

Efecto térmico y del procesamiento por inyección de piezas plásticas en su desempeño mecánico

Effects of injection molding conditions on the mechanical performance of plastic parts

Carlos A. Vargas-Isaza¹ Juan C. Posada-Correa² William Urrego-Yepes² Álvaro J. Castro-Caicedo³

¹Grupo Materiales Avanzados y Energía, Facultad de ingenierías, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia.

²Grupo Calidad, metrología y producción, Facultad de ciencias económicas y administrativas, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia.

³ Universidad Nacional, Medellín, Colombia.

Abstract

El grado de calidad de piezas fabricadas por inyección de termoplásticos se puede establecer por el peso del producto, apariencia y mínimos defectos. Adicionalmente, las condiciones del proceso de inyección pueden inducir un efecto en el desempeño mecánico de las piezas inyectadas, donde los esfuerzos residuales de la pieza inyectada generados en el procesamiento pueden promover la formación de grietas o fallas prematuras del producto durante su uso al aplicarle una carga o fuerza externa. El propósito del presente trabajo es evaluar el efecto que genera el procesamiento por inyección en una pieza inyectada en el desempeño mecánico de esta. Para tal fin, se inyectaron probetas bajo diferentes condiciones de proceso y posteriormente estas fueron sometidas a pruebas mecánicas de flexión, algunas piezas fueron llevadas a un tratamiento térmico de recocido "annealing", con el fin de obtener una relajación molecular que permita reducir sus esfuerzos internos o residuales generados durante el proceso de inyección. Adicionalmente, se hizo una evaluación cualitativa de la distribución de esfuerzos residuales en las piezas inyectadas mediante la técnica de fotoelasticidad, para complementar y validar los resultados de las pruebas mecánicas. Se halló en los resultados de las muestras inyectadas a temperatura de molde de 50 °C una mayor liberación de esfuerzos residuales de acuerdo con las imágenes de fotoelasticidad analizadas y un mayor porcentaje de incremento en la resistencia a la flexión de estas piezas al aplicar el tratamiento térmico. Lo que podría sugerir una mayor generación de esfuerzos residuales a esta temperatura de molde con respecto a la temperatura de molde recomendada de 80 °C. El efecto de tratamiento térmico mejora significativamente el desempeño mecánico de todas las piezas evaluadas a las diferentes condiciones de proceso.

Resumen

The quality of parts manufactured by thermoplastics injection molding can be evaluated based on product weight, appearance, and presence of defects. Furthermore, the conditions of the injection process can significantly influence the mechanical performance of the molded parts. Residual stresses generated during plastic processing may contribute to the formation of cracks or premature failures when the product is subjected to external loads or forces. This study aims to evaluate the effects of the injection process on an injected part and how they affect its mechanical performance. For this purpose, specimens were injected under different process conditions and, subsequently, employed in a. Some parts were also subjected to annealing (a thermal treatment) to induce molecular relaxation, which helps to reduce internal or residual stresses generated during the injection process. Additionally, a qualitative evaluation of the distribution of residual stresses in the injected parts was conducted using the s technique to complement and validate the results of the mechanical tests. The results of the specimens injected at a mold temperature of 50°C showed a greater release of residual stresses, as indicated in photoelasticity images analyzed here, and a noticeable increase in flexural strength if the heat treatment had been applied. This suggests that more residual stresses are produced at 50°C than at the recommended mold temperature of 80°C. The heat treatment significantly improved the mechanical performance of all the parts injected in this study under different processing conditions.

Palabras clave: Esfuerzos residuales, moldeo por inyección, piezas plásticas, propiedades mecánicas, tratamientos térmicos..

Keywords: Residual stress, injection molding, plastic parts, mechanical properties, thermal treatments.

¿Cómo citar?

Vargas-Isaza, C.A., Posada-Correa, J.V., Urrego-Yepes, W., Castro-Caicedo, A.J. Effects of injection molding conditions on the mechanical performance of plastic parts. Ingeniería y Competitividad, 2024, 26(1); e- 22013326.

<https://doi.org/10.25100/iyv.26i1.13326>

Recibido: 3-11-23
Aceptado: 02-03-24

Correspondencia:

lcarlosvargas@itm.edu.co

Este trabajo está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-No Comercial-CompartirIgual4.0.



Conflicto de intereses: ninguno declarado

OPEN  ACCESS

¿Por qué se llevó a cabo?

La investigación se realizó para evaluar la influencia de las condiciones del proceso de inyección de termoplásticos en las propiedades mecánicas de las piezas inyectadas. Además, se emplearon el tratamiento térmico de recocido y la fotoelasticidad como técnicas para liberar y visualizar tensiones residuales en materiales sometidos a procesos de fabricación como el moldeo por inyección.

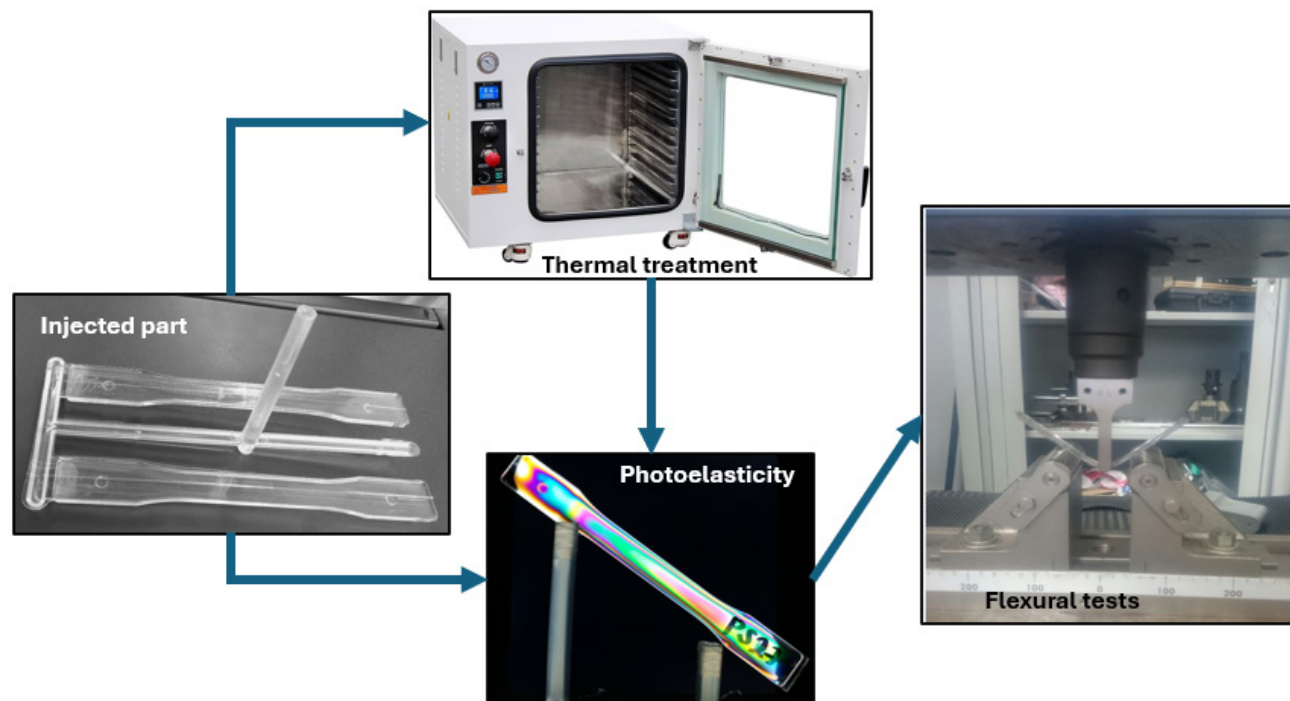
¿Cuáles fueron los resultados más relevantes?

Los resultados de las probetas inyectadas a una temperatura de molde de 50°C mostraron una mayor liberación de tensiones residuales, como lo indican las imágenes de fotoelasticidad aquí analizadas, y un notable aumento en la resistencia a la flexión si se hubiera aplicado el tratamiento térmico. Esto sugiere que se producen más tensiones residuales a 50°C que a la temperatura recomendada del molde de 80°C. El tratamiento térmico mejoró significativamente el rendimiento mecánico de todas las piezas inyectadas en este estudio bajo diferentes condiciones de procesamiento.

¿Qué aportan estos resultados?

Los resultados obtenidos permiten comprender la importancia de considerar las condiciones de fabricación a las que están sometidos los materiales. Tanto los procesos de fusión como los de solidificación pueden influir significativamente en las tensiones residuales en las piezas fabricadas.

Graphical Abstract



Introducción

Sobre las piezas plásticas inyectadas existen diferentes métodos de control de calidad basándose en la medición de esfuerzos residuales en la pieza, estos se pueden clasificar en ensayos destructivos y no destructivos. Entre los primeros se encuentra la técnica de perforación (1), el método de eliminación de capas y por ataque químico (2). En los ensayos no destructivos se destaca la técnica de fotoelasticidad, la cual se realiza en materiales transparentes como el policarbonato, relacionado con el índice de refracción que depende de la polarización y propagación de la luz que incide sobre el material (3). Esta propiedad es aprovechada entonces para visualizar esfuerzos mecánicos (esfuerzos residuales) y anisotropía en el material (4). Adicionalmente, sobre las piezas inyectadas es posible realizar tratamientos térmicos como el recocido (annealing) que permite liberar de forma controlada los esfuerzos residuales de la pieza (5–8). Sin embargo, a la hora de evaluar el desempeño mecánico de piezas inyectadas, es indispensable realizar una prueba o ensayo de laboratorio. Al respecto, se tienen diversos estudios que han investigado el efecto de las condiciones de proceso de inyección en la calidad del producto inyectado, relacionado con las propiedades mecánicas de tensión, flexión, dureza, impacto, entre otras (9–14). No obstante, el uso de técnicas para medir o estimar los esfuerzos residuales en piezas inyectadas y su relación con las propiedades mecánicas finales en estas no se ha estudiado a fondo. Se ha evidenciado como los esfuerzos residuales medidos por fotoelasticidad en piezas inyectadas tienen un efecto directo en la generación de deformaciones (8). El uso de la fotoelasticidad se ha empleado también para revelar en piezas de la industria automotriz como técnica para medir los esfuerzos residuales y cómo estos pueden promover la presencia de grietas en este tipo de piezas (15). Así mismo, el uso combinado de la fotoelasticidad con el tratamiento térmico de piezas plásticas ha validado cómo el incremento en el tiempo del tratamiento térmico permite reducir los esfuerzos residuales en el material (16). Sin embargo, faltan aún estudios que evalúen la relación directa de los esfuerzos residuales en el desempeño mecánico de piezas inyectadas. El propósito del presente trabajo es realizar una evaluación del desempeño mecánico de piezas plásticas inyectadas en función de las condiciones de procesamiento, los tratamientos térmicos posteriores realizados a las piezas y confrontado con ensayos de fotoelasticidad para visualizar las zonas donde se desarrollan mayores niveles de esfuerzos residuales, permitiendo evidenciar el efecto que pueden tener estas variables en las piezas inyectadas.

Metodología

Inyección de piezas plásticas

Para realizar el proceso de inyección se empleó un molde de probetas tipo campus (ver Figura 1), se inyectaron las piezas utilizando diferentes condiciones de proceso (temperatura de molde, tiempo de enfriamiento y pospresión) (ver Tabla 1), el material empleado fue un policarbonato GE (LEXAN 144R). De acuerdo a condiciones recomendadas del proveedor del material y lo reportado en la literatura (17) se establecieron como variables las condiciones anteriormente mencionadas, se empleó una temperatura de molde baja (50 °C), con fin de establecer si este valor puede generar cambios significativos en los esfuerzos residuales y una temperatura de 80 °C recomendada para el policarbonato. El tiempo de enfriamiento promedio a partir del cual se definieron los niveles del diseño experimental se determinaron partiendo de la ecuación analítica de enfriamiento en una sección rectangular (18,19). La pospresión (presión y tiempo) se definieron previamente durante la inyección con el fin de obtener una pieza libre de rechupes y buena apariencia superficial. Como condiciones de proceso fijas se estableció una temperatura de inyección de 300 °C y un tiempo de inyección de 1 segundo. Se utilizó una inyectora de plásticos marca Welltec 90F2V y se obtuvieron las piezas necesarias para realizar las pruebas

posteriores de tratamiento térmico de "annealing", fotoelasticidad y ensayos de flexión.

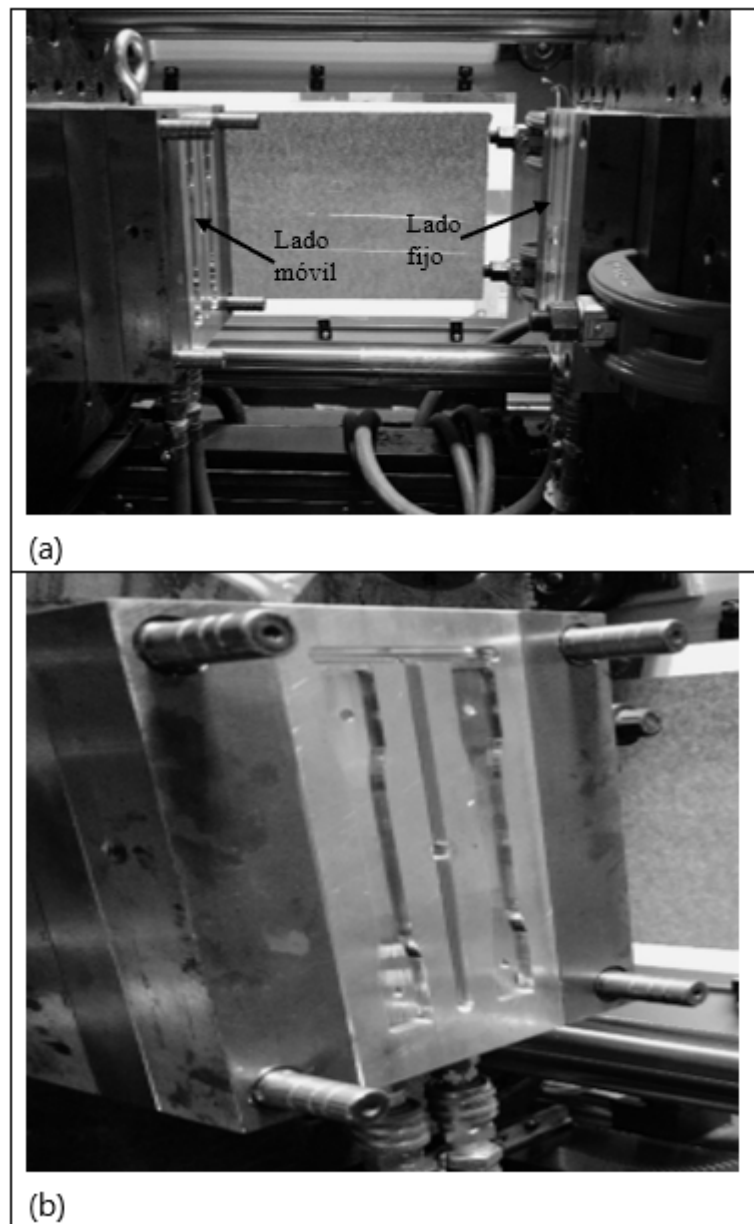


Figura 1. Molde empleado para la inyección de muestras a analizar. Molde abierto (a), y detalle de la cavidad del lado móvil del molde (b).

Tabla 1. Diseño experimental evaluado de condiciones de proceso de inyección

tiempo enfriamiento restante [s]*	tiempo pospresión [s]	Presión pospresión [bar]	Temperatura molde [°C]	
10	1.5	40	50	Cond-1
15	1.5	40	50	Cond-2
10	4	40	50	Cond-3
15	4	40	50	Cond-4
10	7.7	40	50	Cond-5
15	7.7	40	50	Cond-6
10	1.5	60	50	Cond-7
15	1.5	60	50	Cond-8
10	4	60	50	Cond-9
15	4	60	50	Cond-10
10	7.7	60	50	Cond-11
15	7.7	60	50	Cond-12
10	1.5	40	80	Cond-13
15	1.5	40	80	Cond-14
10	4	40	80	Cond-15
15	4	40	80	Cond-16
10	7.7	40	80	Cond-17
15	7.7	40	80	Cond-18
10	1.5	60	80	Cond-19
15	1.5	60	80	Cond-20
10	4	60	80	Cond-21
15	4	60	80	Cond-22
10	7.7	60	80	Cond-23
15	7.7	60	80	Cond-24

*Tiempo de enfriamiento adicional luego del tiempo de inyección y pospresión. El tiempo de enfriamiento incluye tiempo de inyección, pospresión y restante.

Tratamiento térmico de piezas inyectadas

Con el propósito de ver el efecto de un tratamiento térmico en la pieza inyectada, se realizó el tratamiento de recocido (annealing) en algunas piezas inyectadas a las condiciones de proceso establecidas. Para esto se utilizó un horno con recirculación de aire caliente, estableciendo un programa controlado de calentamiento gradual de temperatura

durante 5 horas hasta los 130 °C, la cual fue mantenida durante 45 minutos y finalmente, se enfrió gradualmente durante 5 horas hasta la temperatura ambiente, condiciones establecidas de acuerdo con proveedores de policarbonato (20–22). Cinco réplicas de piezas de las condiciones seleccionadas para este tratamiento térmico se emplearon para ser llevadas a ensayos mecánicos de flexión.

Ensayos de fotoelasticidad

Previo a los ensayos mecánicos se realizó una prueba de fotoelasticidad sobre las piezas inyectadas, la cual permite visualizar los patrones de distribución de esfuerzos residuales en las piezas. Esta técnica se basa en los fenómenos experimentados por las ondas electromagnéticas a su paso por materiales transparentes, en particular la polarización de la luz que ocurre a consecuencia de las tensiones presentes en los cuerpos sometidos a esfuerzos externos o con esfuerzos internos. Para el montaje de ensayo se utilizaron dos láminas polarizadoras, una fuente de luz blanca y una cámara fotográfica con la opción de obtener imágenes en alta resolución. En la figura 2 se muestra el detalle del montaje realizado para obtener las franjas de color de las piezas inyectadas correspondientes a los esfuerzos internos (residuales) generados en las piezas durante el proceso de inyección.



Figura 2. Montaje experimental de fotoelasticidad.

Ensayos mecánicos de flexión

Con el fin de evaluar una condición real de carga a la que pueda estar sometida una pieza plástica durante su aplicación, se evaluaron ensayos de flexión, donde se presentan estados de esfuerzos combinados de tensión y compresión. Los ensayos fueron realizados en una máquina universal de ensayos marca Shimadzu, la carga fue aplicada en la zona rectangular de la pieza, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D790 para piezas termoplásticas moldeadas (23). Se evaluaron 5 repeticiones de cada condición de inyección con el propósito de obtener un promedio y desviación estándar.

Resultados y discusiones

Ensayos mecánicos de flexión

Se realizaron ensayos de flexión a la totalidad del diseño experimental planteado en el estudio, el resumen de resultados se presenta la figura 3. Comparado con la temperatura de molde de 50 °C se observa levemente una mayor resistencia a la flexión a la mayor temperatura de molde empleada (80 °C), la cual es una temperatura cercana a la

recomendada para el material (24). Lo anterior se explica por el hecho que mientras el molde está más caliente, esta condición genera una velocidad de enfriamiento baja, permitiendo por una parte una mejor aplicación de la etapa de pospresión, lo que se traduce en un mayor peso del producto inyectado y reducción de contracciones del material. Así mismo, bajo esta condición se propicia una relajación molecular del plástico inyectado, por otro lado, a una temperatura de molde de 50 °C se generan altas velocidades de enfriamiento, que a diferencia de la relajación propicia altas orientaciones moleculares en las capas solidificadas del plástico inyectado y altas contracciones de las zonas de la pieza aun no solidificadas, condición que propicia el incremento de esfuerzos residuales (17,25), que pueden afectar la carga externa aplicada durante el ensayo de flexión (17,26). Específicamente a la temperatura de molde de 50 °C, las piezas inyectadas no se presentan una tendencia clara en el comportamiento mecánico a flexión, lo cual podría ser indicio de inyección poco repetitivo bajo estas condición de proceso.

El efecto de la pospresión normalmente al aumentar su nivel de pospresión y tiempo genera un incremento en el peso y reducción de las contracciones del producto inyectado, características de calidad que mejoran el desempeño mecánico de este (27–29). Para los resultados obtenidos, a pesar de que las desviaciones estándar no evidencian el comportamiento previamente expuesto, para la temperatura de molde de 80 °C sí se puede manifestar la tendencia de mayor resistencia a la flexión a medida que se aumenta la presión y tiempo de pospresión en las piezas inyectadas, excepto para la condición de 600 bar y 7.7 s. En el caso del molde a 50 °C el comportamiento a flexión es muy variable sin ningún tipo de tendencia, lo cual puede justificar que esta temperatura no es recomendable para procesar el policarbonato.

Finalmente, el hecho de incrementar el tiempo de enfriamiento, para este caso parece no influenciar significativamente la resistencia mecánica del producto inyectado, más allá de permitir una condición de enfriamiento con mayor relajación molecular del material inyectado.

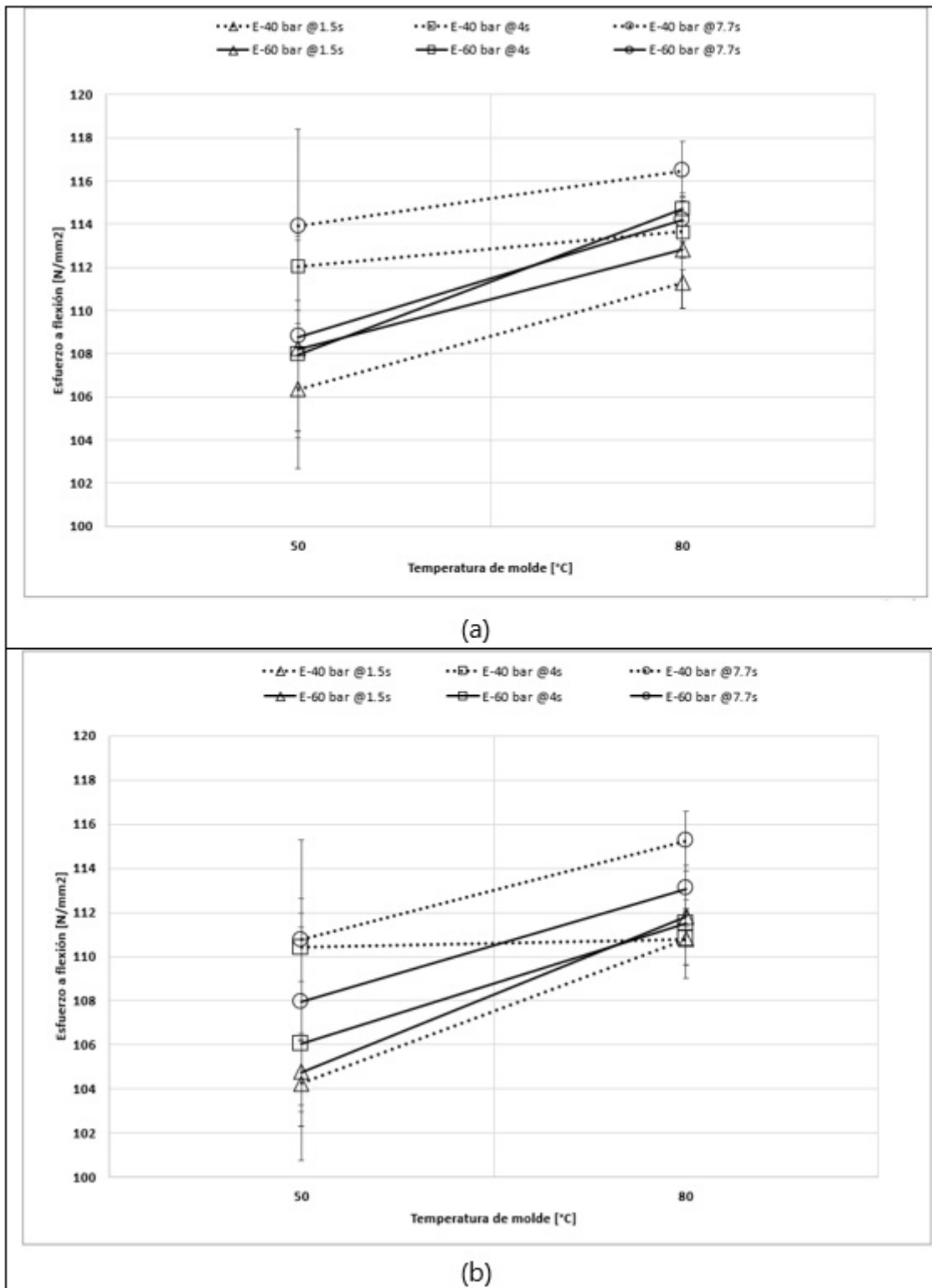


Figura 3. Esfuerzo a flexión de piezas inyectadas en PC durante un tiempo de enfriamiento restante de 10 segundos (a) y 15 segundos (b).

Ensayos mecánicos de flexión de piezas sometidas a tratamiento térmico

En la Figura 4 se comparan los valores de resistencia a la flexión con y sin tratamiento térmico, así como los incrementos en la resistencia a la flexión obtenidos en las muestras con tratamiento térmico (Tabla 2). En primera instancia para los valores de resistencia sin tratamiento térmico se observan valores similares para algunas condiciones de temperatura de molde de 50 °C (condiciones 3 a la 6) y 80 °C (condiciones 16 y 20), esta situación podría explicarse a la interacción de variables con los diferentes niveles de pospresión y tiempo de enfriamiento, donde la combinación de estos niveles podría generar un efecto similar en la orientación molecular al interior de la pieza y la cantidad de material inyectado representado en el peso y densidad del material, variables importantes en el desempeño mecánico del producto inyectado.

Al aplicar el tratamiento térmico, se observa un mayor porcentaje en el incremento de la resistencia a la flexión, en las piezas inyectadas a temperaturas de molde de 50 °C, mostrando que bajo esta condición se obtiene un mayor grado de liberación de tensiones internas o residuales mejorando de esta manera el rendimiento mecánico de las piezas inyectadas (Ver Tabla 2). Para las piezas inyectadas a temperaturas de molde de 80 °C, el tratamiento térmico no generó un incremento significativo en la resistencia mecánica, lo cual se puede explicar en el sentido que a esta temperatura se permite una mayor relajación molecular durante el proceso de inyección con respecto a la condición de temperatura de molde de 50 °C.

De igual forma, a lo presentado en los ensayos mecánicos a flexión en las piezas sin tratamiento térmico, entre cada condición evaluada (pospresión y tiempo de enfriamiento) no se presenta un cambio significativo en los niveles de esfuerzo a flexión. Sin embargo, para todas las muestras evaluadas sí se observa un incremento apreciable en la resistencia a la flexión en las piezas con tratamiento térmico; lo anterior evidencia que al realizar un relajamiento molecular de las piezas mediante el tratamiento térmico se reducen los esfuerzos residuales de las piezas, permitiendo un desempeño mecánico mejorado en cada caso, resultados similares fueron obtenidos en otros estudios evidenciando la mejora en el desempeño mecánico de piezas plásticas inyectadas al aplicar posteriormente un tratamiento térmico de recocido (24,30).

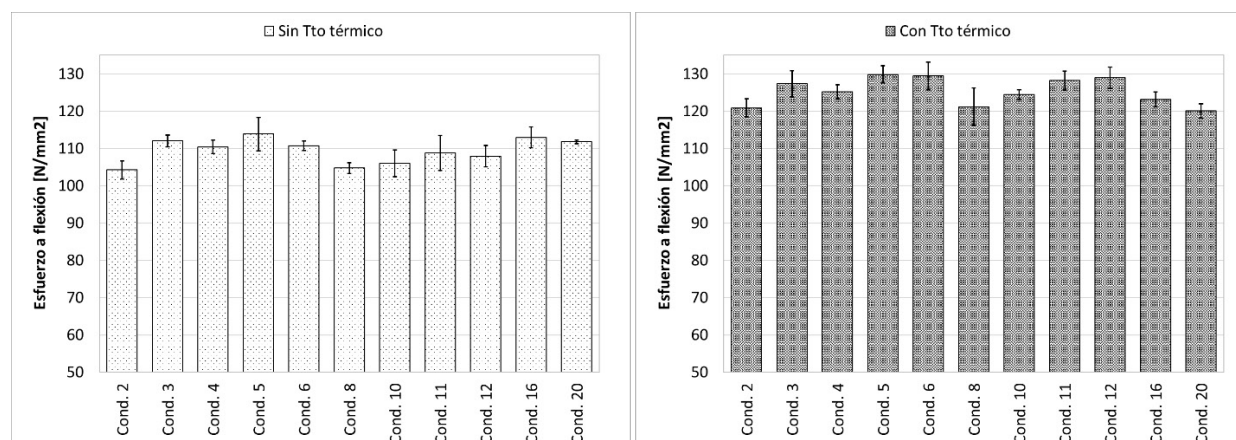


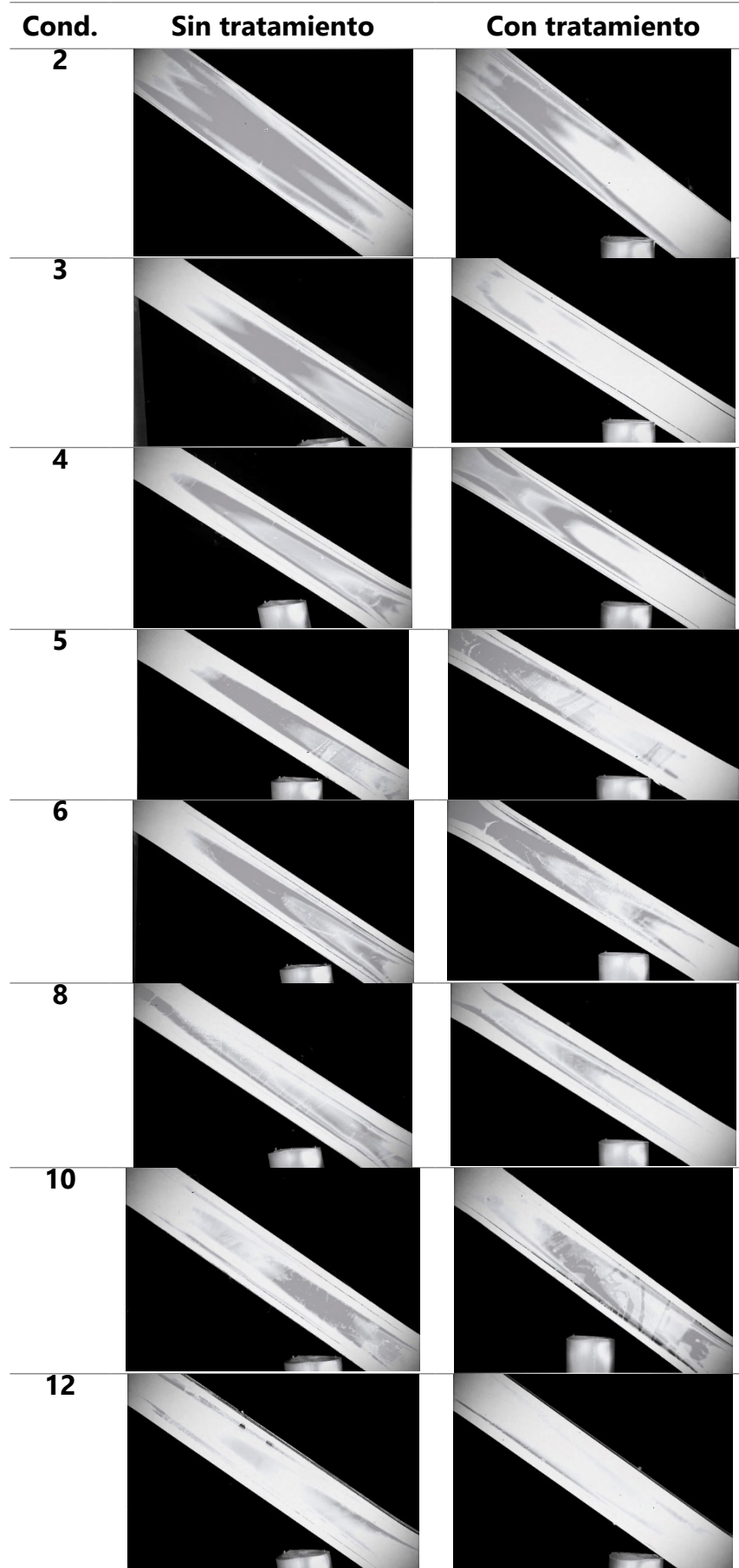
Figura 4. Esfuerzo a flexión de piezas inyectadas en PC con y sin tratamiento térmico.

Tabla 2. Porcentaje de incremento en la resistencia a la flexión de muestras con tratamiento térmico

Inyecciones	Incremento
Cond. 2	13,75%
Cond. 3	12,02%
Cond. 4	11,80%
Cond. 5	12,31%
Cond. 6	19,10%
Cond. 8	13,59%
Cond. 10	14,81%
Cond. 11	15,15%
Cond. 12	16,32%
Cond. 16	8,28%
Cond. 20	6,90%

Pruebas de fotoelasticidad

En la figura 5 se resumen las imágenes obtenidas del montaje de fotoelasticidad, donde se puede visualizar el cambio en el patrón de distribución de esfuerzos residuales al realizar el tratamiento térmico en las piezas inyectadas correspondientes a las condiciones comparadas en la figura 4 y tabla 2. Al confrontar las piezas inyectadas con y sin tratamiento térmico se evidencia un cambio en las franjas de color, donde prevalecen más los tonos oscuros o grises cuando no se presenta tratamiento térmico en comparación con las piezas sometidas a tratamiento térmico, que presentan tonos más claros, los cuales parecen representar zonas con menores esfuerzos residuales, que en algunos casos ayudan a una mejora en el desempeño mecánico a flexión como se presentó en las condiciones 6, 8, 10 y 12. Para las condiciones 16 y 20 que se inyectaron a temperaturas de molde de 80 °C, si bien se observan tonos más claros con el tratamiento térmico, tal como se explicó anteriormente estas piezas desde el momento que fueron inyectadas presentaban un menor nivel de esfuerzos residuales, esto podría explicar que el porcentaje de mejora en la resistencia mecánica al aplicar el tratamiento térmico no tuvo un mayor impacto. Si bien este ensayo es solo cualitativo, sí es posible establecer un cambio importante en la distribución de esfuerzos residuales, lo cual puede verse reflejado en una mayor resistencia a flexión de las piezas inyectadas sometidas a tratamiento térmico, con respecto a las inyectadas a las mismas condiciones de proceso, pero sin el tratamiento térmico (figura 4 y tabla 2). Un análisis cuantitativo de este tipo de piezas inyectadas bajo esta técnica de fotoelasticidad fue realizado por Vargas y colaboradores, donde se logró determinar cómo el efecto del flujo del plástico inyectado fue el predominante para generar los esfuerzos residuales al tener una distribución de temperaturas homogéneas en el molde (31).



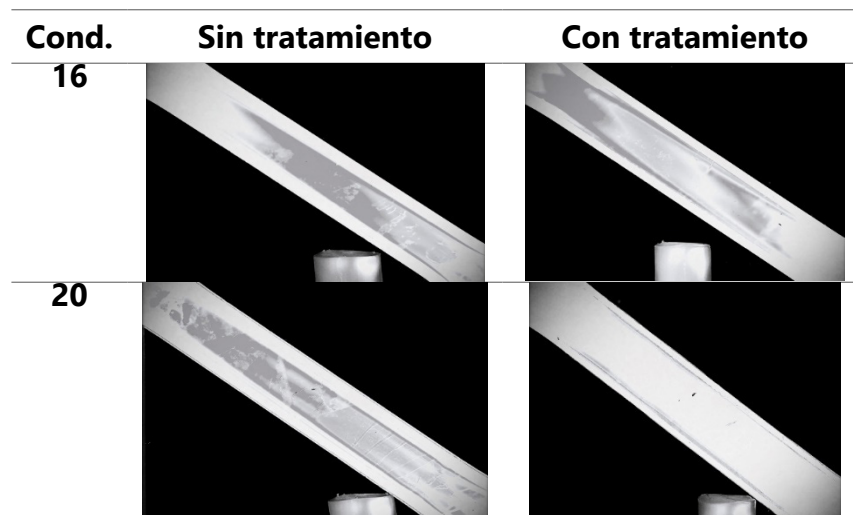


Figura 5. Imágenes de patrón de esfuerzos residuales obtenidos mediante la técnica de fotoelasticidad

Conclusiones

De acuerdo con el comportamiento mecánico evaluado se encontró que las piezas inyectadas a la temperatura de molde de 80 °C presentan menos variaciones en los niveles de resistencia a la flexión, contrario a la temperatura de molde de 50 °C, lo cual puede ser un indicio de un proceso de inyección más variable entre pieza y pieza inyectada, así como variaciones en los esfuerzos residuales en estas. Lo anterior evidencia el motivo por el cual el policarbonato se recomienda inyectar a temperaturas de molde iguales o superiores a 80 °C. Para esta condición de temperatura, si bien se presenta un leve incremento en la resistencia a la flexión cuando se incrementa la presión y tiempo de pospresión, los respectivos niveles de desviación estándar no evidencian un efecto predominante de estas condiciones de proceso. Así mismo, el efecto de incrementar el tiempo de enfriamiento no parece tener un efecto en el desempeño mecánico de las piezas inyectadas. Lo anteriormente expuesto deja abierta la posibilidad de evaluar mayores niveles de pospresión y tiempos de enfriamiento que puedan generar diferentes niveles de contracción y relajación molecular, que puedan producir mayores variaciones en los esfuerzos residuales, así como en el desempeño mecánico final de las piezas inyectadas.

El tratamiento térmico de "annealing" permitió mejorar el desempeño mecánico de las piezas inyectadas al liberar los esfuerzos residuales generados durante el proceso de inyección como se evidenció en los resultados de esfuerzo a flexión, donde para las piezas inyectadas a una temperatura de molde de 50 °C se generó un mayor porcentaje de incremento en la resistencia, lo cual podría estar asociado a un mayor nivel de esfuerzos residuales generados a esta condición, que posteriormente fueron liberados durante el tratamiento térmico, esto se evidenció en los análisis de imágenes de fotoelasticidad. Este tratamiento posterior a la inyección aunque puede tomar un tiempo largo, se puede justificar para ciertos tipos de piezas plásticas. Se pudo establecer que la técnica de fotoelasticidad es un sistema de control de calidad viable para evaluar esfuerzos residuales y de fácil implementación, donde los resultados cualitativos se pueden extender a la determinación numérica de estos niveles de esfuerzos. Otras técnicas, aunque destructivas y de control de calidad se pueden explorar como trabajo futuro como lo es el ataque químico, para evidenciar el comportamiento de esfuerzos residuales en forma de presencia de grietas o fallas prematuras de la pieza analizada y estos como se liberan a partir del uso de tratamientos térmicos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico Metropolitano y a la Universidad Nacional de la ciudad de Medellín – Colombia, por proporcionar los medios y recursos para desarrollar la presente investigación.

Referencias

1. Maxwell a. S, Turnbull a. Measurement of residual stress in engineering plastics using the hole-drilling technique. *Polym Test*. 2003 Apr;22(2):231–3.
2. Turnbull A, Maxwell AS, Pillai S. Residual stress in polymers—evaluation of measurement techniques. *J Mater Sci*. 1999 Feb;34(3):451–9.
3. Chang H jui, Mao Z fa, Su Z ming, Zhang G yi. applied sciences Using Recognizable Fuzzy Analysis for Non-Destructive Detection of Residual Stress in White Light Elements. 2021;
4. Shrivastava A. 3 - Plastic Properties and Testing. In: Shrivastava A, editor. *Introduction to Plastics Engineering*. William Andrew Publishing; 2018. p. 49–110. (Plastics Design Library).
5. Xu Y, Lu H, Gao T, Zhang W. Predicting the low-velocity impact behavior of polycarbonate: Influence of thermal history during injection molding. *Int J Impact Eng*. 2015 Dec;86:265–73.
6. Engels T, Govaert L, Meijer H. The Influence of Molecular Orientation on the Yield and Post-Yield Response of Injection-Molded Polycarbonate. *Macromol Mater Eng*. 2009 Nov;294:821–8.
7. Kim B, Min J. Residual stress distributions and their influence on post-manufacturing deformation of injection-molded plastic parts. *J Mater Process Technol*. 2017;245:215–26.
8. Sudsawat S, Sriseubsai W. Warpage reduction through optimized process parameters and annealed process of injection-molded plastic parts. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018;32(10):4787–99.
9. Gu F, Hall P, Miles NJ, Ding Q, Wu T. Improvement of mechanical properties of recycled plastic blends via optimizing processing parameters using the Taguchi method and principal component analysis. *Mater Des*. 2014;62:189–98.
10. Katmer S, Bilgileri K. THE EFFECTS OF MOLDING CONDITIONS ON THE RESIDUAL STRESSES IN INJECTION MOLDED POLYSTYRENE FLAT PARTS. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*. 2012;27(3).
11. Ovsik M, Hylova L, Fiala T. The Influence of Process Parameters of Injection on Nano-mechanical Properties of Polypropylene. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2018;448(1).
12. Wang G, Zhao G, Wang X. Effects of cavity surface temperature on mechanical properties of specimens with and without a weld line in rapid heat cycle molding. *Mater Des*. 2013;46:457–72.
13. Zhang W, Xu Y. Mechanical properties of polycarbonate: Experiment and modeling for aeronautical and aerospace applications. *Mechanical Properties of Polycarbonate: Experiment and Modeling for Aeronautical and Aerospace Applications*. 2019. 1–184

p.

14. Xu Y, Lu H, Gao T, Zhang W. Processing-induced inhomogeneity of yield stress in polycarbonate product and its influence on the impact behavior. *Polymers (Basel)*. 2016;8(3).
15. Macías C, Meza O, Pérez E. Relaxation of residual stresses in plastic cover lenses with applications in the injection molding process. *Eng Fail Anal*. 2015;57:490–8.
16. Tsai YP, Wei JJ, Hsu RQ. The research of reduce residual stress of polycarbonate products by heat treatment. In: *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings*. 2009. p. 2051–5.
17. Guevara-Morales A, Figueroa-López U. Residual stresses in injection molded products. *J Mater Sci* [Internet]. 2014 Mar 28 [cited 2014 Jun 9];49(13):4399–415. Available from: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84899624113&partnerID=tZOtx3y1>
18. Liang JZ, Ness JN. The calculation of cooling time in injection moulding. *J Mater Process Technol*. 1996;57(1–2):62–4.
19. BASF Plastics. Estimating cooling times in injection moulding. 2023 [cited 2023 Apr 2]. Estimating cooling times in injection moulding. Available from: https://pmtools-na.basf.com/quickcost/cooling_time_est.pdf
20. Materials: Annealing Tips for Amorphous Polymers, Part 2 | *Plastics Technology* [Internet]. [cited 2024 Jan 18]. Available from: <https://www.ptonline.com/blog/post/materials-annealing-tips-for-amorphous-polymers-part-2>
21. Annealing Guidelines for Plastic Stock Shapes | *Boedeker* [Internet]. [cited 2024 Jan 18]. Available from: <https://www.boedeker.com/Technical-Resources/Technical-Library/Plastic-Annealing-Guidelines>
22. Covestro. Annealing of Molded Makrolon® Polycarbonate Parts [Internet]. Pittsburgh; 2019. Available from: https://solutions.covestro.com/-/media/covestro/solution-center/brochures/pdf/cov-211_annealing-of-molded-makrolon.pdf?rev=6334dd40fb2b4fb8902c03a654a6e3e5
23. ASTM INTERNATIONAL. D790. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. *Annual Book of ASTM Standards*. 2002.
24. Xu Y, Lu H, Gao T, Zhang W. Predicting the low-velocity impact behavior of polycarbonate: Influence of thermal history during injection molding. *Int J Impact Eng*. 2015 Dec;86:265–73.
25. Wang J, Hopmann C, Kahve C, Hohlweck T, Alms J. Measurement of specific volume of polymers under simulated injection molding processes. *Mater Des*. 2020;196:109136.
26. Dar UA, Xu YJ, Zakir SM, Saeed MU. The effect of injection molding process parameters on mechanical and fracture behavior of polycarbonate polymer. *J Appl Polym Sci*. 2017;134(7):1–9.
27. Gu F, Hall P, Miles NJ, Ding Q, Wu T. Improvement of mechanical properties of recycled plastic blends via optimizing processing parameters using the Taguchi method and principal component analysis. *Mater Des*. 2014;62:189–98.



28. Katmer S, Bilgileri K. THE EFFECTS OF MOLDING CONDITIONS ON THE RESIDUAL STRESSES IN INJECTION MOLDED POLYSTYRENE FLAT PARTS. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*. 2012;27(3).
29. Brzęk P, Sterzyński T. Stress whitening as an observation method of residual stress in mabs polymer material through the example of holding pressure in an injection molding process. *Polymers (Basel)*. 2020;12(12):1–12.
30. Engels T, Govaert L, Meijer H. The Influence of Molecular Orientation on the Yield and Post-Yield Response of Injection-Molded Polycarbonate. *Macromol Mater Eng*. 2009 Nov;294:821–8.
31. Vargas-isaza C, Posada-correa J, León JB de. Analysis of the Stress Field in Photoelasticity Used to Evaluate the Residual Stresses of a Plastic Injection-Molded Part. *Polymers (Basel)*. 2023;15(16):1–14.