

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

**EFFECTO DEL PROCESO DE INYECCIÓN EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE
POLÍMEROS AMORFOS**

INTEGRANTES:

**MARY LUZ BARRIENTOS RIVERA
NELSON DARÍO ZULETA SAN MARTIN**

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

DOCENTE:

CARLOS ANDRÉS VARGAS ISAZA

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

ITM

2016

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

RESUMEN

Los esfuerzos residuales inducidos en el procesamiento por inyección de piezas termoplásticas pueden afectar significativamente el comportamiento mecánico de un componente, al generar alabeos o iniciar grietas y de laminación de partes compuestas (**Osswald, 2010**). Adicional a las propiedades mecánicas, otro efecto importante de los esfuerzos residuales son el deterioro de las propiedades ópticas del material, ya que los esfuerzos residuales cambian el índice de refracción del material, generando una distorsión óptica, afectando la apariencia de productos como las botellas y ventanas, así como el desempeño de piezas como lentes plásticos y discos compactos. Es por este motivo que la predicción precisa de esfuerzos residuales es importante tenerla en cuenta en el diseño de piezas termoplásticas inyectadas.

Algunas aplicaciones de especial importancia en los efectos de los esfuerzos residuales en el material, contemplan por ejemplo las uniones estructurales entre materiales termoplásticos y metales, ya que un nivel alto de esfuerzos residuales son generados en la interface polímero-metal, influyendo en su resistencia y durabilidad (Erdmann & Holzleitner, 2007; Ramani & Zhao, 1998). Los agrietamientos que generan las tensiones residuales, son propagados al exponerse a ambientes o ciertas sustancias químicas, falla conocida como “environment stress cracking, (ESC)”, muchos tipos de productos plásticos fallan por este tipo de agrietamiento, algunos estudios se han realizado para medir el efecto de materiales como el policarbonato y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) con el ESC en combinación con la aplicación de pequeñas cargas fluctuantes, y la forma de minimizar la falla al someter la pieza a tratamientos térmicos (a . Maxwell & Turnbull, 2004). Los dispositivos electrónicos flexibles son recubiertos con plásticos para elaborar sustratos conductivos flexibles, ya que las películas plásticas presentan un estado de esfuerzos residuales es

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

conveniente medir estos esfuerzos mediante técnicas de fotoelasticidad para minimizarlos (Lee, Liu, Wu, & Lin, 2012).

En el diseño de piezas termoplásticas en muchos casos el desempeño mecánico de estas piezas es importante predecirlo para diferentes aplicaciones. Existen en el mercado diferentes paquetes de software que permiten evaluar el nivel de esfuerzos que se generan en una pieza termoplástica al ser sometida a una carga o fuerza externa de diferentes tipos (cargas estáticas, de impacto, fatiga, pandeo, entre otros) (Ansys, 2011; “NX - Simulation - Structural Analysis - large,” 2013; Systemes, 2013), teniendo en cuenta las características de la estructura molecular del polímero y sus propiedades macroscópicas (Meijer & Govaert, 2005). De igual forma para el proceso de inyección de piezas termoplásticas se encuentran disponibles herramientas computacionales que permite predecir y optimizar el proceso de inyección (Moldex3D, 2014; Moldflow, 2014; SigmaSoft, 2014; Simcom, 2014). En el diseño de una pieza termoplástica inyectada es importante conocer el estado de esfuerzos residuales generados en la pieza, durante el proceso de flujo y de enfriamiento del ciclo de inyección. Esto es posible cuantificarlo con las herramientas de cómputo de inyección citadas, con base en las condiciones del proceso de inyección (Altan & Yurci, 2010; Ozcelik et al., 2010; Sánchez, Aisa, Martinez, & Mercado, 2012; Tsai, Hsieh, & Lo, 2009), para diferentes geometrías específicas (Kansal, Rao, & Atreya, 2001; Wang & Young, 2005), diferentes configuraciones de molde y materiales (Hassan, Regnier, Pujos, & Defaye, 2009; Tutar & Karakus, 2010; Xie, Guo, Jiao, Ding, & Yang, 2014), y diferentes polímeros a inyectar (Azaman, Sapuan, Sulaiman, Zainudin, & Khalina, 2014; Ozcelik & Sonat, 2009) .

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

Mediante el desarrollo del presente proyecto se determinará el efecto de las tensiones internas generadas en el proceso de inyección, de un molde del laboratorio de polímeros destinado a inyectar probetas estandarizadas para ensayos de tensión ASTM 638. De esta forma, se verificará cual es el efecto de las condiciones de proceso de inyección en la resistencia mecánica final de la probeta inyectada y sometida a pruebas de tensión en la máquina universal de ensayos. Esto permitirá determinar si el efecto de la inyección de las probetas estandarizadas afecta el ensayo de tensión ASTM 638.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

RECONOCIMIENTOS

Agradecimientos especiales para nuestro asesor de proyecto de grado Carlos Andrés Vargas Isaza que nos orientó sobre el proceso de inyección y el manejo del programa de simulación MOLDEX 3D, durante el desarrollo de nuestro trabajo, Al Instituto Tecnológico Metropolitano por permitirnos el uso de sus instalaciones en especial la biblioteca que nos permitió obtener material de consulta el laboratorio de polímeros donde se desarrolló la habilidad del manejo del software MOLDEX 3D.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

ACRÓNIMOS

- PET Polietileno Tereftalato
- PEBD Polietileno de baja densidad
- PP Polipropileno
- PVC Policloruro de vinilo
- ESC Environment stress cracking
- ABS Acrilonitrilo butadieno estírenos
- CAE ingeniería asistida por computador.
- CAD Diseño asistido por computador.
- (C) Carbono
- (H) Hidrogeno
- (O) Oxígeno
- (S) Silicio
- (N) Nitrógeno
- (F) Flúor
- (P) Fósforo
- (A) Azufre
- (C) Cloro

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

TABLA DE CONTENIDO

- RESUMEN**¡Error! Marcador no definido.**
- RECONOCIMIENTOS
- ACRÓNIMOS.....
- 1. INTRODUCCIÓN.....9
- 1.1 OBJETIVOS.....10
- 2. MARCO TEÓRICO.....-11
- 2.1 Proceso de inyección13
- 2.2 Importancia de los parámetros en el proceso de inyección14
- 2.3 Esfuerzos residuales debido al proceso de inyección.....16
- 2.4 Importancia de las mediciones de las tensiones residuales.....17
- 2.5 Como afecta los esfuerzos residuales internas en las piezas plásticas
inyectadas.....19
- 2.6 Material polimericos.....22
- 2.6.1 Amorfo.....24
- 2.7 Policarbonato.....25
- 2.8. Ensayos mecanicos en piezas polimericas28
- 2.8.1 Esfuerzos de flexión.....31
- 2.8.2 Ecuacion de tensión y deformacion.....32
- 2.9 Normas de tensión ASTM D638.....39
- 2.10 Norm as de flexión ASTM 790.....40

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

- 3 METODOLOGÍA.....41
- 3.1 Simulación de inyección.....41
- 3.2 Inyección de probeta.....45
- 3.3 Esfuerzos von mises resultados de simulaciones
Computarizadas.....46
- 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....49
- 4.1 Pruebas de tensión.....49
- 4.2 Pruebas de flexión.....54
- 5 CONCLUSIONES,RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....60
- 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....63

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

1. INTRODUCCIÓN

PROCESO DE INYECCIÓN

El proceso de moldeo por inyección de termoplásticos consta de fundir un material para inyectarlo dentro de un molde a través de un pequeño orificio llamado punto de inyección. Este molde debe estar frío y cerrado a presión. Una vez que ha sido inyectado el material se enfría dentro del molde, se solidifica y se obtiene una pieza moldeada, esta tiene un diseño que ha sido influenciado por la demanda de productos con diferentes características. Además, su diseño se ha modificado de manera que las piezas moldeadas tengan un menor costo de producción, lo cual exige mayor rapidez de producción de piezas y con mayor precisión.

Justificación – Problema

Teniendo en cuenta los esfuerzos residuales inducidos en el procesamiento por inyección de piezas termoplásticas, estas pueden afectar significativamente el comportamiento mecánico de un componente, al generar alabeos o iniciar grietas y de laminación de partes compuestas. Adicional a las propiedades mecánicas, otro efecto importante de los esfuerzos residuales son el deterioro de las propiedades ópticas del material, ya que los esfuerzos residuales cambian el índice de refracción del material, generando una distorsión óptica, afectando la apariencia de productos como las botellas y ventanas, así como el desempeño de piezas como lentes plásticos y discos compactos. Es por este motivo que la predicción precisa de esfuerzos residuales es importante tenerla en cuenta en el diseño de piezas termoplásticas inyectadas.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

1.1 OBJETIVOS

General

Evaluar el efecto de las tensiones internas generadas en el proceso de inyección en las propiedades mecánicas finales de piezas inyectadas en polímeros amorfos.

Específicos

- Calcular las tensiones residuales generadas en piezas estandarizadas de tensión ASTM638 bajo diferentes condiciones de procesamiento de inyección.
- Producir mediante el proceso de inyección piezas estandarizadas de tensión ASTM 638 bajo diferentes condiciones de procesamiento de inyección.
- Caracterizar las propiedades mecánicas de piezas estandarizadas de tensión ASTM 638 inyectadas mediante el proceso de inyección.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

2. MARCO TEÓRICO

Maquina inyectora

Una máquina inyectora es un equipo capaz de plastificar el material polimérico y bombearlo hacia un molde en donde llena una cavidad y adquiere la forma del producto deseado.

El propósito de la maquina inyectora de plástico es ser capaz de suministrar la materia prima requerida por el usuario al molde, el cual debe de tener un sistema de enfriamiento apropiado para que el producto se encuentre en buen estado y no pierda sus propiedades y especificaciones indicadas. Los sistemas que componen a la maquina son: sistema hidráulico, térmico, mecánico, de enfriamiento y de control. Cuando se aplica calor a un material termoplástico para fundirlo se dice que se plastifica. El material ya fundido o plastificado por calor se hace fluir mediante presión y llena un molde donde el material se solidifica y toma la forma del molde. Este proceso se le nombra moldeo por inyección.(Brandau & Container, 2012).

En la imagen 1 se muestra una maquina inyectora convencional que se encuentra ubicada en el laboratorio de polímero del ITM, en la cual se puede ejecutar el proceso explicado anteriormente.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13



Imagen 1. Maquina inyectora laboratorio de polímeros ITM. Fuente: Autores.

Una maquina inyectora contiene las partes necesarias para poder ejecutar este proceso de inyección. En la imagen 2 se puede observar a grandes rasgos las partes de una inyectora convencional, como la tolva de alimentación, tornillo, boquilla, molde, motor hidráulico, sistema de cierre, válvula y cámara de inyección.

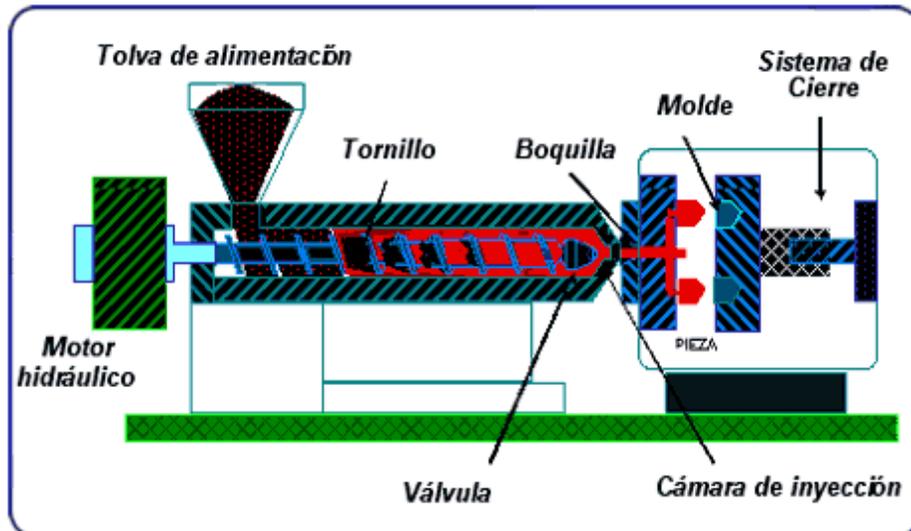


Imagen 2. Partes de una inyectora convencional. Fuente: www.polinter.com

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

2.1 Proceso de inyección

El proceso de inyección principalmente depende de un material plástico fundido que pasa a través de unas boquillas hacia las cavidades de cierto tipo de molde, para producir el artículo o pieza, generalmente son piezas plásticas diversas en tamaño, forma y espesor, esto depende de las necesidades para las que se requiera el artículo.

En la actualidad, la mayoría de las maquinas inyectoras utilizan el principio del tornillo de Arquímedes para plastificar y bombear el material. Por medio de un tornillo de inyección, el barril y las resistencias, el material es fundido por la fricción entre el husillo y el barril, y la temperatura que ofrecen las resistencias.

La inyección es un proceso que está conformado por un conjunto de etapas que se denomina ciclo de inyección, como se muestra en la imagen 3.

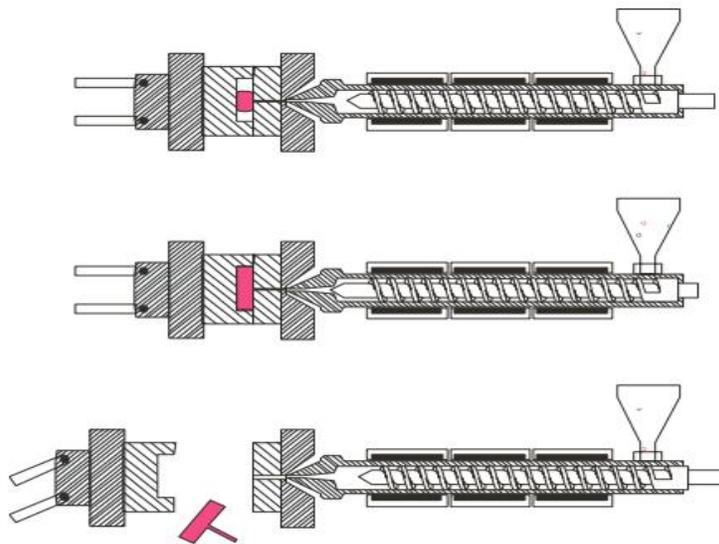


Imagen 3. Secuencia de movimientos de una máquina de inyección. Fuente:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

La inyección consta de las siguientes etapas:

- Cierre de molde
- El tornillo inyecta el material
- Al terminar de inyectar el material, se mantiene el tornillo adelante aplicando una presión de sostenimiento antes de que se solidifique.
- El tornillo gira haciendo circular los gránulos de plástico desde la tolva y plastificándolos. El material fundido es suministrado hacia la parte delantera del tornillo, donde se desarrolla una presión contra la boquilla cerrada, obligando al tornillo a retroceder hasta que se acumula el material requerido para la inyección.
- El material fundido es inyectado tomando la forma de la pieza, este material es enfriado mediante un refrigerante disipando así el calor de la pieza y de este modo se solidifique, la parte móvil del molde se abre y la pieza es extraída.
- El molde cierra y se reinicia el ciclo.

2.2 Importancia de los parámetros en el proceso de inyección

Teniendo en cuenta que cada uno de los parámetros del moldeo por inyección puede modificar de forma drástica la pieza inyectada, es importante tener en cuenta y controlados cada uno de ellos, ya que el mal manejo puede causar la deformación y hasta la fractura de la pieza.

En la tabla 1, se puede observar algunos parámetros de inyección.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

Tabla 1. Datos de inyectora H69 de Industrias Estra

Parámetro	valor
Tiempo de inyección (s)	3,2
Temperatura de inyección (°c)	230
Temperatura de molde (°c)	40
Temperatura de refrigerante (°c)	43,5
Tiempo de apertura molde (s)	5
Tiempo de ciclo de la maquina (s)	42
Temperatura ambiente (°c)	26
Fuerza de cierre (kgf)	7,10s
Flujo de agua de refrigerante (l/min)	4,17
Tiempo de enfriamiento (s)	30

Los parámetros son muy importantes en el proceso de inyección, ya que con estos se gradúan los esfuerzos residuales del producto que se ha inyectado. Si aumentan o disminuyen las temperaturas y presiones del proceso, todo esto hace que los esfuerzos residuales cambien en el producto, en su forma y formación molecular.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

También influye mucho el material con el cual se va a inyectar, hay varios tipos de polímeros: PP, PET, PVC, Poliamidas, Poliésteres, Resinas epoxi, Resinas fenol-formaldehido, caucho, polibutadeino, poliisopreno.

2.3 Esfuerzos residuales debido al proceso de inyección

Los esfuerzos residuales se pueden definir como los esfuerzos que permanecen al interior del material en ausencia de fuerzas externas o gradientes de temperatura (Callister, 2007). En el caso de polímeros termoplásticos inyectados, los esfuerzos residuales se generan por efectos de flujo y efectos térmicos. Los esfuerzos residuales inducidos por el flujo se generan debido al alto nivel de orientación en la dirección de flujo de las macromoléculas del polímero, cuando se realiza la fase de llenado de un molde. El alto nivel de orientación no es el estado natural de las macromoléculas, las cuales tienden a relajarse y volver a su estado de equilibrio (sin orientación definida). Si ocurre un enfriamiento rápido, las macromoléculas no alcanzan un estado de relajación y se congela o mantiene el alto grado de orientación, esta condición produce un nivel de esfuerzos residuales en el material, que se requiere para transformar el alto grado de orientación de las macromoléculas en el estado de relajación molecular natural del material. Esto produce contracciones y propiedades mecánicas no uniformes en la dirección paralela y perpendicular a la dirección de flujo de la pieza inyectada.

Los esfuerzos residuales son incrementados por el efecto térmico del enfriamiento de la pieza termoplástica inyectada. A medida que el material es enfriado en el molde este se contrae y el polímero está sometido a diferentes velocidades de enfriamiento, altas cerca a la pared fría del molde y bajas en el centro de la pieza aún caliente. En primera instancia las capas cercanas a las

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

paredes del molde se contraen y el centro de la pieza permanece libre de contracción, posteriormente cuando el centro de la pieza comienza a enfriarse esta zona comienza a contraerse, pero las capas externas restringen su contracción, ya que se encuentran solidificada y rígidas. Esto genera otro tipo de esfuerzo residual inducido por el enfriamiento del producto inyectado en el molde.

Los esfuerzos residuales inducidos por el flujo son a menudo muy pequeños comparados con los generados por el efecto térmico del enfriamiento. Sin embargo, si las temperaturas de inyección son bajas, los esfuerzos residuales inducidos por el flujo pueden ser significativos produciendo piezas con esfuerzos residuales de tensión en la superficie altos (Osswald, 2010).

2.4 Importancia de las mediciones de las tensiones residuales

Las mediciones de las tensiones son importantes, pero en este caso con polímero son más, ya que por medio de estas mediciones podemos detectar datos útiles y tomar decisiones fundamentales sobre las modalidades de la elaboración de los materiales. Durante todas aquellas fases que pueden modificar la estructura, forma y dimensiones de los componentes con el propósito de eliminar posibles roturas del material.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

Todas las fuerzas que actúan sobre los materiales, incluso en ausencia de cargas externas, se llaman esfuerzos residuales. De esta forma, los esfuerzos residuales pueden estar presentes en el componente o material sin que esto sea evidente visualmente. Por este motivo, los esfuerzos residuales influyen el comportamiento de los componentes mecánicos y pueden comprometer su estabilidad estructural, dimensional y su capacidad de resistencia a la fractura y la fatiga, de hecho, un estado de esfuerzo residual de tracción facilita la propagación de una eventual grieta y, por tanto, reduce la vida de un componente mecánico. Las tensiones residuales internas limitan, en consecuencia, la capacidad de carga y la seguridad de los componentes mecánicos y pueden ser contrarrestadas solo si existe un control que nos permita la medición de las tensiones residuales de forma cuantitativa y cualitativa. El objetivo es determinar las tensiones residuales de los componentes a través de una instrumentación y una medición altamente exacta.

Las tensiones residuales pueden ser causadas por los siguientes factores principales:

- Calentamiento no uniforme o la refrigeración de un componente durante la fabricación de una pieza (por ejemplo, fundición, soldadura, piezas de fundición, tratamiento térmico).
- Procesos de mecanizado para retirar virutas o deformación plástica (por ejemplo, torneado y forja).
- Tratamientos de calor de superficie (por ejemplo, templado, soldadura o molienda) chorro de arena o granallado.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

2.5 Como afecta los esfuerzos residuales internas en las piezas plásticas inyectadas

En las piezas inyectadas plásticas los esfuerzos residuales juegan un papel muy importante, dependiendo del tipo de material y las especificaciones necesarias para poder trabajarlo como presión, temperatura, tiempo de refrigeración varían los esfuerzos residuales de cada material.

Algunos materiales son más propensos a que se generen más esfuerzos debido a su estructura molecular.

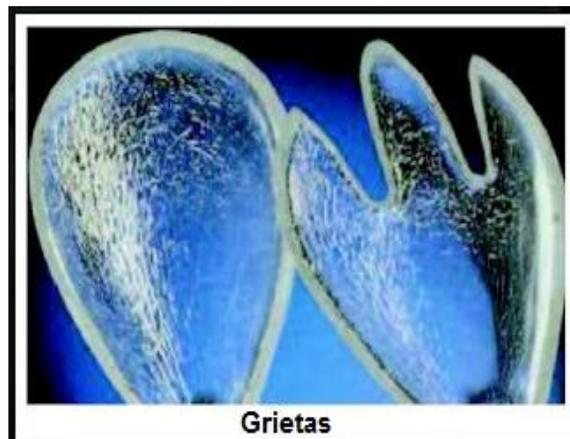
El blanqueo y las roturas por tensión, aparecen a menudo, cuando se utiliza sustancias agresivas, sobre todo después de ser utilizadas por un determinado tiempo, uno ejemplo de este defecto en artículos lo podemos observar en las imágenes 4 y 5.

La coloración blanca por tensión está causada por los esfuerzos internos como por cargas externas (elongación). Las áreas expuestas a la tensión se vuelven de color blanco y las roturas por tensión suelen tener la dirección del desmolde. Muchas veces, las roturas por tensión aparecen varios días o semanas después de la inyección. El color blanco y las roturas que se producen a causa de la tensión tienen lugar cuando se sobrepasa la deformación máxima tolerada (tensión exterior o por deformación). La deformación máxima depende del tipo de material que se utilice, de la estructura molecular, del proceso y del ambiente al que se encuentre expuesto.



Tensiones superficiales en las bisagras

Imagen 4. Tensiones superficiales en artículos inyectados. Fuente: 3.bp.blogspot.com



Grietas

Imagen 5. Grietas generadas por las tensiones internas en piezas inyectadas. Fuente:

3.bp.blogspot.com

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

Los materiales amorfos son el grupo de materiales que debido a su dureza son demasiado frágiles y quebradizos, estos materiales al ser isótropos, es decir, por demostrar propiedades que no dependen en ningún caso de la dirección que se considere al analizarlas; carecen de un patrón. Entre los ejemplos de estos sólidos amorfos se destacan los plásticos, los vidrios, los jabones, las parafinas y muchos compuestos orgánicos e inorgánicos. Entre los más comunes o más fáciles de reconocer son los inorgánicos, los cuales al combustionar emanan gases tóxicos, aquí encontramos una gran variedad de polímeros uno de ellos es el politereftalato de etileno (PET).

En estos materiales amorfos, las cadenas están más separadas que en la estructura laminar. Ello se refleja en una disminución de la densidad.

Según sus propiedades, se distinguen varios tipos de polímeros:

- Polímeros termoplásticos: fluyen (pasan al estado líquido) al calentarlos y se vuelven a endurecer al enfriarlos. Su estructura molecular presenta pocos (o ningún) entrecruzamiento.
- Polímeros termoestables: no fluyen, y lo único que se consigue al calentarlos es que se descompongan químicamente. Este comportamiento se debe a una estructura con muchos entrecruzamientos, que impiden los desplazamientos relativos de las moléculas.
- Elastómeros: muestran un comportamiento elástico. Suelen ser termoestables, pero también termoplásticos debido a que el enlace covalente proporciona la capacidad de que los monómeros vuelvan a la posición original una vez se deja de aplicar la fuerza.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

- Polímeros expandidos (espumas): Se caracterizan por ser porosos y tener baja densidad. Se obtienen por dispersión de un gas en un polímero antes de que se endurezca, bien sea termoestable o termoplástico.

Entre los amorfos podemos destacar el vidrio, el cual es un sólido amorfo con la estructura de un líquido. Técnicamente, un vidrio es un producto inorgánico de la fusión que se ha enfriado a una velocidad demasiado elevada para permitir la formación de cristales.

2.6 Materiales poliméricos

En la enciclopedia en línea Wikipedia (www.wikipedia.org) afirma lo siguiente “los polímeros son compuestos químicos que consisten de cadenas muy largas compuestas de unidades de repetición pequeñas, los monómeros. Las cadenas poliméricas son diferentes de otras cadenas moleculares que se encuentra en química orgánica porque son muchos más largas que, por ejemplo, las cadenas de los alcoholes o ácidos orgánicos. La reacción que ocurre cuando los monómeros se convierten en un polímero es conocida como polimerización. Los polímeros como materiales de ingeniería son conocidos en el lenguaje cotidiano como plástico.

Por plásticos, se refiere que el material de ingeniería está basado en polímeros, generalmente con diferentes aditivos, como colores o plastificantes, que dan al material las propiedades deseadas. Los materiales poliméricos están divididos en caucho (elastómeros), termo fijo y termoplástico.

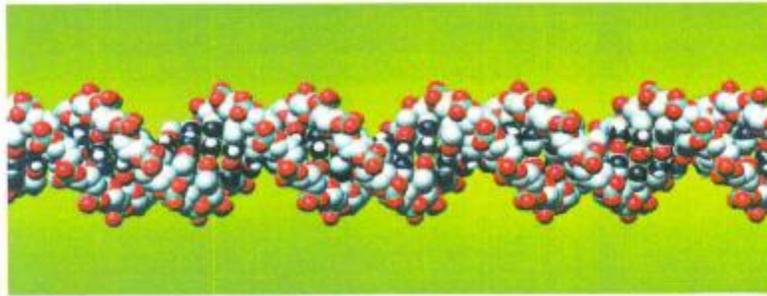


Imagen 6. (Macromoléculas largas de polímeros). Fuente: Guía por el mundo de los plásticos.

En la imagen 6 podemos observar las largas cadenas de varios miles de monómeros en una sola cadena polimérica.

Los polímeros se dividen en plásticos y cauchos.

En los plásticos dominan algunos elementos como: (C) Carbono, (H) Hidrogeno, (O) Oxígeno, (S) Silicio, (N) Nitrógeno, (F) Flúor, (P) fósforo, (A) azufre y (Cl) Cloro.

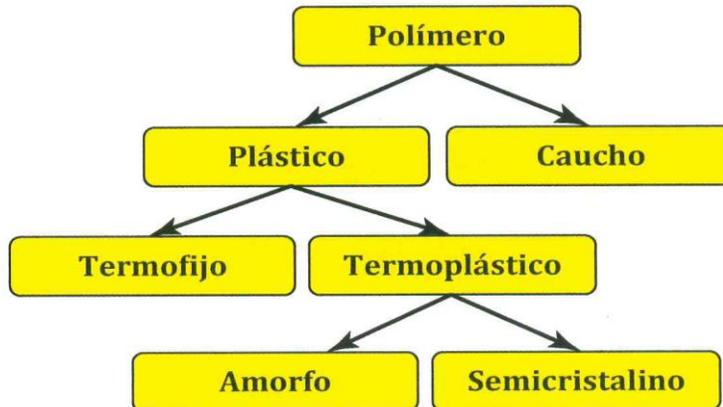


Imagen 7. Clasificación de polímeros. Fuente: Guía por el mundo de los plásticos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

En la imagen 7 se puede observar como usualmente se dividen los polímeros sintéticos en caucho y plástico, con subgrupos de termofijos y termoplástico. Los termoplásticos a su vez estas divididos en plásticos amorfos y semi-cristalinos.

2.6.1 Amorfo

Un polímero que posee en su estructura cadenas ordenadas, se dice que el polímero es semi-cristalino observar imagen 8. Cuando el ordenamiento y las cadenas poliméricas forman una estructura desordenada; en este caso se denomina que el polímero es amorfo. Observar imagen 9



Imagen 8 Estructura moléculas de polímeros semi-cristalinos, fuente: datateca.unad.edu.co

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

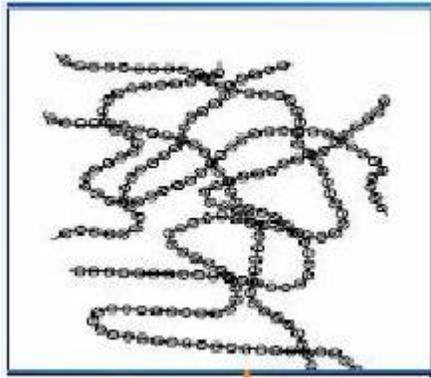


Imagen 9 Estructura de las cadenas moleculares en polímeros amorfos, fuente:

datateca.unad.edu.co

Los polímeros amorfos se presentan básicamente por enfriamiento demasiado rápido. Ocurre cuando la estructura y las condiciones del proceso no son favorables, el polímero continúa enfriándose mientras permanece amorfo.

2.7 Policarbonato

El policarbonato es un polímero termoplástico amorfo naturalmente transparente, con la capacidad de transmitir la luz casi como la del vidrio. Tiene una alta resistencia, tenacidad, resistencia al calor, y una excelente estabilidad dimensional y color.

Policarbonato, o específicamente policarbonato de bisfenol A, es un plástico transparente utilizado para hacer ventanas inastillables, lentes de gafas de peso ligero.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

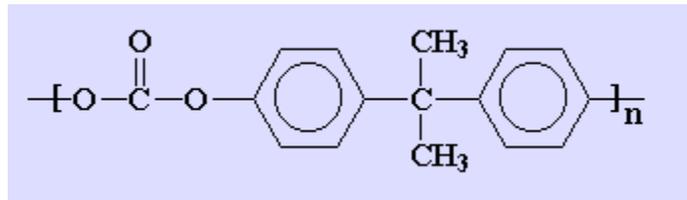


Imagen 10. Estructura molecular del policarbonato. Fuente: pslc.ws/macrog/pc.htm

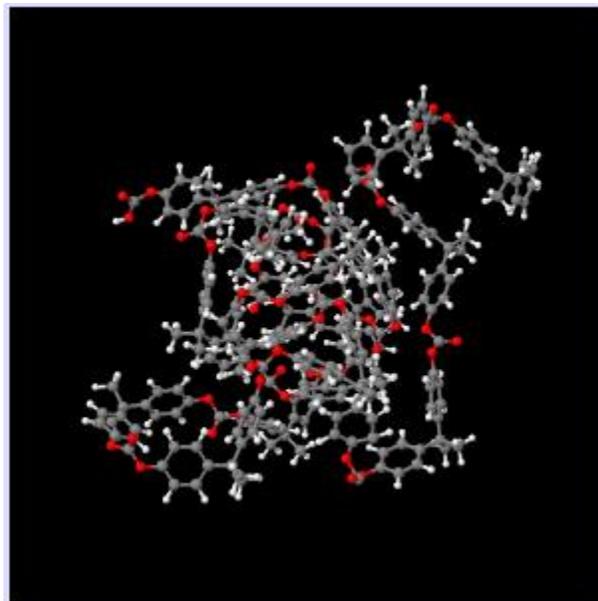


Imagen 11. Estructura interna del policarbonato. Fuente: pslc.ws/macrog/pc.htm

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

En las imágenes anteriores se puede apreciar la forma interna y la estructura del material.

Policarbonato recibe su nombre de los grupos carbonato en su cadena principal. Se llama policarbonato de bisfenol A, ya que está hecho a partir de bisfenol A y fosgeno.

(Observar imagen 12).

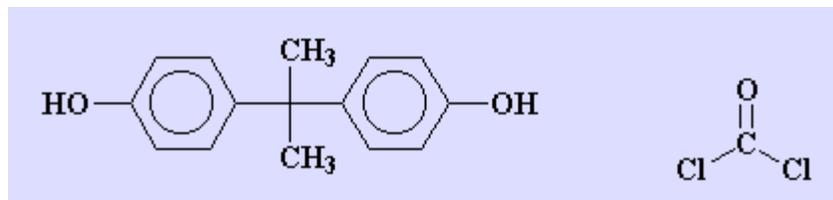


Imagen 12 estructura molecular de bisfenol A y fosgeno, Fuente: pslc.ws/macrog/pc.htm

Una de las mayores ventajas de policarbonato es su resistencia al impacto en comparación de otros plásticos.

Es un tipo de plástico fuerte y ligero, pesa más o menos como un acrílico, pero es más caro, es tan difícil de romper que es utilizador para la fabricación de diversos productos como las ventanas a prueba de balas, DVD y CD es uno de los productos más famosos que están hechas de este material, también es usado para lentes de gafas.

El policarbonato está apareciendo en la fabricación de productos electrónicos como en las cajas de los teléfonos celulares y la computadora, ya que es más ligero y protege a los equipos contra el daño externos (descargas eléctricas). IMac es un ejemplo de este material.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

El policarbonato es reciclable, ya que son reutilizados.

Este material termoplástico es fuerte, ligero, rígido, y reciclable. Creado en 1957, este material fue desarrollado para reemplazar un número de diferentes metales fundidos a presión.

Cada uno de estos termoplásticos se puede calentar y reformar. Esto es lo que hace que sean reciclables.

2.8 Ensayo mecánicos en piezas poliméricas

La resistencia, la dureza y la ductilidad son propiedades mecánicas. Se pueden ejercer tres tipos de fuerzas mecánicas que afecten a los materiales: compresión, tensión y cizalla como se observa en la imagen 13

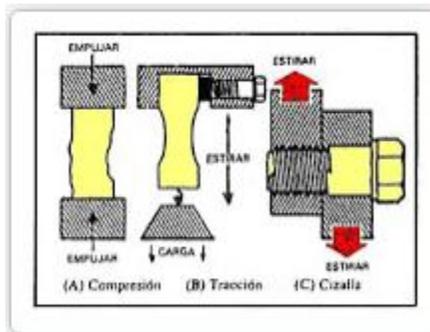


Imagen 13.

Las pruebas mecánicas consideran estas fuerzas por separado o combinadas. Las pruebas de tracción, compresión y cizalla sirven solo para medir una fuerza, mientras que las de flexión, impacto y dureza implican dos o más fuerzas simultáneas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

Resistencia a la tracción y elongación de rotura

La resistencia a la tracción o tenacidad es el máximo esfuerzo que un material puede resistir antes de su rotura por estiramiento desde ambos extremos con temperatura, humedad y velocidad especificadas.

El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente.

2.8.1. Esfuerzo de flexión

El esfuerzo que provoca la flexión se denomina momento flector. La flexión se puede calcular a partir de la siguiente ecuación.

Esfuerzo de flexión: Esfuerzo normal causado por la “flexión” del elemento. El máximo esfuerzo normal es igual a:

$$\sigma_m = \frac{Mc}{I}; \quad (3)$$

Dónde: M = Momento máximo flector., tenemos:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

$$M = \frac{PL}{4} \quad (4)$$

c= Distancia perpendicular del eje neutro al punto más alejado de este y sobre el cual actúa
 Esfuerzo de flexión

$$c = \frac{D}{2} \quad (5)$$

I= momento de inercia de la sección transversal

$$\text{(circular } I = \frac{\pi D^4}{64} \text{)} \quad (6)$$

Por tanto, la ecuación de esfuerzo máximo resulta:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

$$\sigma = \frac{8 PL}{\pi * D^2} \quad (7)$$

El esfuerzo correspondiente puede ser de tensión o de compresión. Deformación unitaria:

Dónde:

ε = deformación unitaria

D = diámetro de la barra,

ΔL = stroke (deflexión de la barra) y

L = longitud de la barra

$$\varepsilon = \frac{6D \Delta L}{L^2} \quad (8)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

2.8.2 Esfuerzo a tensión

- Tensión normal: Intensidad de fuerza normal por unidad de superficie.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1) \quad \text{Unidades: Pa (N/m}^2\text{) ó (MPa)}$$

- Deformación normal: respuesta del material a la aplicación de la tensión. Se mide como el cambio relativo de longitud en la dirección de aplicación de la fuerza (lo que se estira o se encoge)

$$\varepsilon = \frac{L_I - L_0}{L_0} \quad (2)$$

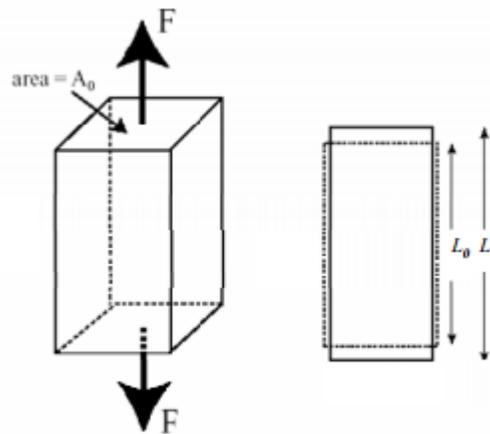


Imagen 14 Explicación de ecuaciones tensión y deformación, Fuente: www1.ceit.es

En el laboratorio de polímeros del ITM se encuentra una maquina universal como se observa en la imagen 15 en la cual se hacen realizaron las pruebas de tensión y flexión.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13



Imagen 15 – maquina universal

El pasó a seguir para poder realizar las pruebas mecánicas tanto de tensión como de flexión son:

1. Se toma la medida de las probeta, ancho, espesor y largo.
2. Se hace unas marcaciones en las probetas, donde esté a una misma distancia del centro de cada una de ellas.
3. Se procede a montar en la maquina universal.

Como se puede observar en las figuras. 16 y 19

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13



Imagen 16. Procedimiento de medición de probetas para ensayos mecánicos.

www.udistrital.edu.co)

Por medio de esta máquina podemos observar la deformación plástica y elástica de la probeta, pasando por el estiramiento y por último la ruptura o reviente, de esta manera podemos sacar resultados y conclusiones del material a evaluar.

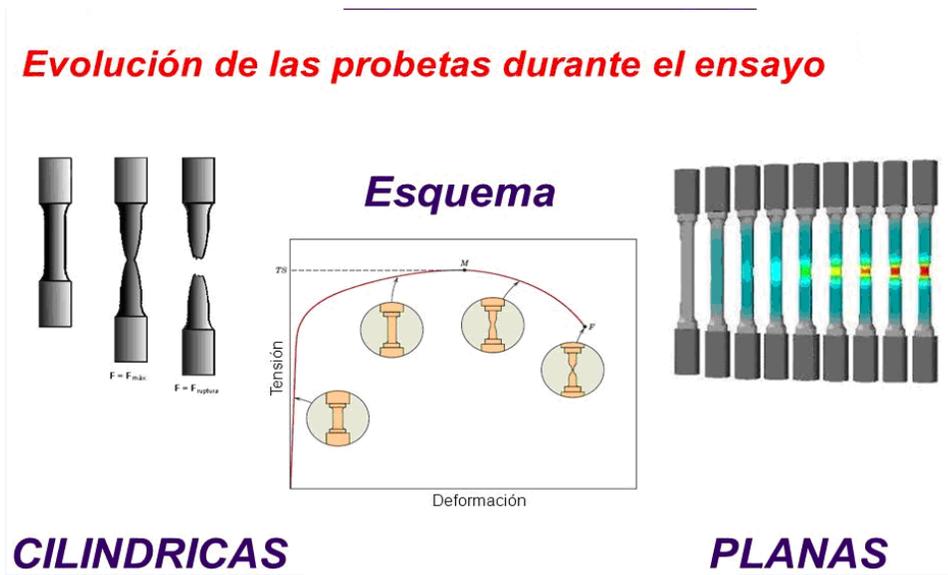


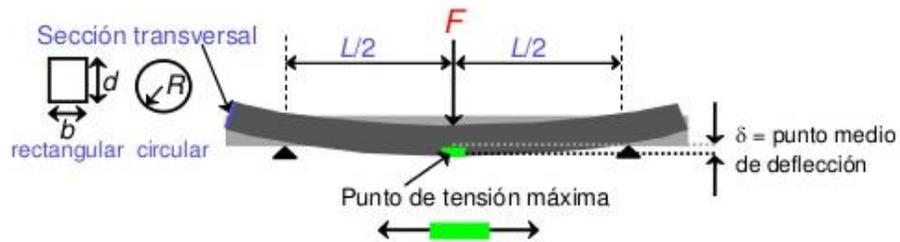
Imagen 17. esquema grafico de una probeta en ensayos Fuente: www.slideplayer.es

En la imagen 16 se observa el proceso que sufren las probetas físicamente y gráficamente de la prueba de tensión.

La prueba de flexión más empleada es la de Flexión en 3 puntos con radio de 5.

Medición del esfuerzo

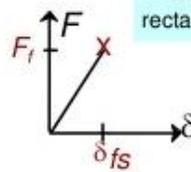
- Prueba de flexión en 3-puntos para medir esfuerzo a T ambiente



- Resistencia a la flexión:

$$\sigma_{rf} = \frac{1.5 F_f L}{bd^2} = \frac{F_f L}{\pi R^3}$$

rectangular
circular



- Valores típicos:

Material	σ_{rf} (MPa)	E (GPa)
Nitruro de Si	250-1000	304
Carburo de Si	100-820	345
Óxido de Al	275-700	393
vidrio (soda)	69	69

Imagen 18. medición de esfuerzos fuente.slideshare.net

En la imagen 18 se puede observar una breve explicación de la prueba mecánica de flexión y ciertas ecuaciones dependiendo al tipo de probeta en la que se va a trabajar rectangular o circular, en este trabajo se evaluarán probetas rectangulares para las pruebas de flexión.

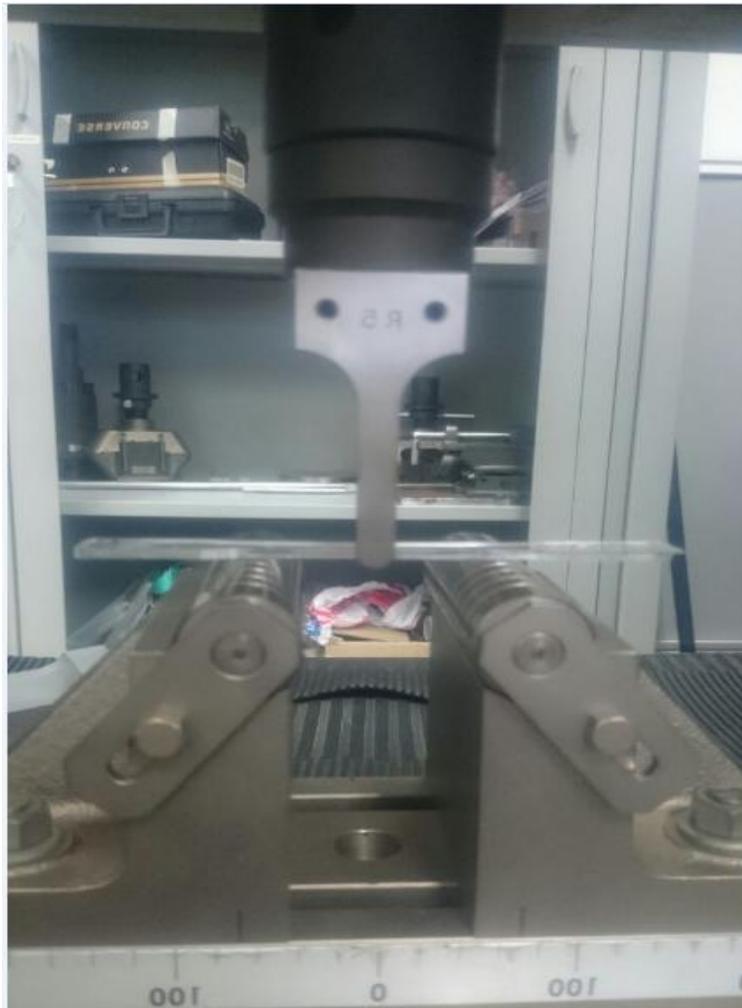


Imagen 19. Montaje de ensayo de flexión en tres puntos en el laboratorio de polímeros ITM.

Fuente: Autores

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13



Imagen 20. Muestra fallada en el ensayo de flexión en el laboratorio de polímeros ITM.

Fuente: Autores

Otra de las pruebas mecánicas realizadas fueron las pruebas de flexión como se puede observar las imágenes 19 y 20, esta prueba de llama Flexión en 3 puntos con radio de 5.

Para las pruebas de tensión, los resultados no se logaron definir bien debido a que las probetas inyectadas tiene una concentración de esfuerzos generados por las huellas de los botadores del

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

molde de inyección, que se encuentran más cortos de lo que deberían ser (están hundidos), de esta manera al someter las probetas a las pruebas tensión ellas siempre fallan en este punto (a pesar q se redujeron al máximo las huellas de botadores, procurando no afectarlas).

2.9 Normas de tensión ASTM D638

Descripción

En esta parte la norma ASTM D638 se especifica las condiciones de los ensayos para determinar las propiedades de tensión de los plásticos reforzados y sin reforzar.

Se aplican a los tipos de probetas tubulares y de placas. Entre estas propiedades se incluye la resistencia máxima, la deformación a la rotura y el módulo de elasticidad. Las propiedades mecánicas de los plásticos pueden cambiar mucho, cuando se incorporan ciertos aditivos a la formula. Algunas de estas propiedades son la resistencia, la ductilidad y la dureza.

Al igual que con muchos materiales, los extensómetros son necesarios para medir correctamente la deformación. Una curva de resistencia del plástico vs curva de La deformación contiene una zona elástica lineal.

Para medir el modulo y la deformación es necesario un extensómetro con una alta resolución.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

2.10 Normas de flexión ASTM 790

Descripción

Las propiedades de flexión de los plásticos son importantes para muchas aplicaciones. La norma ASTM D790 describe el procedimiento adecuado.

Flexión de tres puntos y cuatro puntos se utilizan para evaluar los materiales rígidos y semirrígidos. Se requiere un deflectómetro u otros dispositivos de medición de deformación para la medición de la flexión directa, cuando se realiza una prueba de flexión en cuatro puntos, ya que la distancia entre los apoyos depende del espesor de la muestra, es muy importante conocer el rango de dimensiones de la muestra antes de seleccionar un accesorio de flexión.

La aplicación de la carga y el soporte pueden variar de un estándar a otro, por lo tanto, se sugiere revisar la norma ASTM D790 para comprender plenamente las necesidades de fijación, así como la configuración de la prueba, los procedimientos, requisitos y resultados.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13



Imagen 22. Molde de probeta ITM. Fuente: Autores

Del molde definido saldrá la pieza plástica que llamaremos probeta, la cual se presenta en la **figura 23.**

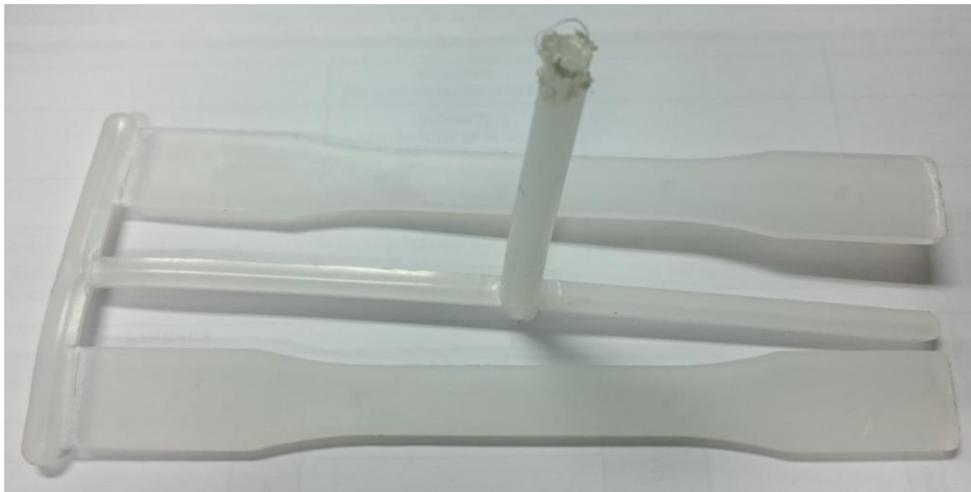


Imagen 23. Ensayo de Probeta ITM. Fuente: Autores

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

Se utilizó el programa CAD solid edge para modelar la probeta en 3D que aparece en la imagen 24.

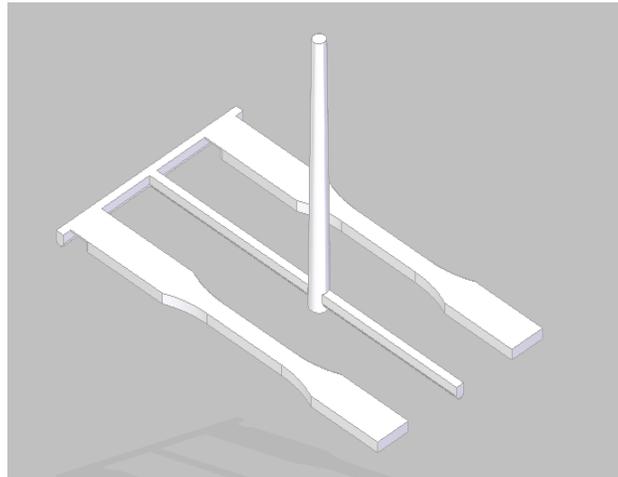


Imagen 24. Modelo CAD de probeta ITM. Fuente: Programa moldex 3D

Los planos, la simulación y el molde ya se encuentran procesados con anterioridad en el software CAD, (modelo 3D) y en el software al Moldex 3D R12 designer para su posterior simulación del proceso de inyección.

Allí se pudo recopilar mucha información de gran importancia como especificaciones mecánicas del material a inyectar, y condiciones de proceso recomendadas del polímero a experimentar (policarbonato).

Por medio de este programa se pudo simular el llenado de la pieza (probeta) y de esta manera poder definir las condiciones a las que estará sometida la pieza (presión, tiempo de enfriamiento, temperatura) y con esta información poder programar los parámetros de la máquina para poder inyectar.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

En estos ensayos se analizaron diferentes escenarios del proceso con el fin de predecir los esfuerzos residuales generados en la pieza inyectada.

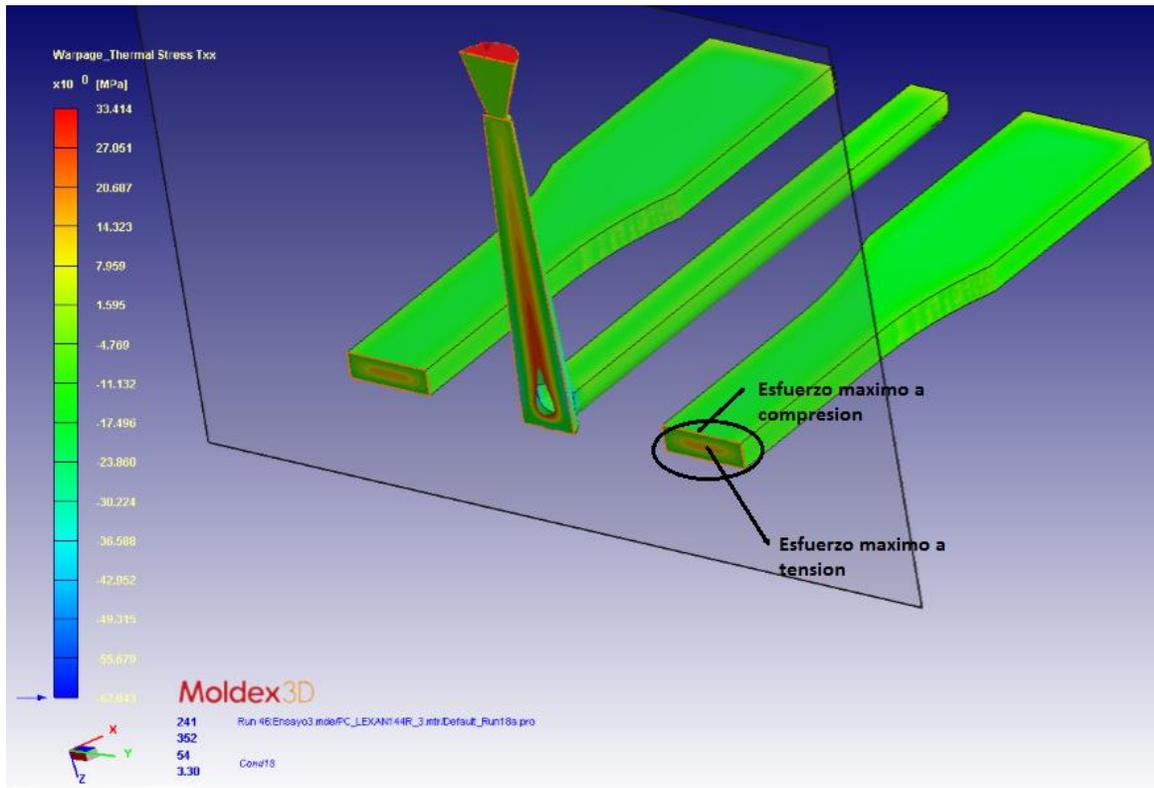


Imagen 25. Esfuerzos máximos a compresión y tensión Fuente: Programa moldex 3D

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

En la imagen 25 podemos observar la probeta sometida a esfuerzos residuales debido al proceso de inyección y los niveles obtenidos de tensión por medio del programa moldex 3D. Los esfuerzos residuales son de dos tipos, las de color amarillo-naranja en el centro de la probeta, indican esfuerzos residuales a tensión (10 MPa, dirección positiva del eje x), las de color verde indican esfuerzos residuales a compresión (-4 MPa, dirección negativa del eje x).

Por medio del programa moldex 3D se pudo obtener resultados donde se puede observar la variación de los esfuerzos residuales, a compresión, tensión y los esfuerzos Von mises que son los esfuerzos principales resultantes de los esfuerzos combinados en el material dependiendo directamente de los datos consignados en el programa.

3.2 Inyección de probetas

Las probetas se inyectaron con una máquina que se encuentra ubicada en el laboratorio de polímeros, se utilizó un molde de 2 cavidades colada fría bajo una temperatura de 60°C y a 80°C con el material policarbonato, Algunas condiciones de inyección fueron simuladas y calculadas para poder evidenciar los esfuerzos residuales de las probetas. Al obtener las probetas posteriormente se llevaron a realizar las pruebas mecánicas de tensión y flexión, donde se pudo observar que sufrían deformación en el mismo lugar debido a una concentración de esfuerzos generada por los botadores del molde.

3.3 Esfuerzos Von Mises resultantes de simulaciones computarizadas

De los resultados obtenidos en el programa moldex 3D se reportaron los resultados de los esfuerzos residuales Von mises en la superficie de la pieza inyectada en la parte media de la pieza, donde se espera que esta falle al realizar las pruebas mecánicas, especialmente en la prueba de tensión (ver ilustración 32).

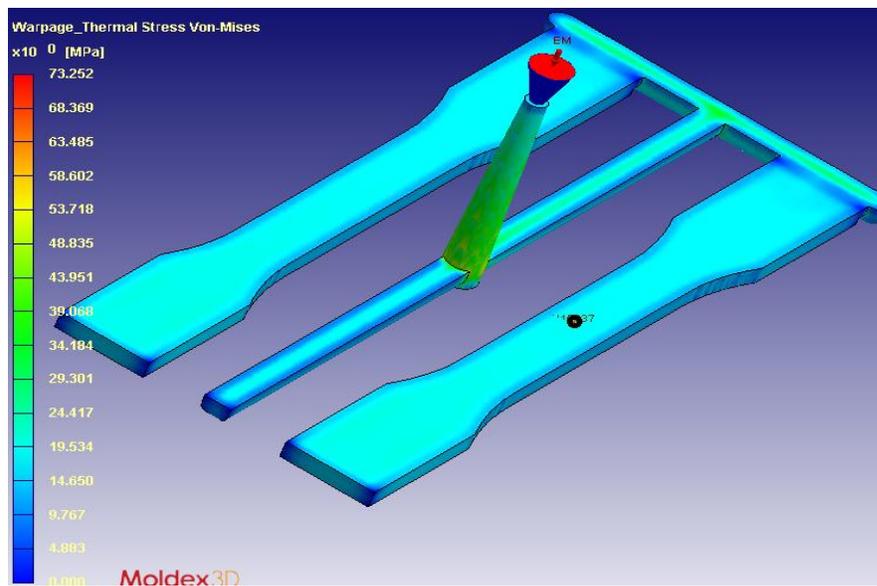


Imagen 32. Simulación de Esfuerzos Von mises Fuente: Programa moldex 3D

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

Las variables que se observan en la tabla 2 son condiciones de proceso que se simularon, ya que son las variables que más impactan los esfuerzos residuales en el proceso de inyección.

Las temperaturas de arranque del molde con las de fundido de la pieza son muy importantes para la pieza inyectada, ya que de eso depende como salga las piezas inyectada y como varíe su estructura interna, dándole así mayor resistencia al impacto, flexibilidad, dureza, etc.

Estas temperaturas también varían dependiendo de las necesidades que se requiera y para que se vaya a utilizar la pieza inyectada.

Nivel		Bajo	Medio	Alto
Temperatura de fundido de la pieza	Ta[°c]	290	305	320
Temperatura de arranque del molde	Ta[°c]	50	80	110

Tabla 2. Datos de variable y niveles modificados. Fuente: Autores

Como todos los materiales, el policarbonato es un material importante que requiere de unas condiciones de proceso recomendadas para ser inyectado. A partir de simulaciones preliminares de la pieza y recomendaciones del fabricante del material a inyectar se obtuvieron los parámetros obtenidos en la tabla 3.

Condiciones constantes o parámetros obtenidos en la tabla 3 son necesarios para el material, el molde y la inyectora así no tener ningún inconveniente en el proceso.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

	Valor
Tiempo de enfriamiento (s)	10
Presión de empaques (bar)	600
Tiempo de empaques (s)	7,69

Tabla 3. Datos de condiciones constantes. Fuente Simulaciones Moldex3D.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3 Pruebas de tensión

Al realizar las pruebas mecánicas de tensión, primero se debe tomar las medidas de las probetas como aparece en la imagen 15, Con el fin que el software del ensayo de pruebas entregue simultáneamente los datos de esfuerzo y deformación a medida que se realice el ensayo. Los ensayos de tensión y flexión de las probetas inyectadas, fueron realizados a condiciones de 23°C y con las velocidades de deformación según lo especificado en las respectivas normas para el tipo de plástico a evaluar.

Por medio de estos resultados se calcula la diferencia que hay de una probeta a otra en la prueba de tensión, donde se pudo observar que la diferencia de (0.9861068 MPa), la cual no es una cifra importante, teniendo presente la variación de temperatura de las probetas de 60 °C y 80 °C. Esto se debe, a que la falla prácticamente se presenta a un mismo nivel de esfuerzos (53 a 55 MPa), debido a la presencia de concentradores de esfuerzos, huellas de los expulsores en la zona de falla de la probeta. No se encontró un efecto en la temperatura del molde en el desempeño mecánico, debido a que el efecto de concentrador de esfuerzos es mucho mayor.

Según la ficha técnica del material original, este a una condición de 23°C del ensayo resiste hasta 63 MPa, es decir que por el efecto de los esfuerzos residuales sin los concentradores de esfuerzo el material puede resistir de 53 a 55MPa. Para determinar si las tensiones residuales pueden afectar la resistencia mecánica para un rango entre los 53 MPa a los 63 MPa, se debe eliminar el efecto de las huellas de los expulsores en las piezas inyectadas.

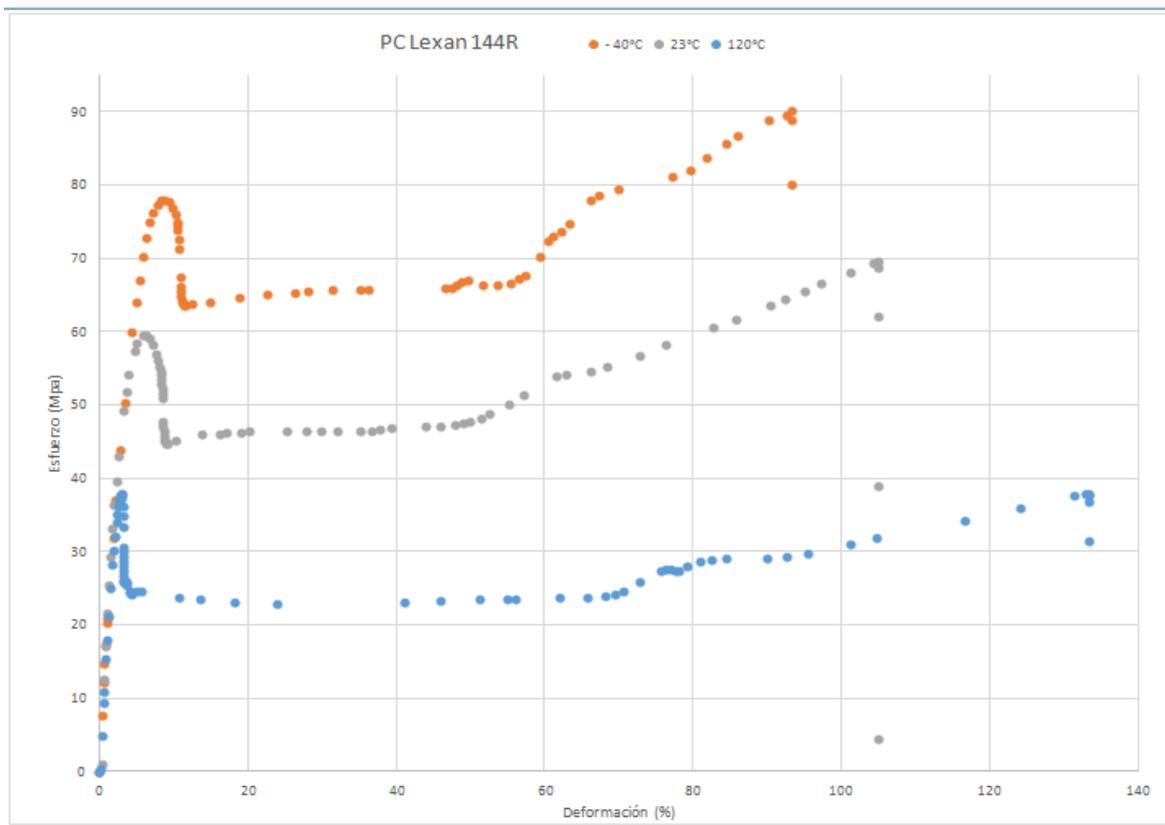


Imagen 26. Curva esfuerzo vs deformación a diferentes temperaturas del policarbonato. Fuente proveedor de materia prima.

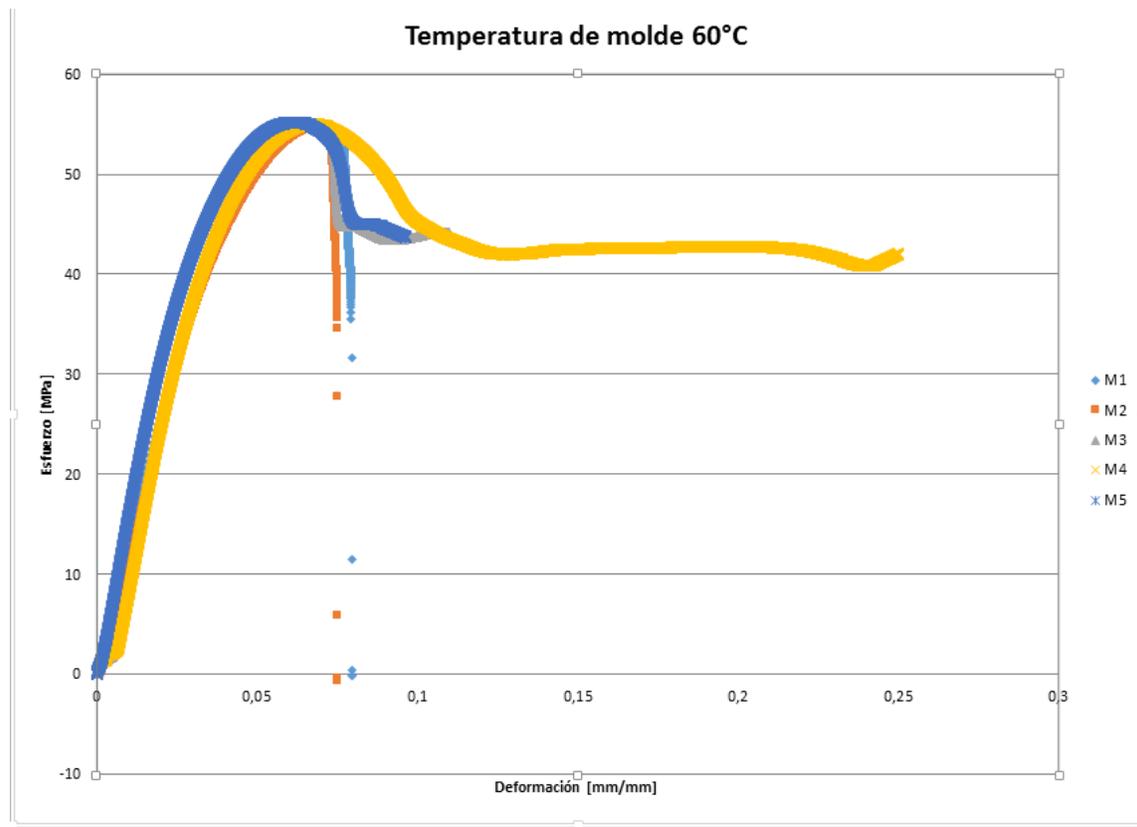


Imagen 27. Grafico Excel resultados de tensión a 60°C. Fuente: Autores

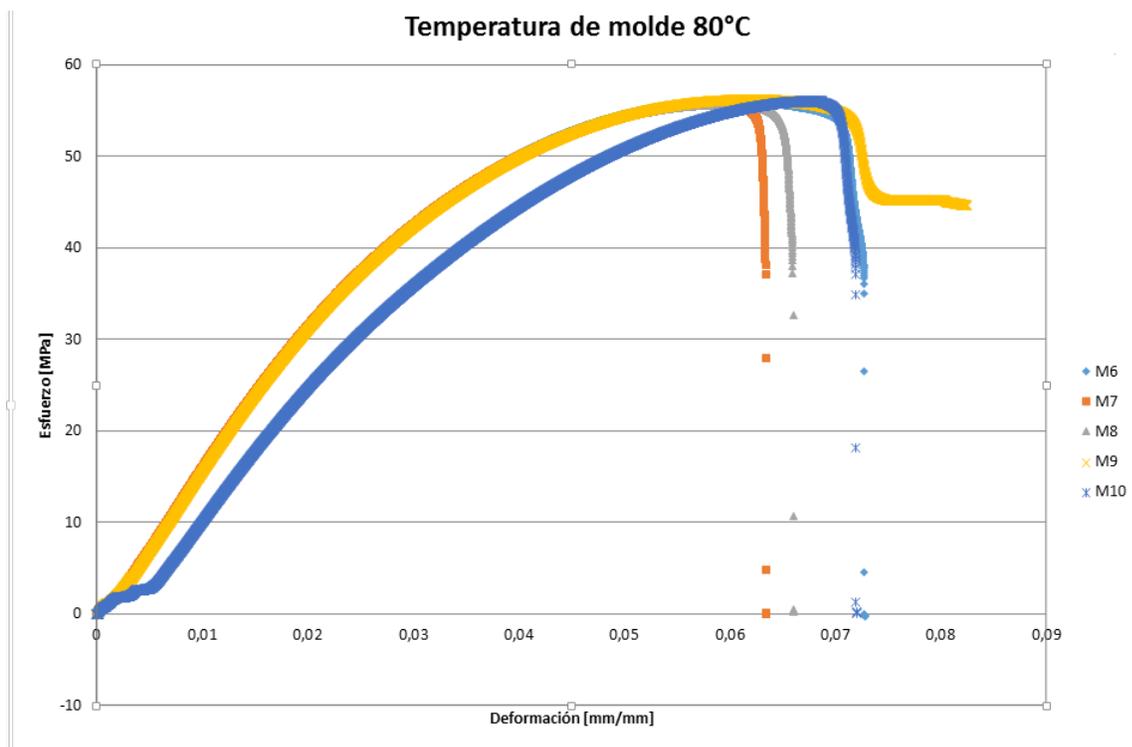


Imagen 28. Grafico Excel resultados de tensión a 80°C. Fuente: Autores

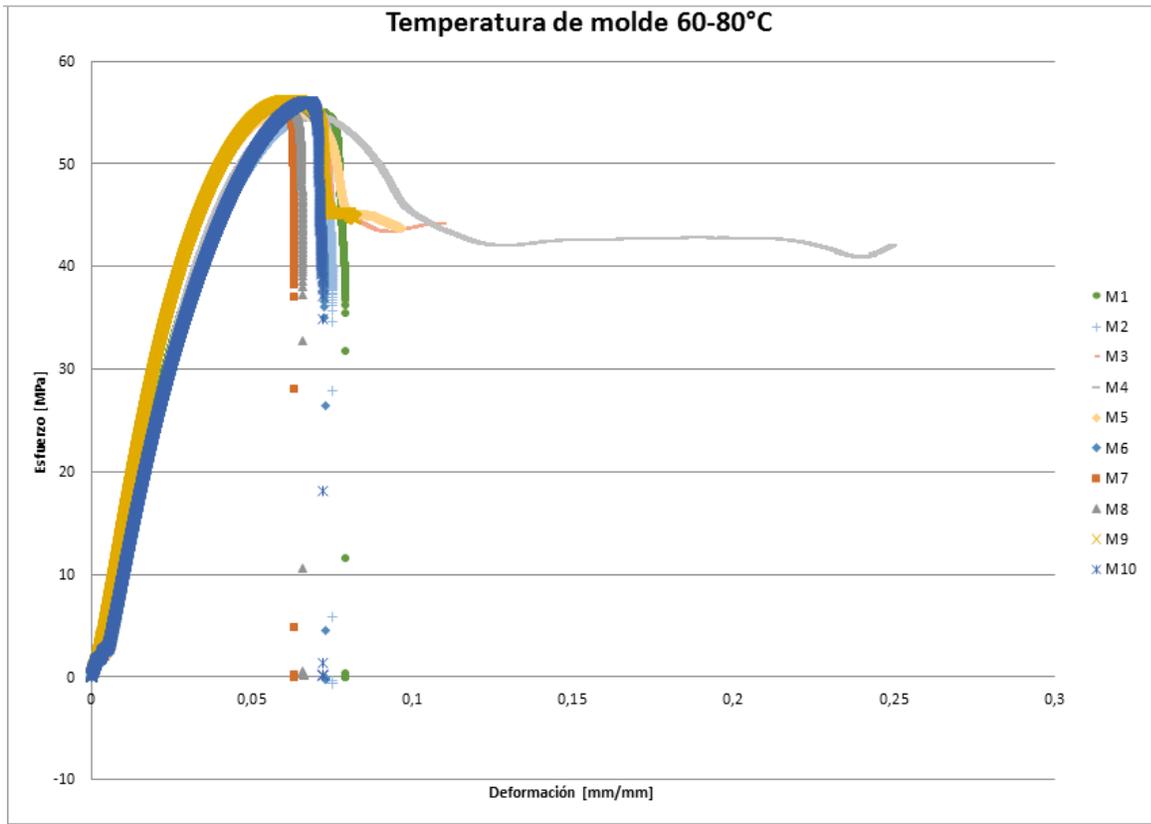


Imagen 29. Grafico Excel resultados de tensión a 80°C vs 60°C. Fuente: Autores

En la imagen 29 se superpusieron los resultados de las gráficas anteriores imagen 27 y 28, Resultados obtenidos de realizar las pruebas mecánicas de tensión con probetas inyectadas a 80° C y 60° C

4.4 Pruebas de flexión

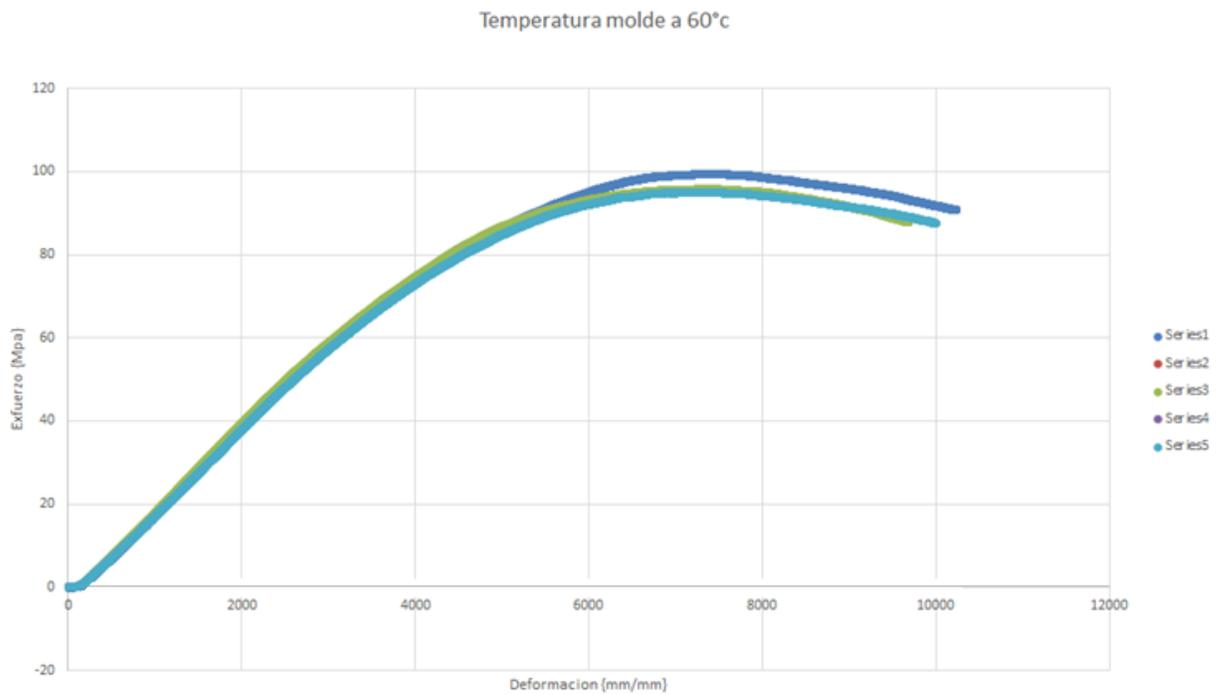


Imagen 30. Grafico Excel resultados de flexión 60°C. Fuente: Autores

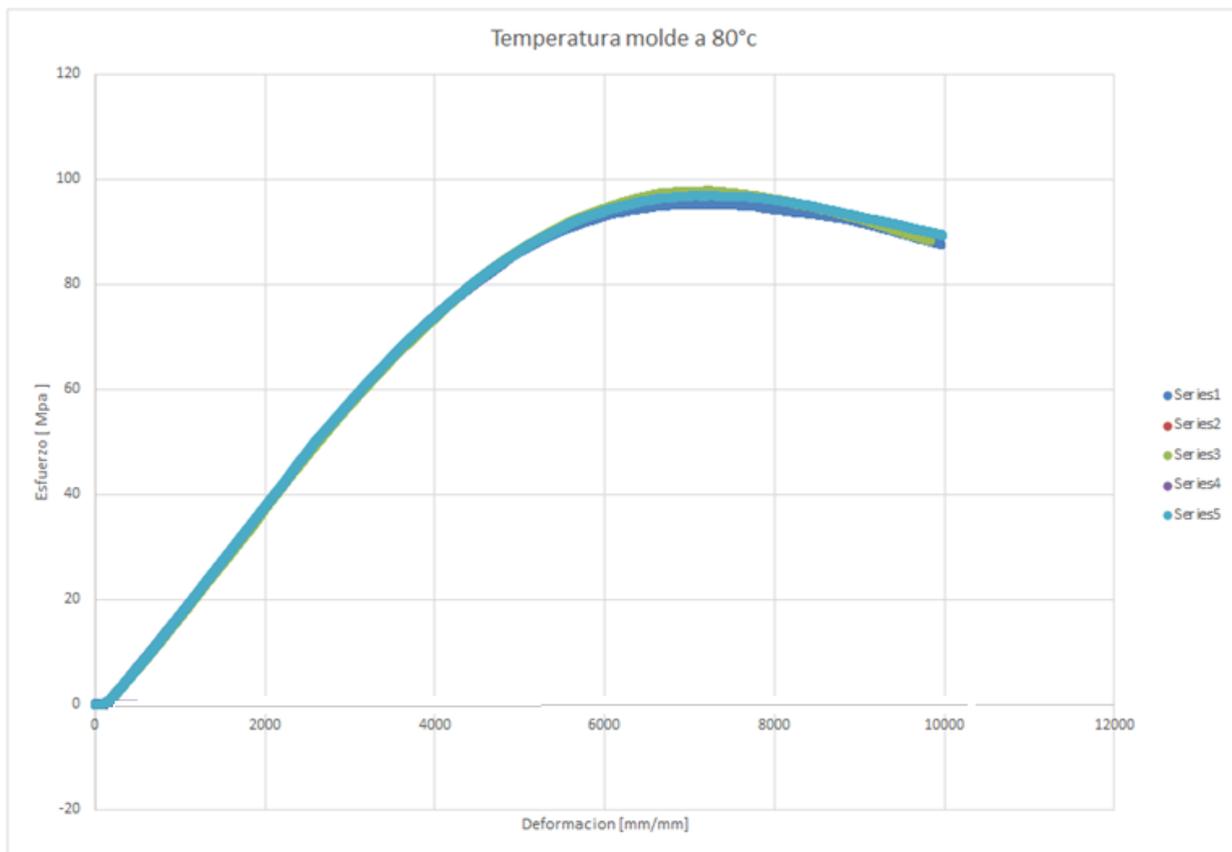


Imagen 31. Grafico Excel resultados de flexión 80°C. Fuente: Autores

La resistencia a la flexión es ligeramente mayor a temperatura de molde de 60°C. Esto podría explicarse debido a que esta condición de temperatura se generan mayores niveles de esfuerzos residuales en la pieza, que, para el caso de ensayos de flexión, contrarrestan la distribución de esfuerzos generado en la pieza debido a la carga aplicada en el centro de la pieza. Sin embargo, ya que la diferencia no es muy significativa, se recomienda realizar más pruebas bajo estas condiciones sin el defecto de las huellas de los expulsores del molde, para comprobar esta hipótesis.

Simulaciones proceso de inyección

En la imagen 25 se presentan los esfuerzos residuales von mises a diferentes condiciones de temperatura de molde y de inyección. Se observa las condiciones internas de la probeta.

Se lograron obtener datos en los que se observan las capacidades de resistencia a falla de las probetas inyectadas a diferentes condiciones principalmente modificando su temperatura de molde.

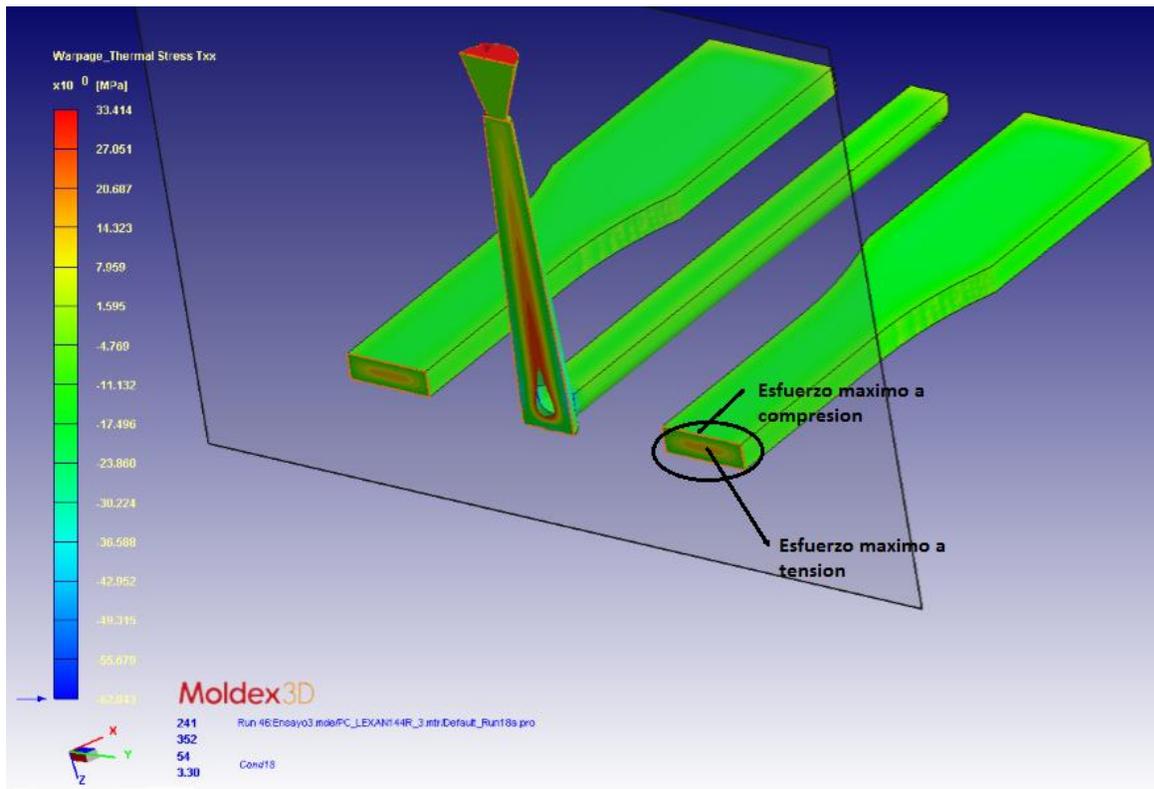


Imagen 25. Esfuerzos máximos a compresión y tensión Fuente: Programa moldex 3D

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

Se obtienen graficas en las que observamos el comportamiento de los polímeros a la hora de inyección y pruebas de esfuerzo.

Para esto se simularon las siguientes condiciones de proceso (ver tabla 1)

Esfuerzos residuales

	Temperatura inyección	Temperatura de molde	Tensión (Mpa)	Compresión (Mpa)	Von mises (Mpa)
	Tf(°c)	Ta(°c)	(Mpa)	(Mpa)	(Mpa)
Cond 1t	290	50	44,435	43,305	36,010
Cond 2t	305	50	44,084	43,040	35,879
Cond 3t	320	50	42,943	41,200	34,389
Cond 4t	290	80	31,458	29,508	25,181
Cond 5t	305	80	30,444	28,236	24,157
Cond 6t	320	80	31,458	28,947	24,858
Cond 7t	290	110	18,829	16,062	14,432
Cond 8t	305	110	20,029	17,040	15,499
Cond 9t	320	110	21,095	18,522	16,768

Tabla 1. Resultados de esfuerzos residuales obtenidos en simulación del software Moldex3D.

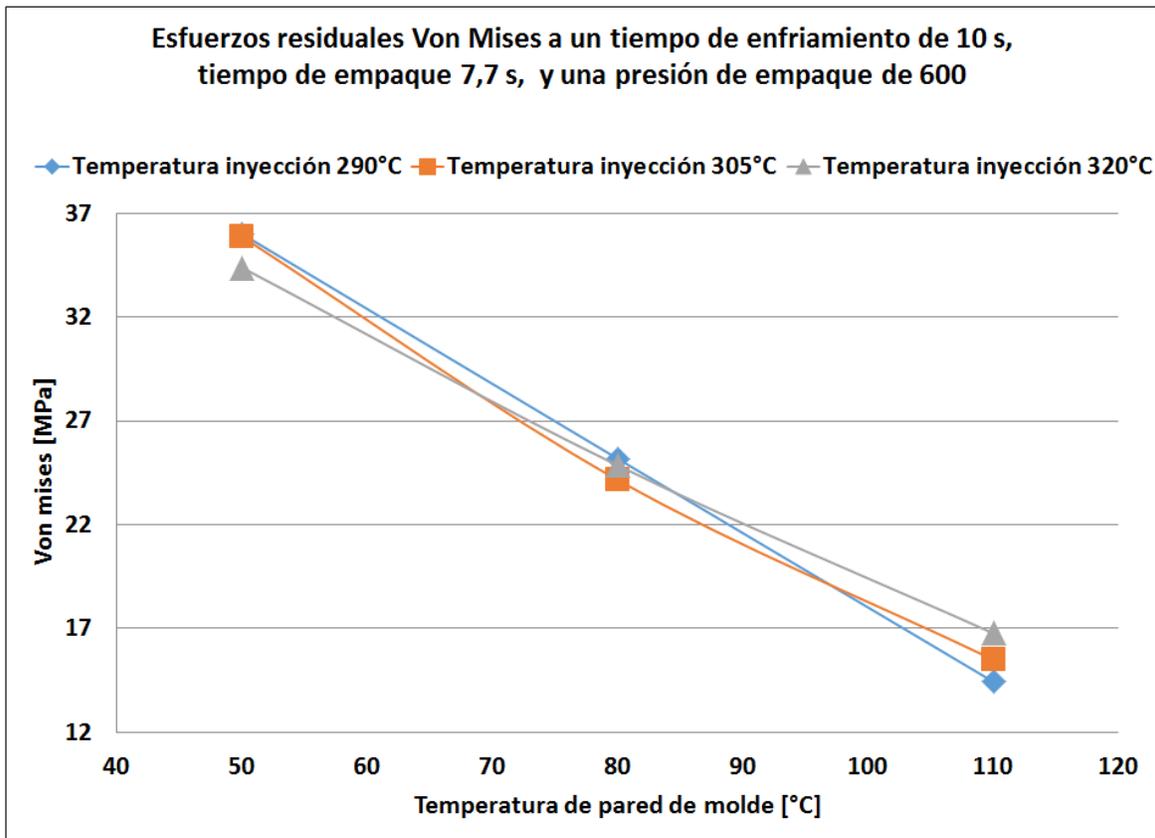


Imagen 33. Esfuerzos residuales von mises. Fuente: Autores

En la imagen 33 se puede observar los esfuerzos residuales de von mises.

En la gráfica se observa el comportamiento en el que se realizaron las pruebas de esfuerzos residuales con temperaturas de molde que se encuentran entre 60 y 80°C y temperaturas de inyección entre los 290 y 305°C. La diferencia de esfuerzos de von mises que se encuentran entre las temperaturas de molde de 60 y 80°C no se reflejan en las propiedades mecánicas de las probetas, debido al mayor efecto que generaron las huellas de los expulsores (concentradores de esfuerzos).

Se encontró que los menores esfuerzos residuales se obtuvieron a la mayor temperatura de molde y la menor temperatura de inyección. Esto se explica por el hecho que la mayor temperatura de molde generará una mayor contracción en el material, especialmente en las capas cercanas a la pared del molde. Adicionalmente, al inyectar a una temperatura menor (290°C), el material en el centro de la pieza (capas lejanas a las paredes del molde) se contraerá menos comparado a las otras temperaturas de inyección. Estas dos condiciones harán que la diferencia de contracciones en el material entre las capas externas y las internas sea menor y por lo tanto los esfuerzos residuales se

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

reduzcan. Para las condiciones de temperatura de molde baja (50°C) y temperatura de inyección alta (320°C), se genera un efecto contrario, la mínima contracción en las capas externas del material inyectado y la máxima contracción en las capas internas del material inyectado, esta condición maximiza los esfuerzos residuales en la pieza inyectada.

Este hecho explica la razón de las condiciones de proceso recomendadas para el Policarbonato, temperaturas de molde entre 80 y 110°C, así como temperaturas de inyección entre 290 y 320°C. Se evaluó en la simulación y las inyecciones temperaturas de molde de 50 y 60°C, buscando evidenciar el efecto negativo en los esfuerzos residuales, lo cual se evidenció en las simulaciones realizadas. Es importante, tener en cuenta que las temperaturas de proceso pueden afectar un mayor o menor tiempo de enfriamiento de la pieza inyectada, donde generalmente mayores temperaturas de molde reducen los esfuerzos residuales, pero incrementan el tiempo de enfriamiento de la pieza y por lo tanto un proceso menos productivo. Por esta razón se debe tener un balance entre la calidad del producto inyectado en cuanto a esfuerzos residuales mínimos y un tiempo de producción menor.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- El material inyectado Policarbonato tiene alta sensibilidad en el cambio de los esfuerzos residuales a las temperaturas de proceso, especialmente a la temperatura de molde.
- La simulación con el software Moldex 3D permitió predecir los esfuerzos residuales a diferentes condiciones de proceso de temperatura (masa fundida de inyección y pared de molde), determinando las condiciones más críticas del proceso.
- La condición más favorable para reducir las tensiones residuales es emplear la temperatura de molde más alta (110°C) y temperatura de inyección más baja (290°C). Esto con el fin de reducir la diferencia de contracciones entre el interior y el exterior de la pieza inyectada.
- La condición más desfavorable que incrementan las tensiones residuales es emplear la temperatura de molde más baja (50°C) y la temperatura de inyección más alta (320°C). Estas condiciones incrementan la diferencia de contracciones entre el interior y el exterior de la pieza inyectada que se traduce en altos esfuerzos residuales.
- La evaluación de propiedades mecánicas por resistencia a la tensión de las piezas inyectadas no permitió evidenciar un efecto de las condiciones de proceso en los esfuerzos residuales, ya que el defecto de huellas de los expulsores en la pieza inyectada tiene una mayor influencia en la falla de la pieza al realizar la prueba. En este caso se encontró que el material de las piezas inyectadas fallaba en un rango entre los 53 a 55MPa, siendo el esfuerzo máximo del material 63 MPa, de acuerdo a especificaciones técnicas del fabricante del material. Para determinar si las tensiones residuales pueden afectar la

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

resistencia mecánica para un rango entre los 53 MPa a los 63 MPa, se debe eliminar el efecto de las huellas de los expulsores en las piezas inyectadas.

En el caso de la resistencia a la flexión, se encontró que es ligeramente mayor para las piezas inyectadas a temperatura de molde de 60°C. Esto se puede explicar debido a que esta condición de temperatura se generan mayores niveles de esfuerzos residuales en la pieza, que para el caso de ensayos de flexión puede contrarrestar la carga externa aplicada, que es una combinación de esfuerzos a tensión y compresión a través del espesor de la pieza inyectada. Sin embargo, se deben realizar más ensayos futuros sin el efecto de la huella de los expulsores en la pieza para verificar este comportamiento.

- Se verificó que la ventana de operación de un Policarbonato en cuanto a temperaturas es de 80 a 110°C en la pared del molde y de 290 a 320°C en la masa fundida de inyección. Al evaluar a temperaturas de molde inferiores de 80°C se evidenció mediante simulación que los esfuerzos residuales se incrementan sustancialmente. Lo anterior concuerda con las temperaturas recomendadas de proceso para este tipo de materiales.
- Para trabajos futuros se propone evaluar con diferentes materiales a los evaluados, como son los plásticos semi-cristalinos.
- Se recomienda posteriormente incluir el efecto de la pos-presión (tiempo y presión) en los esfuerzos residuales de las piezas inyectadas.
- Se propone realizar como trabajo futuro un estudio sobre el comportamiento de los esfuerzos residuales en piezas de paredes delgadas, porque se considera que las piezas son las más fabricadas y es importante poder tener control sobre ellas.
- Finalmente, se propone validar nuevamente este estudio realizado una vez se reforme el molde de inyección de probetas de tensión, donde se eliminen las huellas de expulsión en

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

la pieza inyectada, factor que generó ruido en los resultados experimentales de resistencia mecánica de tensión y flexión.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Osswald, T. et al. (2010). *Ciencia de Polímeros para Ingenieros*. (Guadales, Ed.) (1st ed.). Cucuta.
- Erdmann, M., & Holzleitner, J. (2007). Computational analysis of injection-molding residual-stress development in direct-adhesion polymer-to-metal hybrid body-in-white components, *3*, 19–36. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.059>
- Ramani, K., & Zhao, W. (1998). The evolution of residual stresses in thermoplastic bonding to metals, *17*(4), 353–357.
- Maxwell, a. ., & Turnbull, a. (2004). Influence of small fluctuating loads on environment stress cracking of polymers. *Polymer Testing*, *23*(4), 419–422. <http://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2003.09.012>
- Lee, Y. C., Liu, T. S., Wu, C. I., & Lin, W. Y. (2012). Investigation on residual stress and stress-optical coefficient for flexible electronics by photoelasticity. *Measurement*, *45*(3), 311–316. <http://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.11.017>
- Ansys. (2011). *Structural Mechanics*.
- NX - Simulation - Structural Analysis - large. (2013). Retrieved April 10, 2014, from http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/nx/for-simulation/structural-analysis/index.shtml
- Meijer, H. E. H., & Govaert, L. E. (2005). Mechanical performance of polymer systems: The relation between structure and properties. *Progress in Polymer Science*, *30*(8-9), 915–938. <http://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2005.06.009>
- Moldex3D. (2014). *Moldex3D :: Plastic Injection Molding Simulation Software*. Retrieved April 10, 2014, from <http://www.moldex3d.com/en/>
- Moldflow. (2014). *Plastic Injection Molding Design | Simulation Moldflow | Autodesk*. Retrieved April 10, 2014, from <http://www.autodesk.com/products/autodesk-simulation-family/features/simulation-moldflow/all/gallery-view>
- SigmaSoft. (2014). *SigmaSoft*. Retrieved April 10, 2014, from <http://www.sigmasoft.de/>
- Simcom. (2014). *Cadmould 3D-F*. Retrieved April 10, 2014, from <http://www.simcon-worldwide.com/pages/en/products/cadmould.php?lang=EN>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

- Altan, M., & Yurci, M. E. M. E. (2010). *Optimization of residual stresses in the surface regions of injection moldings. Polymer - Plastics Technology and Engineering*, 49(1), 32–37. <http://doi.org/10.1080/03602550903206399>
- Sánchez, R., Aisa, J., Martínez, A., & Mercado, D. (2012). *On the relationship between cooling setup and warpage in injection molding. Measurement*, 45(5), 1051–1056. <http://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.01.039>
- Tsai, K.-M., Hsieh, C.-Y., & Lo, W.-C. (2009). *A study of the effects of process parameters for injection molding on surface quality of optical lenses. Journal of Materials Processing Technology*, 209(7), 3469–3477. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.08.006>
- Kansal, G., Rao, P. N., & Atreya, S. K. (2001). *Study: temperature and residual stress in an injection moulded gear. Journal of Materials Processing Technology*, 108(3), 328–337. [http://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00659-2](http://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00659-2)
- Wang, T.-H., & Young, W.-B. (2005). *Study on residual stresses of thin-walled injection molding. European Polymer Journal*, 41(10), 2511–2517. <http://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.04.019>
- Hassan, H., Regnier, N., Pujos, C., & Defaye, G. (2009). *3D Study on the Effect of Process Parameters on the Cooling of Polymer by Injection Molding. Polymer*, 112(5), 2988–2998. <http://doi.org/10.1002/app>
- Tutar, M., & Karakus, A. (2010). *Computational Study of the Effect of Governing Parameters on a Polymer Injection Molding Process for Single-Cavity and Multicavity Mold Systems. Journal of Manufacturing Science and Engineering*. <http://doi.org/10.1115/1.4000620>
- Xie, P., Guo, F., Jiao, Z., Ding, Y., & Yang, W. (2014). *Effect of gate size on the melt filling behavior and residual stress of injection molded parts. Materials & Design*, 53, 366–372. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.071>
- Azaman, M. D., Sapuan, S. M., Sulaiman, S., Zainudin, E. S., & Khalina, A. (2014). *Numerical simulation analysis of the in-cavity residual stress distribution of lignocellulosic (wood) polymer composites used in shallow thin-walled parts formed by the injection moulding process. Materials & Design*, 55, 381–386. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.041>
- Ozcelik, B., & Sonat, I. (2009). *Warpage and structural analysis of thin shell plastic in the plastic injection molding. Materials & Design*, 30(2), 367–375. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.04.053>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2016-10-13

.(Brandau & Container, 2012) no la encontré en mi base de datos, ustedes lo deben tener

Callister, W. D. (2007). Materials Science and Engineering An Introduction (Seventh Ed). New York: John Wiley & Sons.

FIRMA ESTUDIANTES

Mary Luz Barranjos Rivera.

Nelson Dario Zuleta S.

FIRMA ASESOR



FECHA ENTREGA: _____

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO _____ ACEPTADO _____ ACEPTADO CON MODIFICACIONES _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____