

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Análisis de esfuerzos residuales en piezas plásticas inyectadas por simulación y fotoelasticidad

Yeny Patricia Arboleda Urrea

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniera en Electromecánica

Asesor
Carlos Andrés Vargas Isaza

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM
Facultad de Ingenierías
Departamento de Electromecánica
Medellín, Colombia
2021

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RESUMEN

Los polímeros son materiales versátiles y de múltiples aplicaciones en todo tipo de industrias, pudiéndose encontrar en cualquier entorno, estos materiales debido a sus propiedades y características pueden ser moldeados, extruidos, e inyectados, lo que hace que su campo de aplicación cada día vaya en aumento, en Colombia los plásticos hacen parte de un mercado muy amplio y con tendencia en ascenso, con el fin de contribuir a la industria del sector plástico, demostrando que las empresas de este sector pueden acceder a ensayos con montajes sencillos y económicos; que permitan realizar controles de calidad en piezas inyectadas en materiales termoplásticos traslucidos como el policarbonato, para que a través de la obtención de datos experimentales y/o por medio de simulación de los esfuerzos residuales que se generan en el proceso de inyección, se puedan conocer los efectos de la temperatura y el flujo del material en el proceso de inyección. Para este propósito, se realizan ensayos de fotoelasticidad en probetas de policarbonato, los cuales se comparan con los resultados obtenidos por medio de simulación a través del software MOLDEX 3D, con la finalidad de evaluar el comportamiento de este material sometido a diferentes condiciones de proceso de inyección y con esto obtener de manera experimental una tendencia en los esfuerzos internos de las probetas que permita predecir posibles fallas prematuras en las piezas inyectadas.

PALABRAS CLAVE: Termoplásticos, Técnicas para medir y/o predecir esfuerzos residuales en materiales, Fotoelasticidad, Policarbonato, Molde de inyección.

KEYWORDS: Thermoplastics, Residual stress/internal stress, Detection of residual stresses, flow-induced stresses, Injection molding, optical birefringence, photoelasticity; Polycarbonate.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RECONOCIMIENTOS

A Dios gracias por cada detalle y momento durante la realización de este proyecto, por ser la base y porque también nos permitió continuar con salud, fuerzas y empeño, a mi familia por su apoyo incondicional y al Ingeniero Carlos Andrés Vargas Isaza, por desempeñar su función de asesor; pues de él obtuve oportunamente retroalimentaciones, consejos y enseñanzas.

Por otro lado, quiero agradecer al Ingeniero Carlos Briñez; por su apoyo con el montaje de las pruebas de fotoelasticidad que permitieron la obtención de datos.

Y finalmente, agradezco al Instituto tecnológico Metropolitano ITM, por permitir el acceso al laboratorio de polímeros además de permitir el uso del software Moldex 3D al Departamento de electromecánica, especialmente al Comité Curricular por aprobar la propuesta y por permitirnos desarrollar lo aprendido durante la carrera.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

ACRÓNIMOS

PC Policarbonato

NaOH Hidrogeno de sodio

UV radiación ultravioleta

cm³ unidad de volumen centímetros cúbicos

Pa unidad de presión Pascal

ASTM Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales, por sus siglas en inglés American Society for Testing and Materials o ASTM International

ASTM D1044 Standard Test Method for Resistance of Transparent Plastics to Surface Abrasion by the Taber Abraser

Twelve fringe photoelasticity (TFP) Fotoelasticidad de doce franjas (TFP)

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	7
1.1	OBJETIVOS	7
1.1.1	General	7
1.1.2	Específicos	8
2	MARCO TEÓRICO	8
2.1	Materiales poliméricos.....	8
2.2	Policarbonato	10
2.3	Proceso de Inyección de materiales termoplásticos.....	11
2.4	Esfuerzos principales y residuales.....	14
2.5	Fotoelasticidad	17
3	METODOLOGÍA	20
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
4.1	Evaluación de la inyección de piezas plásticas mediante simulación	21
4.2	Obtención de imágenes de fotoelasticidad para el análisis de esfuerzos residuales de la inyección de piezas plásticas.....	30
4.3	Análisis de los resultados obtenidos mediante simulación y técnica de fotoelasticidad.	34
4.4	Correlación de los resultados obtenidos mediante simulación y técnica de fotoelasticidad.....	36
5	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	37
	REFERENCIAS	38

Listado de Figuras

Figura 1.	Clasificación de los plásticos.	9
Figura 2.	Estructura Policarbonato.....	10
Figura 3.	Esquema de equipo de inyección.....	11
Figura 4.	Esquema molde de inyección.....	12
Figura 5.	Ciclo de moldeo por inyección.	13
Figura 6.	Estado de esfuerzos en un punto.....	15
Figura 7.	Patrones de esfuerzos residuales.....	16

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Figura 8. Presentación de la luz a través de un material birrefringente.....	18
Figura 9. Medidas probeta D638.....	22
Figura 10. Simulación previa Moldex 3D.....	24
Figura 11. Simulación Moldex 3D T enfriamiento 10 S condiciones 1 y 13; 7 y 19.....	25
Figura 12. Simulación Moldex 3D T enfriamiento 10 S condiciones 3 y 15; 9 y 21.....	26
Figura 13. Simulación Moldex 3D T enfriamiento 10 S condiciones 5 y 17; 11 y 23.....	26
Figura 14. Simulación Moldex 3D T enfriamiento 15 S condiciones 2 y 14; 8 y 20.....	27
Figura 15. Simulación Moldex 3D T enfriamiento 15 S condiciones 4 y 16; 10 y 22.....	27
Figura 16. Simulación Moldex 3D T enfriamiento 15 S condiciones 6 y 18; 12 y 24.....	28
Figura 17. Temperatura de molde a Temp. enfriamiento 50°C condición 1.....	29
Figura 18. Temperatura de molde a Temp. enfriamiento 80°C condición 2.....	29
Figura 19. Temperatura de molde a Temp. enfriamiento 50°C condición 16.....	29
Figura 20. Diferencia de temperatura entre el núcleo y la cavidad del molde.....	30
Figura 21. Imágenes fotoelasticidad obtenidas con Matlab.	31
Figura 22. Fotoelasticidad tiempo de enfriamiento 10 s condiciones 13 y 19.	31
Figura 23. Fotoelasticidad tiempo enfriamiento 10 s condiciones 3 y 15; 9 y 21.....	32
Figura 24. Fotoelasticidad tiempo enfriamiento 10 s condiciones 5 y 17; 11 y 23.....	32
Figura 25. Fotoelasticidad T enfriamiento 15 S condiciones 2 y 14; 8 y 20.	33
Figura 26. Fotoelasticidad T enfriamiento 15 S condiciones 16; 10 y 22.....	33
Figura 27. Fotoelasticidad tiempo enfriamiento 15 s condiciones 6 y 18; 12 y 24.....	34
Figura 28. Esfuerzos residuales Máximos obtenidos por simulación.	35
Figura 29. Resistencia mecánica probetas de policarbonato.....	35
Figura 30. Resultado Moldex 3D VS Fotoelasticidad, tiempo de enfriamiento 10 s condición 3.	36

Listado de Tablas

Tabla 1. Condiciones de proceso a temperatura de inyección de 300°C.....	22
--	----

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

1 INTRODUCCIÓN

Con los procesos de fabricación se generan esfuerzos residuales en las piezas, los cuales producen ciertos efectos en las propiedades de los materiales; la principal causa de estos esfuerzos son los procesos de conformado y fabricación como; soldadura, fundición, maquinado, inyección entre otros. Estos esfuerzos residuales pueden ser benéficos o perjudiciales dependiendo la magnitud, sentido y distribución de estos; como lo describe (Cárdenas, 2007) la falla por fatiga es producto de los esfuerzos a tensión, por lo que esfuerzos residuales a compresión resultan beneficiosos para piezas sujetas a esfuerzos oscilantes que puedan inducir al fallo por fatiga.

En la actualidad existen muchas técnicas para calcular estos esfuerzos entre ellas podemos encontrar ensayos destructivos y otros no destructivos como es el caso de los ensayos de fotoelasticidad, esta es una técnica experimental usada para la evaluación del campo de esfuerzos en cuerpos birrefringentes como lo expresa (Sarmiento, 2011), estas técnicas aprovechan el hecho que, al observar un cuerpo birrefringente a través de un montaje de polarización, la información referente a su campo de esfuerzos se hace evidente a través de la formación de patrones de franjas de color; este análisis muestra la información de los esfuerzos contenida en las intensidades de los patrones de franjas, según las cargas a las que se ha sometido la pieza; con base en esta información se pretende contribuir a la industria del sector plástico, aportando evidencia de que existen ensayos asequibles, que permitan a las empresas de este sector acceder a montajes sencillos y económicos, que les permitan realizar controles de calidad en piezas inyectadas en materiales termoplásticos translúcidos, para que a través de la obtención de datos experimentales y por medio de simulación de los esfuerzos residuales que se generan en el proceso de inyección, se puedan predecir fallas prematuras en las piezas inyectadas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 General

- Evaluar los esfuerzos residuales en piezas plásticas inyectadas mediante simulación computarizada y la técnica de fotoelasticidad, con la finalidad de obtener información del comportamiento de los materiales plásticos que puedan servir de precedente para mejorar los procesos de manufactura de estos materiales.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

1.1.2 Específicos

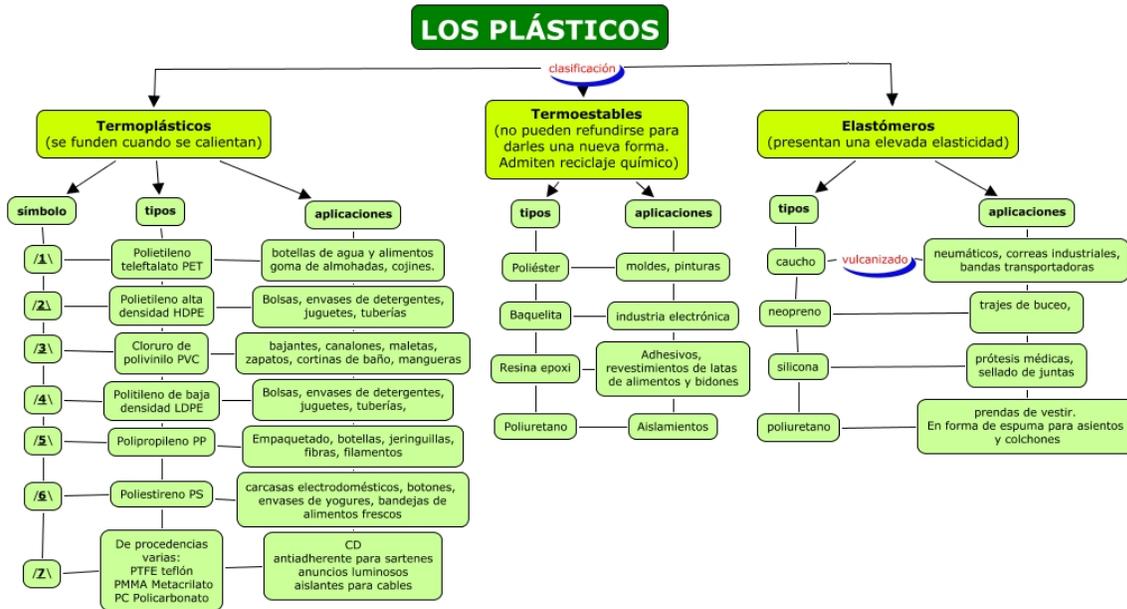
- Evaluar la inyección de piezas plásticas mediante simulación computarizada.
- Obtener mediante la técnica de fotoelasticidad imágenes que representan esfuerzos residuales en piezas plásticas inyectadas.
- Analizar los resultados de esfuerzos residuales de piezas plásticas inyectadas de cálculos numéricos y experimentalmente por medio de fotoelasticidad.
- Correlacionar los resultados de esfuerzos residuales con las propiedades mecánicas de piezas plásticas inyectadas.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Materiales poliméricos

Como lo define (Hermida, 2011); los polímeros son moléculas de gran tamaño, constituidas por “eslabones” orgánicos denominados monómeros, unidos mediante enlaces covalentes. Los eslabones están formados, fundamentalmente, por átomos de carbono y pueden poseer grupos laterales o radicales con uno o más átomos. Estas moléculas orgánicas son las que constituyen los materiales plásticos que conocemos y también los tejidos de los seres vivos (piel, músculos, tela de araña, seda, etc.). Dentro de estos materiales se encuentran una gran variedad de clasificaciones según sus propiedades, familia y forma de obtención, entre otras; en la figura 1 se puede apreciar la clasificación de los polímeros de la familia de los plásticos, en los cuales se enfocará este proyecto, particularmente en el policarbonato el cual hace parte de los termoplásticos.

Figura 1. Clasificación de los plásticos.



Nota: Adaptado de Clasificación de los plásticos, por plásticos online, (Google Sites, 2011).

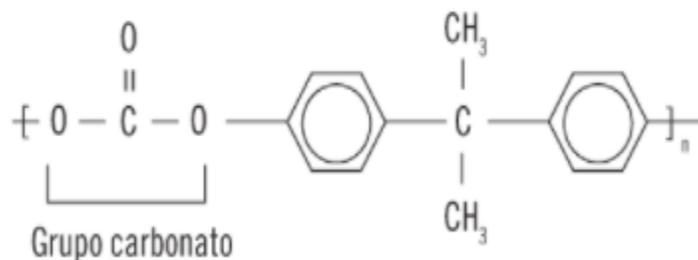
(López Romero, 2015) Define los plásticos como materiales poliméricos que al ser sometidos a la acción de una fuerza externa tienden a deformarse de manera irreversible; dentro de los plásticos encontramos los termoplásticos, cuya característica principal consiste en que al ser sometidos a calentamiento se reblandecen y si el calentamiento es constante comienzan a fluir, sin embargo, cuando la temperatura disminuye vuelven a su estado inicial, convirtiéndolo en material viscoso, solidificándose y endureciéndose finalmente; como lo describe (López Romero, 2015) esta característica permite el moldeo por calentamiento a temperaturas entre 80 °C y 100 °C. Estructuralmente, sus macromoléculas se encuentran ordenadas o desordenadas, con distinto grado de enmarañamiento, al no estar unidas entre sí pueden moverse con relativa facilidad, lo cual explica su propiedad de fluidez; es esta característica lo que hace que estos materiales sean muy utilizados en el ámbito industrial, por lo cual a través de la historia se han desarrollado múltiples procesos de manufactura como los son el rotomoldeo, la extrusión, el soplado, la inyección, entre otros, usados actualmente para la transformación de los termoplásticos, para este trabajo será de utilidad describir en que consiste el proceso de inyección, debido a que este es el proceso usado para producir las probetas de los ensayos que se aplicaran en el desarrollo de este proyecto.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

2.2 Policarbonato

El policarbonato PC como lo describe (Camuña Rodríguez, 2015) es un polímero transparente e incoloro de amplio uso en óptica e ingeniería; este se obtiene a partir de la reacción del Bisfenol A con el fosgeno, haciendo reaccionar en primer lugar al bisfenol A con NaOH, lo que produce la esterificación del bisfenol, que reacciona a continuación con fosgeno, obteniéndose a continuación un cloroformato que sigue reaccionando hasta formar la cadena del policarbonato, la cual se puede apreciar en la figura 2.

Figura 2. Estructura Policarbonato.



Nota: Adaptado de estructura del policarbonato, por tecnología de los plásticos, (Ojeda, 2011)

(ELAPLAS Elastómeros Plásticos, 2020) brinda las propiedades físicas del policarbonato, las cuales se relacionan a continuación.

Sus propiedades son las siguientes:

- Estructura amorfa.
- Buenas propiedades térmicas y estabilidad.
- Buena resistencia al impacto.
- Baja conductividad eléctrica.
- Resistencia a los ácidos en condiciones normales de temperatura y concentración.
- Estabilidad a los rayos UV.
- Densidad: 1,20 g/cm³
- Rango de temperatura de uso: -100 °C a +135 °C
- Punto de fusión: aproximadamente 250 °C
- Índice de refracción: 1,585 ± 0,001
- Índice de transmisión lumínica: 90% ± 1%
- Alargamiento a la Rotura: 100-150%
- Coeficiente de Fricción: 0,31
- Dureza - Rockwell: M70
- Módulo de Tracción: 2,3 - 2,4 GPa
- Relación de Poisson: 0,37

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Resistencia a la Abrasión - ASTM D1044: 10-15 mg/1000 ciclos
- Resistencia a la Compresión: >80 MPa
- Resistencia a la Tracción: 55-75 MPa
- Resistencia al Impacto Izod: 600-850 J/m
- Tensión de Fluencia / Límite Elástico: 65 MPa

El policarbonato es usado frecuentemente como sustituto del vidrio, ya que es un material mucho más ligero, también se aplica en la construcción cuando se requiere tener transparencia en las superficies y como recubrimiento de otros materiales.

Las características y propiedades de los materiales poliméricos son importantes al momento de seleccionar el tipo de ensayo que se utilizara para su caracterización, en este caso, como el PC es un plástico no modificado por adición de adictivos, se hace posible valorarlo con base a sus propiedades ópticas.

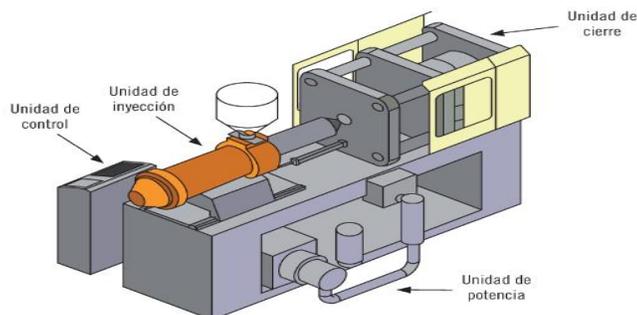
2.3 Proceso de Inyección de materiales termoplásticos

El proceso de inyección es el principal método de la industria moderna para el procesamiento de materiales plásticos, de acuerdo con (López Romero, 2015) el proceso de inyección se realiza por medio de una máquina inyectora la cual plastifica el polímero, haciéndolo más fluido con el fin de llevarlo a llenar un molde; este proceso tiene cuatro partes, las cuales se describen a continuación y se pueden identificar en la figura 3.

Unidad de Control: En este punto se controlan las variables del proceso, temperatura, presión y velocidad de rotación del husillo.

Unidad de Inyección: Zona donde se transporta el polímero, mientras se realiza el desplazamiento el polímero se va plastificando y acaba saliendo por una boquilla hasta el molde.

Figura 3. Esquema de equipo de inyección.



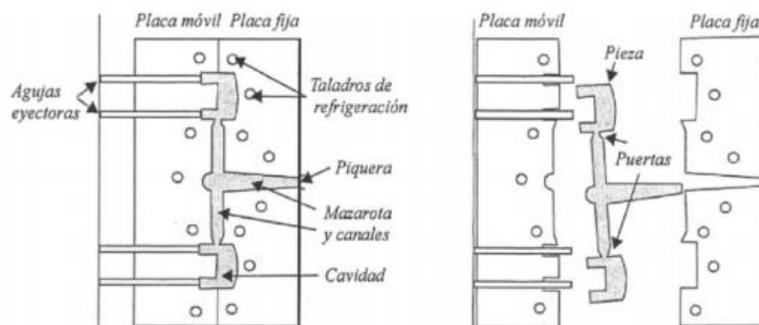
Nota: Adaptado de partes de una maquina inyectora, por portal electromecánico, (Nepta, 2019).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Unidad de potencia: En esta unidad se genera la potencia necesaria para operar la máquina.

Molde: Es el lugar donde se genera la pieza, generalmente son fabricados en acero y suelen ser intercambiables, estos poseen la cavidad para la pieza moldeada, canales de enfriamiento para refrigerar la pieza y barras expulsoras para sacar la pieza del molde. El molde es la herramienta fundamental en el moldeo por inyección, es en donde el plástico entra fundido en la cavidad con la forma que tomará una vez que se enfríe, y se conforma de una serie de elementos importantes, como la cavidad para la colada (canal de plástico que se forma al llenar la cavidad de la pieza), los pines expulsores de las piezas, la colada y el bebedero (parte de plástico que se forma posterior a la nariz de la unidad de inyección, a la entrada del molde), así como partes de sujeción y otras de expulsión, ver figura 4.

Figura 4. Esquema molde de inyección.



Nota: Adaptado de molde de inyección, por Prada, R. & J.C. Acosta-Prado (2017). El molde en el proceso de inyección de plásticos para el logro de objetivos empresariales. *Dimensión Empresarial*, 15(1), P162.

Como lo explica (Reynoso, 2018) cuando se moldean termoplásticos, la materia prima en forma de gránulos se alimenta a través de una tolva a un cilindro o cañón calentado con un tornillo rotatorio interno. A la entrada al cilindro la energía calorífica aumenta fundiendo la resina disminuyendo su viscosidad y permitiendo que el polímero fluya con la fuerza y movimiento de la unidad de inyección. El tornillo manda el material hacia adelante homogenizando tanto su viscosidad como su temperatura y reduce su tiempo de calentamiento con la fricción mecánica del tornillo sumando calentamiento por fricción al polímero.

Por rotación del tornillo el material fundido se mueve hacia adelante y se acumula en la parte delantera del tornillo por medio de una válvula en un volumen conocido como un disparo. Un disparo es el volumen de material que se utiliza para llenar la cavidad del molde, compensar la contracción y proporcionar un colchón para transferir la presión desde el tornillo a la cavidad del molde. Cuando se ha reunido suficiente material, éste es forzado a alta presión y velocidad en la cavidad para formar una pieza.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

El colchón es de aproximadamente 10% del volumen total de disparo y permanece en el cilindro al término del disparo para evitar que el tornillo pegue con el frente del cilindro.

El ciclo de inyección se divide en varias etapas, las cuales se describen a continuación:

Inyección del material en el cual el tornillo avanza al frente inyectando el material fundido al molde a través de la boquilla del cilindro.

Sostenimiento o compactación una vez que llega el tornillo al frente se mantiene estático en esta posición por varios segundos oponiendo presión a la resina en las cavidades del molde mientras esta se enfría; adicionalmente, en esta etapa se suministra material adicional al interior de la cavidad para compensar la contracción del material inyectado y darle el peso final a la pieza.

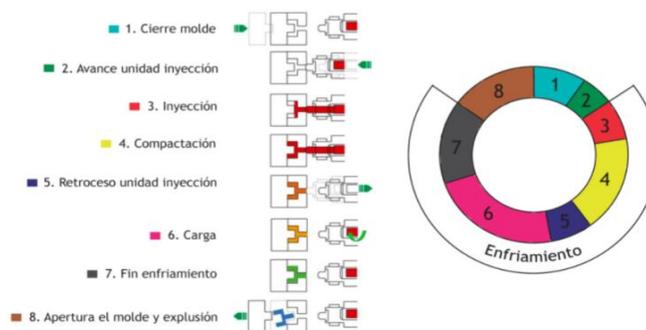
Enfriamiento: una vez que el punto de inyección de las cavidades ha solidificado el tornillo puede retraerse. El enfriamiento está compuesto de dos partes: el tiempo de retracción del tornillo también conocido como tiempo de carga o dosificación, ya que el tornillo atrae más material de la tolva para prepararlo y un tiempo extra también conocido como tiempo de seguridad, con el que el moldeador se asegura de que el material esté lo suficientemente solidificado para abrir el molde.

Apertura del molde y Expulsión: una vez que el molde se abre las piezas son expulsadas del mismo por acción mecánica (expulsores) o por aire.

Cerrado del molde: en este momento vuelve a comenzar el ciclo con la inyección del material.

Debido al ordenamiento molecular durante la solidificación de las resinas cristalinas, así como su punto de fusión, los tiempos en el ciclo de moldeo son diferentes para resinas cristalinas que para resinas amorfas. Algo muy característico es el tiempo de sostenimiento, en donde el tornillo se mantiene al frente ejerciendo presión sobre la cavidad hasta lograr por un lado que la resina logre su relajación molecular y por otro que el punto de inyección se enfríe. En la figura 5 se puede ver el ciclo de moldeo para resinas cristalinas y resinas amorfas.

Figura 5. Ciclo de moldeo por inyección.



Nota: Adaptado de ciclo de inyección, por portal electromecánico, (Nepta, 2019)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

2.4 Esfuerzos principales y residuales

Según (Ruud, 2002) (Martínez, 2017) Una de las tareas más importantes en la mecánica de sólidos es la determinación de los esfuerzos en un punto arbitrario de un elemento de máquina sujeto a fuerzas arbitrarias. Si es posible determinar el estado de esfuerzos en un punto arbitrario del elemento de máquina, será posible determinar si el elemento de máquina puede soportar las fuerzas a las que está sujeto. Esta determinación involucra la selección y aplicación de una teoría de falla apropiada al material de que está formado el elemento de máquina, sea dúctil o frágil, y el tipo de carga, sea estática o dinámica. El estado de esfuerzos en un punto, P, representa los esfuerzos a los que está sujeto el punto en tres planos; que usualmente se seleccionan mutuamente perpendiculares; que pasan por el punto. (Dally, 2005) explica que el estado de esfuerzos en un punto, P, se representa como un cubo en cuyas caras aparecen los esfuerzos a los cuales está sujeto el punto, ver figura 6. Es importante notar que los planos pasan por el mismo punto P, y que, por lo tanto, las dimensiones del cubo son infinitamente pequeñas. Los esfuerzos que aparecen en cada una de las caras pueden representarse de manera matricial como

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

De las ecuaciones de equilibrio, puede probarse que

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (2)$$

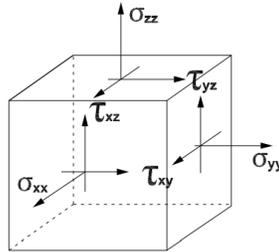
Sustituyendo los resultados indicados en la ecuación (2) en la ecuación (1) se tiene que el estado de esfuerzos S está dado por una matriz simétrica, es decir

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Más aun, puede probarse que el estado de esfuerzos S está sujeto a reglas específicas de transformación y constituye lo que se llama un tensor simétrico de segundo orden.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Figura 6. Estado de esfuerzos en un punto.



Nota: Adaptado de esfuerzos normales y tangenciales, por repositorio UNAL, (UNAL, 2014)

(Dorbecker, 2013) expone que los esfuerzos residuales se encuentran presentes en todos los materiales rígidos, sean metálicos o no (cerámicos, polímeros, madera, vidrio) y dichos esfuerzos son el resultado de la historia de los procesos mecánicos y térmicos a los cuales ha sido sometido el material, por consiguiente, hay que destacar que todos los procesos de manufactura introducen o modifican el estado de esfuerzos internos. Por lo anterior, el esfuerzo residual es normalmente definido como el esfuerzo remanente que se encuentra en el cuerpo de un material sin la presencia de cargas externas u otras fuentes de esfuerzo como gradientes de temperatura, los cuales pueden generar esfuerzos internos. Indiferentemente de la naturaleza y origen, estos esfuerzos se encuentran por sí mismos en equilibrio, esto quiere decir que la fuerza resultante y el momento que producen serán siempre cero. La presencia de esfuerzos residuales en un material no significa que tendrán un efecto perjudicial, para entender el efecto que tendrán en el material se debe hacer un estudio basado en las orientaciones y magnitudes de dichos esfuerzos.

Clasificación de los esfuerzos residuales

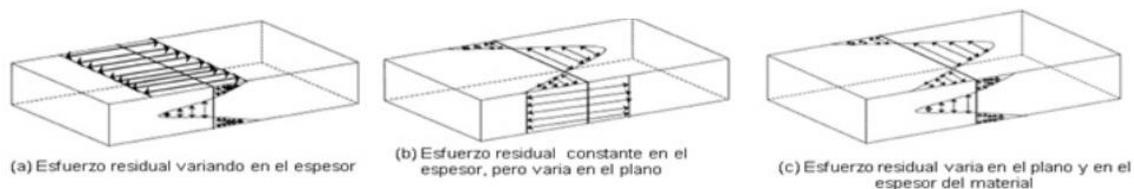
Los esfuerzos residuales se pueden clasificar de una manera muy general en dos tipos: esfuerzos residuales macroestructurales y esfuerzos residuales microestructurales. Donde esfuerzos macroestructurales son aquellos generados por dilataciones térmicas o deformaciones mecánicas que ocurren en procesos de formado, gradientes térmicos durante el vaciado, soldaduras, tratamientos térmicos. Todo esto genera esfuerzos internos por las contracciones y dilataciones no uniformes y usualmente tienen efecto o están equilibrados en un volumen grande del material (varios granos). Mientras que los esfuerzos residuales microestructurales son aquellos resultantes de cambios a nivel atómico y son equilibrados en volúmenes muy pequeños (un solo grano) y se pueden originar en la transformación de fases por ejemplo al transformar de una fase austenítica a fase martensítica existe un aumento en el volumen de la red cristalina, lo cual provoca esfuerzo residual microestructural.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Patrones de distribución de esfuerzo

Basado en el patrón de distribución del estado de esfuerzo residual en el material, según (Ruud, 2002) estos están clasificados en tres principales categorías que se muestran en la figura 7. La mayoría de las técnicas tradicionales para medir esfuerzos residuales miden el patrón de esfuerzo mostrado en la figura 7 (a), donde el esfuerzo residual es uniforme en el plano del componente, pero varía con la profundidad. Sin embargo, en situaciones reales podemos encontrar estados de esfuerzos con patrones como en la figura 7 (a, b y c), entonces la estimación de esfuerzos residuales puede dejar errores experimentales en ciertos casos.

Figura 7. Patrones de esfuerzos residuales.



Nota: Adaptado de patrones de esfuerzos residuales, de Aguilar, O. (2013). Estudio del efecto de esfuerzos residuales en el fenómeno de recuperación elástica, por método de holedrilling para el proceso de nivelado de placa de acero HSLA grado 050; Universidad Autónoma De Nuevo León, P16.

Orígenes de los esfuerzos residuales

Con relación a este tema, pueden ser muy variados los procesos y/o las causas que induzcan o modifiquen esfuerzos residuales en el material. En cuanto a esfuerzos residuales macroscópicos pueden ser inducidos mediante:

- Flujo plástico no homogéneo, bajo la acción de un tratamiento externo (Granallado).
- Deformación plástica no homogénea mediante un enfriamiento o calentamiento no uniforme (Temple ordinario)
- Deformación metalúrgica estructural (Tratamientos Térmicos)
- Varios Tratamientos superficiales (Esmaltado, Chapado de níquel y cobre, y recubrimientos por PVD y CVD)

Para este caso de estudio es importante conocer el comportamiento de estos esfuerzos en piezas plásticas inyectadas, profundizando en este tema podemos saber, según lo planteado por (Morales & López, 2014) que el proceso de inyección provoca que los polímeros experimenten grandes deformaciones durante este proceso, debido al cambio

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

de temperatura y presión, lo que origina las tensiones residuales que se verán reflejadas en la relajación de las cadenas poliméricas, lo cual tendrá un efecto en las propiedades finales del componente.

(Morales & López, 2014) también exponen que los esfuerzos residuales se originan principalmente a partir de dos efectos, los cuales son esfuerzos inducidos por el flujo, que corresponden a la orientación de las moléculas y se desarrollan durante el llenado del polímero en la cavidad del molde; y los esfuerzos inducidos por temperatura los cuales son desarrollados en la etapa de enfriamiento; normalmente los esfuerzos inducidos por el flujo son de menor magnitud que los esfuerzos inducidos por la temperatura.

2.5 Fotoelasticidad

De acuerdo con (Requena, 2016) y (López Alba, 2013) la fotoelasticidad es una técnica óptica experimental que se emplea para el análisis de tensiones en elementos mecánicos. 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. Esta técnica experimental es útil para el estudio de objetos de forma irregular y tensiones localizadas, como piezas de maquinaria con muescas o curvas, componentes estructurales con ranuras o agujeros y materiales con hendiduras. Proporciona un nivel visual para observar las características de las tensiones de los objetos por medio de diagramas de luz proyectados sobre una pantalla o sobre una película fotográfica. Por simple observación se determinan las regiones en que se concentran los esfuerzos. Sin embargo, se necesita una técnica más complicada para un análisis cuantitativo sobre la tensión, comprensión, fuerzas de cizalladura y deformaciones en cualquier punto del objeto con tensiones en tres direcciones espaciales (triaxial).

Con la fotoelasticidad se pueden realizar los siguientes procesos:

- Identificación instantánea de áreas críticas (regiones de sobre-esfuerzo).
- Medidas de picos de tensiones y distribución de tensiones alrededor de agujeros, muescas y sitios potenciales a posibles fallos.
- Identificar y medir tensiones residuales.
- Detectar el rendimiento y observar la redistribución de tensiones en el material que está siendo formado.

La fotoelasticidad ha tenido aplicaciones exitosas en varios campos de manufactura y construcción, donde es empleada. Se destacan los usos en la industria automotriz, aviación, construcción naval, herramientas y muchas otras aplicaciones. Los avances tecnológicos a

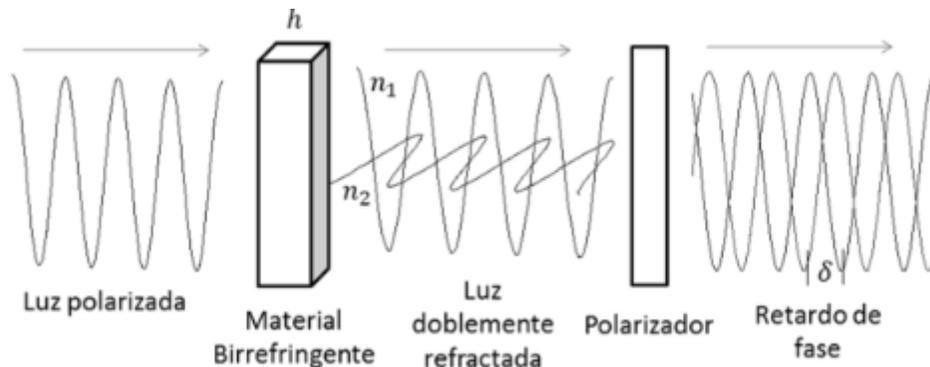
	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

nivel de computación y las técnicas del procesamiento digital de imágenes han hecho la fotoelasticidad más eficiente y confiable para la solución de problemas de ingeniería. Este fenómeno temporal o birrefringencia artificial, es la característica física en el cual se basa la fotoelasticidad.

Un material birrefringente se caracteriza por que divide la onda incidente en dos componentes polarizadas perpendiculares, denominadas ordinaria y extraordinaria. Las direcciones de polarización se denominan direcciones principales, mientras que los ejes asociados en el material se denominan ejes principales del índice de refracción.

Las amplitudes de las dos componentes se establecen a partir del vector eléctrico en componentes a lo largo de las direcciones principales, asumiendo reflexión despreciable y pérdidas por absorción. Las velocidades de las dos componentes son diferentes y pueden describirse en términos de dos índices de refracción asociados con las dos direcciones principales; estos valores, denominados valores principales del índice de refracción, son designados como n_1 y n_2 ; ver figura 8.

Figura 8. Presentación de la luz a través de un material birrefringente.



Nota: Adaptado de representación de la luz a través de un material birrefringente, de León, J. C. B., Martínez, A. R., & Giraldo, F. L. (2013). Estudios de fotoelasticidad: desarrollos y aplicaciones. Revista Politécnica, 9(16), P3.

Para terminar de comprender de mejor manera tanto esta técnica como su principio, a continuación, se definen unos conceptos básicos necesarios:

• **Naturaleza de la Luz**

La teoría electromagnética de Maxwell predijo la presencia de dos campos de vectores en las ondas de la luz, un campo eléctrico (E) y uno magnético (H). Estos vectores están en fase, y son perpendiculares entre sí respecto a la dirección de propagación. Cualquiera de los dos vectores se puede tomar como el vector fundamental de la luz.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

• **Refracción**

Cuando la luz atraviesa un determinado medio, su velocidad disminuye a un valor: Donde n_1 denota el índice de refracción del medio, Sin embargo, como la frecuencia permanece inalterada, la longitud de onda también disminuye.

• **Polarización**

Un rayo de luz no polarizada se compone de un gran número de haces transversales, los cuales están orientados aleatoriamente. Por consiguiente, un rayo de luz polarizada se compone de un gran número de haces transversales, los cuales tienen una orientación predeterminada.

Ecuación Fundamental de la Elasticidad: Ley Tenso - Óptica

Consideremos un modelo birrefringente sujeto a un estado de tensión plana, como lo describe (Requena, 2016) el estado de tensión en un punto del modelo vendrá caracterizado a través de las tensiones principales σ_1 , σ_2 . Cuando el modelo es cargado, experimentalmente se muestra que el modelo pasa a ser doble refractivo y las direcciones de los ejes de polarización en un punto coinciden con las direcciones de las tensiones principales en ese punto. Maxwell formuló el retardo relativo entre las tensiones y los índices de refracción como:

$$\begin{aligned} n_1 - n &= C_1 \sigma_1 - C_2 \sigma_2 \\ n_2 - n &= C_1 \sigma_2 - C_2 \sigma_1 \end{aligned} \quad (4)$$

Donde:

n_1 y n_2 son los índices de refracción asociados con las direcciones principales

n es el índice de refracción en el estado descargado

C_1 y C_2 son coeficientes tenso-ópticos

σ_1 y σ_2 son las tensiones principales

Si el modelo es iluminado con luz polarizada plana, el retardo relativo existente entre las dos componentes refractadas pasa a ser

$$\delta = \frac{2\pi h}{\lambda} (n_1 - n_2) = \frac{2\pi h}{\lambda} (c_1 + c_2) (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (5)$$

Esta ecuación indica que en un modelo fotoelástico, el retardo relativo cambia de un punto a otro dependiendo del nivel de tensión. Si $c_1 + c_2$ se reemplaza por C , el retardo relativo viene dado como:

$$\delta = \frac{2\pi h}{\lambda} C (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (6)$$

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

El coeficiente tenso-óptico relativo C normalmente se asume como constante del material. Sin embargo, como lo lista (León, Martínez, & Giraldo, 2013) existen varios estudios sobre la técnica de fotoelasticidad digital que han demostrado que el coeficiente tenso-óptico depende de la longitud de onda y debería ser usado con cuidado. Esta expresión puede reescribirse en términos del orden de franja N como:

$$N = \frac{\delta}{2\pi} = h \frac{C}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (7)$$

Si despejamos la diferencia de tensiones principales en la ecuación (7) tenemos

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{N \cdot F_\sigma}{h} \quad (8)$$

Donde

$F_\sigma = \lambda/c$ es conocido como el valor de franja del material, con unidades $N/(\text{mm} \cdot \text{franja})$
 h es el valor del espesor del elemento.

Esta última ecuación constituye la Ecuación Fundamental de la Fotoelasticidad, llamada Ley Tenso-Óptica, que relaciona el campo de tensiones con el orden de franja.

Para el análisis objeto de este proyecto, se aplicara la técnica de fotoelasticidad integrada al resultado obtenido con el desarrollo de un algoritmo, basado en la teoría de doce franjas de la fotoelasticidad explicada por (Ramesh, 2020); que permite observar la distribución de los esfuerzos residuales en las probetas inyectadas de forma experimental, los cuales se compararan con las distribuciones de esfuerzos residuales obtenidos por simulación computarizada, para posteriormente confrontar estos resultados con el desempeño mecánico de las piezas de policarbonato inyectadas sometidas a flexión.

3 METODOLOGÍA

El análisis de los esfuerzos residuales que se producen en piezas plásticas inyectadas por simulación y por ensayo de fotoelasticidad, será elaborado aplicando la metodología descrita a continuación.

1. Programación y cálculos por simulación del proceso de inyección
Partiendo de un diseño experimental previamente establecido, donde se obtuvieron un conjunto de probetas inyectadas para ser llevadas pruebas de fotoelasticidad y ensayos mecánicos. Se procederá a llevar este mismo diseño a un software de volúmenes finitos (Moldex 3D), que permite simular la inyección realizada experimentalmente bajo los mismos parámetros de material plástico inyectado,

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

geometría y condiciones de proceso. Como resultado de las simulaciones se puede obtener diagramas de contornos de color de los esfuerzos residuales en las piezas inyectadas a cada condición. Resultados que serán confrontados con los obtenidos mediante la técnica de fotoelasticidad.

2. Procesamiento de imágenes por la técnica de fotoelasticidad

Las piezas inyectadas experimentalmente serán evaluadas mediante el montaje de fotoelasticidad, el cual consiste en un montaje óptico, donde se usara un polariscopio conformado por dos polarizadores lineales y dos retardadores de cuarto de onda, La captura de las imágenes se realizará con una cámara USB con captura a colores; adicional se requerirá como fuente de luz, una luz blanca LED; para obtener patrones de color asociados a los esfuerzos residuales de cada pieza inyectada a diferentes condiciones. Posteriormente, se realiza un procesamiento de imágenes para capturar la zona de interés de la pieza inyectada, que luego se comparará con los resultados de simulación hechos en la etapa previa.

3. Análisis de resultados de simulación, fotoelasticidad y desempeño mecánico de las piezas inyectadas.

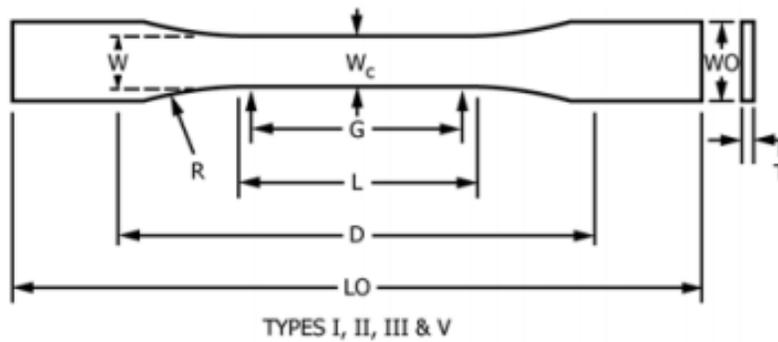
A partir de los resultados obtenidos en las etapas previas, se compararán estos resultados con el desempeño mecánico de las piezas inyectadas a esfuerzos de flexión, pruebas que se disponen para cada conjunto de probetas inyectadas en el diseño experimental llevado a cabo. Se buscará encontrar una tendencia o correlación de los esfuerzos residuales y la resistencia a la tensión de las probetas inyectadas.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Evaluación de la inyección de piezas plásticas mediante simulación

Para proceder con la evaluación de los esfuerzos residuales que se generan en piezas plásticas por inyección, se utilizaron probetas inyectadas en policarbonato, las cuales cuentan con las dimensiones para la ejecución de pruebas de laboratorio definidas por (ASTM, 2018) en el estándar D638, estas medidas se pueden apreciar en la figura 9, estas probetas fueron inyectadas con 24 condiciones de proceso diferentes, los cuales pueden ser apreciados en la tabla 1, con esta misma información se simuló en el software Moldex 3D, la inyección de las probetas aplicando las mismas condiciones de proceso de la inyección física.

Figura 9. Medidas probeta D638.



Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.)^A

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under
	Type I
W —Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)
L —Length of narrow section	57 (2.25)
W_O —Width overall, min ^G	19 (0.75)
W_O —Width overall, min ^G	...
L_O —Length overall, min ^H	165 (6.5)
G —Gage length ^I	50 (2.00)
G —Gage length ^I	...
D —Distance between grips	115 (4.5)
R —Radius of fillet	76 (3.00)
R_O —Outer radius (Type IV)	...



Nota: Adaptado de Specimen dimensions for thickness de ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org

Tabla 1. Condiciones de proceso a temperatura de inyección de 300°C.

Condición	Probeta	Tiempo enfriamiento [s]	Tiempo de sostenimiento [s]	Presión de sostenimiento [Bar]	T media de molde [°C]
1	PC1-1	10	1,5	40	50
2	PC1-2	15	1,5	40	50
3	PC1-3	10	4	40	50
4	PC1-4	15	4	40	50

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO			Código	FDE 089
				Versión	04
				Fecha	24-02-2020

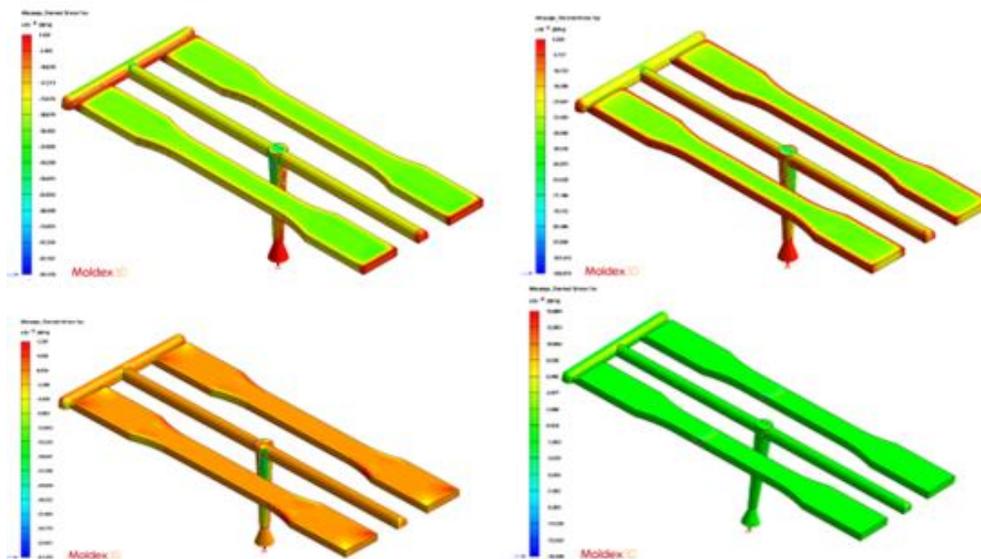
5	PC1-5	10	7,7	40	50
6	PC1-6	15	7,7	40	50
7	PC1-7	10	1,5	60	50
8	PC1-8	15	1,5	60	50
9	PC1-9	10	4	60	50
10	PC1-10	15	4	60	50
11	PC1-11	10	7,7	60	50
12	PC1-12	15	7,7	60	50
13	PC1-13	10	1,5	40	80
14	PC1-14	15	1,5	40	80
15	PC1-15	10	4	40	80
16	PC1-16	15	4	40	80
17	PC1-17	10	7,7	40	80
18	PC1-18	15	7,7	40	80
19	PC1-19	10	1,5	60	80
20	PC1-20	15	1,5	60	80
21	PC1-21	10	4	60	80
22	PC1-22	15	4	60	80
23	PC1-23	10	7,7	60	80
24	PC1-24	15	7,7	60	80

Fuente: autor.

Posteriormente se procedió a realizar la simulación de los esfuerzos producidos en cada una de las probetas a las condiciones de proceso antes relacionadas, se realizaron varias simulaciones para identificar los fenómenos generados en todas las direcciones de los esfuerzos T_{xx} ; T_{xy} ; T_{yy} ; T_{zx} ; T_{zz} ; $T_{von\ mises}$ para identificar en cuál de las simulaciones se veía reflejado el resultado de los esfuerzos residuales producidos por inducción del flujo y la temperatura; en la figura 10 se pueden apreciar las simulaciones realizadas inicialmente para la probeta PC1-2; con base en estos resultados se definió realizar todas las simulaciones para las diferentes condiciones de proceso con los resultados obtenidos en los esfuerzos T_{xx} .

En las imágenes obtenidas en la simulación se identifican contornos de esfuerzos acotados en el centro de las probetas; en algunas imágenes se puede apreciar una tonalidad diferente en uno de los extremos de la pieza, esto es debido a que la simulación muestra un llenado parcial del molde, ocasionada porque el software asume como criterio de simulación la temperatura de solidificación del polímero durante el llenado de la cavidad, de acuerdo con las propiedades del policarbonato y aplicando las condiciones de inyección descritas en la tabla 1, en el proceso de inyección de las probetas se aplicó post presión (sostenimiento) con el fin de adicionar más material para llenar completamente el molde y darle mejores características a la pieza; lo cual no ocurre en teoría con las condiciones de llenado del molde, puesto que el policarbonato se empieza a solidificar antes de terminar de llenar el molde.

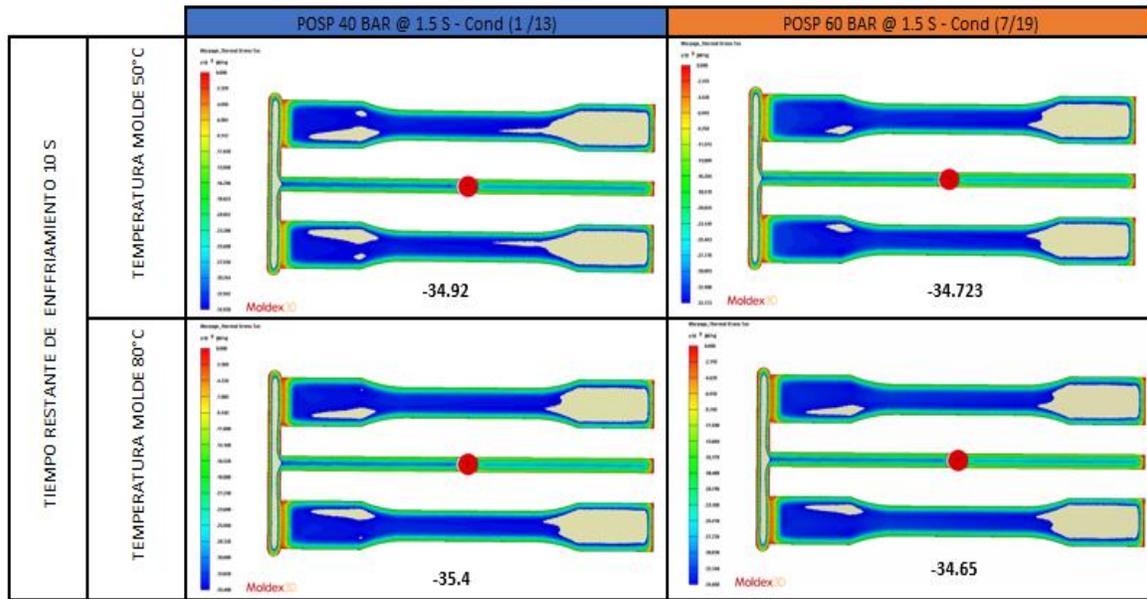
Figura 10. Simulación previa Moldex 3D.



Fuente: autor.

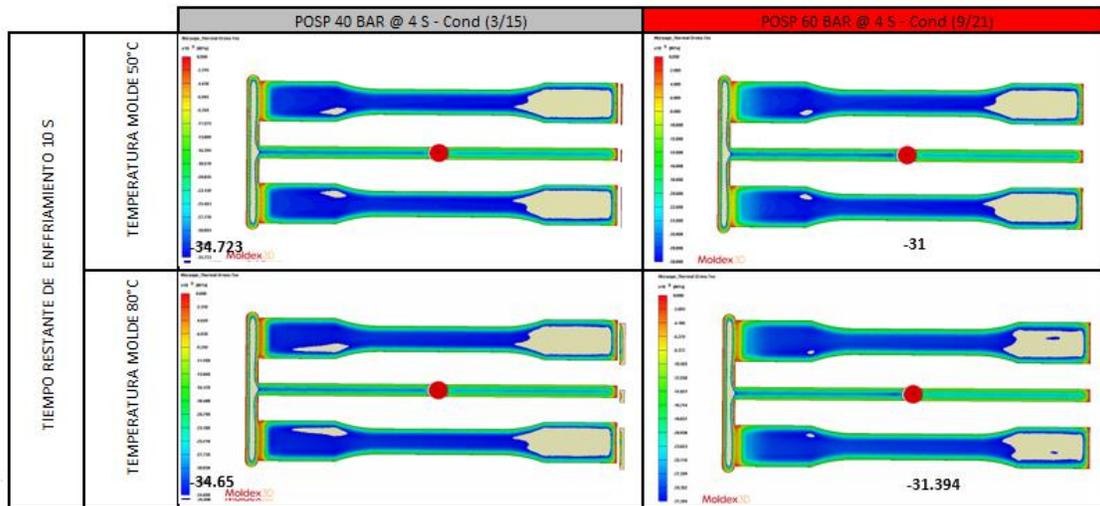
Como se puede apreciar en la tabla 1, en las condiciones de proceso se variaron la presión y tiempo de sostenimiento, la temperatura de molde y tiempo de enfriamiento, esto con la finalidad de identificar qué cambios se producen en las piezas para evidenciar el comportamiento de los esfuerzos internos; estas imágenes fueron organizadas y divididas en dos grupos según el tiempo de enfriamiento aplicado a la pieza; con el software Moldex 3D se obtuvo un valor numérico de esfuerzo residual, el cual fue definido en la zona media de la probeta, debido a que esta es la parte de la pieza que se somete a los ensayos de flexión de acuerdo a lo definido por (ASTM, 2018).

Figura 11. Simulación Moldex 3D T enfriamiento 10 S condiciones 1 y 13; 7 y 19.



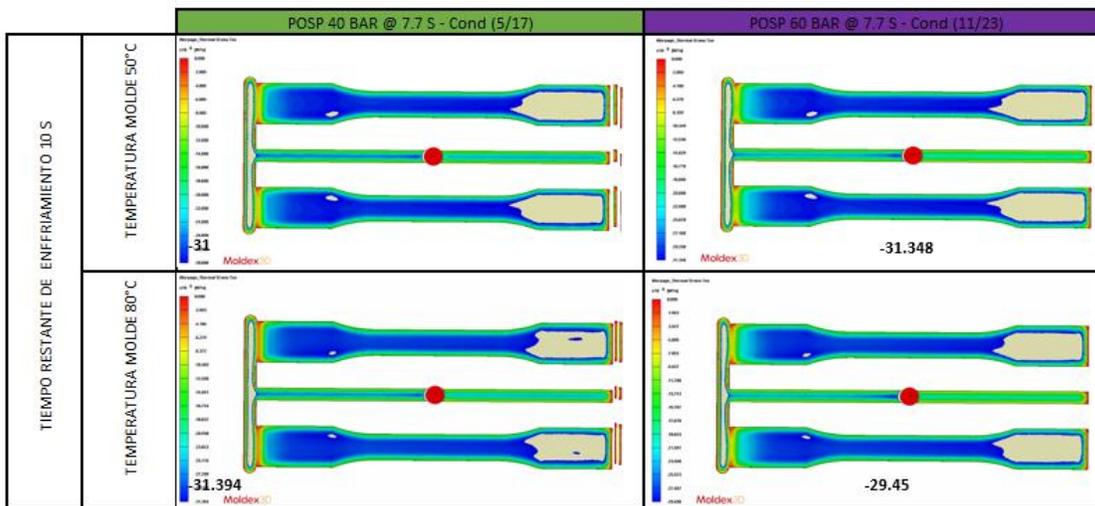
Fuente: autor.

Figura 12. Simulación Moldex 3D T enfriamiento 10 S condiciones 3 y 15; 9 y 21.



Fuente: autor.

Figura 13. Simulación Moldex 3D T enfriamiento 10 S condiciones 5 y 17; 11 y 23.

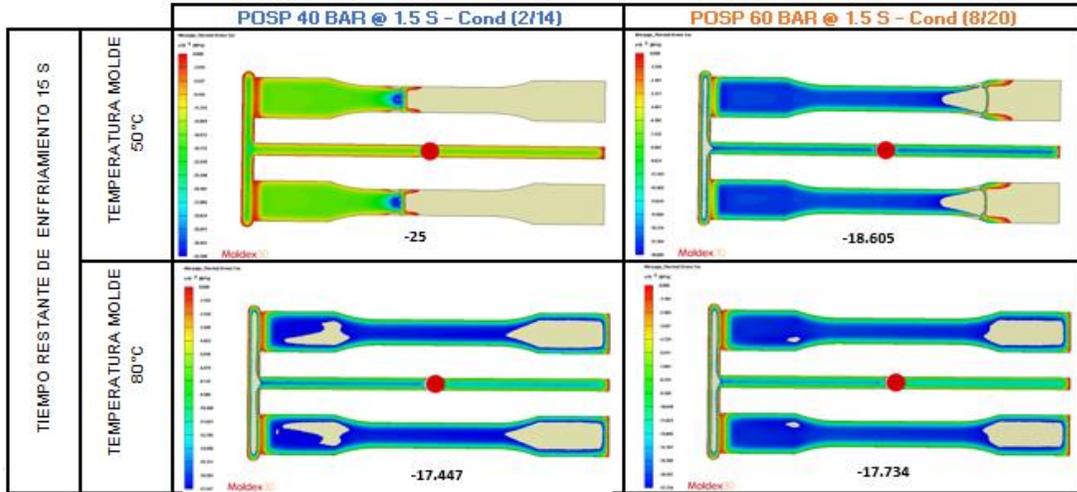


Fuente: autor.

Como se puede apreciar en los resultados de las simulaciones de las diferentes condiciones de proceso con un tiempo de enfriamiento de 10 s, ver figuras 11, 12 y 13, se presenta una mínima variación en los esfuerzos residuales, como efecto del cambio de la temperatura del molde; sin embargo, esta variación no afecta considerablemente las propiedades de las probetas objeto de estudio.

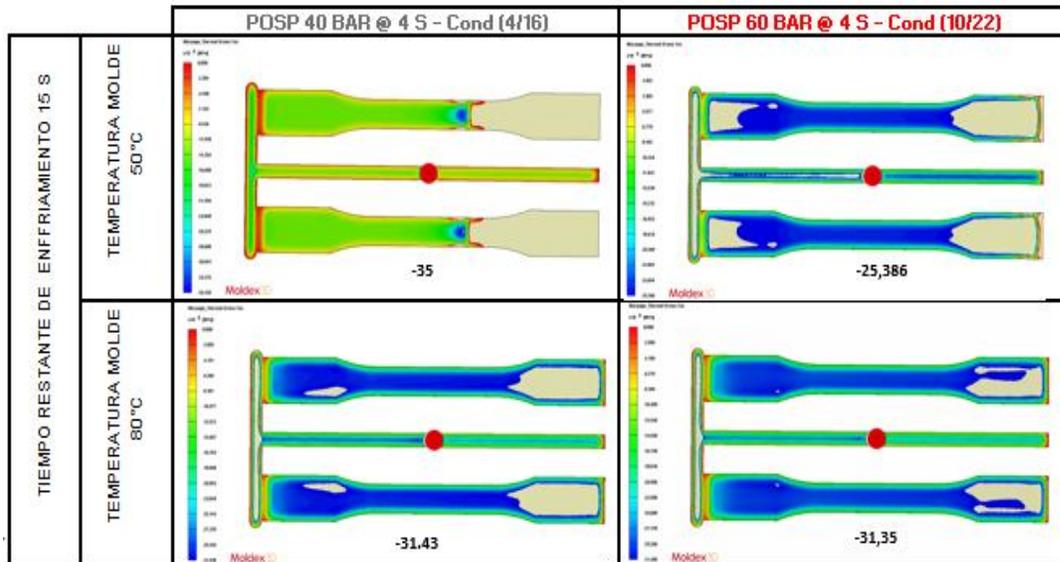
A continuación, se presentan los resultados obtenidos con un tiempo de enfriamiento de 15 s.

Figura 14. Simulación Moldex 3D T enfriamiento 15 S condiciones 2 y 14; 8 y 20.



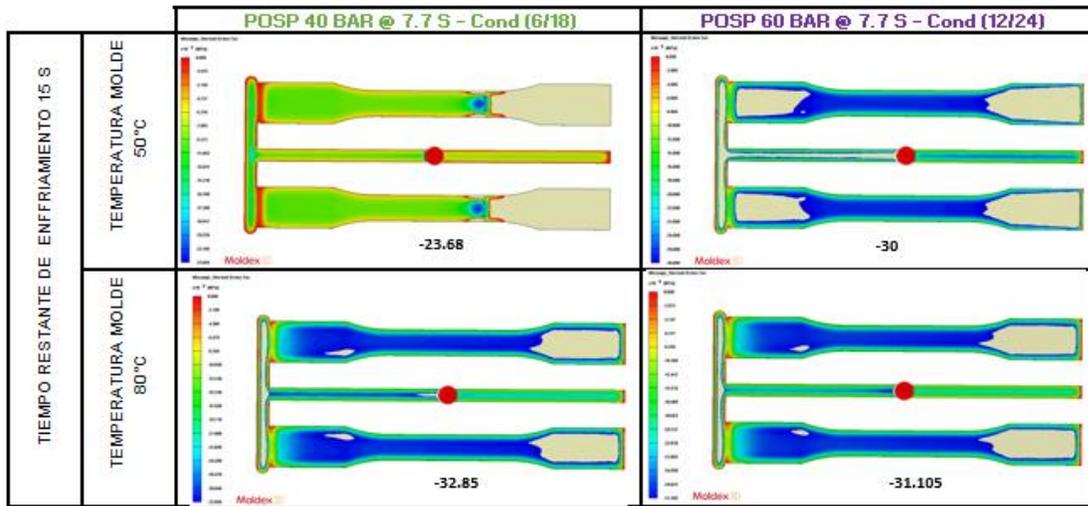
Fuente: autor.

Figura 15. Simulación Moldex 3D T enfriamiento 15 S condiciones 4 y 16; 10 y 22.



Fuente: autor.

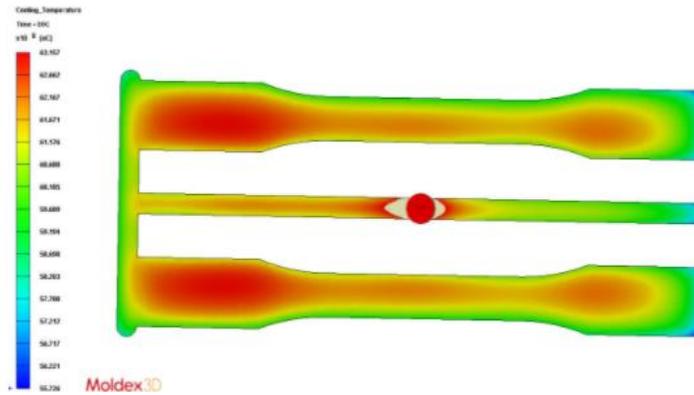
Figura 16. Simulación Moldex 3D T enfriamiento 15 S condiciones 6 y 18; 12 y 24.



Fuente: autor.

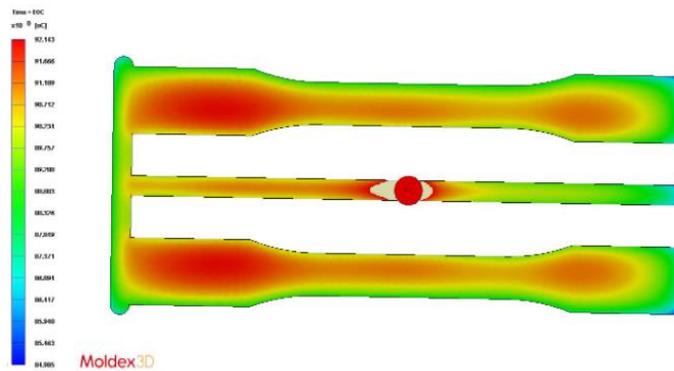
De acuerdo con los resultados obtenidos por medio del software, en las figuras 14, 15 y 16 vemos que la variación de los esfuerzos residuales en estas condiciones de proceso tienen la misma tendencia, de los resultados obtenidos con un tiempo de enfriamiento de 10 s, lo cual nos permite decir que el policarbonato tolera estas condiciones de proceso sin generar esfuerzos internos considerables; esto debido a que la geometría del molde para las probetas de tensión es simple, lo cual permite que las contracciones y deformaciones de la pieza inyectada sean mínimas, esto se comprueba realizando un análisis de la temperatura del molde, lo cual se puede ver en las figuras 17, 18, 19 y 20; donde se identifica que el cambio de temperatura en las caras del molde es muy baja, lo cual asegura un enfriamiento uniforme de la pieza y por tanto se puede afirmar que los esfuerzos residuales no tienen cambios muy significativos, condiciones de proceso empleadas, estas aunque generan un cambio en los esfuerzos residuales, este cambio no es muy significativo, es decir para el software es más representativo el hecho de la uniformidad de la temperatura de pared de molde que los cambios que puedan ocurrir en las otras condiciones de proceso en el incremento de los esfuerzos residuales. Esto puesto que el software solo tiene en cuenta los esfuerzos residuales generados por el efecto térmico, pero no tiene en cuenta el efecto que produce el flujo de material en la inyección de las probetas, que puede afectar las condiciones de proceso diferentes a la distribución de temperatura de molde.

Figura 17. Temperatura de molde a Temp. enfriamiento 50°C condición 1.



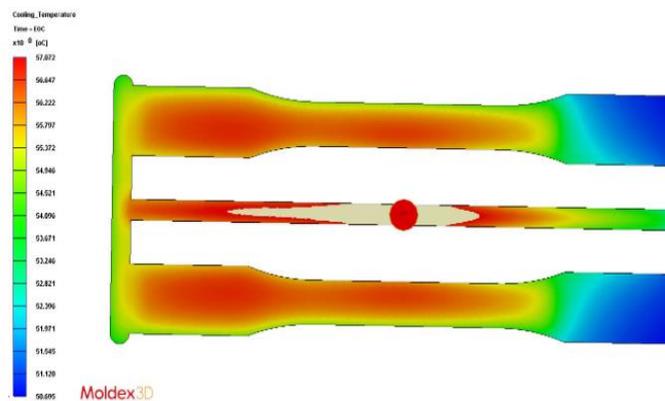
Fuente: autor.

Figura 18. Temperatura de molde a Temp. enfriamiento 80°C condición 2.



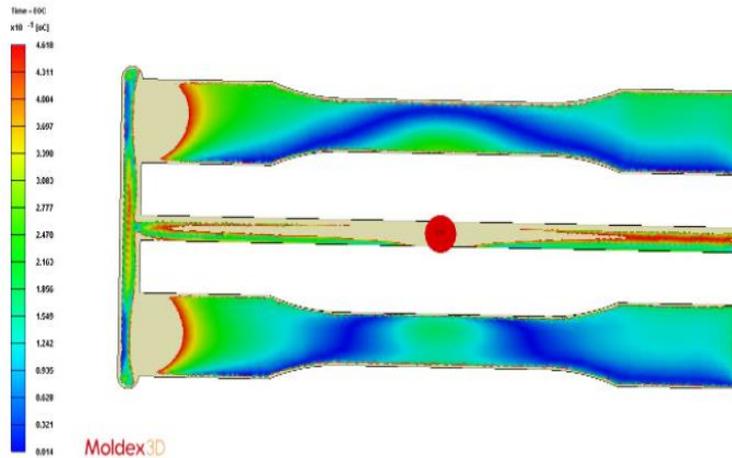
Fuente: autor.

Figura 19. Temperatura de molde a Temp. enfriamiento 50°C condición 16.



Fuente: autor.

Figura 20. Diferencia de temperatura entre el núcleo y la cavidad del molde.



Fuente: autor.

La figura 17 muestra una variación aproximada de 3°C en la temperatura del molde, para las condiciones de proceso con temperatura de molde de 50°C, en la figura 19 se muestra lo mencionado anteriormente respecto al llenado incompleto del molde, comprobando que el software asume el parámetro de temperatura de no flujo, lo cual se traduce en que a ciertas condiciones el molde y el material se encuentran a temperatura de solidificación, es decir baja temperatura que teóricamente no permite flujo de inyección; en la figura 18 se aprecia el mismo fenómeno para la temperatura de molde a 80°C, mostrando un delta de temperatura de molde de 2°C aproximadamente; finalmente se puede decir que la variación en los esfuerzos residuales en las diferentes condiciones de proceso aplicadas, obtenidos por medio de simulación con el software Moldex 3D, no es significativa y que esta es definida por los criterios de variación de temperatura que asume el software, lo cual permite decir que las propiedades mecánicas de las probetas de policarbonato no se ven afectadas en las condiciones de proceso aplicadas en la tabla 1.

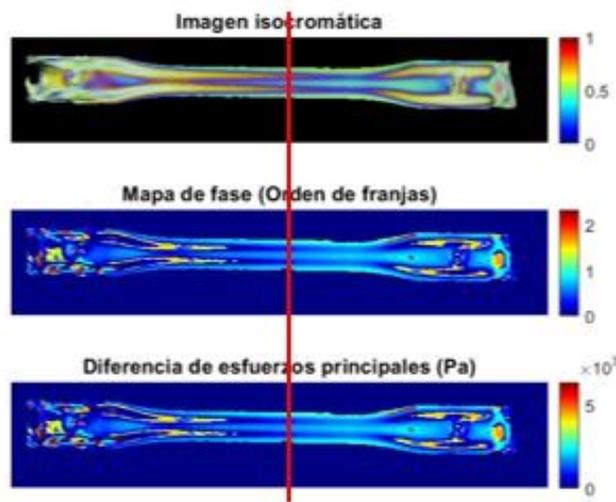
4.2 Obtención de imágenes de fotoelasticidad para el análisis de esfuerzos residuales de la inyección de piezas plásticas.

Aplicando la técnica de fotoelasticidad se procedió a la toma de imágenes de cada una de las condiciones de proceso de las probetas de policarbonato inyectadas, estas imágenes se manejaron con un algoritmo realizado en Matlab, el algoritmo procesa las imágenes para obtener el valor de los esfuerzos y tensiones que se encuentran en las piezas plásticas producto del proceso de inyección, esto con base en las técnicas de adaptación de color

que son útiles para extender el método de fotoelasticidad de doce franjas (TFP); la transferencia de color es una técnica usada en el campo del procesamiento de imágenes para abordar la falta de coincidencia de color entre imágenes. (Ramesh, 2020).

El algoritmo desarrollado en Matlab procesa las imágenes de las probetas permitiendo presentar tres gráficas de la siguiente manera gráfica isocromática, mapa de fases y gráfica de esfuerzos principales ver figura 21, las probetas se posicionaron todas de la misma manera quedando al lado derecho el orificio de llenado del molde, finalmente se analizarán las imágenes de la distribución de esfuerzos producto de la diferencia de esfuerzos principales.

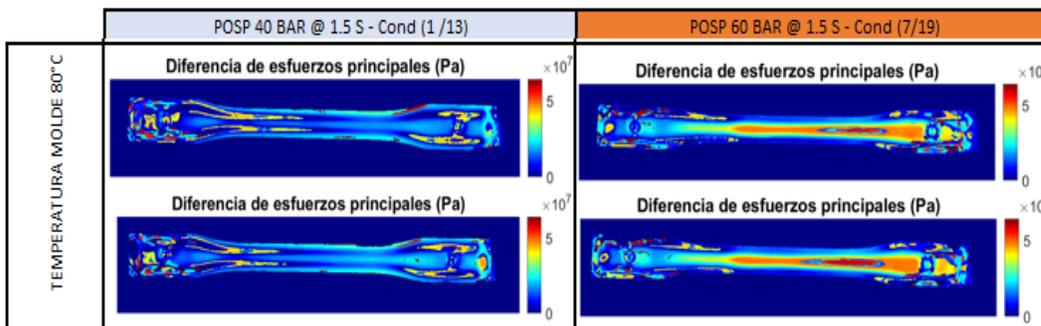
Figura 21. Imágenes fotoelasticidad obtenidas con Matlab.



Fuente: autor.

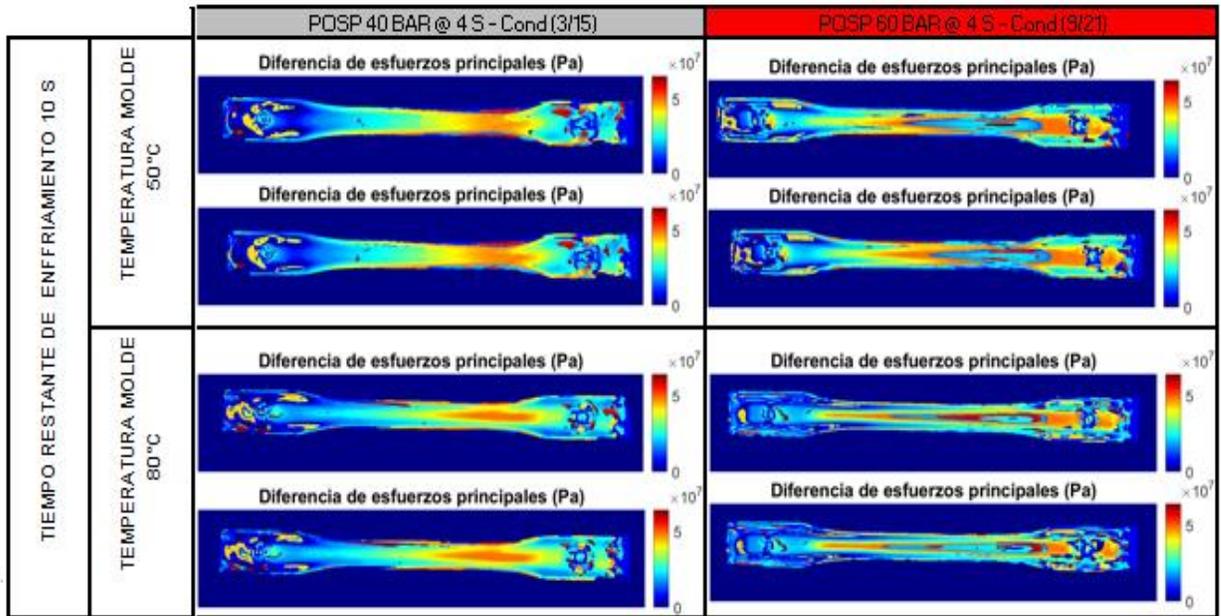
A continuación, se muestran las imágenes con los resultados obtenidos con el algoritmo de Matlab.

Figura 22. Fotoelasticidad tiempo de enfriamiento 10 s condiciones 13 y 19.



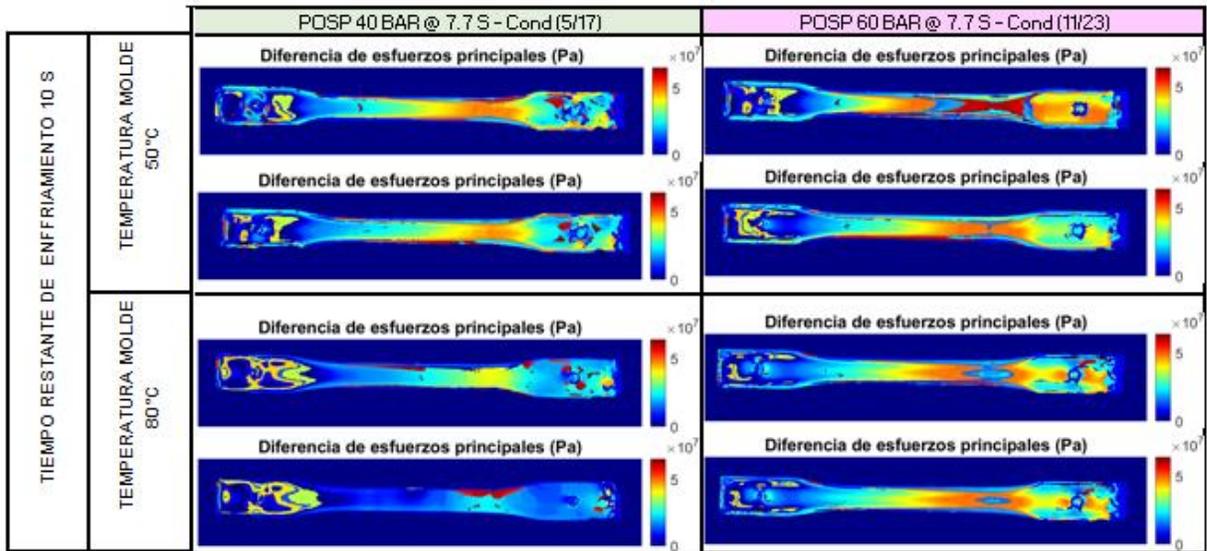
Fuente: autor.

Figura 23. Fotoelasticidad tiempo enfriamiento 10 s condiciones 3 y 15; 9 y 21.



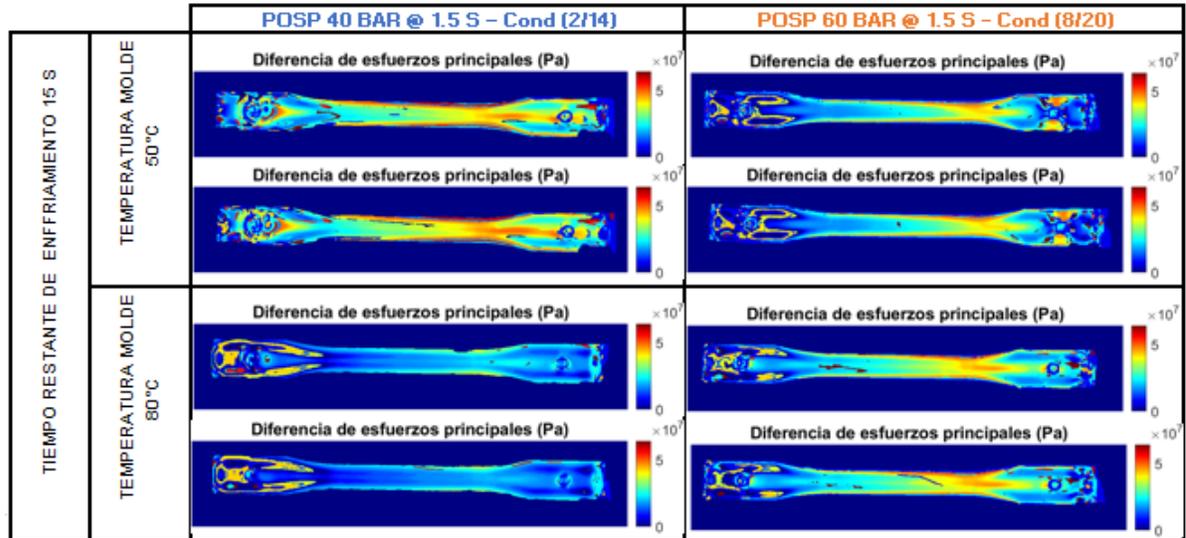
Fuente: autor.

Figura 24. Fotoelasticidad tiempo enfriamiento 10 s condiciones 5 y 17; 11 y 23.



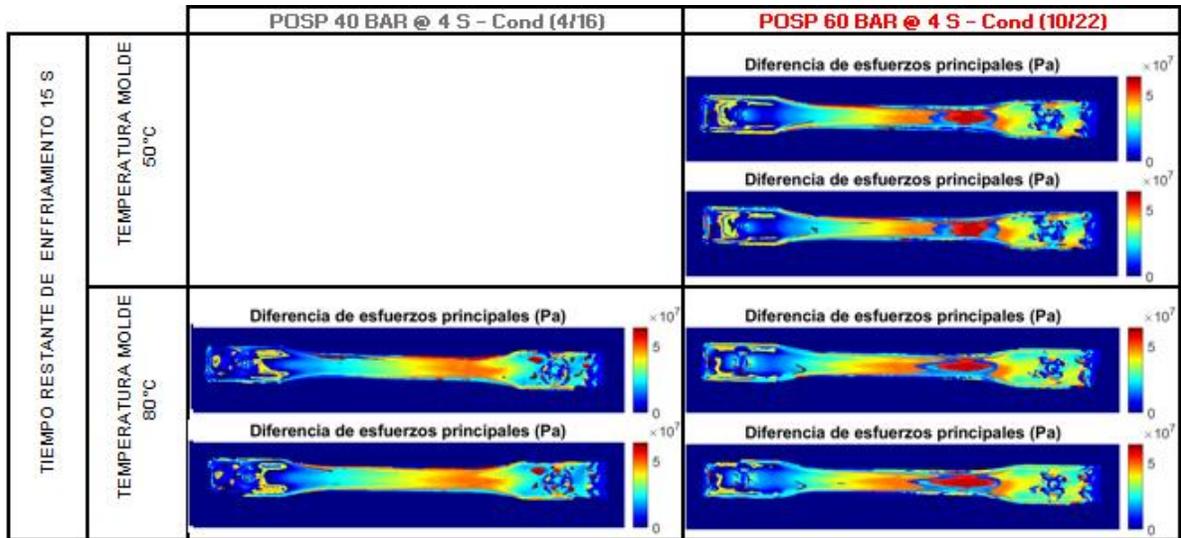
Fuente: autor.

Figura 25. Fotoelasticidad T enfriamiento 15 S condiciones 2 y 14; 8 y 20.



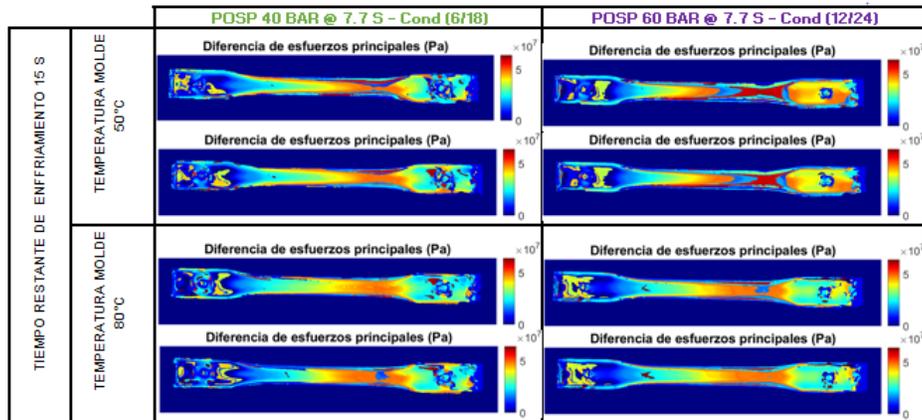
Fuente: autor.

Figura 26. Fotoelasticidad T enfriamiento 15 S condiciones 16; 10 y 22.



Fuente: autor.

Figura 27. Fotoelasticidad tiempo enfriamiento 15 s condiciones 6 y 18; 12 y 24.



Fuente: autor.

Analizando los resultados obtenidos con esta técnica se puede apreciar el efecto del flujo del material y el efecto de la temperatura, observando la figura 26 para la condición 10 y 22; se identifica que en el cuello de la probeta se producen mayores esfuerzos residuales, esto es debido a que en esta parte se genera el efecto de la velocidad del frente de flujo originado porque al inyectar material por post presión el policarbonato ya está solidificándose, puede ser debido a que el material entra en contacto con el molde que se encuentra a una temperatura más baja, como producto de esto al interior del molde se reduce el área de flujo, lo cual aumenta la presión de inyección al interior del molde; sin embargo la variación de los esfuerzos residuales mostrados por la técnica de fotoelasticidad en las diferentes condiciones de proceso se muestran constantes, es decir no hay gran variación en los resultados obtenidos a las diferentes condiciones de proceso; adicional se puede decir que estos resultados son más cercanos a la realidad ya que muestran el efecto tanto del flujo del material como del cambio de temperatura.

4.3 Análisis de los resultados obtenidos mediante simulación y técnica de fotoelasticidad.

Usando el software de simulación MOLDEX 3D, se obtuvo el valor teórico de los esfuerzos en las probetas de policarbonato, los cuales se pueden apreciar en la figura 28; en las imágenes de simulación se observa que los esfuerzos obtenidos son homogéneos; mientras que, analizando las imágenes obtenidas por fotoelasticidad se puede apreciar un patrón de colores que reflejan los esfuerzos residuales y que son muestra del flujo de inyección del

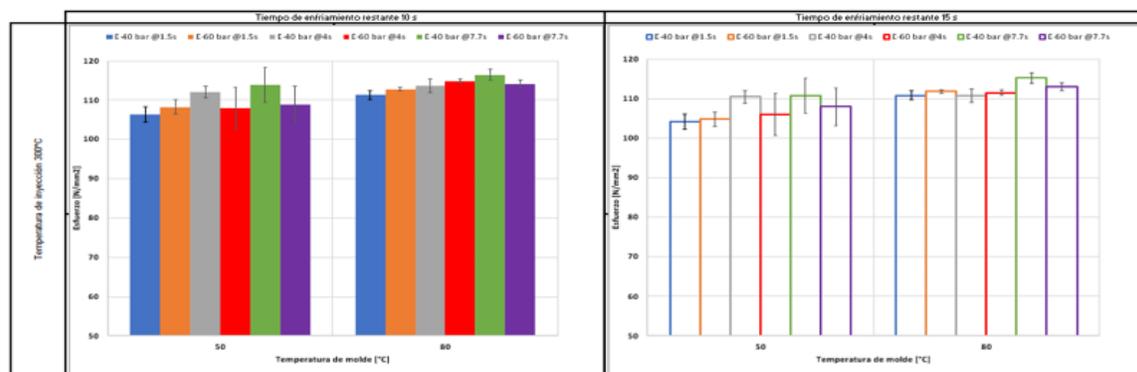
material lo cual es un efecto de la velocidad del frente de flujo en el proceso de inyección, lo cual muestra un resultado más cercano a lo que sucede en la realidad en el proceso de inyección del policarbonato; en la figura 29 se observan los resultados de resistencia mecánica obtenidos aplicando el ensayo de flexión, en la parte (A) se encuentran organizados los resultados obtenidos para las probetas fabricadas con un tiempo de enfriamiento de 10 s y en la parte (B) los resultados para un tiempo de enfriamiento de 15 s; como se puede apreciar ambas figuras muestran una variación constante, donde se puede deducir que la aplicación de post presión en las condiciones definidas tiende a mejorar la resistencia mecánica de las probetas, lo cual es indicador de que la variación de los esfuerzos residuales obtenidos no afecta el desempeño mecánico del policarbonato, en las diferentes condiciones de inyección.

Figura 28. Esfuerzos residuales Máximos obtenidos por simulación.



Fuente: autor.

Figura 29. Resistencia mecánica probetas de policarbonato.



A. Resistencia mecánica probetas con tiempo de enfriamiento de 10 s

B. Resistencia mecánica probetas con tiempo de enfriamiento de 15 s

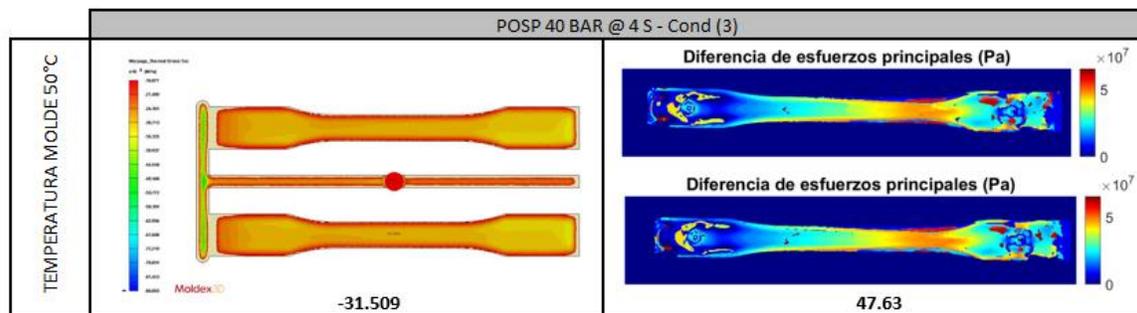
Fuente: autor.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

4.4 Correlación de los resultados obtenidos mediante simulación y técnica de fotoelasticidad.

Comparando los resultados obtenidos por medio del software Moldex 3D y los obtenidos aplicando la técnica de fotoelasticidad, se puede observar que; mientras los resultados del simulador muestran una distribución de esfuerzos de forma homogénea; la técnica de fotoelasticidad permite apreciar un gradiente de contornos de colores que muestra de manera más cercana a la realidad lo que ocurre en el interior de la probeta con los cambios de temperatura producidos en el proceso de inyección, así como los cambios de flujo, que inducen cambios de velocidad del flujo durante el llenado de la cavidad y orientaciones internas de las macromoléculas del polímero inyectado durante el llenado y la fase de sostenimiento.

Figura 30. Resultado Moldex 3D VS Fotoelasticidad, tiempo de enfriamiento 10 s condición 3.



Fuente: autor.

En el proceso de inyección de las probetas objeto del ensayo, se aplicó post presión la cual es una condición de empaque, consistente en aplicar una presión constante una vez finalizado el llenado del molde, esto con la finalidad de evitar la formación de rechupes efecto de la contracción del material debido al enfriamiento del material, adicionando más material; como se puede apreciar en la figura 30; el efecto de la post presión (sostenimiento) no se puede apreciar en los resultados de la simulación, mientras que en los resultados de fotoelasticidad se puede ver un aumento en la intensidad del color en el cuello de la probeta del lado derecho, que corresponde al que está más cerca del orificio de inyección del molde, lo cual muestra el efecto del flujo de inyección del material en el proceso de inyección, ya que en esta zona se genera un aceleramiento del frente de flujo del polímero al interior de la cavidad, lo cual genera una mayor orientación molecular y por

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

lo tanto diferencias de relajación molecular de esta zona con respecto a otras zonas de la pieza, condición que propicia incrementos en los esfuerzos residuales de la pieza.

Otro hecho que evidencia la fotoelasticidad es el flujo interno de polímero al interior del espesor de la pieza, fenómeno que se presenta durante el sostenimiento, que genera orientación molecular, efectos en la relajación molecular y posteriormente en los esfuerzos residuales en esta zona. Lo anterior se puede observar en que a medida que se incrementa la post presión (tiempo y presión) se va incrementando los esfuerzos residuales (zonas más rojas).

También se encuentra que la temperatura de molde menor (50°C) tiende a generar esfuerzos residuales mayores en las muestras analizadas por fotoelasticidad, lo cual justifica el uso de una temperatura a un nivel cercano de la recomendada para el policarbonato (80°C).

Con base en lo anterior se puede decir que los esfuerzos residuales en las diferentes condiciones de proceso no presentan cambios considerables en las diferentes condiciones de proceso aplicadas en la simulación por software MOLDEX 3D.

5 CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Con base en el análisis y la correlación de los resultados obtenidos por simulación y ensayo de fotoelasticidad se puede concluir lo siguiente:

Mediante el software de simulación MOLDEX 3D se pueden obtener valores de esfuerzos residuales, sin embargo, estos no muestran de manera real los efectos del flujo de inyección de las piezas de policarbonato, lo cual si se puede obtener usando técnicas experimentales como la fotoelasticidad, la cual refleja los efectos del flujo y cambios de temperatura al interior de la pieza y que se ven reflejados en los esfuerzos residuales obtenidos.

- El efecto de la diferencia de temperatura en ambas caras del molde lo que se conoce como núcleo y cavidad del molde, no es considerada en el resultado de la simulación, debido a que la temperatura promedio del molde es uniforme, es decir la diferencia entre ambas caras es muy baja, por lo que se puede apreciar un resultado de esfuerzos homogéneos en toda la pieza debido a que las diferencias de los esfuerzos residuales no son significativas entre las diferentes condiciones de proceso, puesto que la simulación esta básicamente calculada por efecto térmico.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Al aplicar post presión en el proceso de inyección se producen mayores esfuerzos residuales al interior de la pieza, por lo que las bandas de colores se intensifican, como se puede observar en los resultados de los ensayos de fotoelasticidad; sin embargo, este efecto no afecta las propiedades mecánicas de manera considerable, al contrario, la adición de material al final del proceso de inyección mejora el comportamiento mecánico de la probeta.
- Los ensayos de fotoelasticidad son ensayos no destructivos que no requieren montajes complejos y que pueden implementarse para pruebas de calidad de piezas inyectadas para obtener resultados que muestran el comportamiento interno de los esfuerzos residuales.

REFERENCIAS

ASTM. (2018). *Standard test method for tensile properties of plastic*. United States: ASTM International.

Camuña Rodríguez, J. F. (2015). *Acondicionado de materiales termoplásticos para su transformación: Operaciones de transformación de polímeros termoplásticos*. Malaga: IC Editorial.

Cárdenas, A. J. (2007). *Determinación de esfuerzos residuales generados por la soldadura GMAW en placas de acero 1018*. Laredo, Mexico: Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa.

Catalán, R. J. (2016). *Análisis numérico y experimental de elementos mecánicos mediante la tecnica de fotoelasticidad*. España: Universidad de Jaén.

Dally, J. W. (2005). *Experimental Stress Analysis*. USA: McGraw-Hill.

Dorbecker, O. A. (2013). *Estudio del efecto de esfuerzos residuales en el fenomeno de recuperación elastica por metodo holdrilling*. Mexico: Universidad Autonoma de Nuevo León.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

ELAPLAS Elastómeros Plásticos. (2020). *ELAPLAS*. Obtenido de <http://www.elaplas.es/wp-content/uploads/policarbonato.pdf>

Gómez, C. L., & Díaz, J. P. (2020). *Diagnóstico de requisitos y brechas de calidad y sostenibilidad sector plástico*. Bogota, Colombia: GQSP Colombia.

Google Sites. (2011). *Los Plásticos*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/losplasticosonlineies/3-clasificacion-de-los-plasticos>.

Hermida, E. (2011). *Polímeros Guía Didáctica*. Argentina: Ministerio de Educación.

León, J. C., Martínez, A. R., & Giraldo, F. L. (2013). Estudios de Fotoelasticidad: Desarrollo y aplicaciones. *Revista Politécnica*, 27-36.

León, J. C., Pérez, J. C., & Motta, G. C. (2017). Validación del uso de Fotoelasticidad como herramienta para los cursos de Mecánica de Sólidos. *Revista EIA "Escuela de Ingeniería de Antioquia"*, 117-131.

López Alba, E. &. (2013). *Aplicaciones Industriales de Técnicas Ópticas de Campo*. España.

López Romero, J. M. (2015). *Transformación de materiales termoplásticos*. Malaga, España: IC Editorial.

Martínez, J. M. (2017). *Esfuerzos Principales y Eigenvalores*. Mexico: Universidad de Guanajuato.

Morales, A. G., & López, U. F. (2014). *Residual stresses in injection molded products*. Mexico: J Mater Sci.

Nepta, J. P. (octubre de 2019). *Portal Electromecánico*. Obtenido de <http://www.portalelectromecanico.org/CURSOS/injectoras/index.html>

Ojeda, M. (2011). *tecnología de los plásticos*. Obtenido de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/policarbonato.html>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Ramesh, K. &. (2020). Applicability of colour transfer techniques in Twelve fringe photoelasticity (TFP). *Optics and Lasers in Engineering*, 127.

Requena, J. C. (2016). *Análisis numérico y experimental de elementos mecánicos mediante la técnica de fotoelasticidad*. Linares, España: Universidad de Jaén.

Reynoso, S. L. (2018). *Los polimeros plásticos*. Mexico : Independiente.

Ruud, C. (2002). *Measurement of Residual Stress*. USA: Pennsylvania State University.

Sarmiento, M. A. (2011). *Estudio de tensiones residuales mediante fotoelasticidad en piezas de poliestireno cristal moldeadas por inyección*. Cartagena, Colombia: Universidad de Cartagena.

Seymour, R. B. (1995). *Introducción a la química de los polímeros (3a. ed.)*. Barcelona, España: Editorial Reverté.

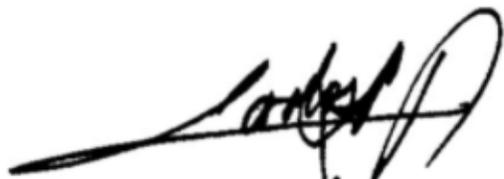
UNAL. (2014). *Repositorio UNAL*. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57121/circulodemohr.pdf?sequence=5&isAllowed>.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Se realizan las correcciones recomendadas por el comité.

FIRMA ESTUDIANTES 

Se validan correcciones de formato recomendadas por el comité.

FIRMA ASESORES 

FECHA ENTREGA: 16/11/2021