

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LAS TENSIONES RESIDUALES EN PIEZAS PLÁSTICAS INYECTADAS Y SU DESEMPEÑO MECÁNICO

CARLOS ANDRÉS VARGAS ISAZA ¹, JUAN DIEGO SIERRA MUÑETÓN ², JUAN CARLOS POSADA CORREA ²

¹ Instituto Tecnológico Metropolitano, Facultad de Ingeniería, grupo materiales avanzados y energía. e-mail: carlosandres.vargasisaza@gmail.com

² Instituto Tecnológico Metropolitano, Facultad de Ingeniería, calidad, metrología y producción. e-mail: juancposada@itm.edu.co – juandiegosierramuneton@gmail.com

Recibido: junio 2017

Aprobado para publicación: junio 2017

RESUMEN

La producción de piezas plásticas es una industria de gran demanda y crecimiento, donde el procesamiento por inyección es uno de los métodos de manufactura más ampliamente usados. Los problemas de calidad y desempeño de productos inyectados generan muchos reprocesos y fallas en el desempeño de los mismos en diferentes aplicaciones, debido a que no se tiene en cuenta el efecto de sus condiciones de procesamiento. El propósito del presente estudio es analizar el efecto de las condiciones de cómo se realiza la inyección en una pieza plástica típica para ensayos mecánicos (tensión y flexión), de tal forma que se pueda identificar las variables más críticas. Para tal propósito, se realizaron simulaciones computarizadas del proceso de inyección para definir las condiciones críticas y determinar condiciones de tensiones residuales que pueden afectar el desempeño de la pieza. Posteriormente, se reprodujeron los análisis de simulación en la inyección real de la pieza en un molde e inyectora, las piezas inyectadas fueron llevadas luego a pruebas mecánicas. Se analizaron dos materiales (Policarbonato y Poliestireno), se encontró una mayor influencia de las condiciones de proceso en el Poliestireno, especialmente en las pruebas de flexión, determinando que este tipo de material tiene una ventana de procesamiento más estrecha que el Policarbonato. Lo anterior se puede explicar por la naturaleza de mayor rigidez y fragilidad del Poliestireno.

Palabras clave: propiedades mecánicas, policarbonato, poliestireno, inyección, tensiones residuales

RESIDUAL STRESS EFFECT IN INJECTED PLASTIC PARTS AND THEIR MECHANICAL PERFORMANCE

ABSTRACT

Production of plastic parts is a sector of greatest growth, where the polymer processing by injection molding is the most widely used. The problems of quality and performance of injected products generate many reprocesses and failures in their performance in different applications, because the effects of the processing conditions are not considered. The purpose of present work is to evaluate the effect of processing conditions of injection molding in a normalized plastic part to mechanical testing (tension and flexion), in order to identify the most critical variables of injection molding process. For this purpose, computer simulations of the injection process were done to determine critical processing conditions and residual stresses conditions that can affect the mechanical performance of injected part. Later, simulation analyzes were reproduced in the actual injection of the part into a mold and injector, the injected parts were then taken to mechanical tests. Two materials were analyzed (polycarbonate and polystyrene), where it was found a greater influence of the process conditions in the polystyrene, especially with the flexion tests, indicating that this polymer has a processing window narrower than polycarbonate. This condition can be explained for a high stiffness and fragility of polystyrene.

Keywords: mechanical properties, polycarbonate, polystyrene, thermoplastic injection molding, residual stresses

INTRODUCCIÓN

La inyección de termoplásticos es un método versátil de gran uso en los procesos de manufactura de polímeros. En los últimos años ha tenido especial atención la optimización de los parámetros para llevar a cabo esta inyección, ya que su adecuada puesta a punto incide en la obtención de tiempos de ciclos menores, bajos consumos de energía y buena calidad de las piezas inyectadas. En este sentido existen diversas investigaciones que permiten evaluar las condiciones recomendadas de inyección, siendo la simulación por computador una herramienta muy útil para estos propósitos. En la tabla 1 se resume un listado de estudio de evaluación de las condiciones de proceso vía simulación y las variables de respuesta mejoradas. Como puede observarse una característica importante en las piezas inyectadas son las tensiones residuales, que en algunos casos puede representar un gran número de fallas o defectos en dichas piezas.

Tabla 1. Estudios de mejora de condiciones de proceso de inyección vía simulación computarizada

Polímero - Variables de proceso	Variables de respuesta	Referencia
(Poliestireno, ABS*) - Presión de empaque, temperatura de inyección, temperatura de molde, velocidad de inyección	Contracciones, deformaciones y tensiones residuales	(Choi & Im, 1999)
(Policarbonato, Poliestireno) - Tiempo y presión de empaque	Tensiones residuales	(Young, 2004)
(Policarbonato/ABS) - Temperatura de molde, temperatura de inyección, empaque (tiempo y presión)	Deformaciones	(Ozcelik & Sonat, 2009)
(Policarbonato) - Temperatura de inyección, temperatura de molde, empaque y presión de inyección	Transmisión de luz, ondulación superficial y acabado superficial	(Tsai, Hsieh, & Lo, 2009)
(Polietileno) - Temperatura de molde, temperatura de inyección, empaque, temperatura de refrigerante	Deformaciones y contracciones	(Farshi, Gheshmi, & Miandoabchi, 2011)
(Polipropileno) - Temperatura de inyección, velocidad de inyección, presión de inyección, presión de empaque, tiempo de empaque, tiempo de enfriamiento	Deformaciones y contracciones	(Kusić, Kek, Slabe, Svečko, & Grum, 2013)
(ABS/Policarbonato) - Tiempo de inyección, temperatura de inyección, temperatura de molde, conmutación, tiempo y presión de empaque, tiempo de enfriamiento, temperatura de refrigerante	Tensiones residuales	(Alkaabneh, Barghash, & Abdullat, 2016)

*Acrilonitrilo butadieno estireno

Por otro lado, se han realizado también diferentes trabajos de investigación que muestran la influencia de las variables del proceso de inyección más representativas, sobre el efecto de las propiedades mecánicas de piezas inyectadas. En la tabla 2 se resumen algunos de estos estudios.

De acuerdo con lo investigado en los últimos años, se ha visto un amplio análisis de las condiciones de la técnica de inyección por predicción computarizada y experimentalmente, con el propósito de mejorar el procesamiento y calidad de la pieza inyectada. Sin embargo, se requieren más análisis que combinen la predicción por simulación del proceso de inyección con un efecto real del producto inyectado y su desempeño mecánico.

El propósito del presente trabajo es el de tratar de establecer una relación entre las condiciones del método de inyección, las tensiones residuales generadas y si alguna de estas características tiene influencia en las propiedades mecánicas de piezas inyectadas. Con esta intención se plantea en primera instancia realizar la simulación del proceso de inyección por computador de una pieza normalizada bajo la norma ASTM D 638M, para pruebas mecánicas, y así determinar las condiciones de proceso recomendadas, tensiones residuales y esta información ser reproducida en una inyección real de las piezas, las cuales posteriormente son sometidas a pruebas mecánicas.

Tabla 2. Estudios de evaluación de las condiciones de proceso de inyección y su efecto en las propiedades de la pieza inyectada

Polímero - Variables de proceso	Variables de respuesta	REF.
(ABS*) - Fijas (Temperatura de inyección 260°C, temperatura de molde 60°C, tiempo de enfriamiento 20 s, tiempo de empaque 3 s, entre otras)	Resistencia a la tensión, flexión, impacto y tensiones residuales	(Akay & Ozden, 1995)
(Polietileno alta densidad) - Presión de inyección, temperatura de inyección y velocidad de inyección	Resistencia a la tensión	(Morales, Candal, & Robles, 2009)
(ABS*) - Temperatura de inyección, presión de empaque, tiempo de enfriamiento y presión de inyección	Resistencia a la tensión, flexión, impacto, material de molde	(Ozcelik, Ozbay, & Demirbas, 2010)
(Polietileno) - Presión de inyección y velocidad de inyección	Resistencia a la tensión	(Raos & Stojic, 2014)
(Policarbonato) - Temperatura de molde	Resistencia al impacto, tensión	(Xu, Lu, Gao, & Zhang, 2015)
(Policarbonato y poliestireno) - Temperatura de molde, tiempo de enfriamiento, tiempo y presión de empaque	Resistencia a la flexión y tensión, tensiones residuales	Estudio actual

*Acrilonitrilo butadieno estireno

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del estudio se realizó primero una simulación computarizada con el fin de identificar condiciones de proceso recomendadas y evaluar previamente el estado de tensiones internas generados por el método de inyección (tensiones residuales), para posteriormente determinar si se tiene efecto en las propiedades mecánicas por este estado de tensiones, por las condiciones o una combinación de estas variables. Se procedió luego a reproducir la inyección real de las condiciones de inyección simuladas en un molde de probetas de tensión y una inyectora. Las piezas inyectadas luego fueron sometidas a pruebas mecánicas.

Materiales

Los materiales empleados para la inyección fueron un Policarbonato de referencia Lexan 144 R del fabricante GE plastics. El Poliestireno es una referencia STYRON 638D del fabricante Americas Styrenics. Ambos materiales son de grado inyección, estos fueron seleccionados para evaluar un material típico de ingeniería de alto desempeño como lo es el Policarbonato y otro de uso masivo para diferentes aplicaciones como el Poliestireno. A pesar del amplio uso de estos materiales, de acuerdo a la experiencia se ha visto que estos pueden ver afectado su desempeño mecánico en algunos casos, por un mal procesamiento de fabricación de las piezas inyectadas.

Simulación computarizada

Para la simulación computarizada se empleó el software Moldex 3D, el cual permite evaluar cada uno de los pasos para realizar la inyección en forma virtual con diferentes condiciones y predecir el desempeño mecánico como deformaciones y tensiones internas (residuales).

Desde la Tabla 3 hasta la Tabla 5 se presentan las condiciones de proceso evaluadas, las cuales se ha visto en la experiencia y diferentes investigaciones que afectan el desempeño final de los productos inyectados. En el caso del policarbonato, se hicieron dos análisis, en primera instancia se fijaron los valores de tiempo de enfriamiento y fase de empaque, variando las temperaturas de inyección y molde, para determinar qué valores tienen mayor impacto en las tensiones residuales. Posteriormente, se evaluaron diferentes niveles de tiempo de enfriamiento y fase de empaque a una condición fija de temperaturas de inyección y molde (305°C y 80°C respectivamente), de acuerdo a los resultados de simulación obtenidos según la Tabla 3.

La Figura 1 muestra el detalle del molde con la cavidad de la pieza inyectada, el sistema de alimentación y enfriamiento.

Tabla 3. Condiciones de proceso de inyección evaluadas por simulación computarizada en el Policarbonato

Variable	Niveles*
Temperatura de inyección [°C]	290, 305, 320
Temperatura de pared de molde [°C]	50, 80, 110

*Niveles fijos de tiempo de enfriamiento (10 s) y presión de empaque (600 bar) aplicada durante 7.7 s

Tabla 4. Condiciones de proceso de inyección evaluadas por simulación computarizada en el Policarbonato

Variable	Niveles
Tiempo de enfriamiento [s]	6, 10, 15
Tiempo de empaque [s]	4, 7.7, 10
Presión de empaque [bar]	400, 600, 800

*Niveles fijos de temperatura de inyección (305°C) y temperatura de molde (80°C).

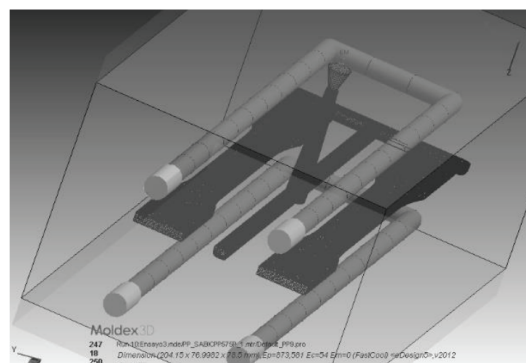


Figura 1. Molde de inyección analizado por simulación computarizada (cavidad, sistema de alimentación y enfriamiento)

Proceso de inyección

El molde real que fue previamente simulado por software se presenta en la Figura 2. Este molde permite inyectar dos cavidades. Se procuró inyectar las condiciones de proceso simuladas, sin embargo, por características técnicas de los equipos y limitaciones del molde no se inyectaron todas las condiciones. En el caso del Policarbonato, se evaluaron dos temperaturas de molde, ya que el sistema de acondicionamiento de temperatura no permite alcanzar temperaturas mayores a 80°C, como tampoco se utilizaron en la inyección niveles de presión de empaque altos, debido a la generación de presiones de inyección y fuerzas de cierre superiores a las especificadas en la máquina inyectora empleada. Para el Poliestireno solo se evaluó una temperatura de molde (70°C) que permitió un adecuado desmoldeo de las piezas, ya que a temperaturas

por encima o debajo de este nivel se presentaron problemas de desmoldeo, por un amarre en la cavidad del molde en el primer caso o una deformación de la pieza con los expulsores al expulsarla a una alta temperatura. En la Tabla 6 se presentan las condiciones de proceso inyectadas para el Policarbonato, en cuanto al Poliestireno se inyectaron las condiciones establecidas en el análisis por simulación computarizada (Tabla 5).

La inyectora empleada fue una de marca WELLTEC de 90 toneladas de fuerza de cierre, con una capacidad de plastificación de 120 cm³. Una vez estabilizado el proceso para cada condición se procedió a inyectar la cantidad suficiente de piezas para obtener muestras para la realización de las pruebas mecánicas. En la Figura 3 se presenta la pieza real inyectada.

Tabla 5. Condiciones de proceso de inyección evaluadas por simulación computarizada en el Poliestireno

Variable	Niveles
Temperatura de inyección [°C]	220
Temperatura de molde [°C]	70
Tiempo de enfriamiento [s]	10, 15
Tiempo de empaque [s]	1.5, 3.5, 7
Presión de empaque [bar]	100, 300, 600

Tabla 6. Condiciones de proceso inyectadas para el Policarbonato

Variable	Niveles
Temperatura de inyección [°C]	305
Temperatura de molde [°C]	50, 80
Tiempo de enfriamiento [s]	10, 15
Tiempo de empaque [s]	1.5, 4, 7.7
Presión de empaque [bar]	400, 600

Pruebas mecánicas

Las piezas inyectadas se sometieron a pruebas normalizadas de tensión y flexión, según la norma ASTM638 y ASTM D790. El equipo empleado fue una máquina universal de ensayos mecánicos marca Shimadzu con una celda de carga de 100 kN +/- 0.5N. Para cada condición de inyección se tomaron 5 muestras a ensayar con el fin de obtener medidas de tendencia central y medidas de dispersión, así como establecer la variación del proceso de inyección para cada parámetro o variable establecida.

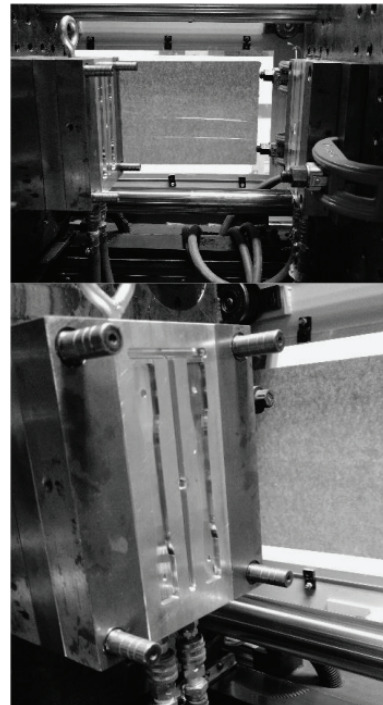


Figura 2. Molde de inyección real para fabricar las probetas de ensayos mecánicos

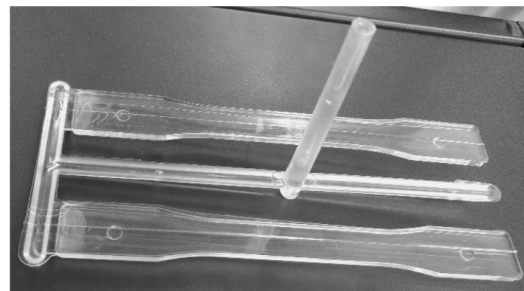


Figura 3. Piezas inyectadas a partir de las cuales se obtienen las muestras de ensayos mecánicos

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Piezas inyectadas en policarbonato

Desde la Figura 4 hasta la Figura 7 se presentan los resultados de las simulaciones por computador listando las condiciones de proceso y las respectivas tensiones residuales generadas (esfuerzos Von Mises), de acuerdo las condiciones establecidas en la Tabla 4. El nivel más bajo de tensión residual observado fue a la temperatura de molde más alta a un nivel bajo de temperatura de inyección. El nivel más alto de tensión residual fue observado al nivel más bajo de temperatura de molde y de inyección. Es decir, a mayor temperatura de inyección es menor la tensión residual en la pieza, ya que una mayor temperatura sobre el punto de inyección en el molde retarda el tiempo de solidificación en

este, lo cual permite inyectar mayor cantidad de material en el molde, que a su vez permite una reducción de la contracción del material y la tensión residual.

La temperatura del molde tiene un efecto similar al explicado con la temperatura de inyección, pero de mayor magnitud con respecto a esta última (Hastenbergh, Wildervanck, Leenen & Schennink, 1992); (Siegmann, Buchman, & Kenig, 1982), ya que, adicionalmente, con una mayor temperatura de molde la región no solidificada es de mayor espesor en la pieza inyectada, lo que permite un mayor efecto de la etapa de empaque que reducirán las contracciones y las tensiones residuales. Tendencias y comportamientos similares han sido reportados en otros estudios (Acevedo-Morantes, Brieva-Sarmiento, & Realpe-Jiménez, 2014); (Choi & Im, 1999); (Weng, Lee, & To, 2009). De acuerdo a la anterior evaluación, se determinó fijar para los siguientes análisis del policarbonato emplear una temperatura de inyección de 305 °C y una de molde de 80°C. Esto debido a que la temperatura más baja (50°C) incrementa significativamente las tensiones residuales y si bien la temperatura más alta de molde (320°C) genera las menores tensiones residuales los tiempos de ciclo de producción se ven incrementados para producir esta pieza, por lo que se optó por seleccionar el punto medio de temperaturas para los análisis posteriores del efecto de la fase de empaque y tiempo de enfriamiento, así como las propiedades mecánicas de las piezas inyectadas, en las cuales si se incluyeron las probetas inyectadas a temperatura de molde de 50°C, para ver su efecto en estas propiedades.

Con respecto al análisis de presión de empaque (post presión) y tiempo de enfriamiento se encontró que los niveles más bajos de tensiones residuales se presentaron a altos tiempos de enfriamiento y altos niveles de presión de empaque. Los niveles más altos de tensiones residuales se observaron a los tiempos de enfriamiento y presión de empaque más bajos. Estos resultados son relativamente razonables, debido a que más material puede ser inyectado por el hecho de aplicar mayor presión de empaque para compensar la contracción del material, como también las tensiones residuales (Bushko & Stokes, 1995); (Jansen & Titomanlio, 1996); (Jansen, Van Dijk, & Husselman, 1998); (Kurt et al., 2009); (Postawa & Koszkul, 2005). Adicionalmente, un mayor tiempo de enfriamiento permite mayor relajación molecular inhibiendo la presencia de mayores tensiones residuales (Acevedo-Morantes et al., 2014); (Choi & Im, 1999); (Sánchez, Aisa, Martínez, & Mercado, 2012); (Wang & Yan, 2012); (Wang, Zhao, & Wang, 2013).

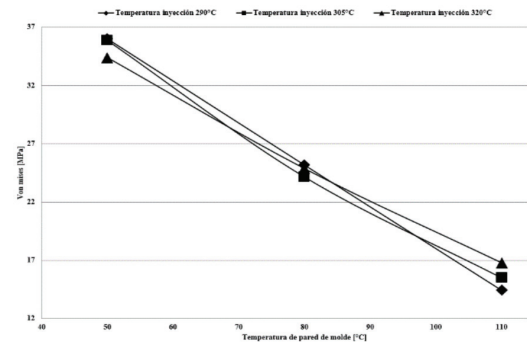


Figura 4. Tensiones residuales de la pieza inyectada en Policarbonato según condiciones de la Tabla 3

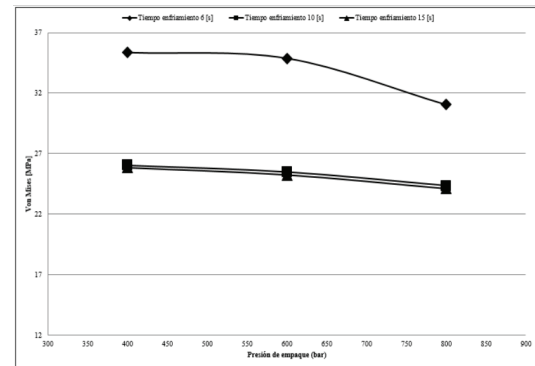


Figura 5. Tensiones residuales de la pieza inyectada en Policarbonato (a un tiempo de 4 s de empaque)

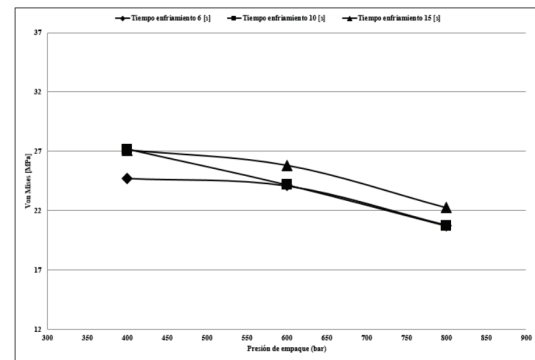


Figura 6. Tensiones residuales de la pieza inyectada en Policarbonato (a un tiempo de 7.7 s de empaque)

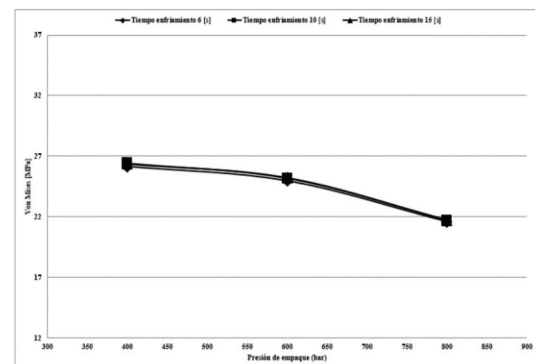


Figura 7. Tensiones residuales de la pieza inyectada en Policarbonato (a un tiempo de 10 s de empaque)

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones se determinaron valores de referencia de tensiones residuales para evaluar si tienen algún efecto al aplicar la carga externa de tensión o flexión, en función de establecer si estas tensiones residuales se suman a la carga externa o contrarrestan.

Los resultados de las propiedades mecánicas se presentan desde la Figura 8 hasta la Figura 11, para probetas inyectadas de acuerdo a las condiciones indicadas en la Tabla 6. Se observa una leve tendencia en incrementar las propiedades mecánicas a una mayor temperatura de molde y mayor presión de empaque (presión y tiempo). Sin embargo, no es concluyente, ya que las barras de error se superponen en la mayoría de las condiciones de proceso. Con respecto al módulo de elasticidad se presenta la misma situación expuesta, donde se ve un leve incremento en el módulo a menores temperaturas de molde, pero con respecto a las otras variables no se ve una tendencia significativa. Lo anterior podría explicar el comportamiento de este material que, al presentar un amplio rango o ventana de operación bajo condiciones de inyección, sus propiedades físico mecánicas no se ven afectadas. Según estos resultados, los niveles altos o bajos de tensiones residuales debido al proceso de inyección aparentemente no tienen efecto en el desempeño mecánico de la pieza, al aplicar una carga externa de tensión o flexión. Pero esto solo se presenta en el caso de una carga aplicada en un tiempo corto durante el ensayo. Se debe evaluar posteriormente si este efecto de las tensiones residuales es aún poco significativo a otras condiciones de carga, tales como fatiga y condiciones más extremas de cargas en medio de ambientes tales como plásticos en contacto con sustancias químicas, corrosivas entre otras.

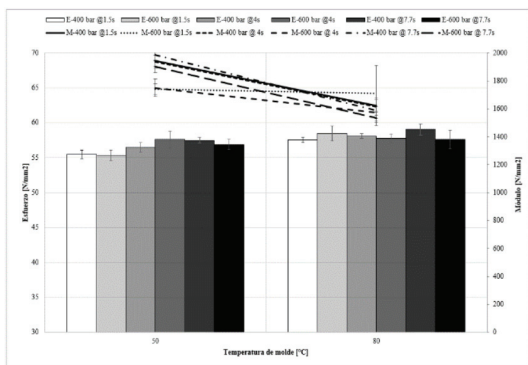


Figura 8. Resistencia a la tensión (E: Esfuerzo, M: Módulo) de las piezas inyectadas en Policarbonato a un tiempo de enfriamiento 10 s

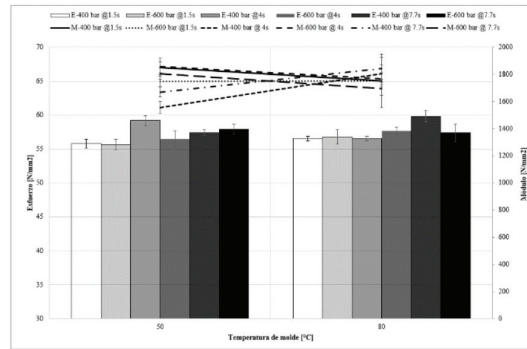


Figura 9. Resistencia a la tensión (E: Esfuerzo, M: Módulo) de las piezas inyectadas en Policarbonato a un tiempo de enfriamiento 15 s

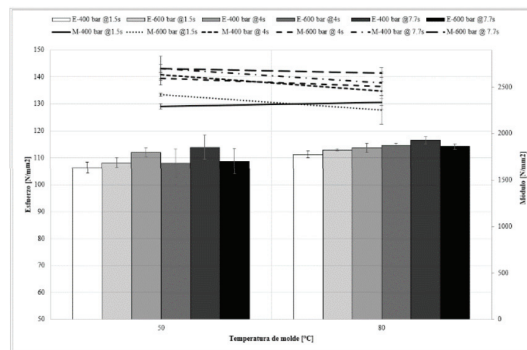


Figura 10. Resistencia a la flexión (E: Esfuerzo, M: Módulo) de las piezas inyectadas en Policarbonato a un tiempo de enfriamiento de 10 s

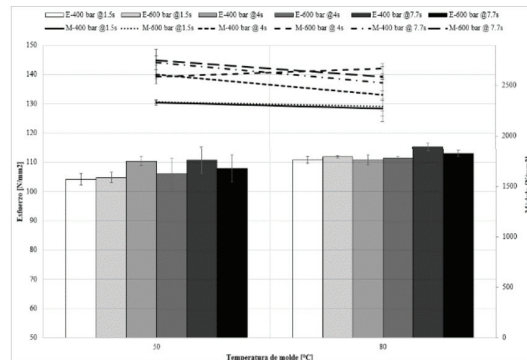


Figura 11. Resistencia a la flexión (E: Esfuerzo, M: Módulo) de las piezas inyectadas en Policarbonato a un tiempo de enfriamiento de 15 s

Piezas inyectadas en poliestireno

Los resultados presentan una tendencia similar a los expuestos en el caso del Policarbonato, pero con niveles de tensiones residuales diferentes (ver Figura 12 hasta la Figura 14). Los análisis se realizaron de acuerdo a las condiciones de inyección establecidas en la Tabla 5. Estos resultados muestran un mayor efecto en las tensiones

residuales debido a la fase de empaque, y un leve cambio al incrementarse en el tiempo de enfriamiento.

Los resultados de las propiedades mecánicas se presentan en las Figura 15, 16, 17 y 18 para probetas inyectadas de acuerdo a las condiciones indicadas en la Tabla 5. Se observa la misma tendencia presentada en el Policarbonato, pero con un cambio mayor, donde se incrementan las propiedades mecánicas a una mayor pospresión (presión y tiempo). En este caso, se presentan diferencias en las barras de error de algunas condiciones de proceso, especialmente en las pruebas de flexión, donde se combinan estados de carga a tensión y compresión al aplicar la carga. Esto indica que la ventana de operación del método de inyección para este material es más estrecha, y en algunos casos pueden afectar sus propiedades mecánicas. Lo anterior se explica debido a una presencia de mayor rigidez y fragilidad del Poliestireno, el cual si puede afectarse por condiciones de tensiones internas generadas en el procesamiento. Se podría afirmar en primera instancia que los resultados de tensiones residuales encontradas en las simulaciones pueden influir en el desempeño mecánico de la pieza inyectada, en este caso coincide que una mayor pospresión reducen las tensiones residuales y hacen que la pieza inyectada mejore su desempeño mecánico. No obstante, esta es una condición que se puede presentar en una pieza inyectada de pared gruesa como lo es la del presente trabajo, donde es importante evitar la contracción del material debido al gran espesor de la pieza. Una condición diferente puede ocurrir al inyectar piezas de pared delgada si se inyectan con niveles de pospresión altos y bajas temperaturas, en este caso se presentan otro tipo de tensiones residuales no debido al efecto térmico sino debido al flujo, lo cual genera altos efectos residuales a tensión en la superficie de la pieza inyectada (Osswald, Menges & Flórez, 2010).

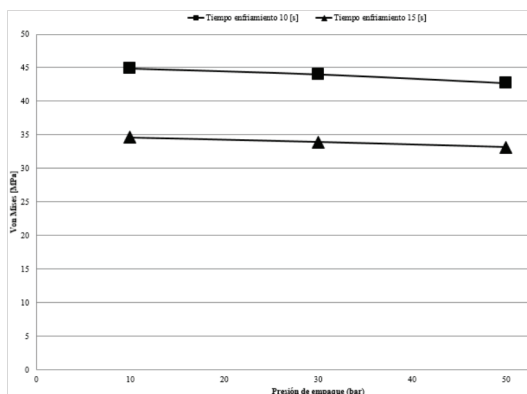


Figura 12. Tensiones residuales de la pieza inyectada en Poliestireno (a un tiempo de 1,5 s de empaque)

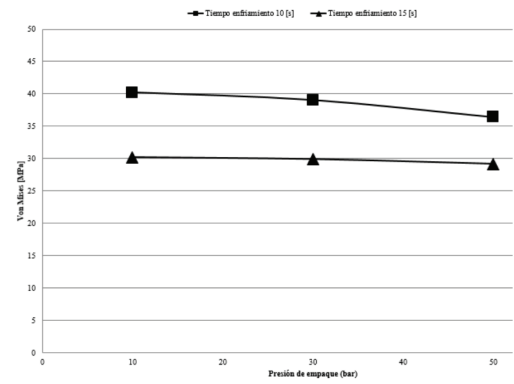


Figura 13. Tensiones residuales de la pieza inyectada en Poliestireno (a un tiempo de 3,5 s de empaque)

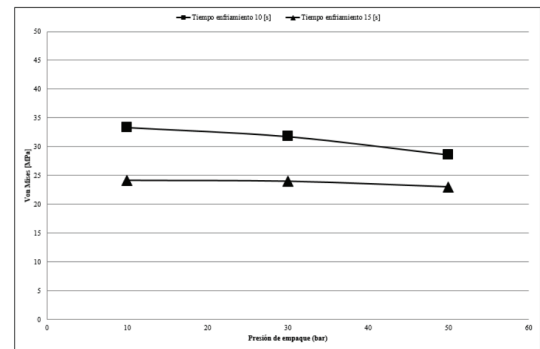


Figura 14. Tensiones residuales de la pieza inyectada en Poliestireno (a un tiempo de 7 s de empaque)

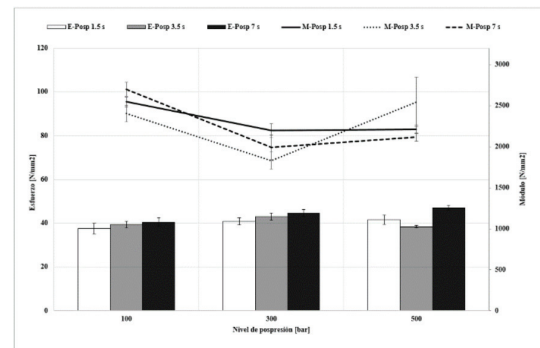


Figura 15. Resistencia a la tensión (E: Esfuerzo, M: Módulo) de las piezas inyectadas en Poliestireno a un tiempo de enfriamiento 10 s

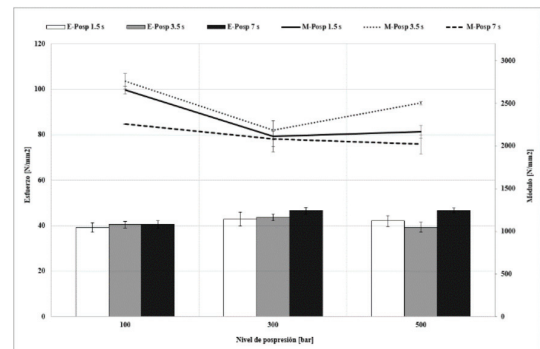


Figura 16. Resistencia a la tensión (E: Esfuerzo, M: Módulo) de las piezas inyectadas en Poliestireno a un tiempo de enfriamiento 15 s

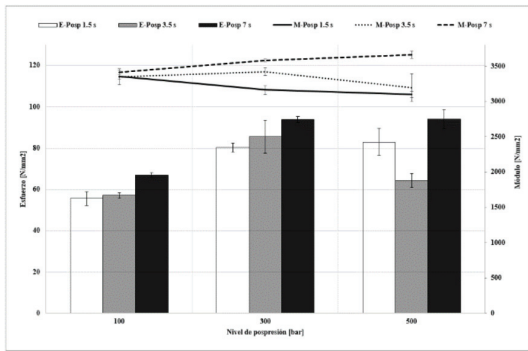


Figura 17. Resistencia a la flexión (E: Esfuerzo, M: Módulo) de las piezas inyectadas en Poliestireno a un tiempo de enfriamiento 10 s

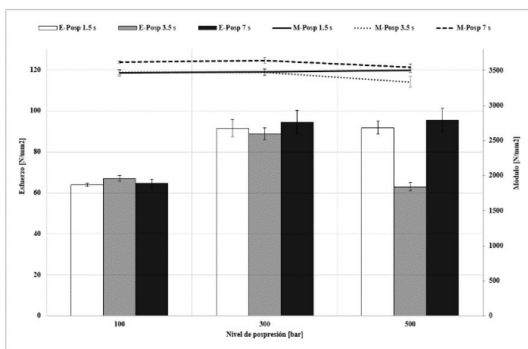


Figura 18. Resistencia a la flexión (E: Esfuerzo, M: Módulo) de las piezas inyectadas en Poliestireno a un tiempo de enfriamiento 15 s

CONCLUSIONES

De acuerdo con las simulaciones del proceso de inyección, se evidenció un efecto directo de las tensiones residuales con la temperatura de molde, etapa de empaque (presión y tiempo) y tiempo de enfriamiento. Donde a altos niveles tiende a reducirse las tensiones residuales y a bajos niveles estas tensiones se incrementan. De acuerdo a esta evaluación preliminar se pudieron determinar condiciones del método de inyección de las probetas de ensayos mecánicos. Aunque en el Policarbonato no se evidenció una relación entre las condiciones de proceso, las tensiones residuales y las propiedades mecánicas de las piezas inyectadas, sí se encontró una influencia en el Poliestireno, especialmente en las pruebas de flexión, donde para niveles de presión altos (presión y tiempo) se incrementan levemente las propiedades mecánicas.

Para tener resultados más concluyentes se complementará el actual estudio con otros materiales plásticos, diferentes geometrías (paredes delgadas) y se evaluará experimentalmente el efecto de las tensiones residuales con pruebas químicas de stress cracking (ESCR).

AGRADECIMIENTO

Al Instituto Tecnológico Metropolitano por el apoyo de recursos para el desarrollo de este trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- ACEVEDO-MORANTES, M. T., BRIEVA-SARMIENTO, M., & REALPE-JIMÉNEZ, A. (2014). Effect of the Molding Temperature and Cooling Time on the Residual Stresses of Crystal Polystyrene. *DYNA*, 81(187), 73–80. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n187.40142>
- AKAY, M., & OZDEN, S. (1995). The Influence of Residual Stresses on the Mechanical and Thermal Properties of Injection Moulded ABS Copolymer. *Journal of Materials Science*, 30(13), 3358–3368. <https://doi.org/10.1007/BF00349880>
- ALKAABNEH, F., BARGHASH, M., & ABDULLAT, Y. (2016). A Novel Statistical Analysis for Residual Stress in Injection Molding. *American Journal of Operations Research*, 6(January), 90–103.
- BUSHKO, W. C., & STOKES, V. K. (1995). Solidification of Thermoviscoelastic Melts. Part II: Effects of Processing Conditions on Shrinkage and Residual Stresses. *Polymer Engineering and Science*, 35(4), 365–383. <https://doi.org/10.1002/pen.760350410>
- CHOI, D. & IM, Y. (1999). Prediction of Shrinkage and Warpage in Consideration of Residual Stress in Integrated Simulation of Injection Molding. *Composite Interfaces*, 47(1999), 655–665.
- FARSHI, B., GHESHMI, S. & MIANDOABCHI, E. (2011). Optimization of Injection Molding Process Parameters using Sequential Simplex Algorithm. *Materials & Design*, 32(1), 414–423. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.043>
- HASTENBERG, C. H. V., WILDERVANCK, P. C., LEENEN, A. J. H., & SCHENNINK, G. G. J. (1992). The Measurement of Thermal Stress Distributions Along the Flow Path in Injection-Molded Flat Plates. *Polymer Engineering & Science*, 32(7), 506-515.
- JANSEN, K. M. B., & TITOMANLIO, G. (1996). Effect of Pressure History on Shrinkage and Residual Stresses Injection Molding with Constrained Shrinkage. *Polymer Engineering & Science*, 36(15), 2029–2040. <https://doi.org/10.1002/pen.10598>

- JANSEN, K. M. B., VAN DIJK, D. J. & HUSSELMAN, M. H. (1998). Effect of Processing Conditions on Shrinkage in Injection Molding. *Polymer Engineering & Science*, 38(5), 838–846. <https://doi.org/10.1002/pen.10249>
- KURT, M., SABAN KAMBER, O., KAYNAK, Y., ATAKOK, G., GIRIT, O., & KAMBER, O. S. (2009). Experimental Investigation of Plastic Injection Molding : Assessment of the Effects of Cavity Pressure and Mold Temperature on the Quality of the Final Products. *Materials and Design*, 30(8), 3217–3224. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.004>
- KUSIĆ, D., KEK, T., SLABE, J. M., SVEČKO, R., & GRUM, J. (2013). The Impact of Process Parameters on Test Specimen Deviations and their Correlation with AE Signals Captured During the Injection Moulding Cycle. *Polymer Testing*, 32(3), 583–593. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2013.02.006>
- MORALES, R., CANDAL, M., & ROBLES, J. (2009). Efectos del proceso de transformacion sobre el coeficiente de endurecimiento por deformacion en polímeros. *Revista de La Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 24(4), 60–70.
- OSSWALD, T., MENGES, G. & FLÓREZ J. F. L. (2010). *Ciencia de los polímeros para ingenieros*. Cúcuta, Colombia: Editorial Guaduales Limitada.
- OZCELIK, B., OZBAY, A., & DEMIRBAS, E. (2010). Influence of Injection Parameters and Mold Materials on Mechanical Properties of ABS in Plastic Injection Molding. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(9), 1359–1365. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.07.001>
- OZCELIK, B., & SONAT, I. (2009). Warpage and Structural Analysis of Thin Shell Plastic in the Plastic Injection Molding. *Materials & Design*, 30(2), 367–375. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.04.053>
- POSTAWA, P., & KOSZKUL, J. (2005). Change in Injection Moulded Parts Shrinkage and Weight as a Function of Processing Conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 162, 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.241>
- RAOS, P., & STOJSIC, J. (2014). Influence of Injection Moulding Parameters on Tensile Strength of Injection Moulded Part. *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*, 2972, 13–15.
- SÁNCHEZ, R., AISA, J., MARTINEZ, A., & MERCADO, D. (2012). On the Relationship between Cooling Setup and Warpage in Injection molding. *Measurement*, 45(5), 1051–1056. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.01.039>
- SIEGMANN, A., BUCHMAN, A., & KENIG, S. (1982). Residual Stresses in Polymers III: The Influence of Injection-Molding Process Conditions. *Polymer Engineering and Science*, 22(9), 560–568. <https://doi.org/10.1002/pen.760220908>
- TSAI, K.-M., HSIEH, C.Y., & LO, W.C. (2009). A Study of the Effects of Process Parameters for Injection Molding on Surface Quality of Optical Lenses. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(7), 3469–3477. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.08.006>
- WANG, T., & YAN, Y. (2012). Residual Stress Simulation and Process Optimization of Injection Molded Part. *China Plastics Industry*, (12). Retrieved from http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-SLGY201212015.htm
- WANG, X., ZHAO, G., & WANG, G. (2013). Research on the Reduction of Sink Mark and Warpage of the Molded Part in Rapid Heat Cycle Molding Process. *Materials & Design*, 47, 779–792. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.047>
- WENG, C., LEE, W. B. B., & TO, S. (2009). Birefringence Techniques for the Characterization of Residual Stresses in Injection-Moulded Micro-Lens Arrays. *Polymer Testing*, 28(7), 709–714. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2009.06.007>
- XU, Y., LU, H., GAO, T., & ZHANG, W. (2015). Predicting the Low-Velocity Impact Behavior of Polycarbonate: Influence of Thermal History during Injection Molding. *International Journal of Impact Engineering*, 86, 265–273. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.08.013>
- YOUNG, W.B. (2004). Residual Stress Induced by Solidification of Thermoviscoelastic Melts in the Postfilling Stage. *Journal of Materials Processing Technology*, 145(3), 317–324. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013603009294>

