—Ingeniería y tecnología, Tecnología de la instrumentación, Tecnología de la automatización, Moldeo por inyección, Presión en cavidad, Industria 4.0.

I. INTRODUCCIÓN

El proceso de moldeo por inyección de plásticos es fundamental en la fabricación de piezas a bajo costo para diversas industrias. La implementación de este proceso ha generado un interés en varios sectores industriales para sustituir la mayoría de los materiales convencionales por los plásticos. Debido a su capacidad de repetición, precisión y rentabilidad, este proceso se ha vuelto extremadamente atractivo para la fabricación de una amplia gama de productos. Ha llegado a sectores como la aeronáutica, médico, automotriz y del hogar, donde la calidad impera como factor crítico para que los clientes tengan la seguridad de que los productos funcionan conforme a lo diseñado

Lo interesante en este proceso radica en la variedad de fenómenos físicos y químicos que tienen lugar durante su desarrollo. Aunque pueda parecer un proceso sencillo debido al uso de sistemas convencionales como hidráulicos, neumáticos y eléctricos, la ciencia que respalda cada una de las etapas del moldeo por inyección es en realidad compleja. Las condiciones finales de los productos deben estar estrechamente vinculadas de manera lógica con los efectos que se presentan como variables durante el proceso. Por desgracia el desarrollo del moldeo por inyección aun en pleno siglo XXI sigue estando regido por el

empirismo de la mayoría de los especialistas, dando pie a que muchas de las acciones y resoluciones de problemas no se guíen bajo los datos e información técnica, sino en atribuciones de experiencia y conocimiento adquirido de la práctica y error.

Muchas de las veces esta metodología es aceptada por buena ya que genera resultados que cumplen con requisitos mínimos, sin embargo, su propagación y generalización no puede ser replicable, generando casos específicos en los que se contemplan modificaciones muy puntuales. En la actualidad es crucial que las piezas cumplan con estrictos estándares de calidad en términos de características dimensionales y comportamiento mecánico. Por lo cual es imperativo que las empresas del rubro den un paso fuera del empirismo y nutran sus procesos con toma de decisiones basadas en datos e información técnica. Esto fundamentará la modificación de variables al conocer como estas benefician o perjudican la calidad de los productos plásticos moldeados.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Las piezas plásticas se han convertido en una parte importante e integral de la vida moderna. Los plásticos se utilizan para hacer artículos, piezas y máquinas que usamos todos los días. La ropa que usamos, los autos que manejamos, los dispositivos que usamos para comunicarnos entre nosotros, los contenedores que usamos para almacenar alimentos u objetos - todas estas cosas son en parte o totalmente de plástico (Selvaraj et al., 2022). Los plásticos deben su popularidad a sus bajos costes de fabricación en comparación con los materiales que reemplazan (madera, cerámica, metales). Los plásticos también se caracterizan por el hecho de que pueden recibir propiedades que no están disponibles para otros materiales (color, flexibilidad, dureza, no inflamabilidad, inodoro) (Raviwongse & Allada, 1997).

A. Moldeo por inyección de plásticos

El moldeo por inyección es uno de los métodos más utilizados para la fabricación de productos plásticos. Más del 30% del peso de todos los productos de plástico se fabrica utilizando el proceso de moldeo por inyección (Shrivastava, 2018). Además de los productos de plástico, el moldeo por inyección se utiliza principalmente en la industria automotriz, industrias médica y electrónica. La alta tasa de producción y la calidad son algunas de las ventajas significativas. Los productos terminados requieren operaciones menores de acabado, lo cual es otra ventaja. Sin embargo, el equipo utilizado en el moldeo por inyección puede ser bastante caro y sofisticado, por lo que no es adecuado para la producción a pequeñas escalas.

El moldeo por inyección es un proceso de fabricación en el que el material fundido se inyecta en un molde para producir piezas. Se pueden moldear diferentes materiales en formas deseadas mediante moldeo por inyección. Algunos de los materiales más utilizados son cloruro de polivinilo (PVC), nailon, poliamida, poliéster y acrílico.

Las fases del proceso de moldeo por inyección se pueden resumir como a continuación se muestra:

1. Cierre del molde: esta es la fase cuando el molde está cerrado. Esto se logra avanzando rápidamente la parte móvil del molde.
2. Inyección: durante esta fase, el sistema de inyección se mueve contra el molde. La boquilla hace contacto con el bebedero del molde. Por rotación del tornillo sin fin en el sistema de plastificación el material líquido se inyecta al molde.
3. Prensado: el tornillo sin fin en el sistema de plastificación se presiona contra la boquilla, lo que causa que el plástico se llene en el asiento del molde. Esta fase es necesaria debido a la consiguiente

falta de volumen plástico. El volumen de plástico prensado en el molde disminuye como resultado de la contracción del plástico.

4. **Plastificación:** un movimiento de tornillo giratorio toma lugar. Como resultado, el plástico se toma del alimentador y el tornillo se mueve a la posición inicial. Durante su movimiento, el material tomado del tornillo se somete a temperatura para plastificarlo, mezclarlo y comprimirlo (la compresión del plástico se produce debido a la forma del tornillo).
5. **Apertura:** durante esta fase, la presión de cierre de las partes fijas y móviles del molde disminuyen. El molde se abre y se expulsa la pieza de este. La eyección desde el molde generalmente se lleva a cabo mediante expulsores integrados en el molde.

Gracias a estas fases existen parámetros y factores que se pueden considerar como relevantes para un proceso de moldeo por inyección, estos se enlistan a continuación:

- Temperatura de las zonas de calentamiento del sistema de plastificación,
- Temperatura de la boquilla de inyección,
- Temperatura del molde,
- Presión de inyección,
- Presión de sujeción,
- Fuerza de cierre del molde,
- Velocidad del tornillo,
- Carrera del tornillo,
- Tiempo de ciclo y tiempo de cada fase del ciclo,
- Velocidad de inyección (Chaciński & Sutowski, 2021).

La mayoría de las máquinas de inyección utilizadas en la industria actual son las máquinas de inyección tipo tornillo. De acuerdo con el modo de conducción, las máquinas de inyección se dividen principalmente en máquinas de inyección eléctricas y máquinas de inyección hidráulicas (Figura 1).

La máquina de inyección por lo general consta de un sistema de inyección, un mecanismo de sujeción del molde, un sistema hidráulico, un sistema de control eléctrico, un sistema de calefacción y otras partes auxiliares como una parte de refrigeración y un parte de alimentación.

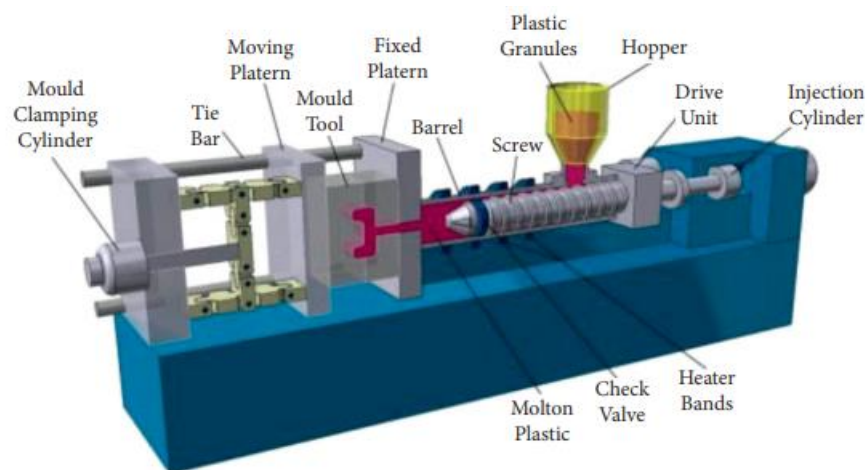


Fig. 1. Componentes principales de una máquina de inyección (Selvaraj et al., 2022).

El proceso de moldeo por inyección incluye principalmente tres etapas que ocurren dentro de la máquina de inyección: tres procesos de llenado, llenado y mantenimiento. Durante la etapa de plastificación del proceso de inyección, el tornillo transporta el material plastificado hacia adelante a cierta velocidad. A medida que la ranura del tornillo se vuelve menos profunda, el material se compacta y se transporta continuamente hacia adelante. La cabeza acumula material continuamente, esperando la llegada de la instrucción de inyección, y al mismo tiempo, el tornillo retrocederá continuamente a medida que la contrapresión de la máquina de inyección aumenta. Cuando se inicia la inyección, el tornillo se mueve hacia adelante y el material llena continuamente el molde. Al mismo tiempo que la presión en el molde aumenta, el tornillo se mueve mientras está inyectando. Cuando el material se llena en el molde, la máquina de inyección inyecta un porcentaje del material en el molde por la acción de contrapresión.

Con la temperatura del material decreciendo, la presión en la cavidad del molde comienza a disminuir. Cuando el material inyectado puede ser con seguridad desmoldeado sin ser dañado, el molde de inyección es abierto y el producto expulsado a través del molde (Fu et al., 2020).

III. DEFECTOS COMUNES DEL PROCESO

A. *Rebaba*

(Chen et al., 2006) La describe como el fenómeno que, durante el proceso de llenado del molde de inyección, y particularmente después de que la cavidad se ha llenado por completo, la fuerza de separación del molde tiende a aumentar los espacios inevitables entre las superficies de separación. Cuando estos espacios coinciden con las líneas divisorias, es posible que el plástico se filtre. Este fenómeno no deseado, conocido como flash, puede ocasionar el rechazo de la pieza si es visible. Debido a que el espacio suele ser pequeño en comparación con la cavidad, las presiones necesarias para provocar la formación de rebabas son elevadas y los intervalos de tiempo son breves.

B. *Tiro corto*

Un producto de plástico que tiene una pieza incompleta se denomina "tiro corto". Este problema se identifica fácilmente al observar una pieza que no ha sido completamente moldeada, lo cual puede ser causado por parámetros de procesamiento que no están correctamente ajustados. Esto puede incluir puntos de conmutación, temperaturas de fusión o de molde, presiones de compactación y otras variables relacionadas (Wibowo et al., 2020).

C. *Instrumentación de moldes de inyección de plástico*

Los fabricantes se esfuerzan por un moldeo por inyección totalmente automático con control de calidad en línea para satisfacer las demandas de los clientes de altos volúmenes con altos rendimientos. Hasta la fecha, este objetivo no se ha logrado debido a la falta de transductores para mediciones precisas en línea. La gran mayoría de los equipos de producción solo utilizan sensores de máquina convencionales para el control de circuito cerrado. Los fabricantes de plásticos suelen utilizar este enfoque centrado en la máquina con límites de control establecidos con la esperanza de que su configuración es "lo suficientemente buena." Como resultado, los estados en sitio del polímero no se observan con precisión ni se controlan adecuadamente, lo que conduce a procesos subóptimos, bajos rendimientos y desechos ambientales. Para un mejor control del proceso, se necesita un conocimiento más preciso del comportamiento del polímero y debe adquirirse utilizando In-mold instrumentation (Ageyeva, Horváth, Kovács 2019).

La detección del proceso de moldeo por inyección se centra en la temperatura, presión, posición, velocidad, que reflejan el estado físico del proceso. Temperatura y presión son las dos variables físicas fundamentales que son las más importantes en el proceso de moldeo por inyección. Además, entre las diversas tecnologías de detección, los sensores de temperatura y presión son los más desarrollados y los más utilizados. Mediante la detección de la temperatura y la presión, se puede obtener abundante información sobre el molde y la fusión de polímero. Con el desarrollo continuo de la tecnología, han surgido algunos nuevos métodos en el campo del moldeo por inyección (Ogorodnyk & Martinsen, 2018).

(Zhao et al., 2020) Establecen que el futuro de las investigaciones para el proceso de manufactura consistirá en un moldeo por inyección inteligente y este contiene tres fases: detección, optimización y control, todas ellas interrelacionadas (Figura 2). Obviamente para la detección de procesos es imperativo realizar una detección en tiempo real de las variables del proceso de moldeo por inyección pues estas más adelante ayudarán a diagnosticar y guiar el proceso de fabricación en tiempo real. Concluyen que los métodos de detección actual son indispensables, pero conforme se desarrolle la tecnología sistemas emergentes de detección serán más utilizados ya que proveen más información y características del proceso de moldeo, sin embargo, el reto para los trabajos futuros será la investigación para su control en tiempo real (Zhou, 2013; Rojas-Rodríguez et al. 2023).

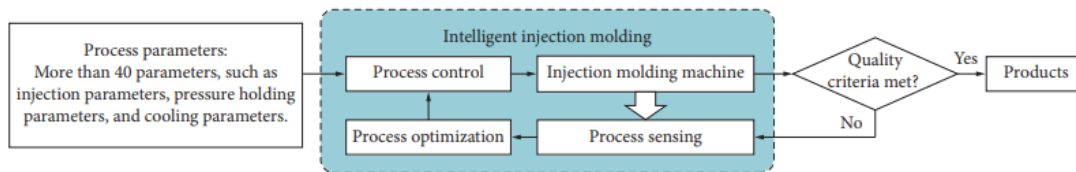


Fig. 2. Esquema de un proceso de moldeo por inyección inteligente (Zhao et al., 2020).

La detección de información interna por ultrasonido revela abundante información sobre el proceso y las propiedades de la masa fundida durante el proceso de moldeo por inyección. (Zhao et al., 2019) diseñaron un sistema de tecnología de caracterización ultrasónica (Figura 3) que tiene las ventajas de ser no destructiva, en línea, de bajo costo y segura. Fue es la primera vez que se ha empleado tecnología ultrasónica para la caracterización de MIM.

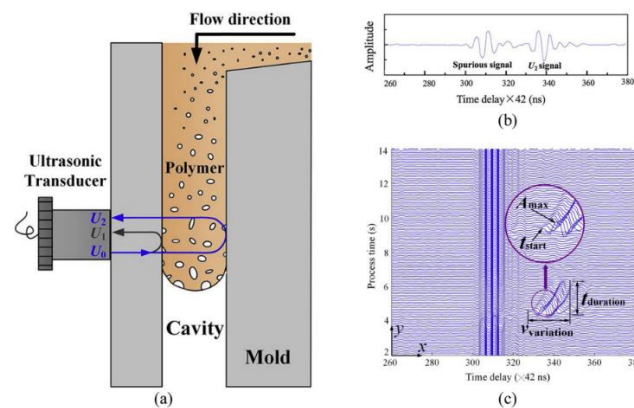


Fig. 3. (a) Sección transversal de molde con transductor de ultrasonido, (b) señal del transductor que incluye la señal U2 y espurio, (c) señales ultrasónicas típicas U2 relativas al ciclo de proceso MIM. (Zhao et al., 2019)

(Guerrier et al., 2017) Diseñaron nuevos componentes del instrumental que tuvieran la peculiaridad de ser transparentes con la intención de colocar una cámara de alta velocidad que grabara el flujo de llenado del plástico y así hacer comparaciones con lo obtenido mediante simulaciones numéricas (Figura 4). A la

par se instalaron termopares y sensores de presión que ayudaron a corregir los tiempos de llenado generales, que no son capturados por la cámara de alta velocidad, y obtener información valiosa sobre la velocidad del interruptor de control de presión, ya que esto no es visible en las grabaciones de vídeo. Encontrado los motivos por los que los resultados no fueron los ideales y entiendo limitantes que en la simulación se deben de considerar.

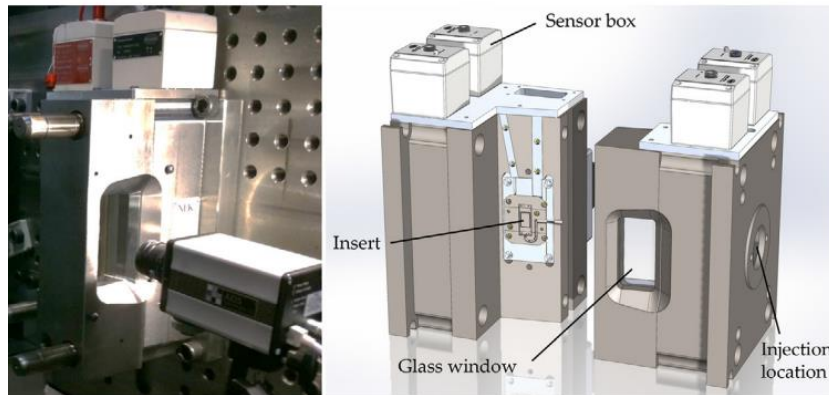


Fig. 4. Visión general de la instalación del sistema de visión de alta velocidad (Guerrier et al., 2017)

Actualmente se han desarrollado sensores multivariables (MVS), que son capaces de medir temperatura de masa, velocidad de masa, viscosidad de masa y temperatura de molde, todo en un mismo sensor (Figura 5) que podría utilizarse para mejorar el control de calidad y la productividad en una serie de procesos de fabricación que dependen de la temperatura y la presión. (Gordon et al., 2015) aplicaron un sensor multivariable en un caso de estudio donde obtuvieron buenos resultados evaluando los resultados obtenidos del sensor en retrospectiva con sensores tradicionales de temperatura y presión. A su vez se obtuvieron buenas aproximaciones en relación con los cálculos hechos para la velocidad y viscosidad de masa.

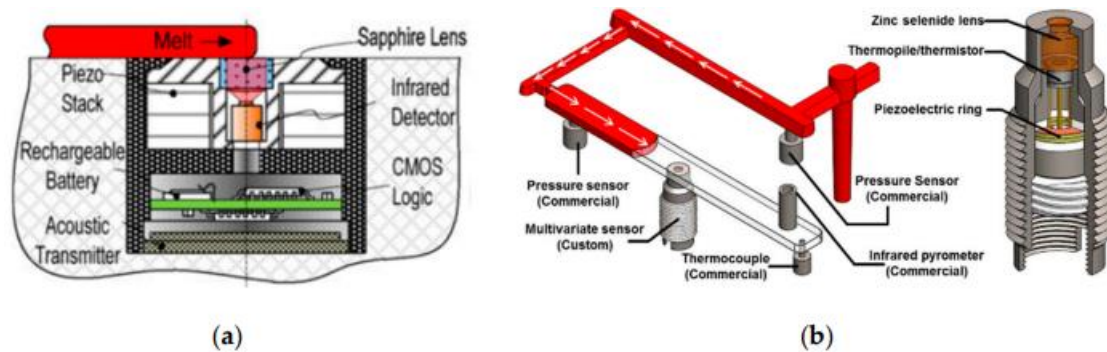


Fig. 5. (a) Esquema sensor multivariable MVS, (b) aplicación de un sensor multivariable (Ageyeva et al., 2019)

D. Sensores de presión

Los sensores de presión se dividen principalmente en dos categorías: resistencia y piezoeléctricos. Estos detectan cambios en la resistencia y el voltaje, respectivamente, en respuesta a niveles variables de presión para determinar su valor. Los sensores de presión disponibles en el mercado han experimentado

un rápido avance en su desarrollo. La señal detectada por el sensor de presión generalmente se representa como un valor unidimensional (1D) en la dirección normal a la superficie de la cavidad (Zhao et al., 2020).

Una descripción de lo de los sensores de presión se presenta en Panchal et al. (Panchal et al., 2009). El diseño se basa en celdas de carga tipo botón, con una geometría diseñada para ofrecer una baja rigidez a la flexión, permitiendo que el diafragma se desvíe con fuerzas mínimas. Además, se incorpora un tope cilíndrico para asegurar que el diafragma no se desvíe más allá de su límite elástico.

(Araújo et al., 2023) en su estudio destacaron la importancia de las mediciones de presión dentro de la cavidad para diagnosticar fallas en el proceso de moldeo por inyección. Ya que además de las variaciones en las condiciones del proceso, se ha identificado una brecha en el uso de estas mediciones en la cavidad para investigar cómo la herramienta del molde influye en la optimización del proceso.

IV. METODOLOGÍA

En esta investigación, se seleccionó como objeto de estudio una pieza plástica inyectada (Figura 6) que desempeña el papel de grapa en los ensamblajes de tarjetas eléctricas y carcasas plásticas para conectores de tableros de automóviles. La composición de esta pieza está constituida por Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), y el material analizado pertenece a la marca LG Chem. con la especificación HI121 (Figura 7).



Fig. 6. Piezas inyectadas más la colada que sale del molde.



Fig. 7. Material ABS grado HI121 de la marca LG Chem utilizado en la investigación.

En cuanto al equipo principal, referente tanto al molde como a la máquina, se empleó una máquina de inyección de la marca JonWai (Figura 8) utilizando específicamente el modelo JW-60SD; El molde encargado de inyectar la pieza es un molde de 2 placas, con sistema de colada fría. En un solo ciclo, tiene la capacidad de inyectar 10 piezas (Figura 9. a)), y en su caja de expulsión cuenta únicamente con una placa de expulsión y su correspondiente placa de soporte (Figura 9. b)). Es en estas placas donde se sitúa el sensor de presión, la colocación del sensor será explicada detalladamente más adelante en este capítulo.



Fig. 8. Máquina de inyección marca JonWai modelo JW-60SD utilizada en la investigación.



Fig. 9. a) Molde de inyección instrumentado. b) Cavity con la geometría de la pieza y la colada fría.

Para alcanzar los objetivos de esta investigación, se implementó un proceso que se dividió en dos etapas. La primera etapa corresponde a la instrumentación del herramental, que se puede resumir como la adaptación realizada en el molde de inyección de plástico para alojar el sensor de presión encargado de recopilar los datos necesarios. La segunda etapa corresponde a la experimentación y prueba de los parámetros de proceso de la máquina de inyección

A. Instrumentación del molde de inyección

Se eligió emplear un sensor de presión genérico disponible en el mercado, sin las restricciones y limitaciones que a menudo acompañan a la elección de sensores de marcas reconocidas, al final estos siempre corresponderán al principio de funcionamiento de una galga extensiométrica FX19 Compression Load Cell con rangos de 10 – 200 lbf. La capacidad de este sensor para abarcar un espectro amplio de valores asegura la obtención de datos detallados y representativos, proporcionando así una base sólida para la consecución de los objetivos planteados en este proyecto.



Fig. 10. Galga extensiométrica modelo FX19 Compression Load Cell utilizada en la investigación.

Por lo tanto, se opta por utilizar una galga extensiométrica modelo FX1901-0001-0200-L de la marca TE connectivity (Figura 10) debido a su excepcional alcance de lectura, que se reveló como crucial para capturar con precisión la gama completa de variaciones en las condiciones analizadas.

Para la instalación de este sensor, se siguió el procedimiento recomendado para su implementación como si fuera un sensor de presión diseñado específicamente para aplicaciones en moldes de inyección de plástico (Figura 11). Este tipo de sensores no pueden ser ubicados de manera directa en la cavidad del molde puesto a que por las condiciones del proceso dañarían los componentes del equipo al cabo del tiempo. Se lleva a cabo una medición de manera indirecta al ubicar el sensor en las placas de eyección del molde. Durante la inyección de plástico en la cavidad del molde, el frente flujo de material fundido pasa por la zona donde se encuentra la punta de un perno expulsor. Entonces la velocidad y presión con la que se desplaza el frente flujo impulsa el perno transmitiendo la presión desde la punta hacia la cabeza del este, que es la parte en contacto con el sensor de presión.

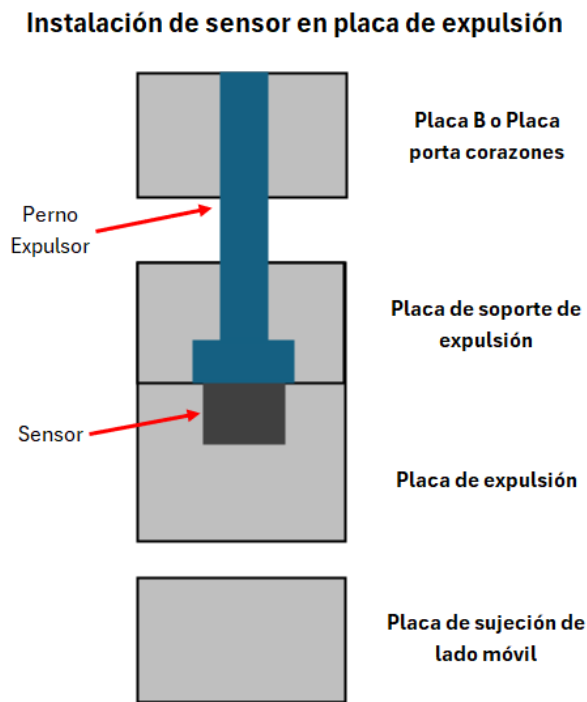


Fig. 11. Diagrama de un sensor de presión para moldes de inyección de plástico.

Observamos la posición de la cabeza de los pernos desde la parte frontal del lado fijo del molde de inyección, notando que el sensor se encuentra instalado en proximidad al punto de inyección (Figura 12).

Es importante señalar que se instaló únicamente un sensor en todo el molde de inyección. Esta decisión se tomó considerando las limitaciones de espacio derivadas del tamaño del sensor en comparación con las dimensiones de la placa de expulsión, lo que dificultó la implementación de múltiples sensores en dicha placa. Sin embargo, el diseño de la pieza es simétrico y esta alineado e incluso balanceado con el sistema de llenado del molde, por ende, no parece indicar un cambio significativo el uso de dos sensores en diferentes cavidades, es importante destacar que esta observación se basa en la información disponible hasta el momento y no puede ser considerada definitiva.

Lo que, si puede ser interesante en trabajos futuros o replicas en otros casos de estudio, es que se aplique más de un sensor en la misma cavidad, pero en diferente zona. Debido a que existe un descenso de la presión en zonas que se alejan de la entrada o punto de inyección, se obtendrían mayores datos para mejorar la caracterización del proceso.

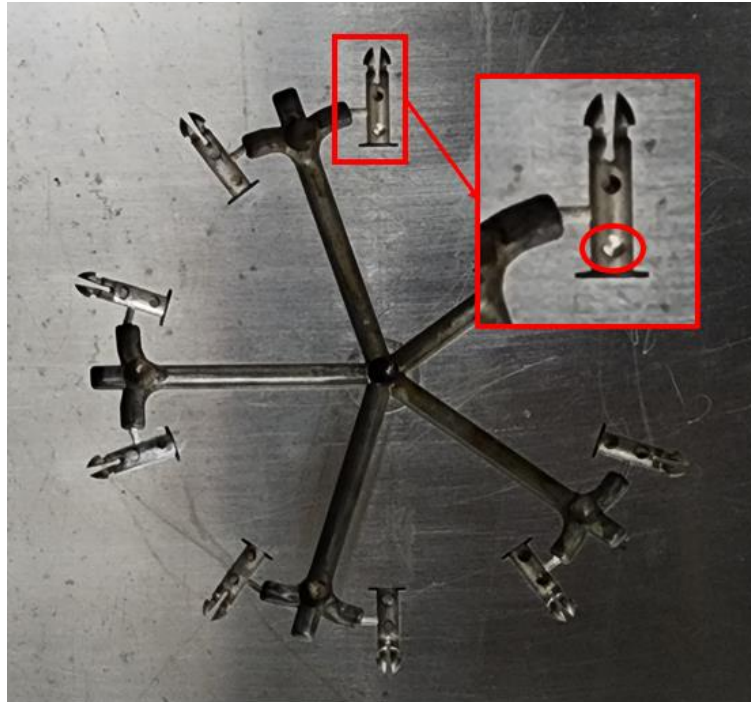


Fig. 12. Perno de expulsión que da lectura al sensor y su colocación con respecto al punto de inyección.

Con respecto al procesamiento de la señal de presión, se empleó un chasis controlador Crio 9048 de la marca National Instruments (Figura 13) para recibir y transmitir la señal de datos generada por el sensor. Este controlador presenta la característica de ser compatible con diversos módulos según las lecturas específicas que se requieran. En el estudio en cuestión, se utilizó el módulo NI9219, el cual ofrece canales de entrada analógicos destinados a la lectura de datos de presión. Se establece la conexión de este controlador a la computadora a través de un cable Ethernet, y simultáneamente se alimenta con una fuente de poder (Figura 14) modelo PSB-1400M, de la marca GW Instek, siguiendo los parámetros especificados por National Instruments para garantizar el correcto funcionamiento del equipo.

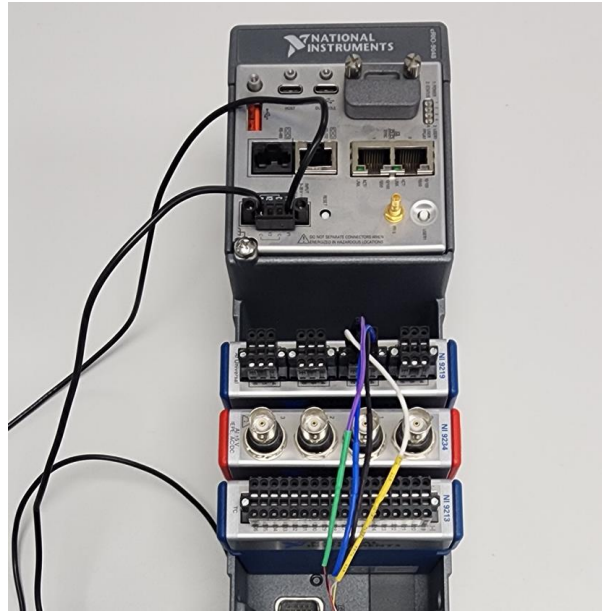


Fig. 13. Chasis controlador Crio 9048 con módulo de lectura NI9219.



Fig. 14. Fuente de poder GW Instek modelo PSB-1400M utilizada para energizar el controlador Crio.

Las conexiones entre el sensor y el módulo del controlador se llevaron a cabo siguiendo la codificación de colores proporcionada por el fabricante (Figura 15. a). Estas conexiones se alinean con las posiciones designadas por el módulo para el puente de Wheatstone. Se ejecutó un proceso de ponchado de cables con el fin de prevenir posibles falsos contactos, y adicionalmente, se recubrieron para protegerlos de posibles averías causadas por el calor (ver Figura 15. b)). Estas acciones se llevaron a cabo antes de la instalación en la máquina.

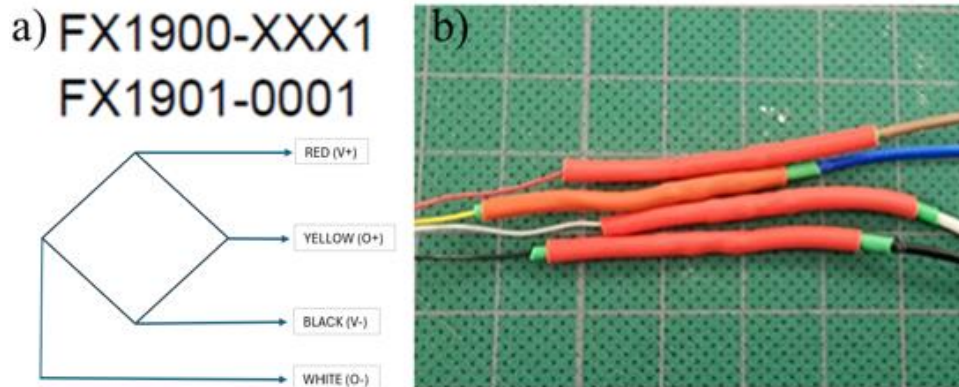


Fig. 15. Detalle de las conexiones principales del sensor. a) Diagrama de codificación para la conexión. b) Cables de conexión entre el sensor y la tarjeta capturadora.

Finalmente, con el propósito de interpretar y visualizar la información generada por el sensor y, en general, por el proceso, se desarrolló una interfaz gráfica utilizando el software LabVIEW, el cual es de la misma marca que todo el equipo de obtención de datos, National Instruments. Para llevar a cabo esta actividad fue necesario la utilización de una serie de complementos del software, el primero es el LabVIEW Real-Time Module que puede usarse para crear e implementar aplicaciones de sistemas distribuidos en tiempo real para pruebas, monitoreo y control. También se utilizó el LabVIEW FPGA Module que es un simulador que ayuda a diseñar sistemas complejos para definir hardware personalizados, además se actualizo y utilizo todos los controladores previstos para el módulo de lectura NI9219.

Por el empleo de los módulos y controladores antes mencionados es que se programó la interfaz siguiendo la lógica del software. Este programa a resumidas cuentas está diseñado para adquirir los datos del sensor con los protocolos de la biblioteca de LabVIEW para el chasis y módulo de lectura. El protocolo también permite evaluar las mediciones del sensor y calibrar el sensor en base el error de las mediciones lo que asegura la fiabilidad de las lecturas registradas durante el proceso. Se programó a que se obtuviera cada 0.01 segundos una señal de presión; estos datos se almacenan en una memoria virtual para el posterior guardado en un formato de texto. Además de las señales de presión, se estipularon una serie de entradas manuales para que fungieran como registros de los parámetros más relevantes del proceso. Al igual que las señales los datos de parámetros fueron guardados en el mismo archivo de texto con la intención de que sirviera como un registro tipo bitácora de lo ocurrido en las corridas y poder procesar la información a conveniencia del usuario final. En la Figura 16 se resume la fase de instrumentación del herramental mediante, que engloba los puntos descritos anteriormente.

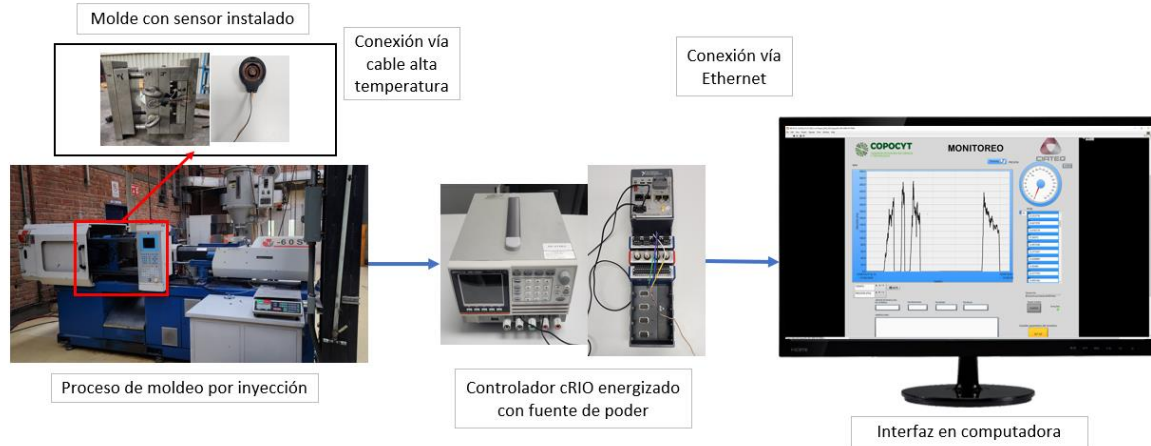


Fig. 16. Esquema de la instrumentación para la captura de datos del molde.

B. Experimentación y pruebas de parámetros de proceso

La etapa siguiente del procedimiento implicó llevar a cabo las pruebas destinadas a adquirir información sobre la presión de la cavidad. El propósito fundamental consistía en identificar los defectos de calidad presentes en la pieza, tomando como referencia el comportamiento registrado en la gráfica de presión.

Se implementó un procedimiento experimental destinado a reproducir de manera controlada algunos de los defectos más recurrentes asociados al proceso de moldeo por inyección. Dicha metodología se diseñó considerando los siguientes defectos específicos: tiros cortos, sobre compactación, fluctuación de peso y dimensiones, y rebabas. Dado a que no se dispuso de una base teórica existente que se asemejará al tipo de experimento propuesto, se optó por ejecutar el experimento mediante la manipulación de los parámetros críticos asociados a cada defecto seleccionado.

Tras alcanzar la estabilización del proceso, se llevó a cabo una serie de ejecuciones, cada una con una duración de 30 minutos, con el propósito de obtener un número significativo de piezas que aseguraran la obtención de réplicas aceptables. Este enfoque experimental permitió generar datos relevantes sobre la incidencia y características de los defectos seleccionados en el moldeo por inyección. La configuración de las pruebas y los parámetros predeterminados a ser abordados en el experimento se resumen en la Tabla I de programación.

Tabla I. Programación de pruebas a ejecutar en el experimento.

Descripción	Configuración del experimento	
	Parámetros por modificar	Tiempo programado
Corrida normal	Sin cambio	30 min.
Fluctuación de peso y volumen	Etapa de sostenimiento	30 min.
Tiro corto	Tiempo de inyección y sostenimiento	30 min.
Tiro corto	Velocidad y presión de inyección	30 min.
Sobre compactación	Presión y tiempo de sostenimiento	30 min.
Rebaba	Temperatura del molde y masa	30 min.
Rebaba	Velocidad y presión de inyección y fuerza de cierre	30 min.

Entonces el experimento comenzó con una corrida normal, sin ningún tipo de alteración en los parámetros del proceso. Se diseño de esta forma para tener la base del comportamiento habitual, posteriormente se cotejaría con lo obtenido en cada una de las pruebas.

Dependiendo de la maquina a utilizar puede cambiar la interfaz de controladores con los que se interacciona en el proceso, sin embargo, son parámetros universales que en todas las máquinas de inyección de cualquier tipo o marca se podrán encontrar. Los parámetros utilizados para la corrida normal fueron establecidos desde que se diseño y valido el molde de inyección, ver la Tabla II.

Tabla II. Parámetros establecidos en la máquina de inyección para correr el proceso en condiciones normales.

Pieza: Staple CIA01, Fecha: 12/09/2023, Material: ABS, Operador: Martin	
Presecado: Si	Carga
Temperatura de presecado: 86° C	1 2 3 SUCC
Tiempo de presecado: 2 horas	95 95 95 50
Temperaturas de zonas del cañon	35 35 35 50
Zona 1: 235° C	20 23 40
Zona 2: 220° C	
Zona 3: 220° C	Tiempo de enfriamiento: 20 seg
Zona 4: 225° C	
Temperaturas del molde:	Cierre de molde
Lado Movil: 19° C	Cierre
Lado fijo: 19° C	Presión: 50 50 70 140
	Velocidad: 35 40 20 80
Inyección	Posición: 200 80 60
Tiempo Ciclo: 28.3 seg	
	Abertura
Presión: 30 40	Presión: 20 20 50 140
Velocidad: 32 37	Velocidad: 20 35 30 15
posición: 15 20	Posición: 235 200 200 100
Tiempo de inyección: 1.8 seg	Expulsión:
	Presión: 55 55 45
Sostenimiento	Velocidad: 20 45 30
	Pausa: 0 0 0
Presión: 25	Posición: 6 12 0
Velocidad: 10	Mod. Expuls: 1 - num
Tiempo: 0	Numer. Expuls: 2

Cumplido el tiempo destinado para la corrida normal, se modificaron los parámetros para obtener piezas con fluctuación de peso y volumen. La modificación realizada consistió en suprimir la etapa de sostenimiento, configurando un tiempo de 0 segundos y subiendo el tiempo de enfriamiento a 20 segundos. Al quitar la etapa de sostenimiento las piezas pueden estar completas, pero al no pasar por una fase de compresión y remanencia las piezas no tendrás las características finales previstas.

Existe una serie amplia de combinaciones en los parámetros que puede dar una gama de resultados considerable, uno de los errores comunes es pensar que solo una variable puede crear estragos en la calidad del producto, ya que no se considera que esta variable es parte de una combinación específica que modifica las condiciones con las que se trabaja el proceso. Como ya se ha explicado, para esta investigación se tomó solo aquellas condiciones con las cuales es más probable encontrarse con los defectos seleccionados. Por lo antes dicho es que la segunda prueba que corresponde a tiro corto se dividió en dos. La primera consistió en disminuir los tiempos tanto de la fase de llenado como el de la fase de sostenimiento, respectivamente se disminuyó a 0.7 segundos y 0.3 segundos. La elección de la magnitud de los parámetros fue fundamentada en un juicio cualitativo de como el valor influía en las condiciones de calidad de las piezas.

La tercera prueba como ya se ha explicado también consistió en tiro corto, pero para este caso se manejó una alteración específica de la fase de llenado. Todas las máquinas de inyección de plástico tienen la capacidad de realizar perfiles de inyección y de sostenimiento, esto se refiere a que se destina por ejemplo la inyección en pasos, que es lo que se encuentra enumerado cada columna de datos. Para esta prueba se configuró una disminución de presión a 35 y luego 25 bares en la etapa 1 y 2 respectivamente. También se redujo la velocidad a 20 y 15 mm/s respectivamente. Las dos limitaciones presentadas en la inyección exhiben un caso en el que se impide que la fase de llenado se complete de manera adecuada, obteniendo que las piezas no se formen completas aun a pesar de que tienen una etapa de sostenimiento.

La sobre compactación fue el objetivo de la prueba número cuatro. La configuración utilizada consistió en una variación inversa de la etapa de sostenimiento. Si en la fluctuación de peso se eliminó como tal el sostenimiento, en la sobre compactación se elevaron los valores de presión, velocidad y tiempo, 60 bares, 35 mm/s y 6 segundos respectivamente. Con esto se somete al proceso a una fase de empaquetamiento más agresiva, que compacta una mayor cantidad de material en un tiempo más prolongado. Dependiendo de las características del plástico se puede comprimir a mayor o menor medida durante el proceso. Por ende, a diferencia de otros procedimientos, una vez abarcado la cavidad del molde en su totalidad no se frena el ingreso de material fundido, si se programa como se realizó el experimento, la máquina interpretará que deberá de seguir llenando la cavidad basándose en las condiciones configuradas.

Al igual que lo suscitado con el tiro corto, se dividió la prueba en dos, pues son dos combinaciones las que se consideran consistentes en los procesos de moldeo. Entonces en la prueba de rebaba número 5, se incrementó las temperaturas tanto de la masa fundida como las temperaturas del molde. La temperatura de la masa se refiere a la temperatura que controla que el plástico fundido se mantenga a la temperatura de trabajo establecida, por otra parte, las temperaturas del molde son aquellas que controlan las superficies que tienen contacto con el molde y que ayudan al proceso de solidificación del plástico. Las temperaturas de masa en un contexto normal se configuraron en 230 °C, para la prueba se elevó hasta 245 °C, las temperaturas del molde de estar a 19°C se incrementaron hasta 60 °C aproximadamente. Con lo antes dicho se buscó que el plástico tuviera una capacidad de fluir de mayor manera a los intersticios del herramental generado el defecto antes nombrado.

Por último, la prueba número seis que también corresponde a rebaba, consistió en una variación de la etapa de llenado. Se modificó tanto la presión como velocidad en sus dos pasos, 55 y 45 bares en la presión, además de 55 y 50 mm/s para la velocidad respectivamente. Aunado al tema de llenado, se modificó el valor de la alta presión en el módulo de cierre de molde, la alta presión es cuando la máquina aplica la fuerza requerida para que el molde no se abra al recibir la presión de inyección. Este valor se cambió de 140 toneladas a 80 toneladas. La idea central fue aumentar las presiones ejercidas en la inyección con tal de que forzaran al molde abrirse y denotar las rebabas, por las condiciones del

herramental se utilizó la fuerza de cierre solo para hacer evidente este proceso, pues el cierre entre caras del molde cumplía con evitar la fuga de material.

V. RESULTADOS

A partir del método explicado en el capítulo previo, se obtuvieron una serie de resultados positivos, que de inicio satisface el criterio de caracterizar el proceso de moldeo por inyección. Además, se llega al entendimiento de cómo se relacionan los defectos más comunes con las configuraciones que son programables en la máquina.

A. Resultados generales de la metodología

El principal desafío de la investigación consistía en determinar si la metodología implementada podría generar lecturas precisas de los datos, incluso bajo las condiciones físicamente agresivas del proceso de moldeo por inyección. Como resultado inicial, se observó que una galga extensiométrica genérica era capaz de proporcionar mediciones equiparables a las obtenidas por un sensor de presión de marcas comerciales. Además, se confirmó que la interfaz desarrollada (Figura 17) podía recibir e interpretar de manera efectiva las señales de presión, generando representaciones gráficas en forma de gráficos XY. Estas visualizaciones facilitan la interpretación de los datos que se detallarán en este mismo capítulo.

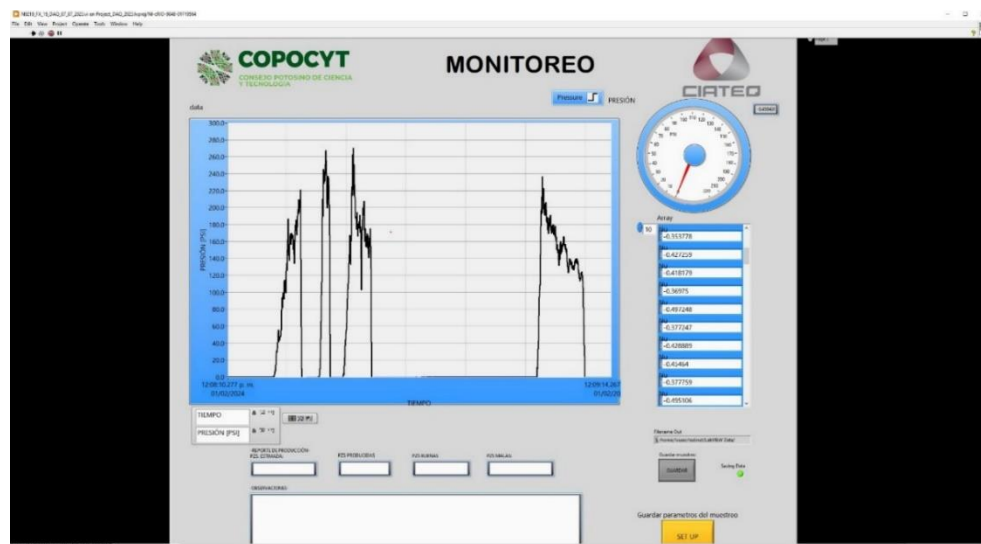


Fig. 17. Interfase desarrollada en LabView para registrar los valores del sensor de presión.

El siguiente resultado destacado que se logró obtener a través de toda la metodología de instrumentación es que, de manera similar a la prevista, los datos se almacenaban durante el proceso en la memoria de la computadora. Posteriormente, siguiendo las indicaciones del usuario mediante el uso de las funciones programadas para esta tarea, los datos se registraban en un documento con formato de texto. Los archivos generados contienen una recapitulación completa de toda la información del proceso, abarcando tanto los parámetros de programación utilizados para la ejecución en máquina, como los registros detallados de las presiones acumuladas a lo largo de la corrida. Estos archivos pueden ser posteriormente empleados en estudios subsiguientes u otras situaciones donde sea necesario utilizar dicha información.

B. Hallazgos obtenidos a partir de la instrumentación

Con respecto a los datos obtenidos durante las pruebas realizadas y en base a la metodología aplicada, se ha extraído información relevante que se detalla a continuación para cada prueba específica de la experimentación. Se tomarán los resultados de la prueba normal o sin modificaciones en parámetros con tal de explicar al lector el comportamiento de la gráfica y como interpretarla, a partir de esto solo se explicarán los cambios más relevantes en cada gráfica.

B.1) Corrida normal condición de piezas OK

El ciclo de inyección se puede definir de manera general como el lapso donde se produce el producto moldeado. Un ciclo se cuenta desde que cierra el molde para inyectar hasta que vuelve abrir para expulsar las piezas ya formadas. Durante este suceso tienen lugar fases que como se ve en la gráfica de presión (Figura 18), tienen importancia para el cumplimiento del ciclo de inyección.

- a) Es el comienzo del ciclo de inyección, antes de llegar a este punto la maquina cerró el molde a una velocidad rápida y luego controlada para evitar daños. Desde este punto hasta el siguiente transcurre la fase de llenado. Los datos observados ascienden de manera exponencial debido a que esta fase es controlada por la velocidad, esto quiere decir que el plástico fluye de manera rápida debido a que la maquina inyecta el material a altas presiones en tiempos cortos.
- b) Es el punto en el que sucede una transición de control de la máquina, el ciclo pasa de estar controlado de velocidad a presión, también se ha de aclarar que es el punto con mayor presión. Desde este punto hasta el D) ocurre la fase de sostenimiento, al estar llena la cavidad ya no es necesario empujar una cantidad de material considerable, sino que ahora se ocupa mantener una presión más baja que la de inyección durante un determinado tiempo, esto con el fin de que la pieza pueda adquirir las características finales.
- c) Antes de este punto la presión disminuye de manera exponencial, hasta casi alcanzar la presión programada de sostenimiento. Puede que a la maquina le tome un poco más de tiempo en comparación al llenado e incluso existirá un pico de disminución. Esto es completamente normal ya que corresponde al tiempo de respuesta de la máquina para hacer el cambio.
- d) Aquí ocurre la congelación de la entrada de inyección en la cavidad, haciendo que hasta este punto haya sido efectivo el tiempo de sostenimiento. Se puede notar como antes de que suceda esto, la presión adquiere una forma de campana aplanada. El fenómeno es debido a que la maquina aumenta la presión para llegar al valor configurado, pero hace que descienda inmediatamente por mantenerse en un periodo de tiempo más corto. Al congelarse la entrada de inyección se genera que la pieza no sea susceptible algún cambio por efecto de la presión, por eso vemos que después de este punto la presión va hacia cero.
- e) Este punto corresponde a un pico de presión generado por la expulsión de la pieza. El sensor es susceptible a este pico, debido a que el accionamiento de la expulsión es por medio de barras que empujan y jalan la placa donde están los botadores. Generando así que el sensor tenga una perturbación y mida la presión del movimiento. Este punto solo debe de ser tomado en cuenta como el fin del ciclo por ser aquel donde la pieza ya ha sido expulsada del molde.

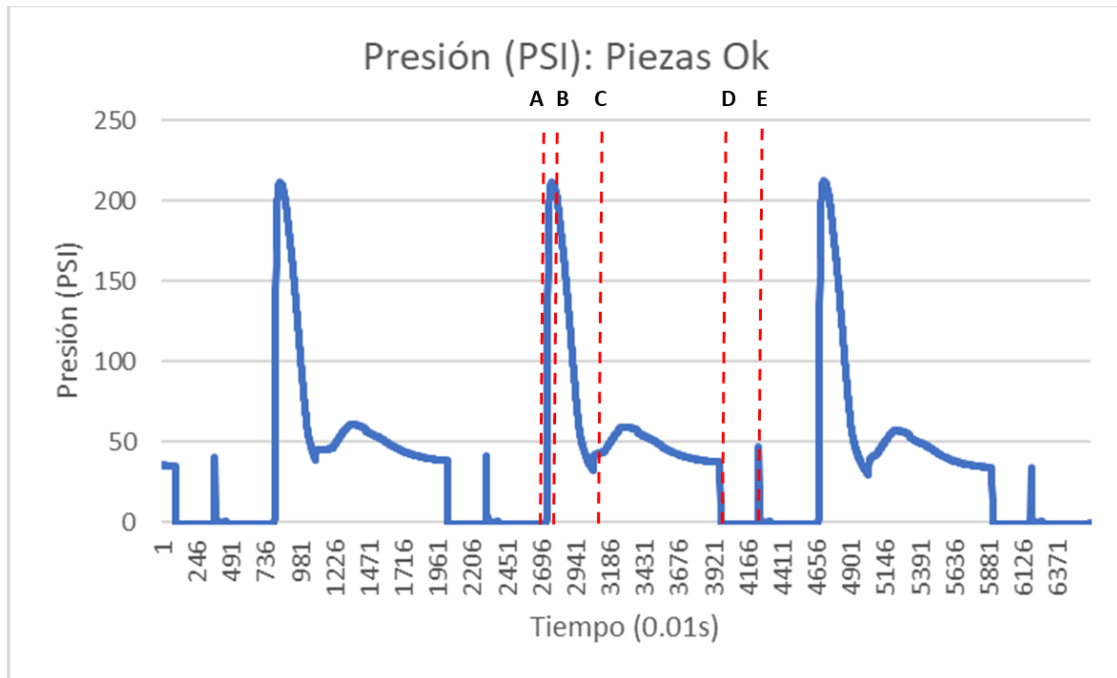


Fig. 18. Extracto de la gráfica de presión de la corrida normal, piezas con condiciones ok.

Con respecto a la prueba, podemos notar que al ser la base de los demás experimentos las piezas plásticas salen sin problemas estéticos (Figura 19).



Fig. 19. Piezas en condiciones normales, sin problemas estéticos evidentes.

Las piezas están completamente llenas y la colada ósea el conjunto de formas cilíndricas que une a las piezas también no tiene ningún problema. Por lo que debemos tomar esta imagen como referencia para los posteriores efectos suscitados de cada prueba.

B.2) Corrida de fluctuación de peso y volumen

En el experimento relacionado de las piezas con fluctuaciones de peso y volumen, (Figura 20) se revela que, aunque la etapa de sostenimiento prácticamente no existe en la curva, aún se mantiene cierta presión residual en el proceso, originada por el material que permanece en el tornillo como cojín y que se comprime durante el tiempo total del ciclo. El tiempo de enfriamiento también juega un papel importante aquí, ya que este compensa la ausencia de la etapa de empaquetamiento, permitiendo que esa presión residual pueda ser visible.

Con lo que respecta a las piezas y colada (Figura 21), a simple vista no se denota alguna malformación o cambio abrupto de la pieza. Lo que sí es notable son marcas de rechupe, esto porque la contracción del material aumenta con las piezas que no están homogéneamente llenas.

Las especificaciones de peso y volumen suelen ser criterios críticos para ciertas aplicaciones, puesto a que pueden llevar a variaciones dimensionales o de características mecánicas impactando en el desempeño de la pieza.

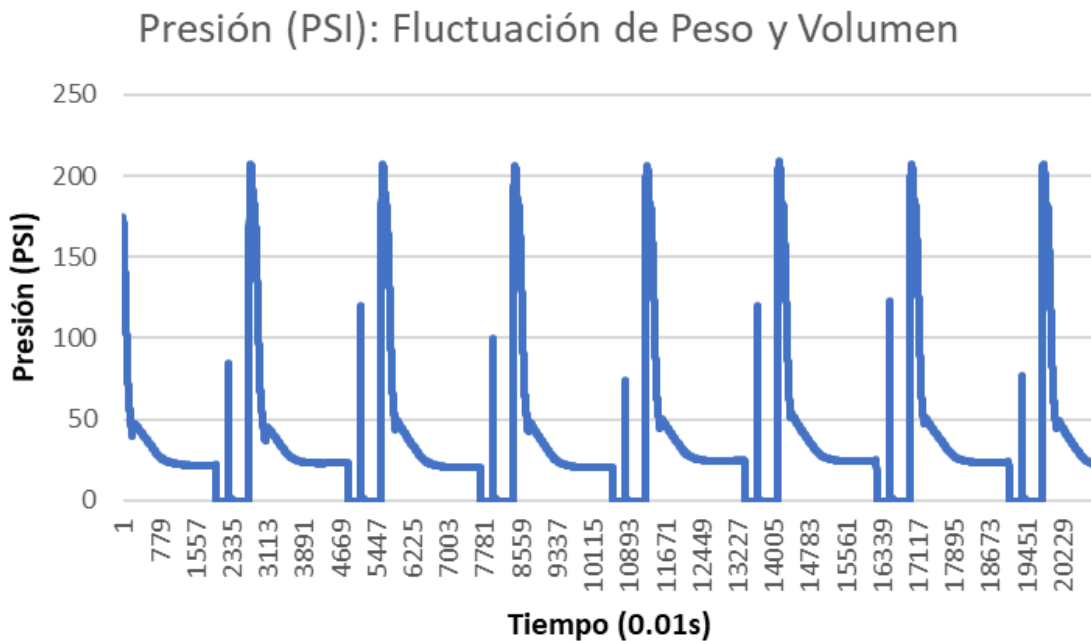


Fig. 20. Grafica de la corrida de piezas con fluctuación de peso y volumen.



Fig. 21. Piezas con condición de fluctuación de peso y volumen.

B.3) *Corridas de tiro corto*

En relación con las piezas de tiro corto, como se ha dicho se llevaron a cabo dos pruebas. En la primera prueba (Figura 22. a)) se exhibe una notable disminución en la presión. Inicialmente, la presión alcanzaba alrededor de los 210 PSI, reduciéndose drásticamente a menos de 20 PSI en el punto máximo de inyección debido a la disminución del tiempo de inyección a casi la mitad. Se observa que la etapa de sostenimiento no es visible, ya que la reducción de su tiempo impide su ejecución adecuada.

En las piezas (Figura 23. a)) podemos notar que el tiempo de inyección no fue suficiente para llenar las piezas, la máquina impulsa el plástico, pero no concreta el llenado de todas las piezas. Ya desde aquí podemos notar un desbalanceo del molde pues todas las piezas tienen un llenado diferente.

Al analizar la gráfica de la segunda prueba (Figura 23. b)) se evidencia la completa inestabilidad del proceso. La presión ha disminuido, similar al experimento anterior. La fase de sostenimiento en algunos casos es apenas perceptible, pero se encuentra significativamente por debajo de los niveles necesarios para lograr una compactación adecuada. Existe una alta variabilidad porque a la máquina le cuesta responder en el tiempo establecido con esos parámetros.

Al observar las piezas (Figura 23. b)) notamos que la presencia de piezas incompletas es mucho más evidente, esto a resultado de que la presión en este caso disminuye a menos 10 PSI. Lo que se pudo notar es que el resultado también era aleatorio, ósea que las piezas con menor cantidad de plástico variaban entre todas las cavidades. Si se tienen piezas completas no existe manera en que los productos cumplan con función, ya que ni siquiera la forma diseñada o prevista puede ser alcanzada. Una pérdida de recurso al obtener este tipo de piezas impide la productividad de las empresas que se dedican a inyección.

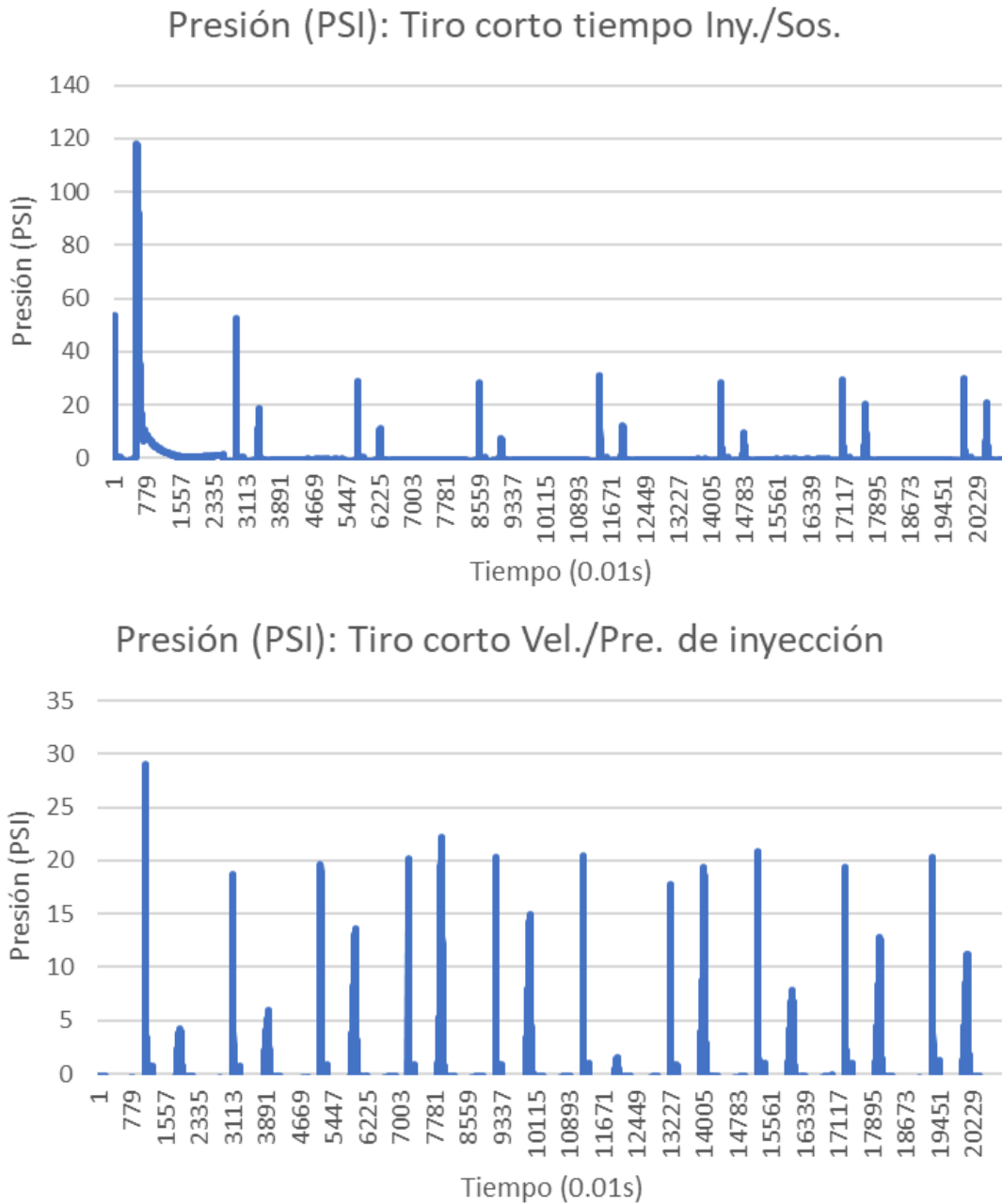


Fig. 22. Graficas de las corridas de piezas con tiro corto. a) modificación en tiempo de inyección y sostenimiento. b) modificación en velocidad y presión de inyección.



Fig. 23. Piezas con tiro corto. a) modificación en tiempo de inyección y sostenimiento. b) modificación en velocidad y presión de inyección.

B.4) Corrida de sobre compactación

Las piezas con sobre compactación exhiben estabilidad en la fase de inyección. La gráfica de presión (Figura 24) refleja un cambio significativo en la etapa de sostenimiento, donde el aumento de los parámetros de presión y tiempo provoca una respuesta lenta. No obstante, hacia el final de la curva, se observa un incremento exponencial que resulta en un mayor material en las piezas.

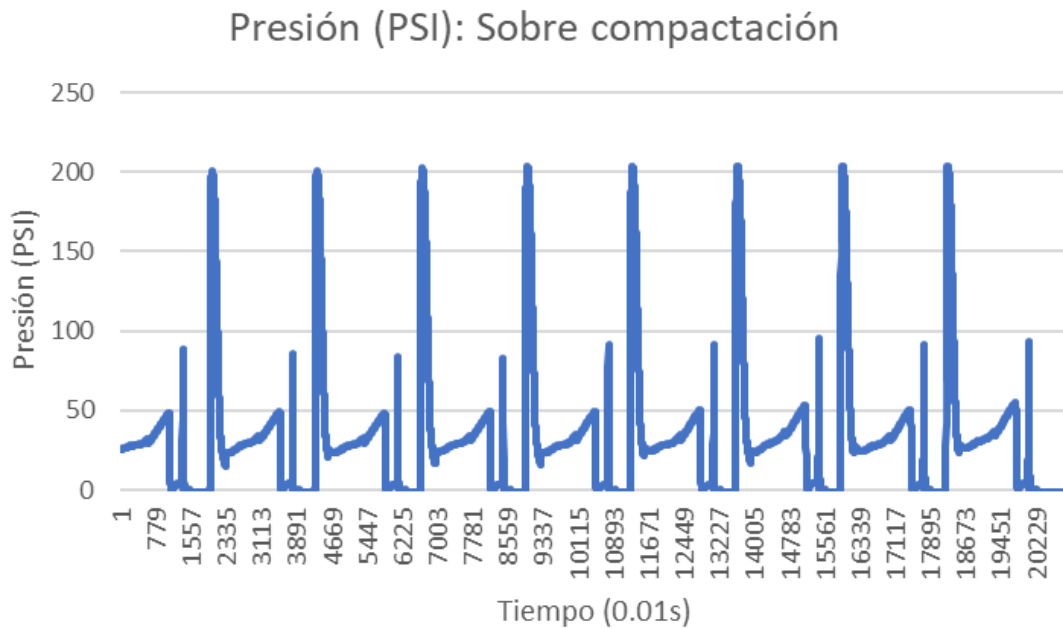


Fig. 24. Gráfica de corrida de piezas con sobre compactación.

A simple vista las piezas (Figura 25) no revelan cambios sustanciales en la estética, solo se hace el hallazgo en que las piezas se ven abultadas del centro y que son más evidentes las marcas de los pernos expulsores o de las líneas de separación. La sobre compactación de piezas es un problema crítico. Por un lado, la compañía puede perder dinero por invertir más recursos energéticos y de materia prima. Por otra parte, las piezas plásticas son susceptibles a fracturas o deformación que disminuye la función y durabilidad de las piezas comprometiendo entonces la calidad del producto moldeado.



Fig. 25. Piezas con sobre compactación.

B.5) *Corridas de rebaba*

Finalmente, como ya se ha dicho en relación con las piezas con rebabas, se llevaron a cabo dos tipos de experimentos. En la primera prueba, se encontró con la gráfica de presión (Figura 26. a)) que el pico de presión se elevó hasta 250 PSI. Además, la caída de presión para la transición al sostenimiento se realiza de manera más lenta.

Este proceso es altamente estable, como se aprecia tanto en la gráfica como en las piezas físicas (Figura 27. a)). En este caso, aunque la rebaba no es muy pronunciada, es evidente, especialmente en la línea de partición de las piezas.

En el último experimento relacionado con las rebabas, se evidenció un cambio significativo. La gráfica de presión (Figura 27. b)) registró la mayor presión, alcanzando valores superiores a los 300 PSI. Además, esta gráfica es una de las más compactas, ya que la inyección es mucho más rápida. Cabe destacar que, a pesar de no tener un aumento en el sostenimiento, toda esta etapa se eleva al doble. El fenómeno sucede porque la presión de inyección asciende tanto que residualmente deja mucha presión que se transfiere a la fase de sostenimiento.

Las piezas físicas (Figura 27. b)) exhiben una rebaba muy pronunciada, evidenciando que, debido al pico de presión alcanzado, excede la fuerza de cierre, por lo que el plástico vence las caras del molde y fluye en ese sentido. Las rebabas en piezas plásticas son evitadas principalmente por la mala estética que dan al producto, sin embargo, en casos puntuales como es el caso, la rebaba podría impedir un ajuste o ensamblaje correcto con los demás componentes poniendo en juego la calidad de los productos en donde esta pieza va ensamblada.

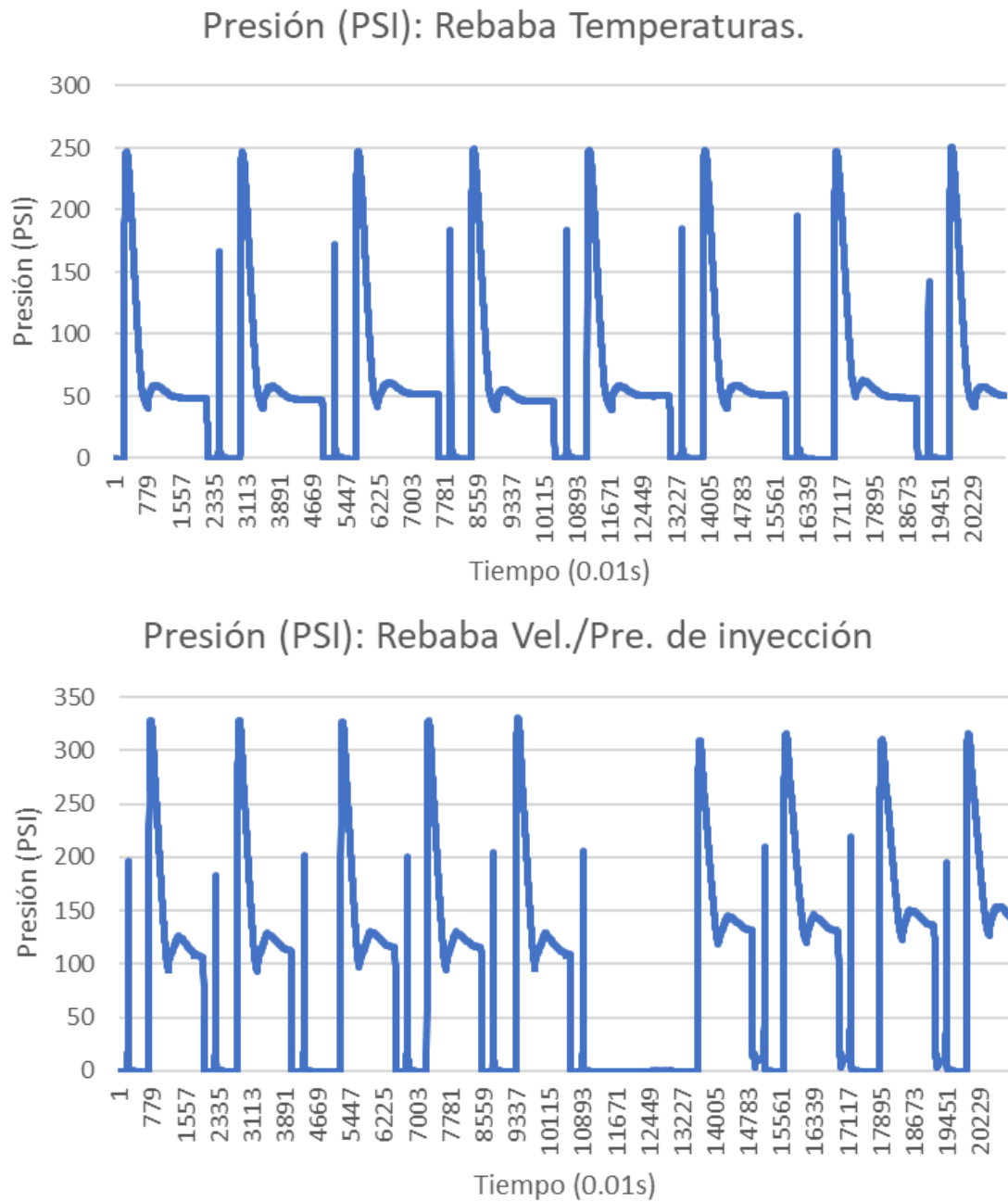


Fig. 26. Gráficas de corridas de piezas con rebaba. a) modificación de temperaturas. b) modificación de velocidad y presión de inyección.



Fig. 27. Piezas con rebaba. a) modificación de temperaturas. b) modificación de velocidad y presión de inyección.

VI. CONCLUSIONES

En este manuscrito, se abordó el objetivo de caracterizar el proceso de moldeo por inyección, de manera que se anticipara la ocurrencia de defectos o fallos en la producción de piezas plásticas. Los resultados obtenidos a raíz de la investigación son significativos para demostrar que la presión dentro de la cavidad es un parámetro que otorga mucha información sobre todo el ciclo de inyección, realizando su importancia para que las compañías que se dedican al moldeo lo tengan más presente en sus procesos. Los hallazgos que deja la investigación con respecto a este tema se pueden resumir de la siguiente manera:

- 1) La integración físico-digital creada trabajó con completa normalidad y cumplió con su función, como si se tratase de lo que existe en el mercado. Esto es relevante porque regularmente los artefactos que se encuentran en el mercado tienen costos muy altos, que igualan en ocasiones los precios de los equipos periféricos del proceso. Lo antes dicho impide que las personas puedan acceder a esta tecnología, dejando de lado la información y optando por métodos tradicionales en la resolución de problemas del proceso.
- 2) A pesar de que en el proceso de moldeo por inyección se obtengan piezas con defectos, no deja de ser un proceso muy estable y repetible. Lo cual es consistente si vemos los casos de fluctuación de peso y volumen, sobre compactación y rebaba. Las pruebas de tiro corto son las únicas que demuestran que a esas condiciones el proceso es inestable.
- 3) Si existe una pérdida de presión considerable en el pico más alto de inyección, podremos intuir que las piezas tendrán la aparición de tiro corto. En caso contrario, si se eleva este pico de presión por encima de lo configurado, será más probable que tengamos problemas de rebaba.
- 4) Si nos centramos en la etapa de sostenimiento, al tener una caída en la presión en esta fase, será probable que las piezas no cumplan con los requerimientos de peso y volumen. Pero si, en cambio, se aumenta la presión o se prolonga por más tiempo, será común encontrar piezas que tengan una sobre compactación.
- 5) La modificación de pocos parámetros impacta significativamente en el proceso, por lo que se debe tener en cuenta como parte de un todo al momento de realizar ajustes en el proceso.

La correcta implementación de esta metodología puede otorgar al usuario la capacidad de interpretar señales de presión que le ayudarán a tomar la decisión de qué modificar en los parámetros, para corregir u optimizar la calidad de las piezas plásticas que se produzcan.

Por último, es necesario reflexionar sobre el punto de mejorar la digitalización de los procesos. Muchas veces se intenta de manera abrupta implementar tecnologías de la Industria 4.0; sin embargo, los procesos aún no cuentan con la infraestructura necesaria para que se pueda incursionar completamente. Investigaciones como esta intentan cerrar esta brecha tecnológica, demostrando los atributos positivos que conlleva implementar tecnologías y ciencia en procesos cotidianos, así como a su vez sentar bases para que las implementaciones queden al alcance de cualquier tipo de compañía.

RECONOCIMIENTOS

J. A. Ruiz Sánchez agradece a CONAHCYT por la beca otorgado para los estudios de Posgrado en la Maestría en Manufactura Avanzada en CIATEQ unidad San Luis Potosí.

I. E. Garduño agradece el apoyo del COPOCYT Fideicomiso 23871 Multas Electorales Convocatoria 2021–01 a través del proyecto Optimización de Parámetros en Procesos de Moldeo por Inyección de Plásticos con Enfoque Hacia Manufactura 4.0.

I. E. Garduño y H. Arcos Gutiérrez agradecen enormemente el apoyo del programa Investigadoras e Investigadores por México CONAHCYT a través del proyecto No. 674.

Los autores agradecen la ayuda de Martín Vázquez en la captura de los parámetros del proceso de inyección y al Ing. Gilberto Pérez en la digitalización del modelo 3D.

REFERENCIAS

- [1] Ageyeva, T., Horváth, S., & Kovács, J. G. (2019). In-mold sensors for injection molding: On the way to industry 4.0. En *Sensors (Switzerland)* (Vol. 19, Número 16). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/s19163551>
- [2] Araújo, C., Pereira, D., Dias, D., Marques, R., & Cruz, S. (2023). In-cavity pressure measurements for failure diagnosis in the injection moulding process and correlation with numerical simulation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(1–2), 291–300. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11100-1>
- [3] Chaciński, T., & Sutowski, P. (2021). Common defects in injection molding of plastic products and their influence on product quality. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 5(45), 7–14. <https://doi.org/10.30464/jmee.2021.5.1.7>
- [4] Chen, Z., Giacomini, A. J., & Turng, L. S. (2006). Flash. En *Polymer Engineering and Science* (Vol. 46, Número 3, pp. 241–247). <https://doi.org/10.1002/pen.20467>
- [5] Finkeldey, F., Volke, J., Zarges, J. C., Heim, H. P., & Wiederkehr, P. (2020). Learning quality characteristics for plastic injection molding processes using a combination of simulated and measured data. *Journal of Manufacturing Processes*, 60, 134–143. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.028>
- [6] Fu, H., Xu, H., Liu, Y., Yang, Z., Kormakov, S., Wu, D., & Sun, J. (2020). Overview of Injection Molding Technology for Processing Polymers and Their Composites. En *ES Materials and Manufacturing* (Vol. 8, pp. 3–23). Engineered Science Publisher. <https://doi.org/10.30919/esmm5f713>
- [7] González-Bautista, N., Mercado-Lemus, V. H., Hernández-Hernández, M., Garduño-Olvera, I. E., & Arcos-Gutiérrez, H. (2022). Methodology to implement CAE validation in repair & redesign parts process of plastic injection molds. *REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS*, 5(1), 176–193. <https://doi.org/10.37636/recit.v5i1176193>

- [8] Gordon, G., Kazmer, D. O., Tang, X., Fan, Z., & Gao, R. X. (2015). Quality control using a multivariate injection molding sensor. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(9–12), 1381–1391. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6706-6>
- [9] Gruber, P. A., & de Miranda, D. A. (2020). Heat transfer simulation for decision making in plastic injection mold design. *Polimeros*, 30(1). <https://doi.org/10.1590/0104-1428.08319>
- [10] Guerrier, P., Tosello, G., & Hattel, J. H. (2017). Flow visualization and simulation of the filling process during injection molding. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 16, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.08.002>
- [11] Ogorodnyk, O., & Martinsen, K. (2018). Monitoring and Control for Thermoplastics Injection Molding A Review. *Procedia CIRP*, 67, 380–385. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.229>
- [12] Panchal, R., Kazmer, D., Panchal, R. R., & Kazmer, D. O. (2009). In-mold shrinkage monitoring sensor for injection molding. <https://www.researchgate.net/publication/267718657>
- [13] Raviwongse, R., & Allada, V. (1997). Artificial Neural Network Based Model for Computation of Injection Mould Complexity. En *Int J Adv Manuf Technol* (Vol. 13).
- [14] Selvaraj, S. K., Raj, A., Rishikesh Mahadevan, R., Chadha, U., & Paramasivam, V. (2022). A Review on Machine Learning Models in Injection Molding Machines. En *Advances in Materials Science and Engineering* (Vol. 2022). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2022/1949061>
- [15] Shrivastava, A. (2018). *Introduction to Plastics Engineering* (1st Edition). Elsevier Inc.
- [16] Wibowo, E. A., Syahriar, A., & Kaswadi, A. (2020, septiembre 28). Analysis and Simulation of Short Shot Defects in Plastic Injection Molding at Multi Cavities. *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/3429789.3429837>
- [17] Zhao, P., Zhang, J., Dong, Z., Huang, J., Zhou, H., Fu, J., & Turng, L.-S. (2020). Intelligent Injection Molding on Sensing, Optimization, and Control. *Advances in Polymer Technology*, 2020, 1–22. <https://doi.org/10.1155/2020/7023616>
- [18] Zhao, P., Zhao, Y., Kharbas, H., Zhang, J., Wu, T., Yang, W., Fu, J., & Turng, L. S. (2019). In-situ ultrasonic characterization of microcellular injection molding. *Journal of Materials Processing Technology*, 270, 254–264. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.03.012>
- [19] Zhou, Huamin. (2013). *Computer modeling for injection molding: simulation, optimization, and control*. Wiley.
- [20] Rojas-Rodríguez, A.; Chiwo, F.S.; Arcos-Gutiérrez, H.; Ovando-Vázquez, C.; Garduño, I.E. Development and Evaluation of a Machine Learning Model for the Prediction of Failures in an Injection Moulding Process. In *Innovation and Competitiveness in Industry 4.0 Based on Intelligent Systems*; Méndez-González, L.C., Rodríguez-Picón, L.A., Pérez Olguín, I.J.C., Eds.; EAI/Springer Innovations in Communication and Computing; Springer International Publishing: Cham, 2023; pp. 101–122 ISBN 978-3-031-29774-8, doi:10.1007/978-3-031-29775-5_5