

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

Análisis de interacción de variables en el proceso de inyección de piezas plásticas de pared gruesa y delgada.

Luciano José Santa Pulgar

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

Asesor
Carlos Andrés Vargas Isaza

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM
Facultad de Ingenierías
Departamento de Electromecánica y Mecatrónica
Medellín, Colombia
2022

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

RESUMEN

En un proceso de inyección de plásticos intervienen muchas variables que son motivo de estudio, con el cual se busca tener los mejores resultados para finalmente poder garantizar un producto de buena calidad, estas diferentes condiciones hacen que se presente una gama muy amplia de valores de presión, temperatura y tiempo. Para ello se debe tomar ciertos niveles predeterminados de presión, tiempo de inyección, tiempo de empaque, presión de empaque y analizar cuáles serían las mejores características mecánicas que permitan reducir deformaciones en una Pieza de Pared Gruesa (PPG) y una de Pared Delgada (PPD), buscando además mejores tiempos de producción, minimizar deformaciones como las contracciones después del enfriamiento, las líneas de unión, llenado incompleto y otras más.

La calidad de una pieza moldeada depende de sus parámetros y sus interacciones con diferentes rangos de sensibilidad, esto es necesario resolverlo mediante el uso de un diseño experimento (DOE), para permitir modelar la simulación del proceso de inyección.

Para el caso del presente trabajo se empleará el software Moldex 3D, inicialmente simulando un tiempo que garantice el llenado completo de la pieza de análisis y que permita evaluar las diferentes condiciones de calidad del producto inyectado, tales como contracciones, deformaciones, líneas de unión[1] , [2] entre otros factores. Lo anterior evaluado en dos escenarios de tipos de piezas de inyectadas, piezas de espesor delgado y grueso, buscando evaluar los resultados de deformaciones y esfuerzos residuales de la pieza inyectada a partir de diferentes condiciones de procesamiento.

Palabras claves: Inyección de plásticos, simulación, esfuerzos residuales, contracciones, deformaciones.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

RECONOCIMIENTOS

Agradezco al profesor Carlos Vargas por todo el apoyo y acompañamiento en todo el proceso del trabajo. También agradezco al ITM por las herramientas brindadas para la elaboración del trabajo, como el software y equipos de soporte remoto.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	5
2.	MARCO TEÓRICO	7
3.	METODOLOGÍA	11
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
5.	Trabajos futuros.....	49
	REFERENCIAS	50

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

1. INTRODUCCIÓN

El plástico es un material que ha demostrado tener un sin número de aplicaciones en todas las ramas de la industria, con una gran diversidad de compuestos, con los cuales se varían las propiedades finales y específicas para cada uso, llegando a reemplazar partes de máquinas que anteriormente solo eran metálicas. Por lo tanto seguirá siendo motivo de estudio para continuar innovando y mejorando las tendencias tecnológicas en una industria cada vez más exigente.

Como en todos los procesos industriales, siempre se estará buscando la manera de mejorar y optimizar la producción para poder tener unos resultados que permitan mayor rendimiento, es decir, disminución de tiempo con menores pérdidas[2], las piezas plásticas sin deformación son beneficiosas para la industria, ya que reducirán el consumo de costos durante el proceso de ensamblaje[3], lo cual se traduce en una tendencia a una optimización del 100% en calidad.

Para la fabricación de piezas, el proceso de moldeo por inyección de plástico es una técnica muy versátil en la industria, destacándose la inyección de Piezas de Pared Delgada (PPD) y Piezas de Pared Gruesa (PPG), no obstante en muchos casos se desconoce la forma adecuada para procesar piezas tan diversas y el efecto obtenido durante su proceso de inyección con sus diferentes variables de temperatura, presión, tiempos de llenado, de empaquetado, y la calidad con la que la pieza es producida finalmente.

Por este motivo, se realizará un análisis de simulación para cada caso de las piezas (De pared gruesa y delgada) y así encontrar y analizar las diferencias en su procesamiento y efectos en la calidad de la pieza inyectada.

OBJETIVOS

General

Analizar la interacción de variables del proceso de inyección de piezas plásticas de pared gruesa y delgada mediante un diseño experimento estadístico factorial.

Específicos

- Establecer las variables que influyen en la calidad de piezas inyectadas para geometrías de espesores gruesos y delgados.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

- Determinar las variables de respuesta relacionadas con la mejora en la calidad de piezas inyectadas para geometrías de espesores gruesos y delgados.
- Determinar una técnica de análisis de interacción de variables que afectan la calidad de piezas inyectadas para geometrías de espesores gruesos y delgados.
- Evaluar por simulación computarizada las condiciones óptimas que permite obtener una pieza inyectada de pared gruesa y delgada de buena calidad.

Organización de la tesis

En el marco teórico se dará una breve explicación de cómo funciona específicamente el proceso de inyección del plástico en el molde, con sus diferentes etapas. En la simulación se ingresarán primeramente datos para realizar el modelo de experimento que permita ingresar las variables necesarias para que el proceso funcione y poder ejecutar el programa.

El Software de simulación de inyección de plástico tiene como objetivo ilustrar tanto gráfica como numéricamente los valores en los cuales se puedan definir los tiempos y presiones que optimicen la producción de la pieza de estudio. Este programa utiliza algoritmos complejos basados en volúmenes finitos, lo cual eleva su grado de importancia en cualquier aplicación de la industria de inyección de plásticos.

En la metodología se detalla en qué condiciones y circunstancias se procederá a realizar la simulación, justificando los valores que se tendrán en cuenta al momento de ejecutar el programa, de tal manera que se enfoque hacia los objetivos.

Se explica en los resultados, lo que el experimento de simulación arrojó con los parámetros ingresados al programa para poder sacar las conclusiones pertinentes.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO		Código	\$CODIGO
			Versión	\$VERSION
			Fecha	\$FECHA

2. MARCO TEÓRICO

Hoy día existen muchas herramientas que aportan y enriquecen el área de la inyección de termoplásticos tanto en estudios de simulaciones como en casos prácticos de la industria, agregando nuevos resultados, métodos, que buscan un fin común con cada parámetro en que se enfoque. El método Taguchi (propuesto por muchos autores) en el cual se afirma que un producto con calidad se determina por todas las etapas que se tienen que superar para entregarlo finalmente, desde su diseño, producción y entrega, basándose para ello en la estadística con numerosos factores que evitan innumerables experimentos y reducen variables no controladas, ya que se centra en la identificación y evaluación de variables que tienen más influencia en un proceso. Este método se utilizó para un estudio de proceso de inyección de pared delgada en una aleta de válvula de mariposa y de pared gruesa para el eje de ésta válvula, enfocándose en la tasa de deflexión, la contracción volumétrica y la deformación debido a la contracción, permitiendo entonces tener en cuenta parámetros como la temperatura del molde, temperatura de fusión, tiempo de inyección, tiempo de empaquetado, presión de empaque y tiempo de enfriamiento, en el cual se determinó que los principales parámetros que se deben tener en cuenta para una mejor calidad en un proceso de inyección son la temperatura del molde, la temperatura de fusión, el tiempo de empaque y la presión de empaque [4].

Algunas simulaciones se extienden más allá de dichos parámetros en busca de nuevas alternativas y multiplicidad de aplicaciones, llevando consigo a la necesidad de agregar elementos al polipropileno.

Este factor puede influir notoriamente en el producto obtenido, haciendo variar la resistencia a la tracción y al desgaste, como en el caso específico de la simulación del proceso de inyección de un revestimiento de prótesis de cadera, en primera instancia con un modelo experimento de Diseño Factorial Fraccionado (FFD)[5], realizado con el programa Autodesk Moldflow en la que se analiza también el comportamiento para dos diferentes espesores del material, concluyendo que cuando se aumenta la temperatura de fusión y se disminuye el tiempo de empaque, la contracción volumétrica se hace mayor, mientras que si se disminuye la temperatura de fusión y el tiempo de empaque, la deformación aumenta obligando a buscar ese punto de conveniencia en el cual la deformación y la contracción sean mínimos. Para hacer un complemento y darle ampliación a los resultados de la aplicación del revestimiento de prótesis de cadera, se realizó otro trabajo en el cual el método matemático utilizado fue un modelo de Función de Base Radial (RBF), en el cual se buscó optimizar la contracción volumétrica y la deformación, con mejores resultados, ya que al ser un modelo no lineal, estos resultados fueron más precisos que el método anterior[6].

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

En el presente trabajo se realizará la simulación con un punto de inyección, ya que es la mejor manera en comparación con múltiples puntos de inyección, además los parámetros se basan en la acumulación de experiencias y métodos de ensayo y error, permitiendo ahorrar tiempo y dinero[2].

Se analizará el comportamiento de las tensiones residuales, factor de propagación de contracciones, deformaciones y posibles fallas prematuras en la pieza inyectada al aplicar cargas mecánicas externas durante su uso final. En este caso, la aplicación de los modelos de simulación matemáticos son la única opción para predecir las tensiones residuales, las cuales, siempre van a estar presentes en las piezas plásticas[7]. Por lo tanto es importante ver los efectos de cambios significativos en el espesor de las piezas (de pared delgada y de pared gruesa), lo cual es el propósito del presente trabajo.

Con estos parámetros, métodos numéricos y sus respectivas conclusiones en cada trabajo de simulación citado, se tiene una directriz con diversas referencias que se pueden comparar en los resultados, lo cual es importante para ver los efectos de cambios significativos en el espesor de las piezas.

El panorama de trabajos e investigaciones publicadas, muestra que hay una gran cantidad de temas que se deben abordar en los análisis y simulaciones de inyección de plásticos, un sondeo con palabras clave relacionadas con el proceso de inyección, evidencia los temas en que hay menos publicaciones como son la deformación volumétrica y piezas de pared delgada y de pared gruesa (Tabla 1). Adicionalmente se grafica para ilustrar didácticamente a modo de estado del arte del proceso de simulación de inyección de plásticos.

Tabla 1. Datos consultados en Elsevier de la base de datos Scopus con palabras clave del proceso.

	Total documentos encontrados	Web Pages	Books	Journal
Injection Molding	6542	1141	5330	59
Volumetric Shrinkage	1590	120	1457	11
Sink mark Depth	17061	3245	13138	621
Mold Temperature	5124	272	5085	50
Melt temperatura	5424	285	5085	50
Injection Time	12088	3091	8643	286
Packing Time	12678	3136	9185	289
Packing Pressure	5531	560	4913	47
Cooling Time	12695	3121	1210	296
thinck wall, thin wall	4215	304	3864	40

En la tabla 1 se tienen las cantidades de publicaciones arrojadas por la base de datos de Scopus.

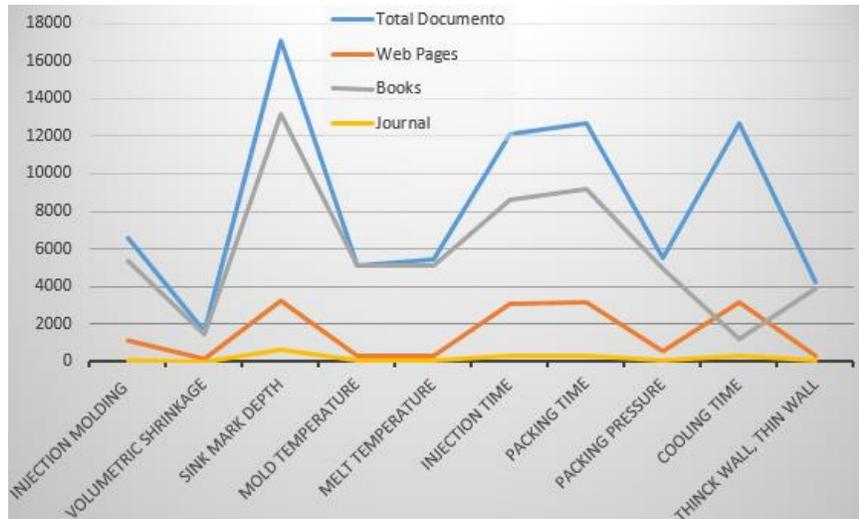


Figura 1. Gráfica de palabras clave según categorías de libros, páginas Web y revistas científicas, consultadas en la base de datos de Scopus de ELSEVIER.

En la Figura 1 se pueden observar las publicaciones con mayor y menor cantidad, graficadas según los resultados obtenidos de la Tabla 1.

Este documento dará un aporte de análisis en esfuerzo residual, deformación, presión de empaque, realizado en piezas de pared gruesa y piezas de pared delgada que también se encuentra entre los documentos menos publicados.

El proceso de inyección de termoplásticos, permite dar una forma deseada a una resina plástica, sometida a una temperatura previamente establecida que la funde (es decir en estado líquido) facilitando su empuje por medio de un tornillo sinfín desde la cámara de inyección hacia todos los rincones del molde, el cual luego de un tiempo de enfriamiento se abre para que la pieza sea expulsada.

Básicamente se presentan unas etapas en este proceso, conocidas como llenado, empaque, enfriamiento y expulsión.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

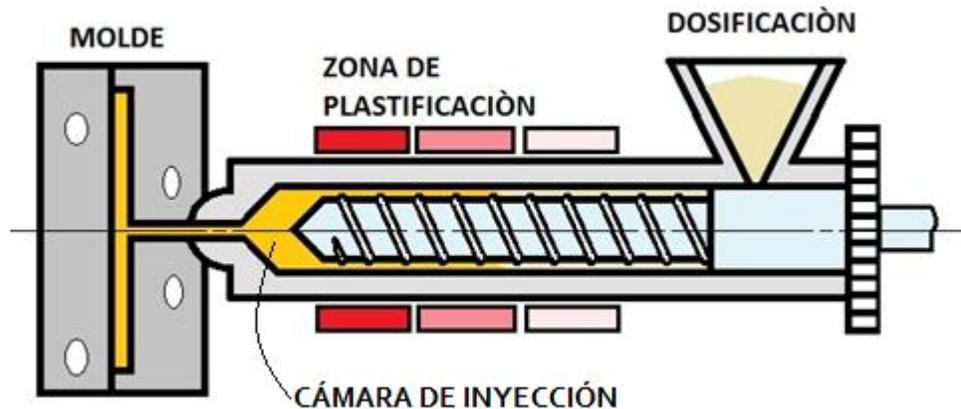


Figura 2. Diagrama básico del proceso de inyección.

En la figura 2, se aprecia el recorrido que realiza el plástico, desde el momento en que ingresa por la dosificación y es llevado con ayuda mecánica de un tornillo sinfín primeramente a la zona de plastificación, donde se funde por aumento de la temperatura para luego ser inyectado a la cavidad del molde. A partir de la zona de plastificación empiezan a regir los parámetros que son motivo de estudio del presente trabajo, como son la temperatura de inyección ($T_{iny} [^{\circ}C]$), temperatura del molde ($T_c [^{\circ}C]$), tiempo de empaque ($t_{emp} [s]$), tiempo de enfriamiento ($t_{enf} [s]$), tiempo de inyección[s], Presión de empaque ($P_{emp} [Bar]$).

Etapa de llenado, una vez el molde es cerrado, se inicia el ciclo de fusión del material derriéndolo en la zona de plastificación, generando un flujo homogéneo que se ubica en la cámara de inyección con accionamiento del tornillo sinfín, desplazando el polímero hacia el interior del molde e introduciéndose en todas sus cavidades, en esta etapa el material fundido pierde temperatura al hacer contacto con las paredes del molde, esto obliga a que el llenado se haga en un corto tiempo definido por medio de un análisis de estudio que puede marcar diferencias en segundos o decimas de segundos para el tiempo de llenado.

La temperatura de llenado es muy importante, ya que podría variar los resultados, como son un bajo flujo de material que daría piezas de llenado incompleto, aumento o disminución de la presión debido a que a altas temperaturas el flujo del plástico requiere menos presión y a medida que la temperatura es más baja, se solidificaría y por ende la presión necesaria debe aumentarse. Por lo tanto se busca que haya un equilibrio que sea suficiente para que la temperatura y la presión no tengan que ser tan alta para que optimice los costos de una posible producción.

Etapa de Empaque, seguidamente del llenado, se procede a aumentar la presión de llenado para garantizar que el flujo llegue a todas las cavidades del molde, lo cual requiere de unas presiones muy grandes bajo ciertas condiciones, por ser un material viscoso que rápidamente se enfría y puede obstaculizar su desplazamiento, haciendo que su masa se compacte, lo que aumentaría su

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

densidad, además que con esto se evitan deformaciones ocasionadas por las contracciones del material durante su solidificación.

Esta etapa requiere también de un análisis de estudio, ya que, a presiones bajas, el molde podría no alcanzar a llenarse y a presiones demasiado elevadas, generaría daños al proceso o sobrecostos innecesarios en la producción, afectada incluso también con diferencias de décimas de segundo de empaque.

Cuando se llena el volumen en el molde, se llega a la presión de llenado o de inyección, a partir de aquí la presión que se adiciona es la llamada presión de empaque.

Etapa de Enfriamiento, se puede decir que esta etapa comienza inmediatamente con el llenado ya que, el contacto del material con las paredes del molde baja la temperatura del fluido, pero para efectos de estudio y orden consecutivo de los tiempos, se determinará luego del tiempo de empaque, denominándose tiempo restante de enfriamiento.

No se requiere que la temperatura final de enfriamiento llegue a la temperatura del molde o de ambiente, esta etapa se podría decir que es más lenta pues la disipación del calor empieza por las capas más externas.

Además, la molécula de un polímero cuando se encuentra a alta temperatura y velocidad, esta se estira y orienta en la dirección de flujo y en estado de reposo o de baja temperatura (fría) se halla recogida o menos alargada, este comportamiento se tendrá en cuenta en el análisis de resultado de dicha simulación, ya que la etapa de enfriamiento podría afectar tanto el proceso como la calidad de la pieza.

Etapa de expulsión, esta etapa se ejecuta al alcanzar la temperatura de expulsión, el cual es uno de los parámetros para determinar el tiempo de enfriamiento de la pieza en el molde. Una vez expulsada la pieza del molde, puede someterse nuevamente a otra inyección del plástico, haciendo repetir el ciclo. En este modelo propuesto de simulación no será necesario tener en cuenta esta etapa, ya que hará parte de las condiciones de una máquina, en este trabajo solo se analizarán temperaturas, presiones y tiempos arrojados por las iteraciones que se le ingresen al programa[8] , [9].

3. METODOLOGÍA

Moldex3D es un poderoso programa de simulación usado en la industria de moldeo por inyección de plásticos, el cual apoya simulando una amplia gama de aplicaciones que incluye factores externos como temperatura, inyección asistida

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

por gas, refrigeración por agua, orientación de la fibra para materiales compuestos como la fibra de vidrio o incluso materiales poliméricos de un solo compuesto como el policarbonato, el cual será el que se utilizará en el presente trabajo.

El programa de simulación Moldex-3D utiliza un método basado en la Fluidodinámica computacional, soportado en el método de volúmenes finitos que entrega datos puntuales del flujo térmico, permitiendo hacerle un seguimiento para cualquier instante de tiempo o de las variables que sean motivo de estudio[10].

Con el programa Moldex3D se puede visualizar eficazmente cómo afecta el tiempo de llenado de una pieza al proceso de inyección, el cual sirve para ingresar las otras condiciones motivo de análisis, se extraerán los valores del desplazamiento térmico o deformación [mm] y el esfuerzo residual [MPa] tomados en dos puntos diferentes de la pieza, tanto para la de pared delgada como para la de pared gruesa.

El material a inyectar utilizado en las simulaciones es un Policarbonato de referencia Lexan 144R de General Electric, sus propiedades térmicas, reológicas y mecánicas se encuentran en la base de datos del software para de esta forma poder calcular todos los resultados requeridos en el presente análisis.

Tabla 2, Valores de referencia para el policarbonato tomados de la ficha técnica[11].

Injection	Nominal Value Unit
Drying Temperature	121 °C
Drying Time	3.0 to 4.0 hr
Drying Time, Maximum	48 hr
Suggested Max Moisture	0.020 %
Suggested Shot Size	40 to 60 %
Rear Temperature	271 to 293 °C
Middle Temperature	282 to 304 °C
Front Temperature	293 to 316 °C
Nozzle Temperature	288 to 310 °C
Processing (Melt) Temp	293 to 316 °C
Mold Temperature	71.1 to 93.3 °C
Back Pressure	0.345 to 0.689 MPa
Screw Speed	40 to 70 rpm
Vent Depth	0.025 to 0.076 mm

Los valores de referencia tenidos en cuenta en el presente trabajo para la simulación de inyección del policarbonato son tomados en relación a la ficha técnica del mismo [11] en la Tabla 2 se aprecia una parte de la ficha que muestra rangos de valores del material para su procesamiento por inyección.

Se evaluaron dos geometrías una Pieza de Pared Delgada (PPD) de espesor 1.5mm y otra Pieza de Pared Gruesa (PPG) de espesor 3.7mm. La configuración del molde de inyección se presenta a continuación en la Figura 3, con un sistema de dos cavidades y enfriamiento de canales de igual forma tanto en el lado móvil como en el lado fijo del molde.

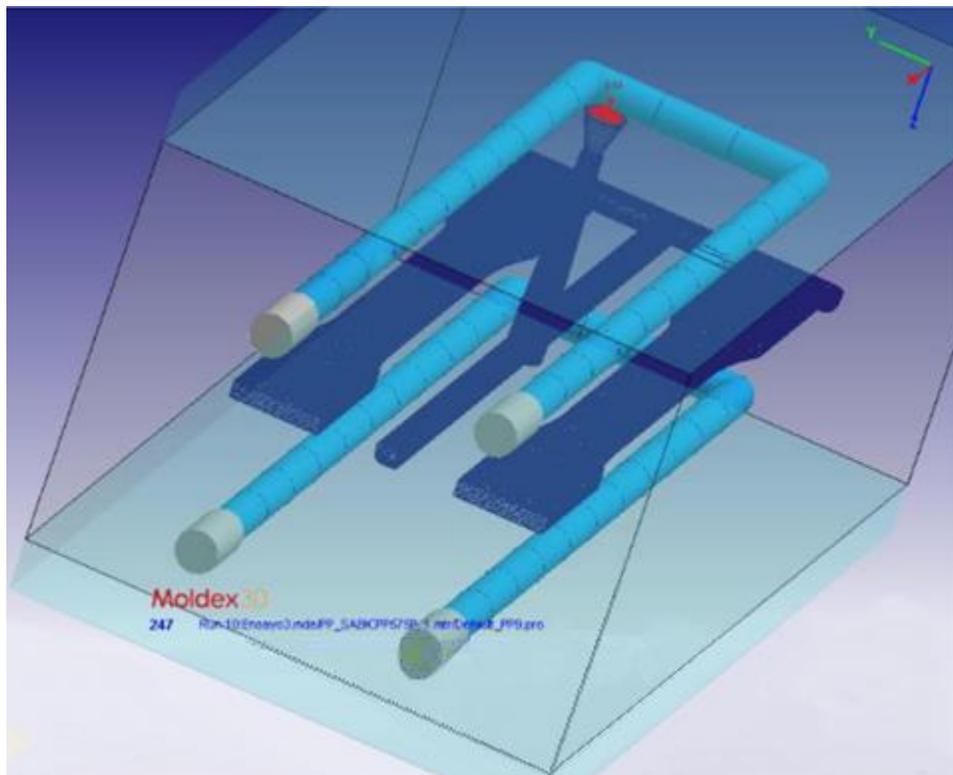


Figura 3 Molde simulado y distribución de canales de enfriamiento

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

En la Figura 3 se observa la pieza generada por el programa de simulación Moldex 3D dentro del molde, con un punto de inyección a cada cavidad y los respectivos canales de enfriamiento. Al tener un solo punto de alimentación de la inyección, se genera un solo frente de flujo, generando un contorno casi circular a medida que el flujo avanza dentro de la cavidad en dirección del final del molde, haciendo que la masa fundida adopte la forma de la pieza[12], con lo cual, no habrá posibilidad de presentar líneas de unión ocasionadas por choque entre dos o más frentes de flujo del material fundido, esto se puede apreciar en las Figuras 5, 6 y 7 para la PPD y en la Figura 9 de la PPG, en donde, para cada una corresponde un solo frente de flujo.

Para cada caso de espesores, se generó una malla de volúmenes finitos en la cual se tuvieron mínimo 6 elementos en el espesor de la pieza (Figura 4). Este refinamiento de malla ha permitido obtener resultados con mayor precisión de acuerdo a estudios similares[13], que además recomiendan que los elementos en el espesor sean de 5 a 7 para dar resultados más confiables en esfuerzo residual y deformación[14].

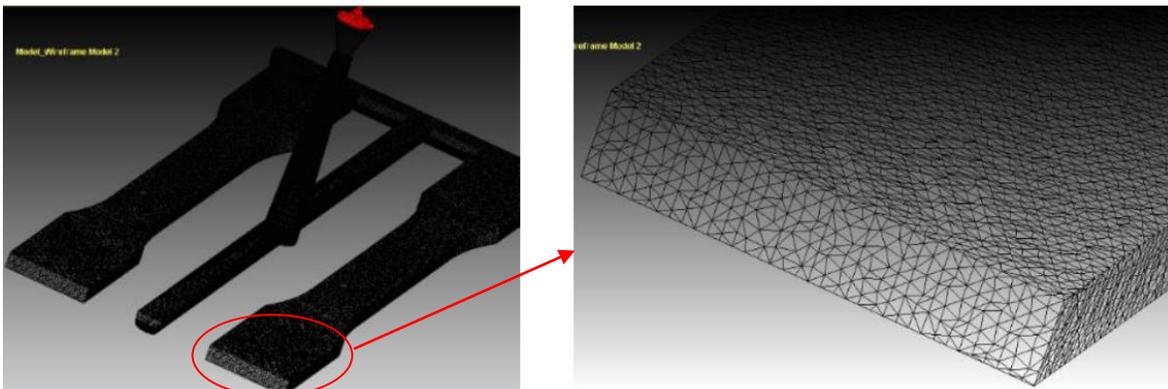


Figura 4, Malla de volúmenes finitos empleada en la simulación

Habiendo seleccionado el tipo de moldeo, el cual es por inyección, el programa Moldex3D permite generar el refinamiento de malla de volúmenes finitos Figura 4. Se ubicará un punto (nodo) en el extremo y otro nodo central para cada pieza, estos puntos tienen un número de referencia dado por el programa, diferente para cada pieza, ya que obedece al diseño previo de cada una.

Una vez hecha la simulación, los valores se extraerán uno a uno para ingresarse en una tabla con sus respectivas condiciones de trabajo durante el proceso de inyección.

Los valores obtenidos se agruparán teniendo en cuenta iguales valores de temperatura de llenado, tiempo de enfriamiento, temperatura del molde, presión de empaque, tiempo de empaque. Estos datos se ingresarán en un archivo de Excel

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

para poderlos graficar, analizar y luego poder sacar las respectivas conclusiones de toda la simulación.

Las variables de entrada establecidas en el análisis del software de simulación se establecieron de acuerdo con información recopilada y analizada, la cual se presenta a continuación.

El tiempo de enfriamiento ($t_{enf}[s]$) es una variable fundamental que no solo determina el tiempo de procesamiento de piezas plásticas por inyección, sino que define características de calidad de la pieza inyectada como contracciones y deformaciones finales de esta[15]. De igual forma la presión y el tiempo durante el cual se aplica la fase de empaque ayudan a reducir las contracciones, deformaciones y esfuerzos residuales finales de la pieza inyectada[15] ,[16] ,[17]. En este caso, para el presente estudio se evaluarán estas variables en rangos recomendados para el material inyectado de la siguiente forma:

Tiempo de enfriamiento ($t_{enf}[s]$): se tomará como punto de referencia el cálculo analítico de tiempo de enfriamiento de una sección rectangular de acuerdo con la siguiente ecuación y es punto de referencia en el cual se ajustan los tiempos de enfriamiento cuando se realiza la puesta a punto en moldes de inyección[18]:

$$t_{enfT} = \left(\frac{e^2}{\pi^2 * Dif} \right) * Ln \left(\frac{8 * (Ti - Tc)}{\pi^2 * (Te - Tc)} \right) \quad (1)$$

Donde:

t_{enfT} : tiempo de enfriamiento total [s].

E: Espesor de la pieza inyectada [mm].

Pi: número π .

Dif: Difusividad térmica efectiva del material [mm^2/s].

Ti: Temperatura de inyección promedio [$^{\circ}C$].

Tc: Temperatura promedio cavidad del molde [$^{\circ}C$].

Te: Temperatura promedio de expulsión de la pieza inyectada [$^{\circ}C$].

Ya que las temperaturas de molde y de expulsión son promedios y dependen del proceso como tal, se tomaron valores recomendados para el material, así mismo se tomó una temperatura de inyección recomendada para este[11].

De esta forma para la pieza de pared gruesa se calcularon tiempos de 20.8s y 13.4s, correspondientes a una temperatura de molde recomendada del material ($80^{\circ}C$) y otra fuera del rango recomendado ($50^{\circ}C$) para ver su efecto en las variables de respuesta, con una temperatura de inyección de $300^{\circ}C$, el resultado del cálculo del $t_{enfT}[s]$ corresponde al tiempo de llenado de la cavidad ($t_{llenado} [s]$)

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

más el tiempo de empaque ($t_{emp}[s]$), más el tiempo restante de enfriamiento ($t_{enf}[s]$), así:

$$t_{enfT} [s] = (t_{llenado} + t_{emp} + t_{enf}) [s].$$

Con estos cálculos de referencia y de acuerdo a estos resultados, se estiman rangos de tiempos que se toman antes y después de ellos, desde $t_{enfT} = 12.5s$ hasta $23.7s$, en los cuales se evalúa la deformación y el esfuerzo residual.

En el caso de la PPD como se explicará más adelante al tener un menor espesor se trabajó con una temperatura de molde de $95^{\circ}C$, para evitar una solidificación previa del material durante la inyección, de esta forma el tiempo de enfriamiento aproximado es de $7.3s$. La temperatura de expulsión ($100^{\circ}C$) se define a partir de la temperatura de deflexión bajo carga (deflection temperature under load, T_d)[11], que es la temperatura a partir de la cual el material ya solidificado comienza a presentar una cierta rigidez, normalmente como referencia en inyección de plásticos se toma la temperatura de expulsión como la $T_d - 20^{\circ}C$, de esta forma al expulsar la pieza por medios mecánicos, no se deformará la pieza durante este proceso, ya que, se encuentra rígida y dimensionalmente estable. La temperatura de inyección del material se aplicó a $305^{\circ}C$, el cual es un valor medio dentro del rango recomendado del material.

Las presiones de empaque no tienen un criterio físico que defina su magnitud, en la práctica del procesamiento de inyección de plásticos se establece que estos niveles de presiones deben ser por lo menos en un nivel similar (mayor o igual) a la presión de inyección requerida para llenar el volumen de la cavidad durante la fase de llenado. Para el caso de las simulaciones preliminares realizadas, las presiones de inyección fueron alrededor de 40 bar ; sin embargo, exceder niveles muy altos con respecto a la presión de inyección se ha encontrado que generan presiones internas muy altas dentro del material que pueden generar fallas posteriores en la pieza inyectada[19]. Los tiempos de empaque si es posible mediante simulación establecerlos, conociendo lo que se conoce como tiempo de solidificación del punto de inyección a la cavidad del molde. Se evalúan entonces diferentes tiempos de empaque y se mide la cantidad de material que ingresa a la cavidad del molde en gramos, el tiempo en el cual se estabiliza el incremento de masa indica que ya se está solidificando el punto de inyección y por lo tanto al aplicar más tiempo de empaque no implica más entrada de material a la cavidad del molde. De acuerdo con este criterio, en la pieza de pared delgada a partir de los 5 a 6 segundos de empaque, no se registra un incremento significativo de

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

material en la cavidad. De igual forma para la PPG realizando este mismo análisis se requieren entre 6 a 8 segundos de tiempo de empaque.

Para los siguientes análisis, el tiempo de enfriamiento $t_{enf}[s]$ es realmente el tiempo restante de enfriamiento, ya que el tiempo de enfriamiento calculado en la ecuación (1) es la suma del tiempo de llenado, de empaque y el tiempo restante de enfriamiento. Para este análisis se tienen separados, ya que el tiempo de empaque es una variable de interés y que tiene influencia en las variables de respuesta.

Adicionalmente, se realizará una evaluación de la interacción de las variables del proceso en las variables de respuesta empleando el software minitab, que permitirá visualizar cuales variables del proceso y su interacción tienen un mayor efecto sobre las variables de respuesta, con estas gráficas se puede apreciar un comportamiento confiable de las respuestas y su interacción, tal como lo realizan en documentos publicados en esta área de estudio [13],[20], [21].

DETERMINACIÓN DE VALORES DE LLENADO DEL MOLDE PARA LA PIEZA DE PARED DELGADA (PPD).

El llenado es el ingreso del material fundido al interior del molde, este paso se debe definir para garantizar que el material ingrese a todas sus cavidades, por lo tanto un análisis preliminar se debe realizar a las simulaciones que entregan los valores de las variables de respuesta (esfuerzo residual y deformaciones), pues de lo contrario los resultados obtenidos no serán coherentes.

MOLDEX 3D, permite simular con diferentes tiempos de llenado cual es el tiempo o velocidad de moldeo por inyección que hace más eficaz el proceso, se tomarán 3 tiempos para dicha simulación, del resultado se implementará el más eficiente para la simulación de inyección, se le ingresarán datos con tiempo $t_{llenado}$ de 0.5s, 0.3s y 0,2s.

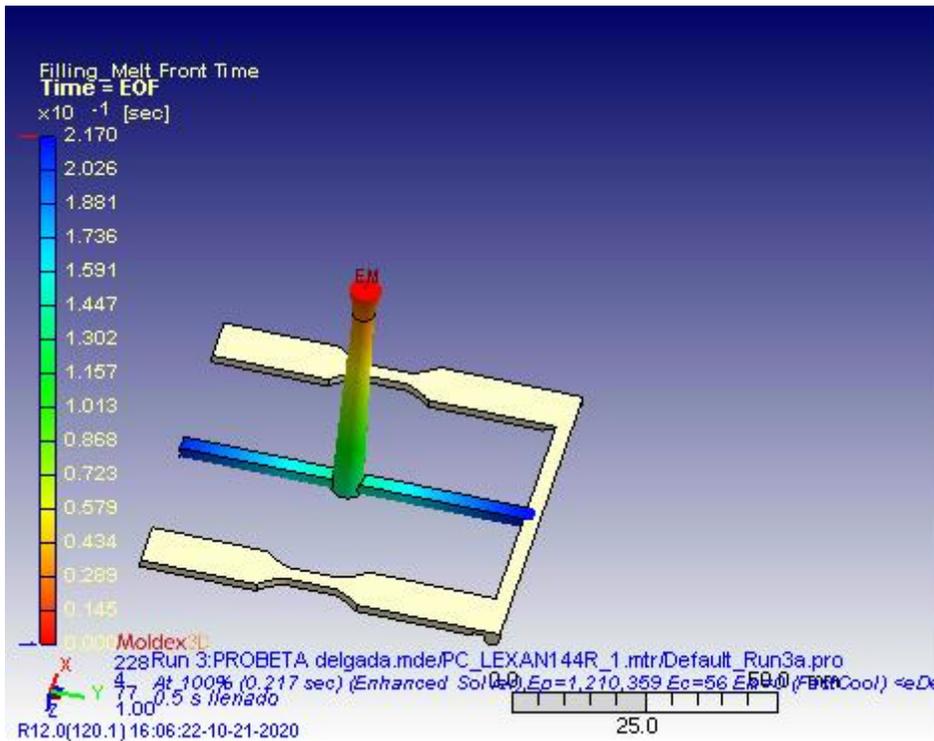


Figura 5, Alcance de llenado de la pieza con $t_{\text{llenado}} = 0.5\text{s}$.

En la figura 5 con un tiempo $t_{\text{llenado}} = 0.5\text{s}$, se observa que el flujo plástico no llega a las cavidades del molde, en color azul se muestra que el plástico apenas alcanza a llenar el canal de alimentación del molde (en la simulación es apreciable que el frente de flujo tiene una forma circular).

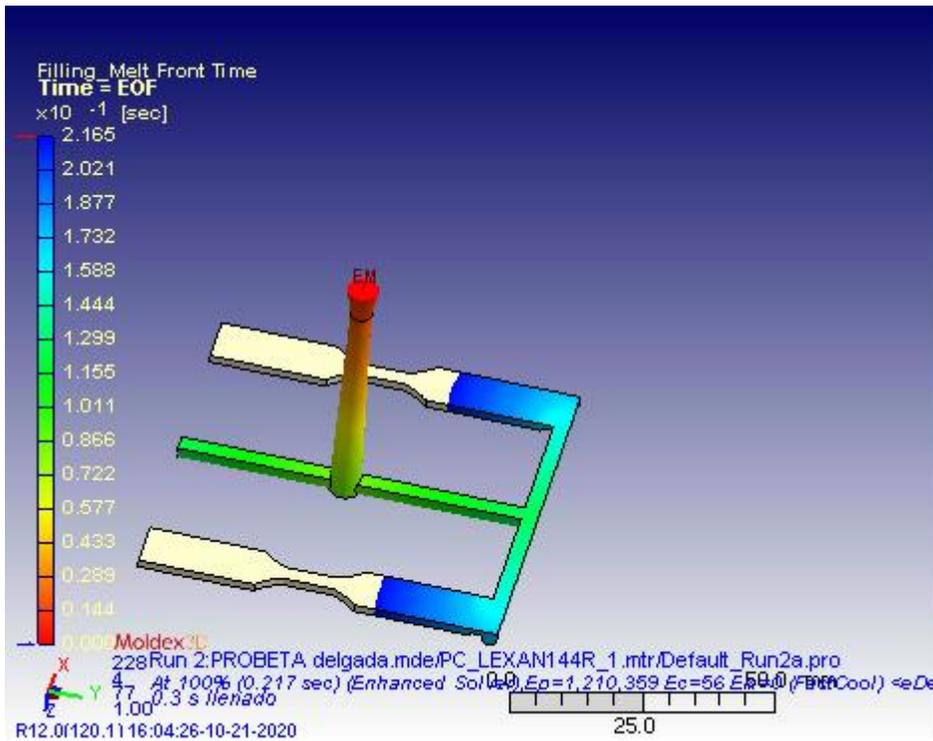


Figura 6, Alcance de llenado de la pieza con $t_{\text{llenado}} = 0.3\text{s}$.

En la figura 6 con un tiempo $t_{\text{llenado}} = 0.3\text{s}$, muestra que el flujo (en azul) avanza hasta ingresar en el cuerpo de la probeta, pero no lo llena completamente, en cada pieza el frente de flujo es único.

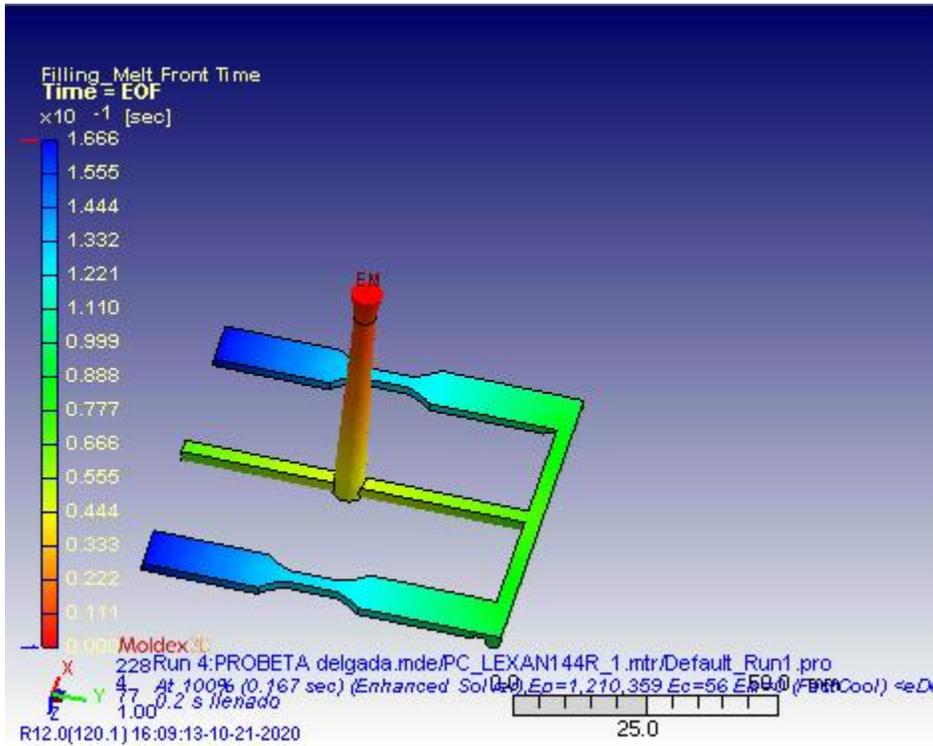


Figura 7, alcance de llenado de la pieza con un tiempo $t_{\text{llenado}} = 0.2\text{s}$.

En la figura 7 con un $t_{\text{llenado}} = 0.2\text{s}$, se observa que el llenado es completo, con lo cual, se concluye que a menor tiempo de llenado mayor se da la eficiencia del moldeo, esto se puede dar debido a que la pieza al ser delgada se debe inyectar lo más rápido posible para evitar un enfriamiento y solidificación prematura del material mientras se llena la cavidad.

Con base a este diseño de experimento se toma un tiempo de inyección de 0,2s para las simulaciones que garantizarán el llenado completo de la pieza de pared delgada.

Con una temperatura de inyección de 305°C, un tiempo de llenado $t_{\text{llenado}} = 0.2\text{s}$ y una temperatura de molde $T_c = 95^\circ\text{C}$, este valor se toma con base a recomendaciones del material, Tabla 2 y la ficha técnica [11].

Se introducirán presiones de empaque de 40bar, 60bar y 80bar para 3 tiempos de empaque de 2s, 3,7s y 6s, cada uno de los cuales tendrá un tiempo de enfriamiento restante de 2.7s, 5s y 7.5s. Los anteriores valores se tomaron de acuerdo con rangos recomendados para el material y simulaciones preliminares.

Se obtiene así un diseño factorial con 27 puntos de análisis agrupados en 9 graficas con tres diferentes resultados cada uno. Estos datos se introducirán al programa MOLDEX 3D, el cual se encuentra en una computadora del ITM a la que se tiene acceso por vía remota y presencial, con asesoría del profesor de la institución Carlos Vargas.

Se tomaron 2 puntos (nodos) en la pieza, uno en el extremo y el otro en su interior, aproximadamente en el centro de la probeta como se muestra en la figura 8, esta referencia de estos puntos los da el programa y se escogieron para analizar el comportamiento de las deformaciones y los esfuerzos en dos zonas de la pieza diferentes, para analizar diferencias en los resultados.

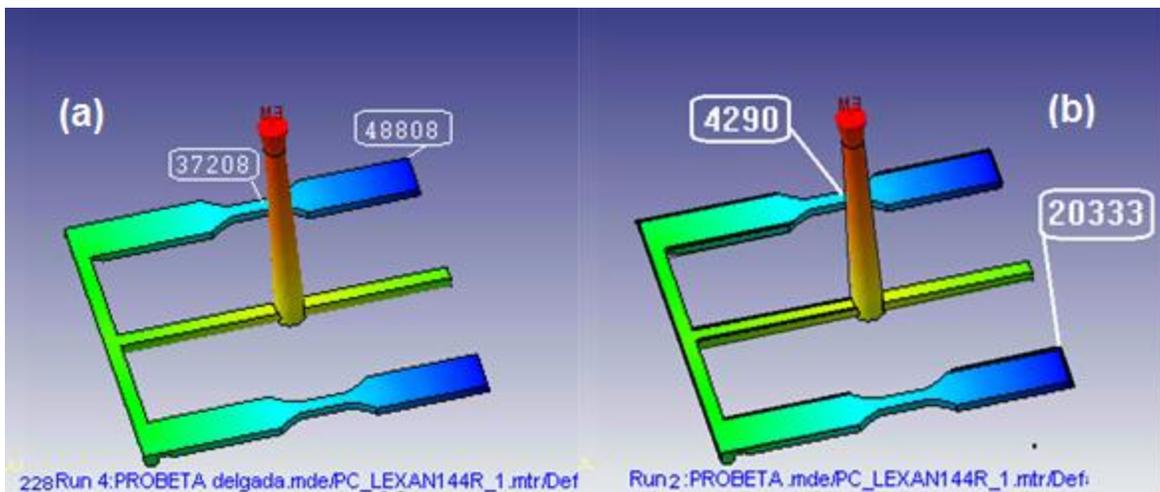


Figura 8 Ubicación de los puntos de análisis para cada pieza.

En la Figura 8, se observan los puntos con su respectivo número de referencia arrojado por el programa Moldex3D, en la PPD (a) y la PPG (b), uno en el centro y otro en el extremo para cada pieza.

Luego de la simulación del programa, se extraerá para cada condición el desplazamiento térmico total, el cual arrojará información referente a la Deformación (Def [mm]) de la pieza de estudio y el *thermal stress von-miss* que es el Esfuerzo Residual (Esf Res [MPa]).

TABLA 3, TIEMPO Y PRESIÓN DE EMPAQUE PARA CADA CONDICIÓN EN PIEZA DE PARED DELGADA (PPD).

Condición	Tiempo de empaque(s)	Presión de empaque (Bar)	Tiempo restante de enfriamiento [s]
1	2	40	2.7
2	2	40	5
3	2	40	7.5
4	2	60	2.7
5	2	60	5
6	2	60	7.5
7	2	80	2.7
8	2	80	5
9	2	80	7.5
10	3,7	40	2.7
11	3,7	40	5
12	3,7	40	7.5
13	3,7	60	2.7
14	3,7	60	5
15	3,7	60	7.5
16	3,7	80	2.7
17	3,7	80	5
18	3,7	80	7.5
19	6	40	2.7
20	6	40	5
21	6	40	7.5
22	6	60	2.7
23	6	60	5
24	6	60	7.5
25	6	80	2.7
26	6	80	5
27	6	80	7.5

En la Tabla 3 se tienen los valores ingresados a la simulación de la pieza de pared delgada a una temperatura de inyección de 305°C, temperatura de molde de 95°C y un tiempo de llenado de 0.2s. Se tienen las 27 condiciones analizadas, el desplazamiento térmico dado en mm y el esfuerzo residual en MPa para los 2 puntos escogidos en la pieza de análisis citados en la Figura 8 a.

PIEZA DE PARED GRUESA (PPG).

En la Tabla 4, se tienen los valores ingresados a la simulación del proceso para la Pieza de Pared Gruesa (PPG), de los cuales se reportarán las variantes de desplazamiento térmico y esfuerzo residual para los puntos escogidos desde el programa, los que se muestran en la figura 8b.

TABLA 4, TIEMPO Y PRESIÓN DE EMPAQUE PARA CADA CONDICIÓN EN PIEZA DE PARED GRUESA (PPG).

Condición	Tiempo de empaque(s)	Presión de empaque (Bar)	Tiempo enfriamiento restante [s]
1	1.5	40	10
2	1.5	40	15
3	4	40	10
4	4	40	15
5	7.7	40	10
6	7.7	40	15
7	1.5	60	10
8	1.5	60	15
9	4	60	10
10	4	60	15
11	7.7	60	10
12	7.7	60	15
13	1.5	40	10
14	1.5	40	15
15	4	40	10
16	4	40	15
17	7.7	40	10
18	7.7	40	15
19	1.5	60	10
20	1.5	60	15
21	4	60	10
22	4	60	15
23	7.7	60	10
24	7.7	60	15

En la Tabla 4, se tienen las condiciones a evaluar la simulación de la pieza de Pared Gruesa (PPG) a una temperatura de 300°C y un tiempo de llenado de 1s.

Empleando el mismo procedimiento hecho con la Pieza de Pared Delgada (PPD), se hicieron simulaciones preliminares que permitieron establecer los niveles de

presión y tiempo de empaque, así como el tiempo de llenado del volumen de la cavidad del molde.

DETERMINACIÓN DE VALORES DE LLENADO DE MOLDE PARA LA PIEZA DE PARED GRUESA (PPG).

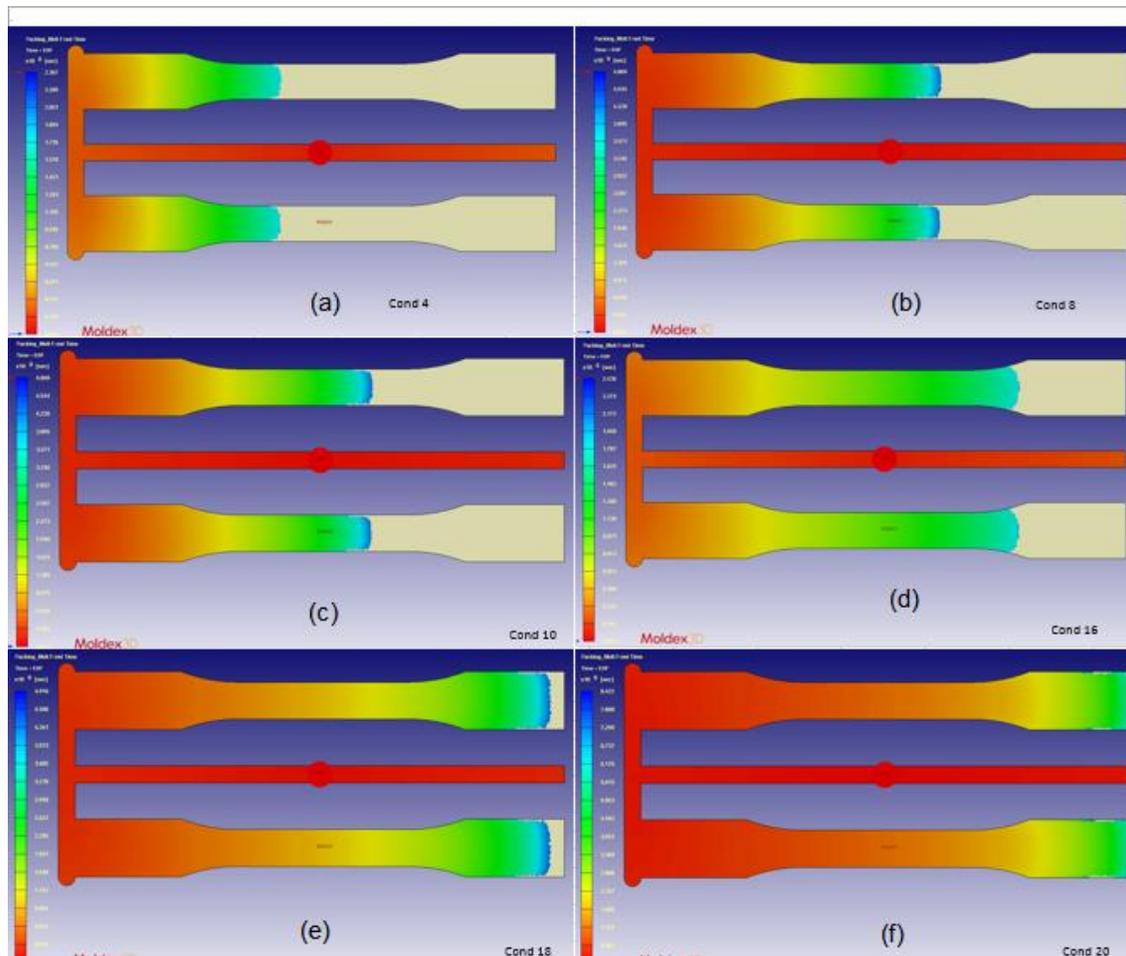


Figura 9, Diferentes etapas de llenado para la Pieza de Pared Gruesa (PPG) según datos de la Tabla 4.

En la Figura 9 se observa el llenado incompleto a temperatura de molde 50°C y $t_{enf} = 15s$ a diferentes condiciones de empaque así:

En (a) con tiempos de empaque $t_{emp} = 1.5s$ a 40bar, (b) $t_{emp} = 4s$ a 40bar, (c) $t_{emp} = 7.7s$ a 40bar, (d) $t_{emp} = 1.5s$ a 60bar, (e) $t_{emp} = 4s$ a 60bar.

En (f) el llenado completo: a condiciones de temperatura de molde 50°C, tiempo de enfriamiento $t_{enf} = 10s$ y condiciones de temperatura molde 80°C y cualquier presión de las ingresadas (40 y 60 bar).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

Según los resultados obtenidos en la simulación del análisis de variables reportado en la de la tabla 4, se puede obtener la imagen simulada del estado de llenado de la pieza, la cual se muestra en la Figura 9, donde la inyección a temperatura de molde $T_c = 50^\circ\text{C}$ es más restringido, presentándose solo llenado completo de la cavidad al emplear el tiempo de enfriamiento restante $t_{enf} = 10\text{s}$, pero con $t_{enf} = 15\text{s}$ se presenta solidificación del material inyectado antes de completar el llenado de la cavidad. Para temperaturas de molde $T_c = 80^\circ\text{C}$ todas las condiciones evaluadas en el diseño experimental presentan un llenado completo de la cavidad.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ANALISIS SOBRE GRAFICAS DE PIEZA DE PARED DELGADA (PPD)

De acuerdo a las variables y niveles establecidos se planteó un diseño experimental factorial, los resultados de este diseño factorial fueron obtenidos mediante simulación en el software Moldex 3D, posteriormente los resultados fueron ingresados en el software de análisis estadístico Minitab para analizar la interacción de variables. A continuación se presentan los resultados para un punto en el centro de la pieza y otro en un extremo de esta, como se muestra en la Figura 8.

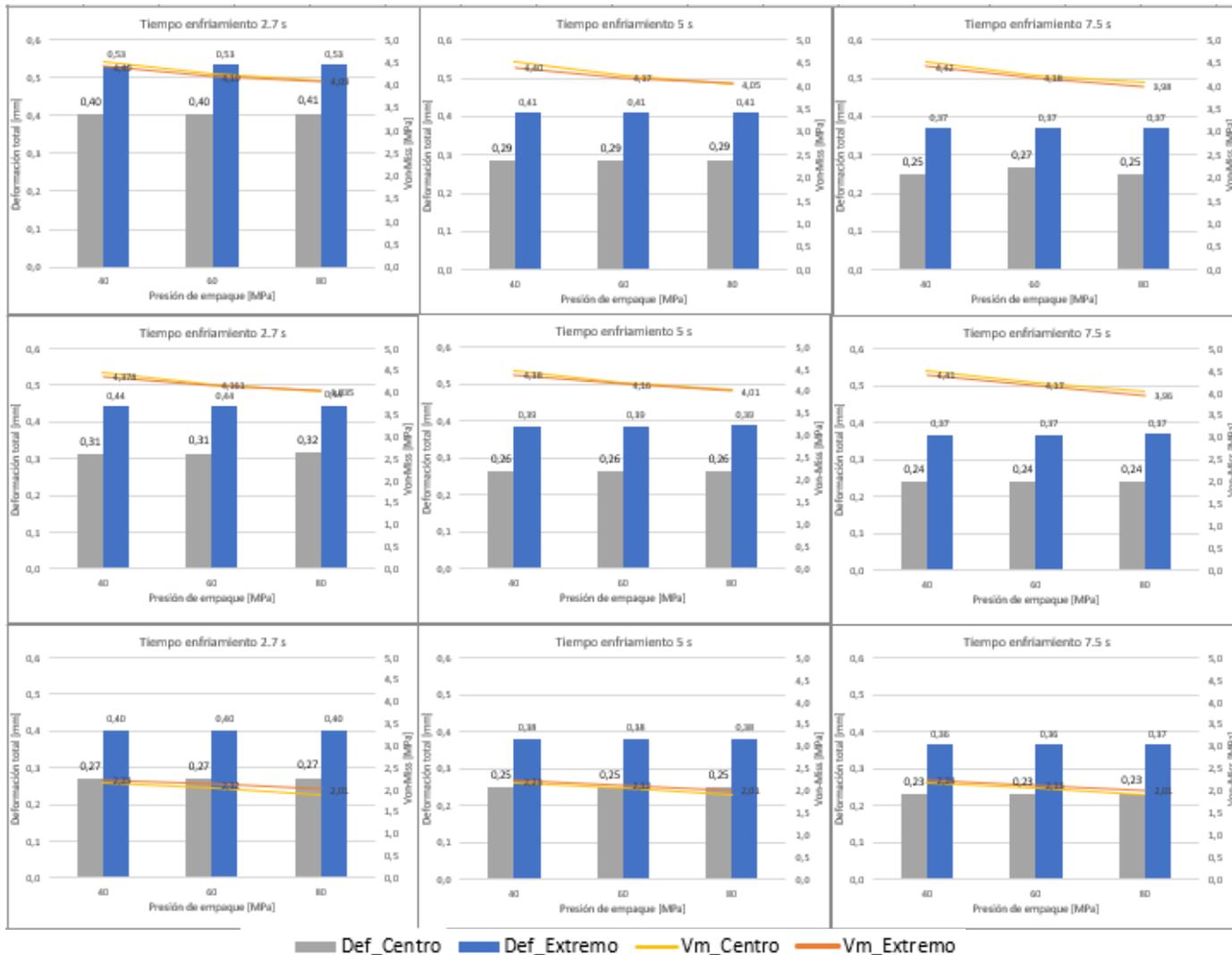


Figura 10, Gráficas para el nodo zona media y extremo de la Pieza de Pared Delgada a una temperatura de inyección de 305°C, temperatura de molde $T_c = 95^\circ\text{C}$ y un tiempo de llenado $t_{\text{llenado}} = 0.2\text{s}$.

El análisis del efecto de las variables del proceso (tiempo enfriamiento restante (t_{enf} [s]), presión de empaque (P_{emp} [bar]) y tiempo de empaque (t_{emp} [s]), en las variables de respuesta (esfuerzo residual Von Misses [Mpa] y deformaciones [mm]) se presentan en la Figura 10 para PPD. Se observa un efecto significativo del tiempo y presión de empaque sobre el esfuerzo Von Misses y sin influencia del tiempo de enfriamiento[20].

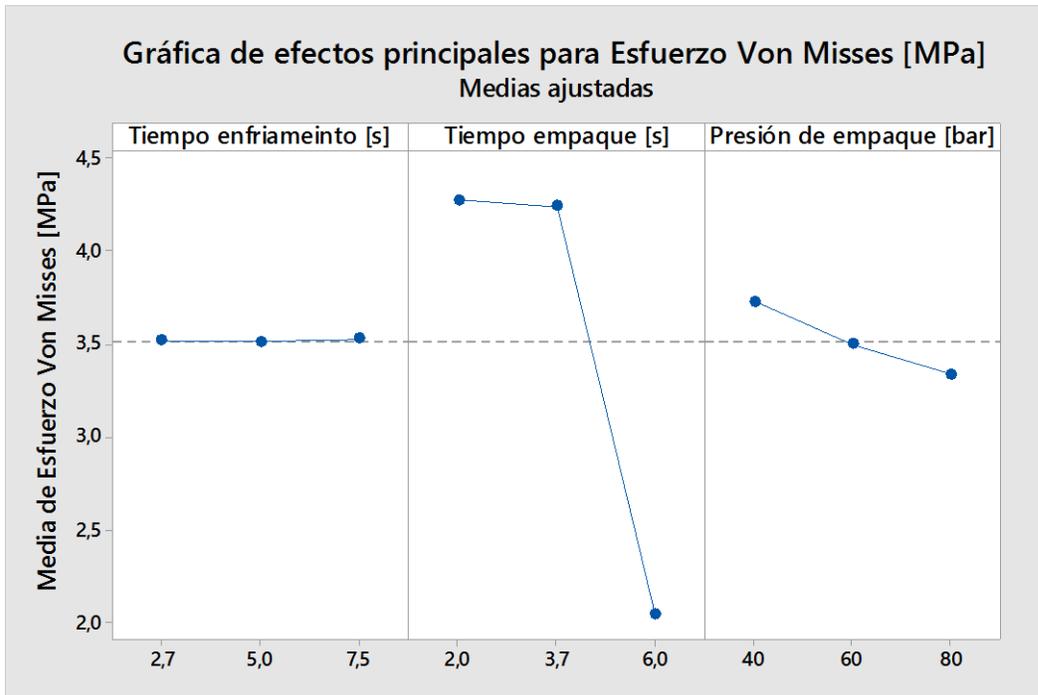


Figura 11, Gráfica del comportamiento promedio del Esfuerzo residual (Esfuerzo Von Misses, unidades en Mpa.) en diferentes condiciones de tiempos y Presiones.

En la figura 11 se tiene graficado para los resultados el comportamiento del esfuerzo residual promedio con las diferentes condiciones de tiempo de enfriamiento, tiempo de empaque y presión de empaque, visualizándose el comportamiento de la variable de respuesta con respecto a las variables de entrada.

En el tiempo de enfriamiento se observa que el Esfuerzo residual promedio fue constante para los tres tiempos de 2.7s, 5.0s y 7.5s con los valores correspondientes de 3.501 MPa, 3.503MPa y 3.498MPa, con valor promedio de 3.50MPa, el cual se observa como una línea recta horizontal (Figura 11 izquierda). En los tiempos de empaque (2.0s, 3.7s y 6.0s) se aprecian los valores promedio del Esfuerzo residual correspondiente (4.207MPa, 4.174MPa y 2.121MPa), bajando 2.086MPa desde 4.207MPa con 2.0s hasta 2.121MPa con 6.0s (Figura 11 centro).

La presión de empaque con sus diferentes valores (40Bar, 60Bar y 80Bar) tiene un efecto correspondiente en el esfuerzo residual de 3.652MPa, 3.489MPa y 3.361MPa, arrojando una diferencia de 0.291MPa entre el mayor valor de

3.652MPa y el menor de 3.361MPa para presiones de empaque de 40Bar y 80Bar respectivamente. El valor promedio involucrado con las tres variables es de 3.50MPa, indicado con la línea segmentada.

El software estadístico hace este análisis de variable de encontrar el parámetro que genera más efecto en PPD, que en este caso fue el tiempo de empaque, además se evalúa la interacción de variables.

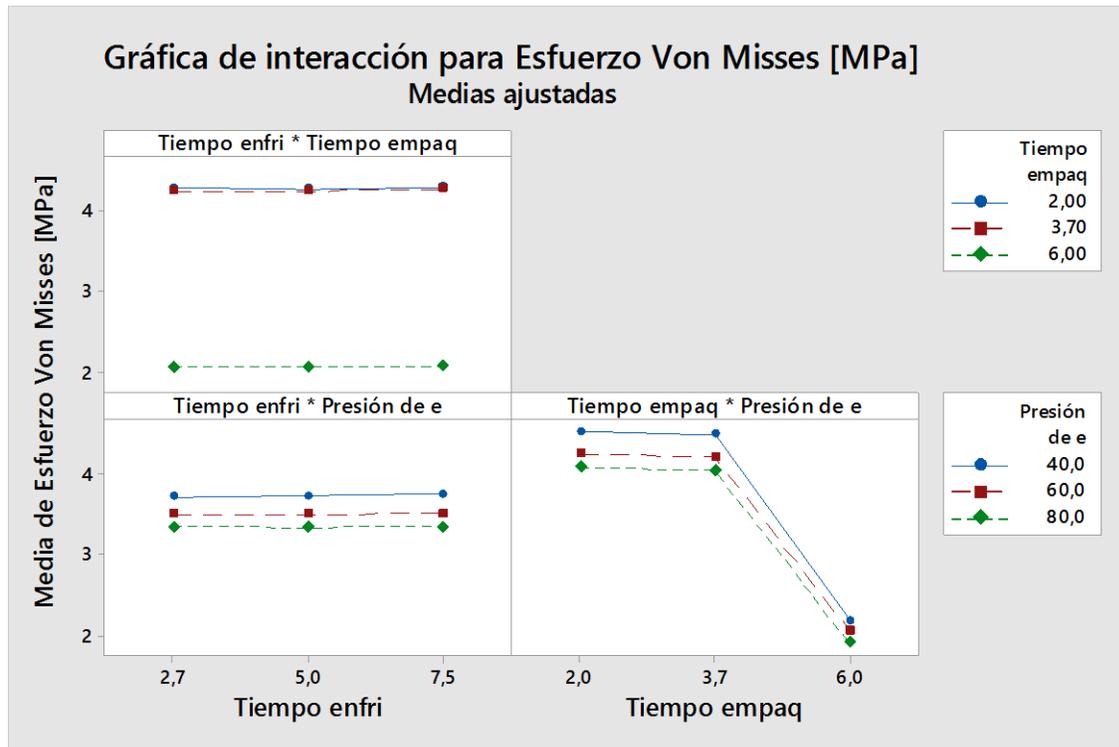


Figura 12 Gráfica Interacción de variables, para Esfuerzo residual Von Misses, unidades en Mpa.

En la Figura 12 se tiene la interacción del tiempo de enfriamiento con el tiempo de empaque, evaluados en 2.7s, 5,0s y 7.5s, en el cual cada línea corresponde a un tiempo de empaque. Se observa que la interacción entre el tiempo de enfriamiento y el tiempo de empaque (superior izquierda) el efecto más notorio se halla con el tiempo de empaque de 6.0s (línea inferior), es decir que es lo mismo evaluar con un t_{enf} de 2.7s, 5,0s y 7.5s con t_{emp} de 2s, al igual que con los mismos tiempos de enfriamiento teniendo t_{emp} de 3.7s, pero no sucede así, cuando se aumenta el tiempo de empaque t_{emp} a 6.0s, en el cual el esfuerzo residual baja a un promedio de 2.121MPa, es decir una reducción de 49%.

Ahora, el tiempo de enfriamiento combinado con la presión de empaque, para cada uno de estos tiempos 2.7s, 5,0s y 7.5s, cada línea paralela corresponde a valores de esfuerzo residual promedio de 3.652MPa (a 40Bar), 3.489MPa (a 60Bar) y 3.361MPa (a 80Bar), con una diferencia entre el valor superior y el

inferior de 0.291Mpa de Esfuerzo residual Von Misses, es decir un 8% menos. Por lo tanto para cada tiempo de enfriamiento a medida que aumenta la presión de empaque, se reduce el esfuerzo residual.

La interacción entre el t_{emp} y P_{emp} muestra también un efecto significativo con 6.0s y una P_{emp} de 80bar respectivamente.

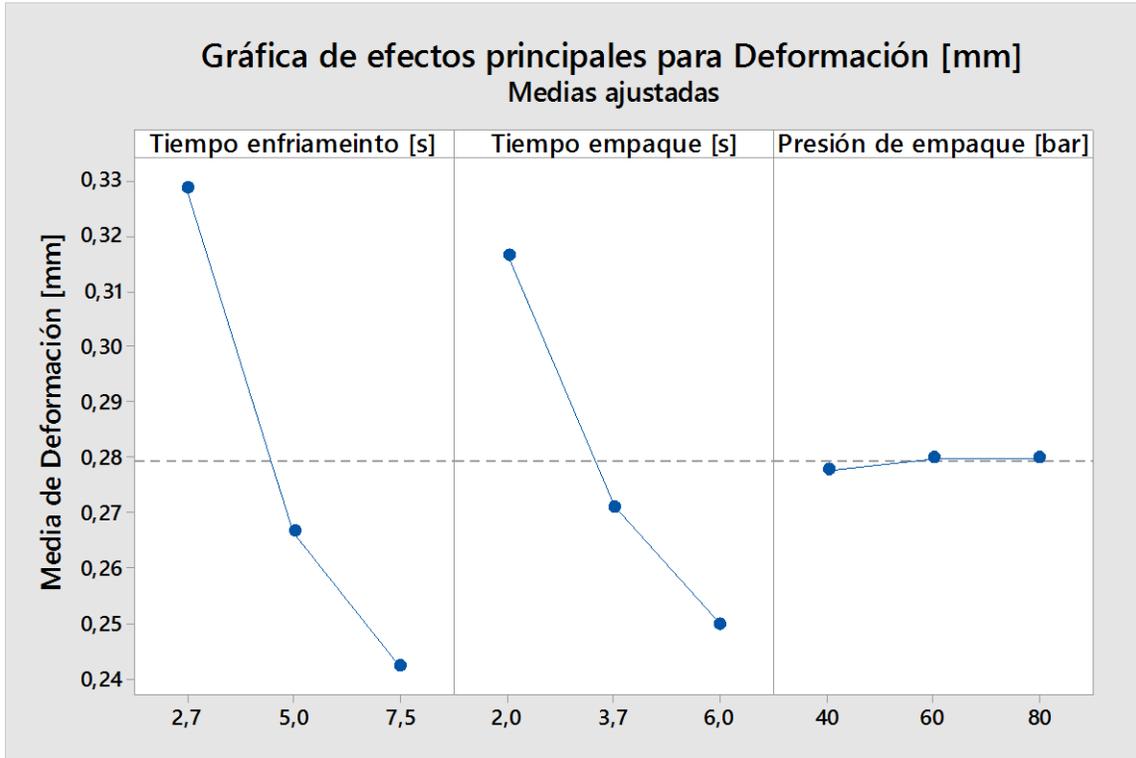


Figura 13, Gráfica del comportamiento promedio de la deformación (Def [mm]) en diferentes condiciones de tiempos y Presiones (tiempo de enfriamiento t_{enf} , tiempo de empaque t_{emp} y Presión de empaque P_{emp}).

En la Figura 13 se aprecia el comportamiento de la deformación (unidades en mm), respecto a los diferentes tiempos y la presión de empaque (t_{enf} , t_{emp} y P_{emp}). La primera gráfica de la izquierda, muestra los valores promedio de la deformación respecto al tiempo de enfriamiento, de 0.330mm, 0.266mm y 0.249mm para los correspondientes t_{enf} de 2.7s, 5.0s y 7.5s, con una variación de 0.081mm de deformación entre los valores 0.330mm para t_{enf} de 2.7s y 0.249mm para t_{enf} de 7.5s. En la gráfica del centro se muestra el comportamiento de la deformación respecto a los 3 tiempos de empaque, con valores promedio de deformación de 0.322mm, 0.272mm y 0.251mm correspondientes a t_{emp} de 2.0s, 3.7s y 6.0s, con una variación de 0.071mm entre los valores 0.322mm con t_{emp} de 2.0s y 0.251mm con t_{emp} de 6.0s.

En la gráfica derecha de la figura 13 se observa el comportamiento de la deformación respecto a las 3 presiones de empaque (40Bar, 60Bar y 80Bar), con una variación muy reducida en el valor de la deformación de 0.001mm entre los

valores promedio de deformación de 0.27mm con P_{emp} de 40Bar y 0.279mm con P_{emp} de 80Bar. La línea segmentada indica el promedio para todas las variables involucradas de 0.279mm. Por lo tanto los efectos principales por variable de entrada para la deformación son el tiempo de enfriamiento y el tiempo de empaque.

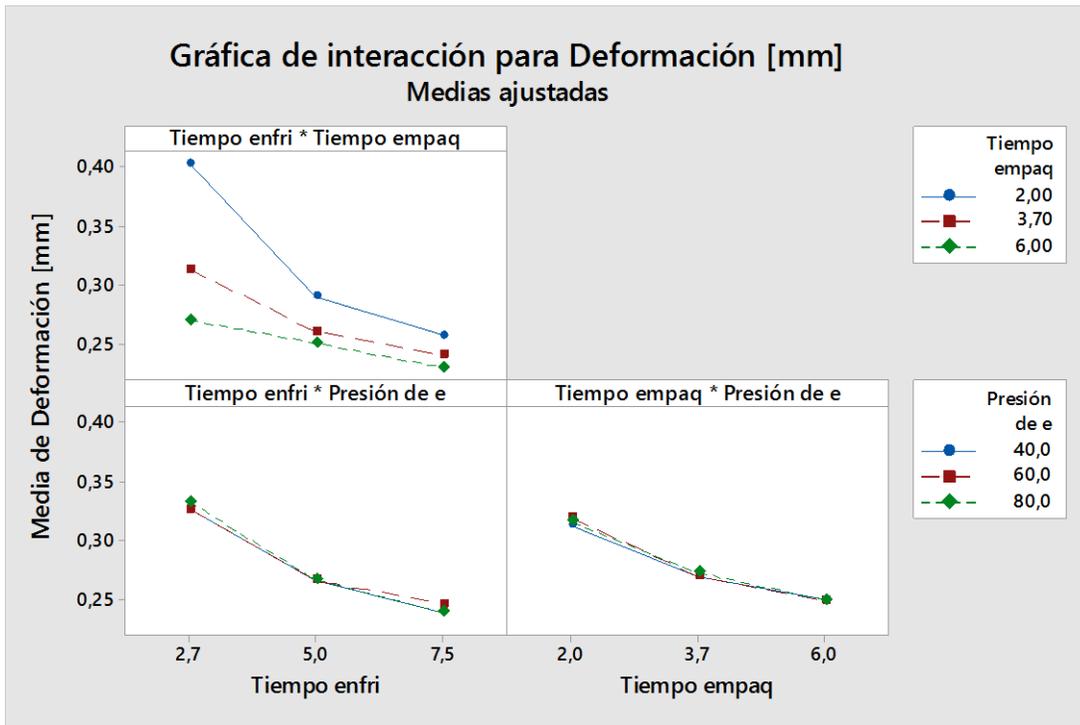


Figura 14 gráficas de interacción de variables para la deformación.

La Figura 14 contiene las gráficas de interacción de las variables t_{enf} con t_{emp} para la deformación (superior izquierda), t_{enf} con P_{emp} (inferior izquierda) y t_{emp} con P_{emp} para la deformación (derecha). La interacción de variables que mas reduce la deformación es la del tiempo de enfriamiento y tiempo de empaque al emplear los respectivos mayores niveles ($t_{enf} = 7.5s$ y $t_{emp} = 6s$).

Se observa tambien que en los niveles extremos (bajos y altos) se obtienen cambios más significativos en las variables de respuesta. A partir de este primer análisis, se optó por simplificar el análisis eliminando el nivel intermedio de cada variable del proceso. Esto permite reevaluar el análisis estadístico con el fin de establecer las variables y la interacción entre estas que realmente tienen efecto en las variables de respuesta, permitiendo obtener una ecuación de regresión simplificada en función de las variables que tienen el mayor efecto sobre la variable de respuesta.

En las Figuras 15 y 16 se presentan los diagramas de pareto de los efectos de las variables y sus interacciones.

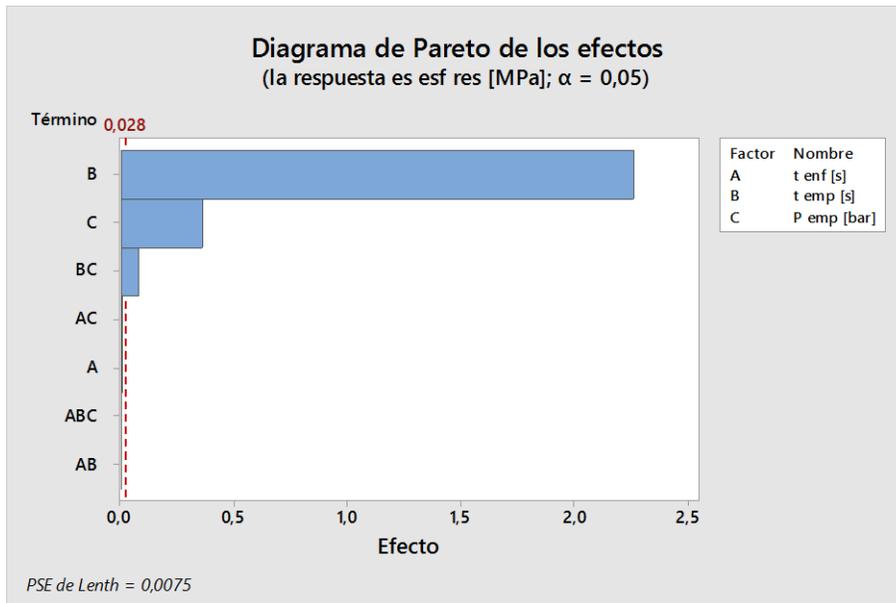


Figura 15 Diagrama de Pareto con las variables de respuesta del esfuerzo residual

Para la variable de respuesta de esfuerzo residual (Figura 15), se observa un mayor efecto del tiempo de empaque, seguido por la presión de empaque y finalmente por la interacción entre estas dos variables. El tiempo de enfriamiento restante y todas las sus interacciones con las demás variables no tienen un efecto significativo en la variable de respuesta.

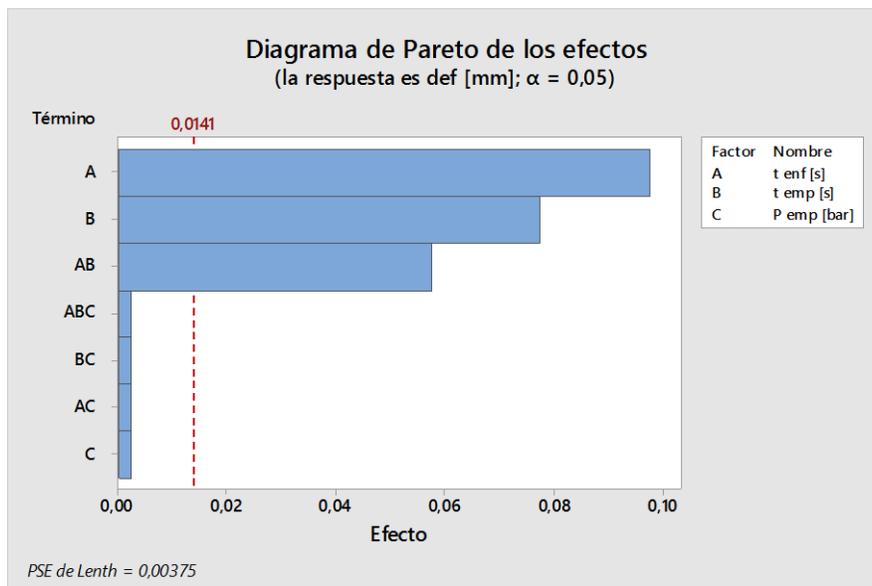


Figura 16 Diagrama de Pareto con las variables de respuesta la deformación

En la Figura 16 se observa el diagrama de Pareto de los efectos de la variable de respuesta de deformación, muestra un mayor efecto del tiempo de enfriamiento,

seguido por el tiempo de empaque y finalmente por la interacción entre estas dos variables. La presión de empaque y todas las sus interacciones con las demás variables no tienen un efecto significativo en la variable de respuesta.

De esta forma se obtuvo una ecuación de regresión para calcular el esfuerzo residual y deformación en función de las variables e interacciones que tuvieron respectivamente mayor efecto en las variables de respuesta.

$$\text{Esf res} = 6,2175 - 0,62625 * t_{\text{emp}} - 0,013187 * P_{\text{emp}} + 0,001031 * t_{\text{emp}} * P_{\text{emp}} \quad (2)$$

$$\text{Def} = 0,59203 - 0,04427 * t_{\text{enf}} - 0,04992 * t_{\text{emp}} + 0,00599 * t_{\text{enf}} * t_{\text{emp}} \quad (3)$$

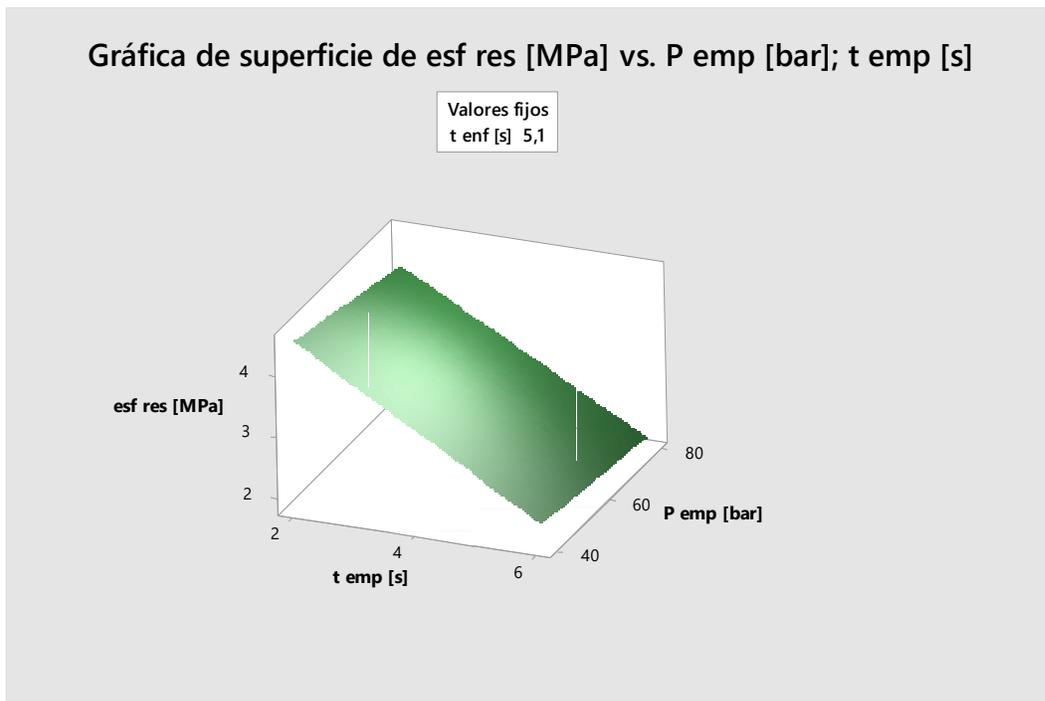


Figura 17 gráfica generada con la ecuación del esfuerzo residual (Esf res [Mpa]), en función de P_{emp} y el t_{emp} .

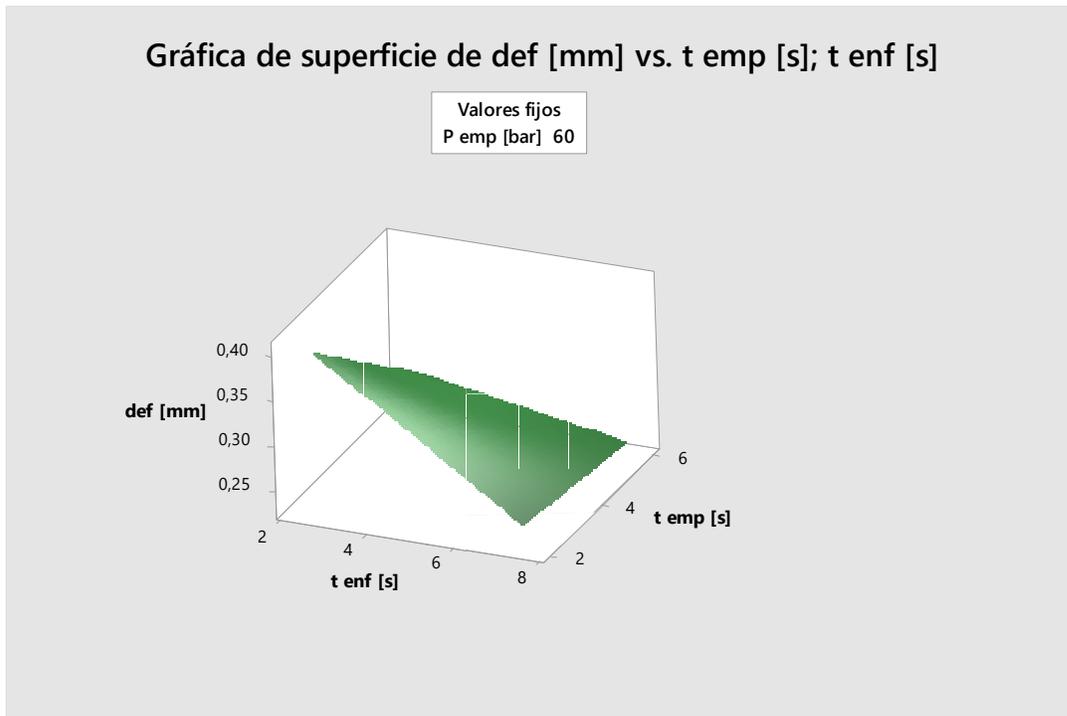


Figura 18, gráfica generada con la ecuación de la deformación (def [mm]), en función del T_{enf} y del T_{emp} .

La Figura 17 muestran el efecto combinado para el esfuerzo residual (esf res [Mpa]), en función de P_{emp} [bar] y el t_{emp} [s], generado por la ecuación (2) en la cual se observa un comportamiento directo con respecto al aumento del t_{emp} y P_{emp} a medida que aumentan se va disminuyendo el esfuerzo residual, para la deformación [mm] (Figura 18) en función de T_{enf} [s] y del T_{emp} [s] generada por la ecuación (3), a medida que el t_{enf} y el t_{emp} aumentan, la deformación disminuye.

Para el caso del punto ubicado en el extremo de la Pieza de Pared Delgada (PPD) se presenta la misma tendencia o comportamiento para las dos variables de respuesta, pero con diferencias en sus niveles o valores (ver figura 10). En el caso del esfuerzo residual no se aprecia una diferencia significativa en sus niveles, lo cual se puede explicar por el tipo de pieza inyectada que por sus dimensiones y espesor delgado tiene un enfriamiento muy homogéneo, que permiten contracciones isotrópicas y por lo tanto pocas diferencias de esfuerzos residuales entre las diferentes condiciones de proceso evaluadas. Es conocido que la anisotropía en la contracción debido a grandes diferencias de temperatura es una de las principales causas de generación de esfuerzos residuales[19] ,[22] ,[23].

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

Con respecto a los valores obtenidos de deformaciones finales, se obtienen mayores deformaciones en el punto del extremo de la pieza inyectada. Esto se puede explicar por el hecho que este punto no tiene tanta restricción para su deformación en el momento que se expulsa del molde y durante el tiempo que la pieza se termina de enfriar hasta la temperatura ambiente experimentará más contracciones y deformaciones finales.

ANALISIS SOBRE GRAFICAS DE PIEZA DE PARED GRUESA

Efecto temperatura de molde

Para este análisis se tuvo en cuenta solo a tiempos de enfriamiento restantes de 10s, ya que, de acuerdo con las simulaciones previas, para 15s no se obtiene un llenado completo del molde por solidificación del material durante el llenado de las cavidades.

En la Figura 19 se observa el comportamiento del esfuerzo residual para la PPG inyectada. Con respecto al esfuerzo residual no se observa una tendencia definida o lineal en los valores obtenidos. Al revisar los resultados con un tiempo de enfriamiento restante de 10s, se presenta el mayor nivel de esfuerzo residual al aplicar un tiempo de empaque de 1.5s, luego se reduce levemente a los 4s de empaque, pero de nuevo se incrementa levemente a los 7.7s. En cada uno de los anteriores casos el respectivo tiempo de enfriamiento total corresponde a 11.5s, 14s y 17.7s ($t_{\text{empaquete}} + t_{\text{enfriamiento restante}}$). Estos resultados muestran que en estos rangos de condiciones de proceso las interacciones de las variables generan un comportamiento no lineal en la variable de respuesta (esfuerzo residual). Un estudio similar hecho por Vargas y colaboradores[13] muestran este comportamiento donde se obtuvo una superficie de respuesta del comportamiento del esfuerzo residual de piezas inyectadas en policarbonato en función del tiempo de enfriamiento total y la presión de empaque a una temperatura de molde de 80°C y una temperatura de inyección de 305°C (ver figura 20 en la cual se observan las regiones evaluadas en el presente trabajo de grado encerradas en los óvalos). En los niveles de tiempo de enfriamiento (11.5s – 17.7s) y presión de empaque de 40MPa (400 bar) a 60MPa (600 bar) se encuentra una curvatura de la superficie dando cuenta de la no linealidad del esfuerzo residual en ese rango de valores, incluso a niveles de tiempos de enfriamiento hasta de 22.7s. Esto muestra que, para este nivel de espesores, se presentan dos procesos en paralelo como es la relajación molecular debido al tiempo de enfriamiento, pero de otro lado una orientación molecular al incrementar la presión de empaque, dependiendo de los niveles de una de las dos variables, puede incrementarse o reducirse la orientación molecular que conlleva a cambios en los esfuerzos residuales. Lo anterior adicional a las diferencias de temperaturas y contracciones del material, condiciones de diseño del molde y pieza, puntos de inyección, canales de enfriamiento y condiciones de proceso, pueden generar

comportamientos no predecibles de los esfuerzos residuales en la pieza inyectada[22]. Adicionalmente, se ha encontrado que el esfuerzo residual se puede generar por dos mecanismos, en el primero el esfuerzo residual inducido por el flujo y en el segundo inducido por el enfriamiento en el molde, esta última condición solo es tenida en cuenta en el software de simulación, ya que se ha determinado que esta es la condición que más pesa en la generación de esfuerzos residuales[19].

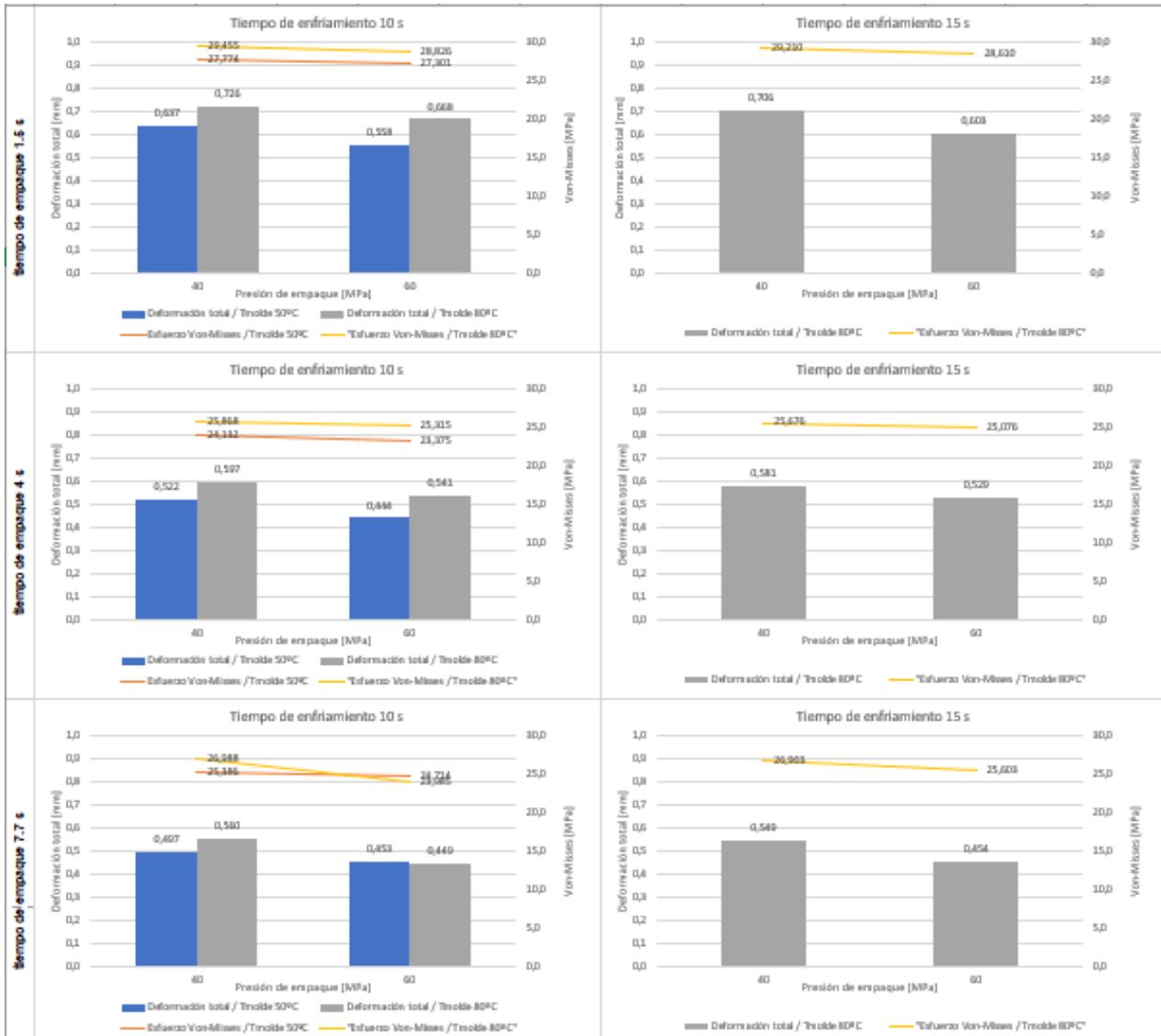


Figura 19, Gráficas de la simulación de nodo 20333 (en la mitad de la PPG).

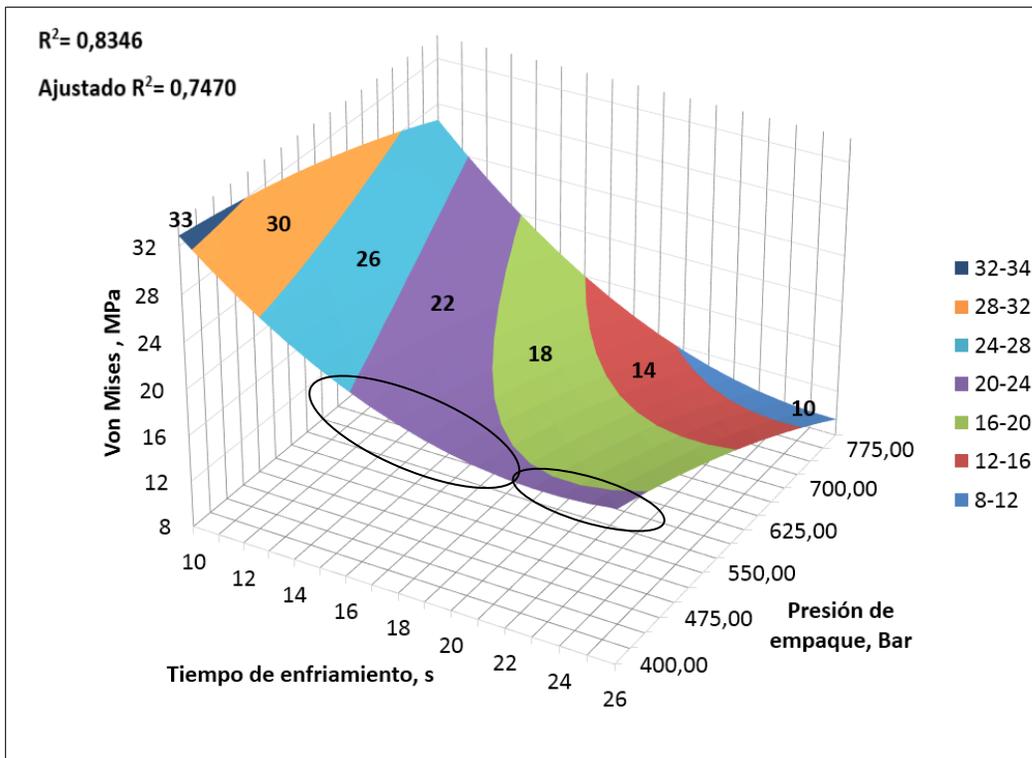


Figura 20. Gráfica de superficie de respuesta de pieza inyectada del Policarbonato en función del t_{enf} y P_{emp} con $T_c = 80^\circ\text{C}$ y Temperatura de inyección de 305°C . Fuente: [13]

En la Figura 20 se observa el análisis de superficie de respuesta de pieza inyectada del policarbonato en función del tiempo de enfriamiento y presión de empaque a una temperatura de 80°C y una temperatura de inyección de 305°C (Fuente: [13]). Obsérvese encerrado en óvalo las dos zonas evaluadas en este trabajo con t_{enf} desde 11.5s hasta 22.7s en el borde de la gráfica coordenada de 40bar (400Mpa en la Figura 20).

En el análisis de interacción de variables mediante el software estadístico minitab para evaluar el efecto de la temperatura de molde 50°C y 80°C , se evaluaron solo a tiempos de enfriamiento de 10s más los tres niveles de tiempo de empaque (1.5s, 4s y 7.7s), ya que a tiempos de enfriamiento de 15s se presentaba llenado incompleto del molde y no se arrojaban resultados en la simulación.

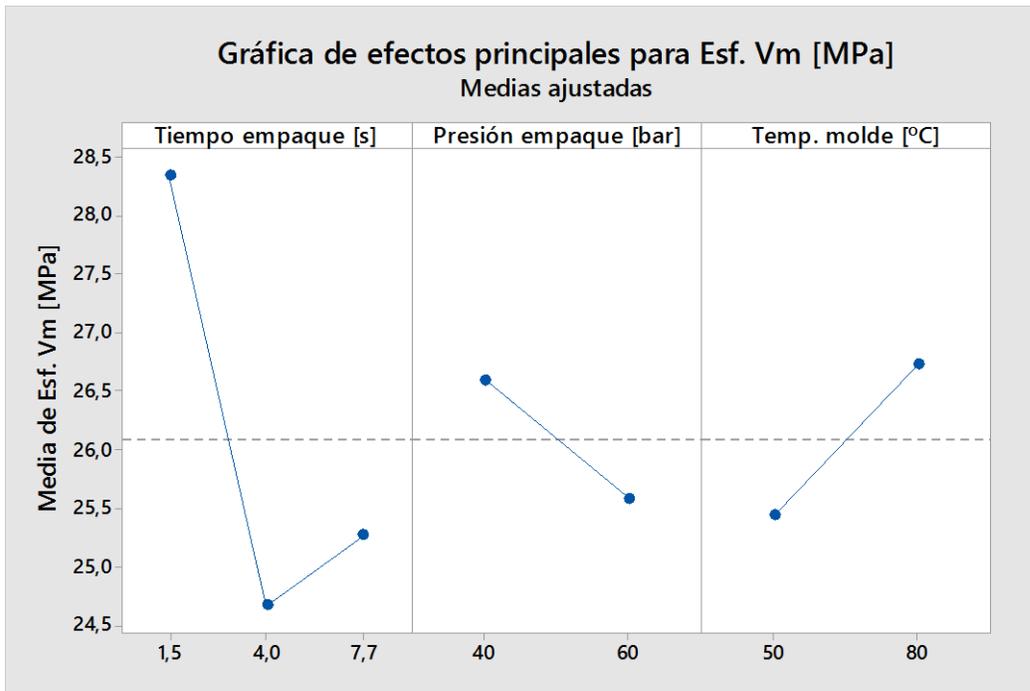


Figura 21 Gráfica del comportamiento promedio del Esfuerzo residual (Esfuerzo Von Mises, unidades en MPa.) en diferentes condiciones de tiempo de empaque (temp [s]), Presión de empaque (P_{emp} [bar]) y Temperatura de molde (T_c [°C]).

En la figura 21 se observa el comportamiento promedio del esfuerzo residual Von Mises [MPa] con respecto a la variable de entrada del t_{emp} [s] a la izquierda, con valor máximo de 28.34MPa para un t_{emp} de 1.5s y un esfuerzo residual mínimo de 24.67MPa para un t_{emp} de 4s, pero al incrementar el temp a 7.7s el esfuerzo residual aumenta levemente a 25.26MPa, con una diferencia de 0.59Mpa, pero entre el máximo y el mínimo con un valor de 3.67MPa de esfuerzo residual.

En el centro se observa la gráfica de la P_{emp} [bar] que corresponden a 40 y 60bar, con un esfuerzo residual promedio de 26.60MPa y 25.60MPa respectivamente, lo que indica que bajó 1MPa al aumentar la Presión de empaque de 40bar a 60bar.

Para el extremo derecho se tiene el comportamiento del esfuerzo residual inicial de 25.44MPa y 26.74MPa para una temperatura de molde de 50°C y 80°C respectivamente, con lo cual se observa un incremento del esfuerzo residual de 1.30Mpa a medida que la T_c aumenta de 50°C a 80°C. La línea segmentada indica el nivel promedio de Esfuerzo residual de 26.09MPa para las tres variables involucradas (t_{emp} , P_{emp} y T_c).

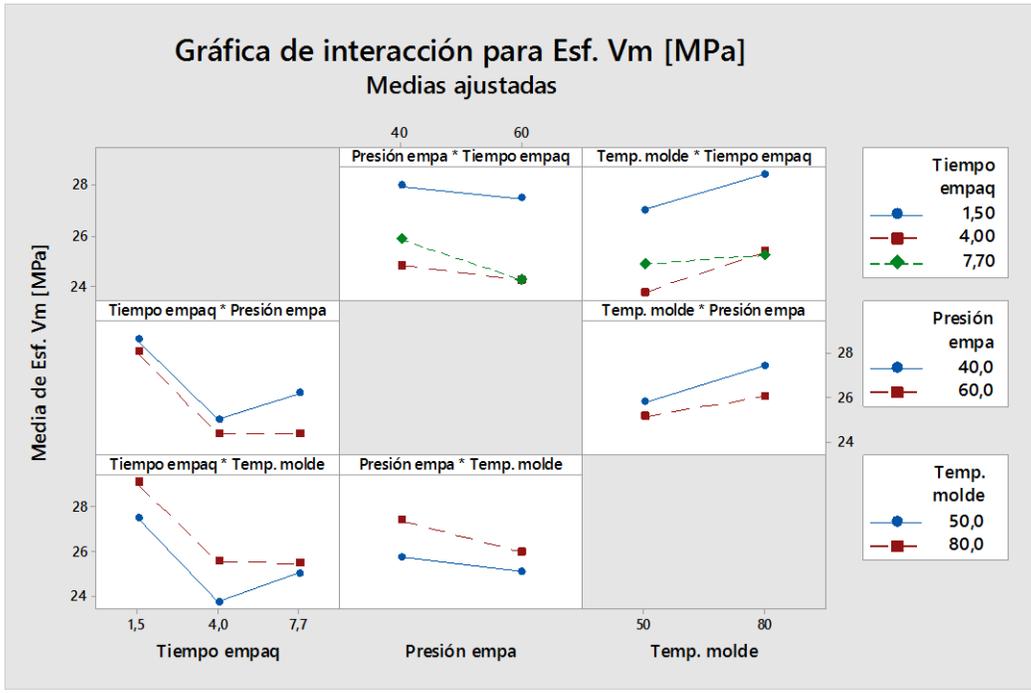


Figura 22 Gráfica Interacción de variables, para Esfuerzo residual Von Misses, unidades en Mpa.

En la figura 22 se observa la interacción de variables graficada para el Esfuerzo residual de t_{emp} y P_{emp} , en ella se presenta una variación notoria entre 1.5s a 4.0s en t_{emp} y P_{emp} promediada desde 28.5MPa bajando a 24.47MPa, es decir una variación de 4.20MPa de reducción en el esfuerzo residual (lado izquierdo de la Figura).

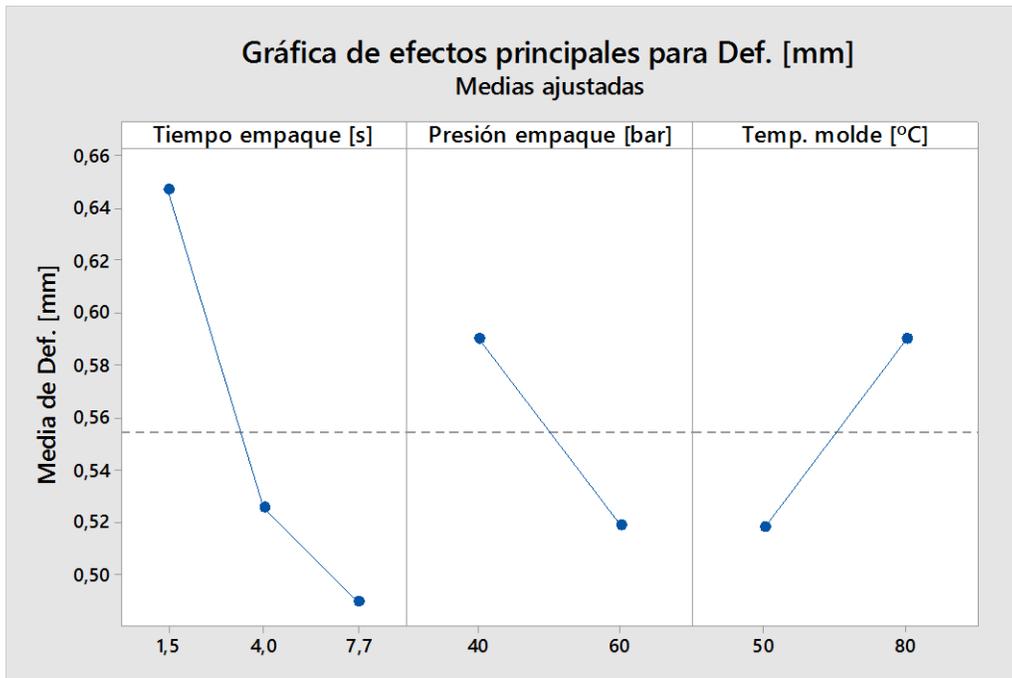


Figura 23 Gráfica del comportamiento promedio de los efectos principales con respecto a la Deformación (Def [mm]).

En el caso de la deformación de las gráficas de interacción de variables (t_{emp} , P_{emp} y T_c) muestran un comportamiento similar al de esfuerzos residuales (Figuras 21 y 23), pero no tan pronunciado entre el tiempo de 4s a 7.7s, intervalo en el cual la deformación continúa bajando a medida que aumenta el t_{emp} (Figura 23 izq.) con una disminución de 0.162mm (desde .647mm baja a 0.485mm). En la parte central se observa un decrecimiento promedio de al Def de 0.590mm a 0.519mm con P_{emp} de 40bar y 60bar respectivamente, dicha disminución son 0.071mm. En el extremo derecho de la figura se tienen los valores promedio de la Def de 0.518mm y 0.593mm para T_c de 50°C y 80°C respectivamente. Es decir, un promedio para las tres variables de 0.554mm, indicados con la línea segmentada.

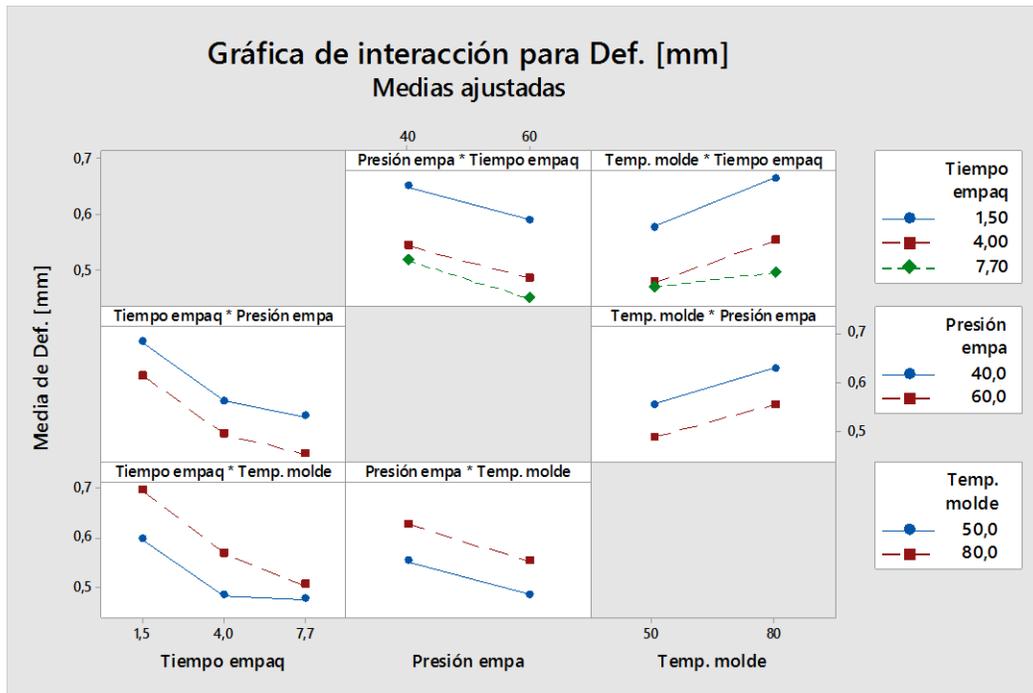


Figura 24 Gráfica Interacción de variables, para la Deformación (Def [mm]).

En la Figura 24 también se observa una interacción de variables con un comportamiento de la deformación similar a la interacción de variables del esfuerzo residual (Figura 22).

Efecto tiempo de enfriamiento restante

Se realizó de igual forma el análisis de interacción de variables mediante el software estadístico minitab para evaluar el efecto del tiempo de enfriamiento restante (10 a 15s) a una temperatura de molde de 80°C, en los tres niveles de tiempo de empaque (1.5s, 4s y 7.7s), ya que los resultados a temperaturas de molde de 50°C no se obtuvieron en la simulación, no se tuvo en cuenta en este nivel.

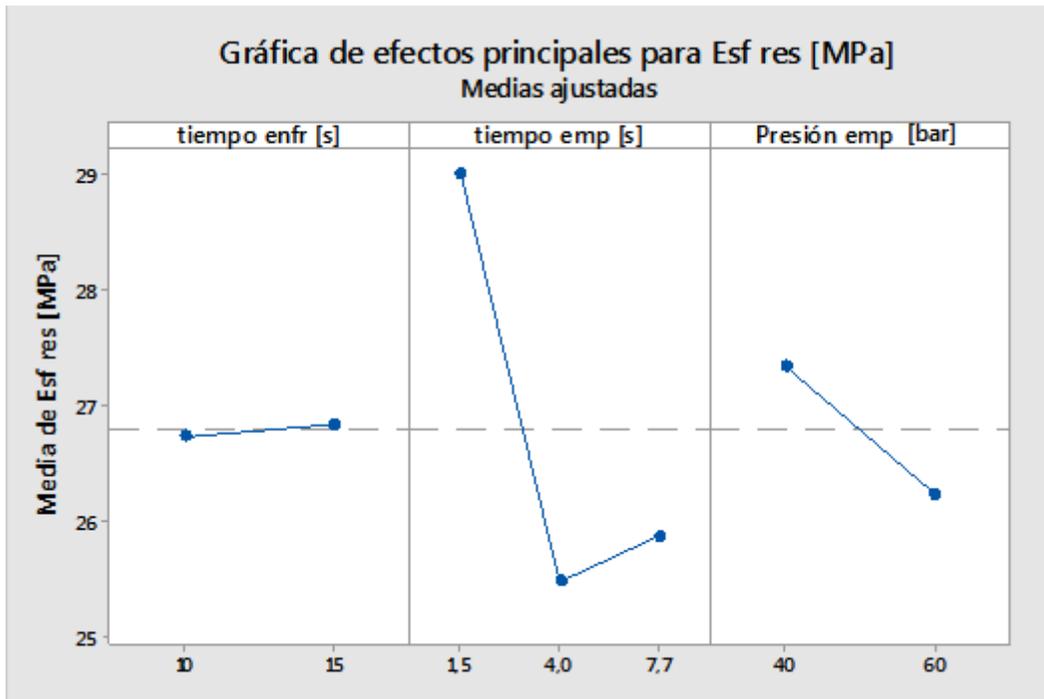


Figura 25 Gráfica del comportamiento promedio del Esfuerzo residual (Esfuerzo Von Mises, unidades en Mpa.) en diferentes condiciones de tiempo de enfriamiento (t_{enf} [°C]), tiempo de empaque (t_{emp} [s]), Presión de empaque (P_{emp} [bar]).

En la Figura 25 se observa la influencia de las tres variables (t_{enf} , t_{emp} y P_{emp}), se observa que las variables que tienen mayor peso en el esfuerzo residual son el tiempo y presión de empaque. Para el esfuerzo residual, en la parte izquierda un comportamiento casi constante cuando se pasa de t_{enf} de 10s a 15s dando un esfuerzo residual de 26.74MPa y 26.832MPa respectivamente, pero en el centro, el t_{emp} genera un cambio de esfuerzo residual desde 29.023MPa baja a 25.472MPa y sube levemente a 25.864MPa para t_{emp} de 1.5s, 4.0s y 7.7s respectivamente, en este caso el Δ esfuerzo residual entre el mayor y menor valor fue de 3.551MPa y el promedio marcado en la figura con la línea segmentada es de 26.79MPa.

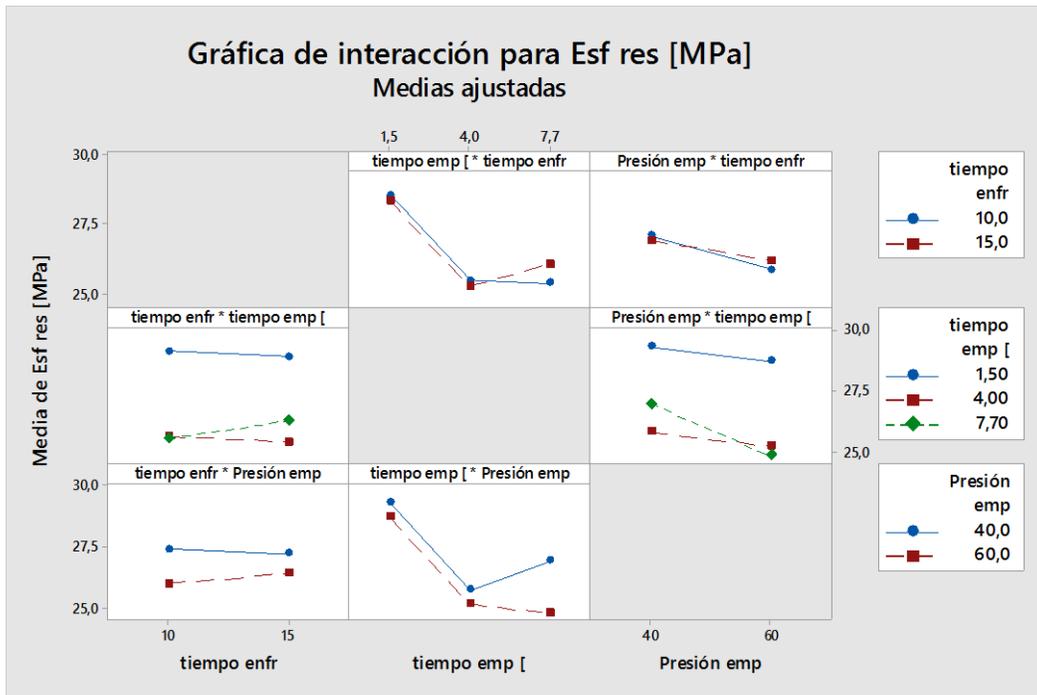


Figura 26 Gráfica Interacción de variables, para Esfuerzo residual Von Misses, (Esf Res [Mpa]).

Para la condición de temperatura de molde de 80°C se hizo otro análisis de interacción de variables ya teniendo en cuenta el tiempo de enfriamiento (t_{enf} [s]), el tiempo de empaque (t_{emp} [s]) y presión de empaque (P_{emp} [bar]). Adicionalmente, la interacción entre el tiempo y presión de empaque ofrece la mayor influencia en el esfuerzo residual obteniéndose el menor nivel a un tiempo de empaque de 7.7s y 60 MPa (Figura 26), lo anterior está de acuerdo estudios previos donde se evidencia el impacto de estas variables sobre el esfuerzo residual y la deformación[19] , [13] , [22].

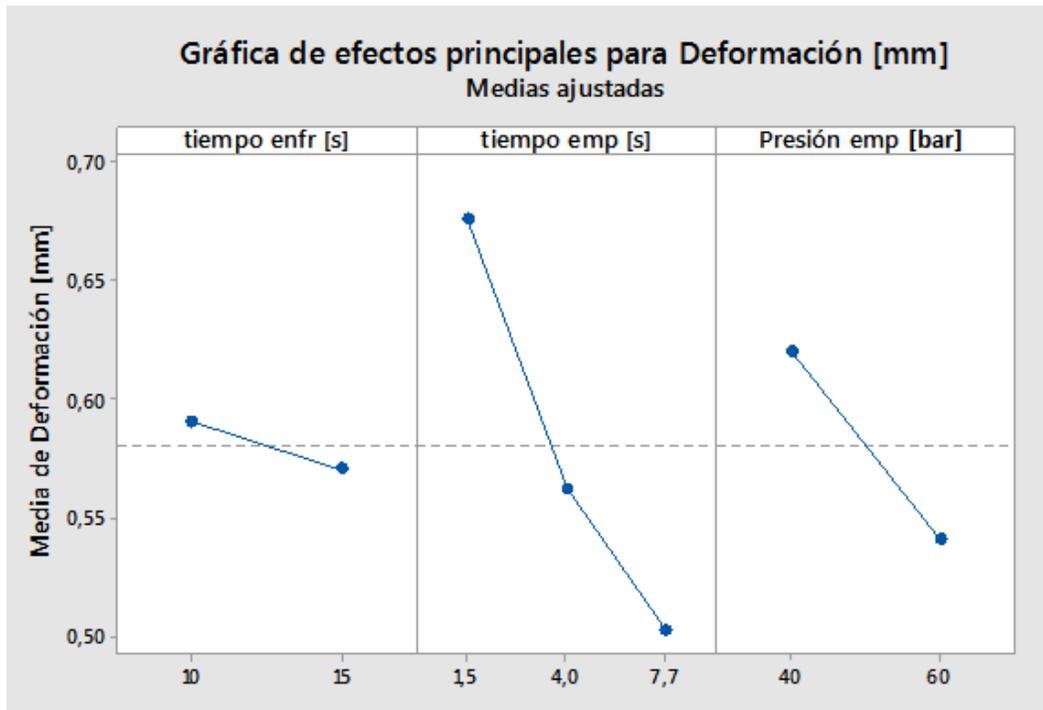


Figura 27 Gráfica del comportamiento promedio de los efectos principales con respecto a la Deformación (Def [mm]), respecto a t_{enf} [s], t_{emp} [s] y P_{emp} [bar].

En la Figura 27 se observa el comportamiento promedio de la deformación para las tres variables involucradas t_{enf} , t_{emp} y P_{emp} . En la parte izquierda cuando pasa de t_{enf} de 10s a 15s, la deformación disminuye levemente de 0.590mm a 0.569mm respectivamente. En el centro con el t_{emp} de 1.5s, 4.0s y 7.7s la deformación baja a medida que aumenta el t_{emp} desde 0.675mm baja a 0.562mm y descende a 0.502mm respectivamente, con un ΔDef de 0.173mm.

En el extremo derecho al intervenir la P_{emp} de 40bar y 60bar la Deformación descende de 0.619mm a 0.541mm, quedando un promedio general de $Def = 0.580mm$, indicada con la línea segmentada.

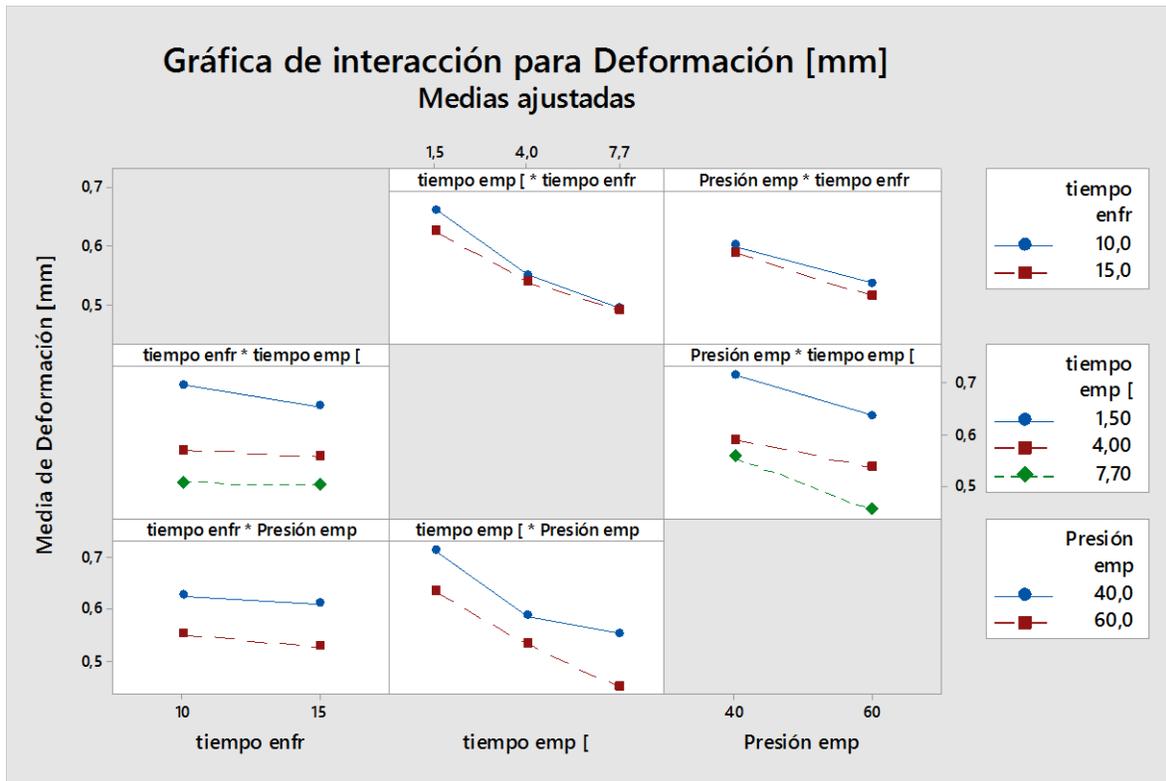


Figura 28 Gráfica de interacción de variables para la Deformación (Def [mm]), respecto al t_{enf} [s], t_{emp} [s] y P_{emp} [bar].

La interacción entre el tiempo y presión de empaque muestra la menor deformación. En este caso el comportamiento tiende a ser más lineal, lo cual muestra que a condiciones recomendadas de temperatura de molde (80°C) se puede comenzar a presentar una tendencia más previsible de las variables de respuesta, a diferencia de lo presentado a temperaturas de molde de 50°C. Esto justifica la razón de los rangos de temperaturas de molde recomendadas en las fichas técnicas del material a inyectar (71 a 93°C Tabla 2).

Para el caso del punto ubicado en el extremo de la pieza se obtuvo el mismo comportamiento al discutido en la pieza de pared delgada. Sin embargo, los niveles de esfuerzo residual se reducen drásticamente comparados con el punto central de la pieza (ver Figura 29), así mismo, la deformación se incrementa significativamente. Como se mencionaba anteriormente, este punto de la pieza permite la liberación del esfuerzo residual posterior al desmoldeo de la pieza, cuando esta se encuentra equilibrando su temperatura con la del ambiente y como consecuencia una mayor deformación en la pieza en el extremo de esta. Esto también se explica por el hecho que la pieza de mayor espesor experimenta una mayor contracción del material, lo cual se refleja en mayores deformaciones. Adicionalmente, una pieza de mayor espesor, a diferencia de la pieza delgada, si

puede presentar mayores gradientes de temperatura en la pieza y por lo tanto mayores esfuerzos residuales, lo cual se evidencia en los resultados obtenidos.

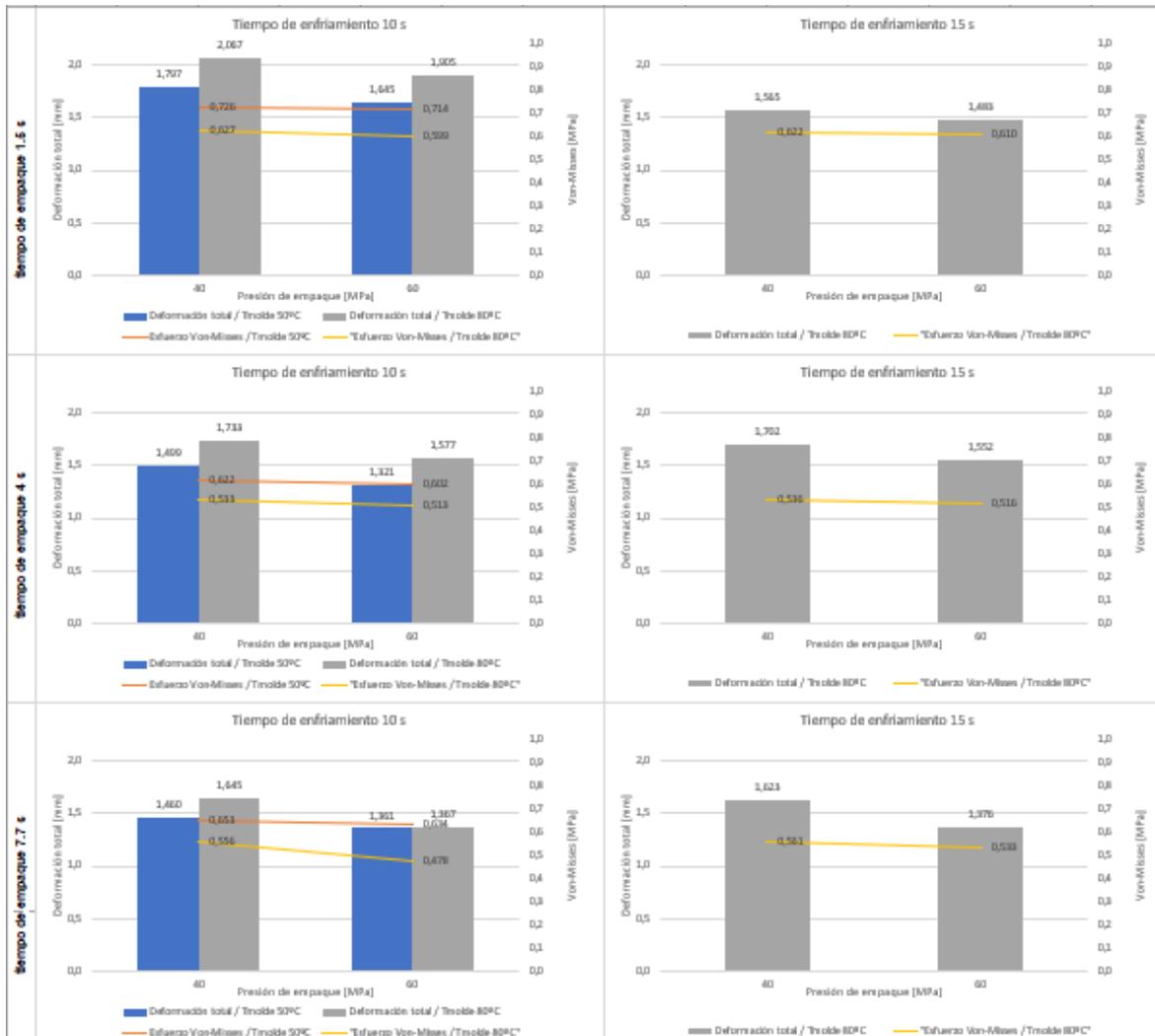


Figura 29 Gráficas de la simulación de punto 20333 en un extremo de la Pieza de Pared Guesa.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

CONCLUSIONES

1. RESPECTO A LAS VARIABLES DE ENTRADA DEL PROCESO DE INYECCIÓN

- En la Pieza de Pared Gruesa se trabajó con temperatura de molde de 50°C y 80°C, la temperatura de molde de 80°C es válida en la pieza de Pared Gruesa ya que garantiza el llenado completo del molde, siendo este nivel de temperatura recomendado para la inyección de este tipo de materiales (Policarbonato).
- Se observa que el rango de temperatura válido para estos materiales oscila entre 80°C y 100°C. En la pieza de Pared delgada se trabajó a 95°C debido a que se enfría rápidamente por tener poco espesor, si se trabaja con una temperatura más baja lo que puede suceder es que se solidifica el material mucho más rápido provocando llenado incompleto, como se muestra en la Figura 5 y 6 de la pieza de pared delgada y en la Figura 9 (a, b, c, d, e) con los datos de temperatura de molde de 50°C de la pieza de Pared Gruesa que arrojó llenado incompleto con un $t_{enf} = 15s$.
- En la pieza gruesa no es recomendable trabajar con una temperatura de molde de 50° C, ya que como se visualiza en la Figura 9 el llenado se da incompleto con este nivel de temperatura. En las figuras extraídas del programa Moldex 3D, se puede visualizar cómo el llenado (a la misma temperatura de 50°C) va creciendo a medida que se aumenta el tiempo de empaque, pero no logra ser suficiente porque la temperatura del molde es muy baja provocando que el flujo plástico se enfríe rápidamente y evitando el llenado completo. Es por esto que las gráficas para analizar el comportamiento se realizaron solo con temperatura de molde de 80°C.
- La temperatura de molde de 50°C es muy baja para el proceso de inyección de un policarbonato para una PPG ya que limita que el tiempo de enfriamiento sea de 10s.
- Después de varios ciclos de inyección, la temperatura de molde se estabiliza, si se le da más tiempo de enfriamiento el molde se enfriará más rápido obteniendo un molde más frío.
- En una pieza gruesa para evitar contracciones se debe aplicar una presión de empaque mayor a la de llenado, dado que, por tener más espesor, el material tiende a contraerse con mayor facilidad.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

- Los resultados observados concuerdan con ensayos de parámetros similares en los que arroja una relación proporcional entre deformación y contracción directamente asociado al esfuerzo residual.

2. RESPECTO A LAS VARIABLES DE RESPUESTA DEL PROCESO DE INYECCIÓN (ESFUERZOS RESIDUALES Y DEFORMACIÓN).

- Con respecto al análisis de los resultados de la simulación y los análisis hechos de los defectos de variables con el estudio estadístico, se constató que las variables que tuvieron más peso en la Pieza de Pared Delgada (PPD) para el esfuerzo residual son el tiempo y la presión de empaque, generando una reducción de hasta un 50% y 8% respectivamente. Para la deformación fueron el tiempo de enfriamiento y el tiempo de empaque con una reducción del 24.5% y 22% respectivamente. Respecto a la Pieza de Pared Gruesa (PPG), el Esfuerzo residual se reduce 12.9% y 3.8% al aumentar el t_{emp} y p_{emp} respectivamente, pero aumenta en 5.1% cuando la T_c aumenta. Por lo tanto, en ambos casos para PPG y PPD al aumentar la P_{emp} se disminuye la deformación y el Esfuerzo residual.
- Como se definió de acuerdo a la literatura y en la simulación del software estadístico, los cambios de las variables de respuesta que para estos casos de análisis de PPG y PPD son la deformación y el esfuerzo residual, están sujetas a las variables de entradas, se determina cómo influyen en la calidad de una pieza, para la deformación hubo una reducción hasta de 0.081mm y para el esfuerzo Residual una reducción hasta de 3.67Mpa acortando dimensiones que son críticas para piezas de ensamble y bajando esfuerzos internos que evitan que una pieza falle como consecuencia de esfuerzos residuales internos que excedan la resistencia del material.
- Para el análisis de interacción de variables, la técnica usada fue la complementación entre el uso de un diseño factorial y el análisis estadístico, pudiendo determinar y evidenciar de manera confiable, cuáles fueron las variables que tenían mayor influencia en la calidad de las PPD y PPG.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

- Es muy diferente evaluar entre una PPD y una PPG como se evidenció en el análisis que el esfuerzo residual promedio para la PPD fue del orden de 3.5MPa, mientras que en la PPG el promedio de esfuerzo residual fue de 26.69Mpa elevándose un 768%. Respecto a la deformación, para la PPD de 0.279mmy para la PPG fue del orden de 0.566mm la cual se eleva un 202%, esta diferencia se debe a que el espesor de la PPD presenta un enfriamiento más homogéneo y para la PPG los enfriamientos no homogéneos elevan la concentración de esfuerzo residual y la deformación, este patrón concuerda con estudios previos reportados en donde se demuestra que a mayor espesor mayores esfuerzos residuales y Deformación.

5. Trabajos futuros

- Se recomienda realizar estos mismos análisis para polímeros semicristalinos que a diferencia del Policarbonato que es amorfo puede generar comportamientos diferentes en las variables de respuesta analizadas.
- Evaluar y validar la predicción de los esfuerzos residuales y deformaciones por simulación mediante técnicas experimentales.
- Evaluar el efecto de los esfuerzos residuales generados por el proceso de inyección en el desempeño mecánico de las piezas inyectadas.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

REFERENCIAS

- [1] C. Vargas, J. Sierra, J. Posada, and J. F. Botero-Cadavid, “Análisis y modelamiento de simulaciones de esfuerzos residuales en piezas plásticas inyectadas empleando correlaciones robustas,” *Rev. Mater.*, vol. 22, no. 4, 2017, doi: 10.1590/S1517-707620170004.0228.
- [2] F. T. Weng, Tsochu-Lin, and Y. Y. Lu, “Parameter analysis of lift component in injection molding,” *Proc. 4th IEEE Int. Conf. Appl. Syst. Innov. 2018, ICASI 2018*, pp. 754–757, 2018, doi: 10.1109/ICASI.2018.8394369.
- [3] S. Q. Ch’Ng, S. M. Nasir, M. Fathullah, N. Z. Noriman, and M. H. M. Hazwan, “Warpage analysis on thick shell part using response surface methodology (RSM) to optimize parameter setting in injection molding process,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2030, no. September 2019, 2018, doi: 10.1063/1.5066808.
- [4] M. Altan, “Reducing shrinkage in injection moldings via the Taguchi, ANOVA and neural network methods,” *Mater. Des.*, vol. 31, no. 1, pp. 599–604, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.049>.
- [5] B. S. Heidari *et al.*, “Optimization simulated injection molding process for ultrahigh molecular weight polyethylene nanocomposite hip liner using response surface methodology and simulation of mechanical behavior,” *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 81, no. February, pp. 95–105, 2018, doi: 10.1016/j.jmbbm.2018.02.025.
- [6] B. Shiroud Heidari, A. H. Moghaddam, S. M. Davachi, S. Khamani, and A. Alihosseini, “Optimization of process parameters in plastic injection molding for minimizing the volumetric shrinkage and warpage using radial basis function (RBF) coupled with the k-fold cross validation technique,” *J. Polym. Eng.*, vol. 39, no. 5, pp. 481–492, 2019, doi: 10.1515/polyeng-2018-0359.
- [7] P. Poszwa, P. Muszynski, P. Brzek, and K. Mrozek, *Influence of processing parameters on residual stress in injection molded parts*. Springer International Publishing, 2019.
- [8] “Moldeo por inyección - Wikipedia, la enciclopedia libre.” https://es.wikipedia.org/wiki/Moldeo_por_inyección (accessed Apr. 14, 2022).
- [9] “Procesos de Moldeo.” <https://todoenpolimeros.com/procesos-de-moldeo/> (accessed Apr. 14, 2022).
- [10] “Moldex3D | Software de simulación de moldeo por inyección de plástico.” <https://www.moldex3d.com/support/faq/> (accessed Apr. 14, 2022).
- [11] T. Data, “LEXAN™ 144R resin,” 2015.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

- [12] C. Y. Khor *et al.*, “Three-dimensional numerical and experimental investigations on polymer rheology in meso-scale injection molding ☆,” *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 37, no. 2, pp. 131–139, 2010, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.08.011.
- [13] J. C. Posada, J. D. Sierra, and C. A. Vargas, “Actas de Ingeniería Prediction of residual stresses in polymer processing by response surfaces techniques and simulation Predicción de esfuerzos residuales en procesamiento de polímeros por técnicas de superficies de respuesta y simulación,” vol. 2, pp. 16–24, 2016.
- [14] A. Mechanics and A. M. Division, “Prediction of residual stresses in injection moulded parts,” 2013.
- [15] M. Azdast, T., Behraves, A. ., Mazaheri, K., & Darvishi, “Numerical simulation and experimental validation of residual stress induced constrained shrinkage of injection molded parts.,” pp. 53(4), 304–310, 2008.
- [16] A. B. Hakimian, E., & Sulong, “Analysis of warpage and shrinkage properties of injection-molded micro gears polymer composites using numerical simulations assisted by the Taguchi method.,” *Mater. Des.*, pp. 62–71., 2012, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.04.058>.
- [17] M. Yin, F., Mao, H., Hua, L., Guo, W., & Shu, “Back Propagation neural network modeling for warpage prediction and optimization of plastic products during injection molding.,” *Mater. Des.*, 2011, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.022>.
- [18] & O. S. R. S. Sánchez, I. G. Yáñez, *Moldeo por inyección de termoplásticos*. CDMX, MX, 2005.
- [19] U. Guevara-Morales, A., & Figueroa-López, “Residual stresses in injection molded products.,” *J. Mater. Sci.*, pp. 4399–4415, 2014.
- [20] B. Ozcelik and I. Sonat, “Warpage and structural analysis of thin shell plastic in the plastic injection molding,” vol. 30, pp. 367–375, 2009, doi: 10.1016/j.matdes.2008.04.053.
- [21] R. Surace, V. Bellantone, G. Trotta, and I. Fassi, “Replicating capability investigation of micro features in injection moulding process,” *J. Manuf. Process.*, vol. 28, pp. 351–361, 2017, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.07.004.
- [22] T. Koslowski and C. Bonten, “Shrinkage , warpage and residual stresses of injection molded parts Shrinkage , Warpage and Residual Stresses of Injection Molded Parts,” vol. 070003, no. January, 2019.
- [23] B. Kim and J. Min, “Journal of Materials Processing Technology Residual stress distributions and their influence on post-manufacturing deformation of injection-molded plastic parts,” *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 245, pp. 215–226, 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.02.015.
- [24] S. Katmer and C. Karatas, “Shrinkage and Warpage in the Permanent Shape of Sape-Memory Polyurethane Parts,” *Mater. Plast.*, vol. 58, no. 4, pp. 102–113, 2021, doi: 10.37358/MP.21.4.5536.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

- [25] T. H. Wang and W. Bin Young, “Study on residual stresses of thin-walled injection molding,” *Eur. Polym. J.*, vol. 41, no. 10, pp. 2511–2517, Oct. 2005, doi: 10.1016/J.EURPOLYMJ.2005.04.019.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	\$CODIGO
		Versión	\$VERSION
		Fecha	\$FECHA

ANEXO

FIRMA ESTUDIANTES	 _____
FIRMA ASESORES	 _____

FECHA ENTREGA: Noviembre 4 de 2022.