

**ANÁLISIS TÉRMICO Y REOLOGICO PARA MOLDES DE INYECCION
PLASTICA**

FABIAN ARBEY VARGAS TABORDA


INGENIERIA ELECTROMECHANICA

CARLOS ANDRES VARGAS ISAZA

INSTITUTO TECNOLOGICO METROPOLITANO

AGOSTO

2014

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

RESUMEN

La industria, en general, está presionada en tiempo para tomar decisiones. La falta de una metodología para la toma de decisiones dificulta además su entendimiento y la estandarización. Los métodos estadísticos y de investigación de operaciones pueden proveer una estructura adecuada y auditable a estas actividades. En específico, en moldeo por inyección, las variables de proceso pueden determinar la calidad final de las partes producidas, por lo que es primordial entender cómo realizar cambios en estas variables. Tomando además en cuenta la naturaleza multicriterio de los procesos de manufactura, se requiere de una selección cuidadosa de técnicas capaces de resolver eficientemente este problema. La finalidad de este trabajo es determinar las variables del proceso, demostrando con un caso práctico la utilización de una metodología de optimización, apoyada en análisis de datos enfocada a encontrar los mejores compromisos entre múltiples medidas de desempeño.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

RECONOCIMIENTOS

Presento un sincero agradecimiento al profesor CARLOS ANDRES VARGAS ISAZA director de este proyecto por su gran orientación, seguimiento y dedicación en la elaboración de este proyecto de grado, para conseguir los resultados que se presentan en este trabajo, además por su conocimiento aportado.

Agradecerte a ti Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, porque hiciste realidad este sueño anhelado.

Al INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO (ITM) por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

Un agradecimiento muy especial por la comprensión, paciencia y el ánimo recibidos de mi esposa e hijo y familia en todo el tiempo de mi carrera.

A Carlos Mario córdoba, gerente de la empresa optimoldes SAS. Por permitirme desarrollar este proyecto con uno de sus diseños y el apoyo que me ha brindado.

A todos ellos, muchas gracias.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

ACRÓNIMOS

PP: Polipropileno.

PID: Proporcional integral derivativo.

CAE: Ingeniería asistida por computador.

CAD: Diseño asistido por computador.

PLC: Controlador Lógico Programable.

(Tc): Tiempo de compactación.

(Ti): Tiempo de inyección.

(Tp): Tiempo de plastificación.

(Ts): Tiempo de solidificación o enfriamiento.

Tm: Temperatura del molde (°C)

Tc: temperatura del material fundido (°C)

Fc: Fuerza de cierre.

Pi: Presión de inyección.

PvT: (relaciones de presión-volumen-temperatura).

Mpa : Mega pascales.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

TABLA DE CONTENIDO	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.	7
1.1. GENERALIDADES.	7
1.2. OBJETIVOS.	8
1.3. ORGANIZACION DEL TRABAJO.	9
1.3.1. LISTA DE FIGURAS.	9
1.3.2. LISTA DE TABLAS.	11
2. MARCO TEORICO.	12
2.1. MOLDEO POR INYECCIÓN.	12
2.2. MAQUINA DE INYECCION.	14
2.3. UNIDAD DE CIERRE.	16
2.4. UNIDAD DE INYECCIÓN.	16
2.5. LA UNIDAD DE POTENCIA.	17
2.6. LA UNIDAD DE CONTROL.	18
2.7. PARÁMETROS DE UNA INYECTORA.	18
2.8. PARTES IMPORTANTES DE LA MÁQUINA DE INYECCION PARA PLASTICO.	19
2.8.1. CÁMARA DE PLASTIFICACIÓN.	19
2.9. PROCESO DE INYECCIÓN.	21
2.9.1. TIEMPO DE CICLO DE INYECCIÓN.	23
2.9.2. DEFECTOS DE INYECCIÓN.	28
3. METODOLOGIA.	30
3.1. ANÁLISIS DE LA PIEZA A INYECTAR.	30
3.2. DESCRIPCIÓN DEL MOLDE EXISTENTE.	32
3.3. OBJETIVO DEL ANALISIS	33
3.3.1. PRESIÓN.	34

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	38
4.1. TIEMPO DE INYECCIÓN.	38
4.1.1. PROCESO DE LLENADO.	38
4.1.2. ANÁLISIS DEL LLENADO.	41
4.2. PROCESO DE LA COMPACTACIÓN.	42
4.3. TEMPERATURA.	48
4.4. REFRIGERACIÓN DEL MOLDE.	50
4.4.1. ANÁLISIS DE REFRIGERACIÓN.	53
4.5. ANÁLISIS DE LAS DEFORMACIONES.	55
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.	62
5.1. CONCLUSIONES.	62
5.2. RECOMENDACIONES.	63
5.3. TRABAJO FUTURO.	63
REFERENCIAS.	64


	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

1. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES.

El moldeo por inyección es un herramental para revertir resinas, polvos, pellets y otras formas de termoplástico en productos útiles. Es apropiado para todos los termoplásticos. Las máquinas de moldeo por inyección sirven para procesar y transformar polímeros. En todos los casos, los materiales granulados absorben suficiente calor para reducir su viscosidad, lo que permite la inyección del plástico caliente en molde cerrado, en el que se crea la forma deseada. Cuando se enfría, se extraen las piezas del molde con un sistema de expulsión. Las máquinas inyectoras constan de unidad de inyección y prensa de molde.

Esta tesis relaciona las herramientas de simulación del proceso de inyección. MOLDES3DX es una herramienta muy importante para el diseño de moldes y piezas plásticas inyectadas. Mediante este software se puede realizar la inyección virtual del molde y obtener una importante información que permite valorar aspectos tan importantes como la viabilidad de la pieza, los medios de fabricación necesarios, posibles defectos y dificultades técnicas que pueden aparecer en el futuro desarrollo del molde real. Actualmente estas herramientas permiten la introducción de numerosos datos y parámetros de proceso que definen tanto el molde a analizar, como el material termoplástico. El molde a analizar se define principalmente mediante la geometría de la pieza, sistemas de alimentación y refrigeración y el material o materiales con los que se va a fabricar. El material viene caracterizado por numerosas propiedades de las cuales destaca por su importancia para todos los resultados las curvas de comportamiento reológico. Los materiales termoplásticos se pueden caracterizar mediante los reómetros capilares

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

Obteniéndose los valores de viscosidad para las temperaturas y velocidades de cizalla que sufrirán en el proceso de inyección.


1.1 Objetivos.

Objetivo general.

Realizar un estudio sobre los principios que rigen el proceso de moldeo por inyección con el fin de establecer parámetros para la fabricación de piezas en plástico de un caso real e industrial.

Objetivos específicos.

Analizar los diferentes parámetros que intervienen en el desarrollo del proceso variables de la máquina de inyección, sistemas de llenado, refrigeración del molde, deformaciones y contracciones en la pieza.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

1.3 Organización del trabajo.

1.3.1 Lista de figuras.

Figura 1. Material fundido (Velia García Loera. “estudios de optimización En moldeo por inyección).	13
Figura 2. Inyección de material (Velia García Loera. “estudios de optimización en moldeo por inyección)	13
Figura 3. Expulsión de la pieza moldeada (Velia García Loera. “estudios de optimización en moldeo por inyección)	14
Figura 4. Componentes principales de una máquina de inyección. (Universidad De Antioquia - Ingeniería - Moldes De Inyección).	15
Figura 5. unidad de inyección (Universidad De Antioquia, Ingeniería, Moldes De Inyección)	17
Figura 6. Máquina de inyección tornillo (tecnología de polímeros M. Beltran y A. Marcilla).	21
Figura 7. Estructura de la unidad de inyección (S. Steven. 2008. Manufacturing Processes for Engineering Materials)	22
Figura 8. Cierre del molde e inicio de inyección (Universidad De Antioquia, Ingeniería, Moldes De Inyección).	23
Figura 9. Inyección de material (Universidad De Antioquia, Ingeniería, Moldes De Inyección).	24


	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

Figura 10. Aplicación de la presión de sostenimiento (Universidad De Antioquia, Ingeniería, Moldes De Inyección).	25
Figura 11. Plastificación del material. (Universidad De Antioquia, Ingeniería, Moldes De Inyección).	25
Figura 12. Enfriamiento y extracción de la pieza. (Universidad De Antioquia, Ingeniería, Moldes De Inyección).	26
Figura 13. Esquematización del consumo de potencia durante el ciclo de inyección. (www.metalactual.com/revista/27/procesos_moldes).	27
Figura 14. Estuche kit que se va analizar	30
Figura 15. PvT obtenida en el análisis.	35
Figura 16. Distribución de presiones del estuche kit con Moldex3D	36
Figura 17. Análisis del llenado respecto a la presión de inyección.	37
Figura 18. Llenado de la pieza con Moldex3D.	40
Figura 19. Estadísticas del proceso de llenado.	41
Figura 20. Perfil, fuerza de cierre para el llenado.	42
Figura 21. Presión de compactación.	46
Figura 22. Estadística del proceso de compactación.	47
Figura 23. Perfil, fuerza de cierre 106 (ton). Para la compactación.	47
Figura 24. Estadística de máxima temperatura.	49
Figura 25. Máxima temperatura de la pieza.	49
Figura 26. Canales de refrigeración.	51
Figura 27. Análisis de la refrigeración	52

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

Figura 28. Eficiencia de la refrigeración.	53
Figura 29. Tiempo de enfriamiento de la pieza inyectada.	54
Figura 30. Tiempo máximo de enfriamiento.	55
Figura 31. Deformación del estuche kit.	56
Figura 32. Estadística de desplazamiento.	57
Figura 33. Desplazamiento térmico.	58
Figura 34. Contracción volumétrica.	59
Figura 35. Deformación nivel 1.	60
Figura 36. Deformación nivel 2.	60
Figura 37. deformación nivel 3.	61

1.3.2 lista de tabla

Tabla 1. Análisis del ciclo de inyección.	34
---	----

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Moldeo por inyección

El proceso llamado de moldeo por inyección, ocurre cuando el plástico ya fundido o plastificado por calor y acción mecánica puede hacerse fluir mediante la aplicación de presión y llenar un molde donde el material solidifica y toma la forma del molde

El moldeo por inyección comprende tres operaciones básicas:

- a) Fundir el plástico hasta un punto donde pueda fluir bajo la aplicación de presión. Normalmente esto se hace calentando y moliendo los gránulos sólidos de material hasta formar un líquido viscoso maleable (ver figura 1), con una temperatura uniforme. Esto se lleva a cabo dentro del barril de calefacción de la máquina mediante la utilización del tornillo, el cual aporta el trabajo mecánico (fricción) que junto con el calor del barril funden (plastifican) el plástico. Es decir el tornillo transporta, mezcla y plastifica el material.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

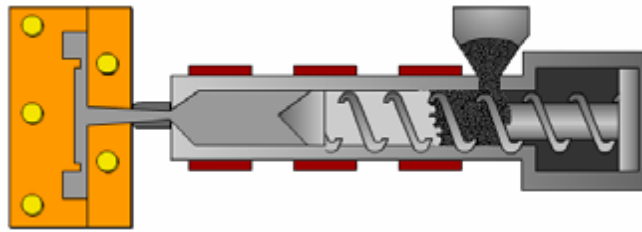


Figura 1. Material fundido

- b)** Inyección del material en el molde cerrado. En esta segunda etapa el material fundido ya plastificado en el barril de la máquina, es inyectado a alta presión a través de una boquilla (ver figura 2). que conecta el barril hacia varios canales del molde hasta llegar a las cavidades donde toma la forma del producto final.

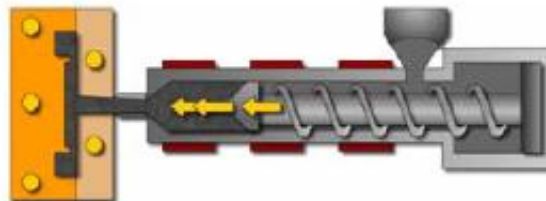


Figura 2. Inyección de material

- c)** Solidificación. El plástico se enfría al contacto con la superficie fría del molde y empieza a solidificar, la presión del tornillo se mantiene para compactar el material adicional en las cavidades y así compensar la contracción durante el

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

enfriamiento. Una vez que la pieza solidifica lo suficientemente, el molde se abre y expulsa la pieza (ver figura 3).

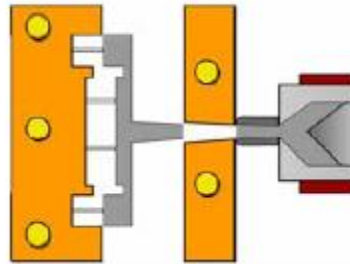



Figura 3. Expulsión de la pieza moldeada.

2.2 Máquina de inyección

El proceso de inyección está destinado a la obtención de piezas de materiales termoplásticos introduciendo el material bajo presión y a la temperatura adecuada, en un molde atemperado. Una vez solidificado el material, se abre el molde para la extracción de la pieza.

La unidad de sujeción o prensa de molde sirve para abrir y cerrar el molde y para expulsar las piezas. Los dos métodos más corrientes para generar fuerzas de sujeción usan mecanismos de abrazaderas hidráulicas directas, que eliminan las uniones mecánicas pero requieren de cilindros de sujeción de dimensiones superiores.

Las máquinas por inyección se clasifican de acuerdo al tonelaje de fuerza máxima de cierre, presión de inyección, y al volumen de carga máxima de material

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

El proceso de moldeo por inyección es llevado a cabo en una máquina inyectora (ver figura 4) la cual tiene los siguientes componentes principales : unidad de inyección, unidad de sujeción , unidad de potencia y unidad de control

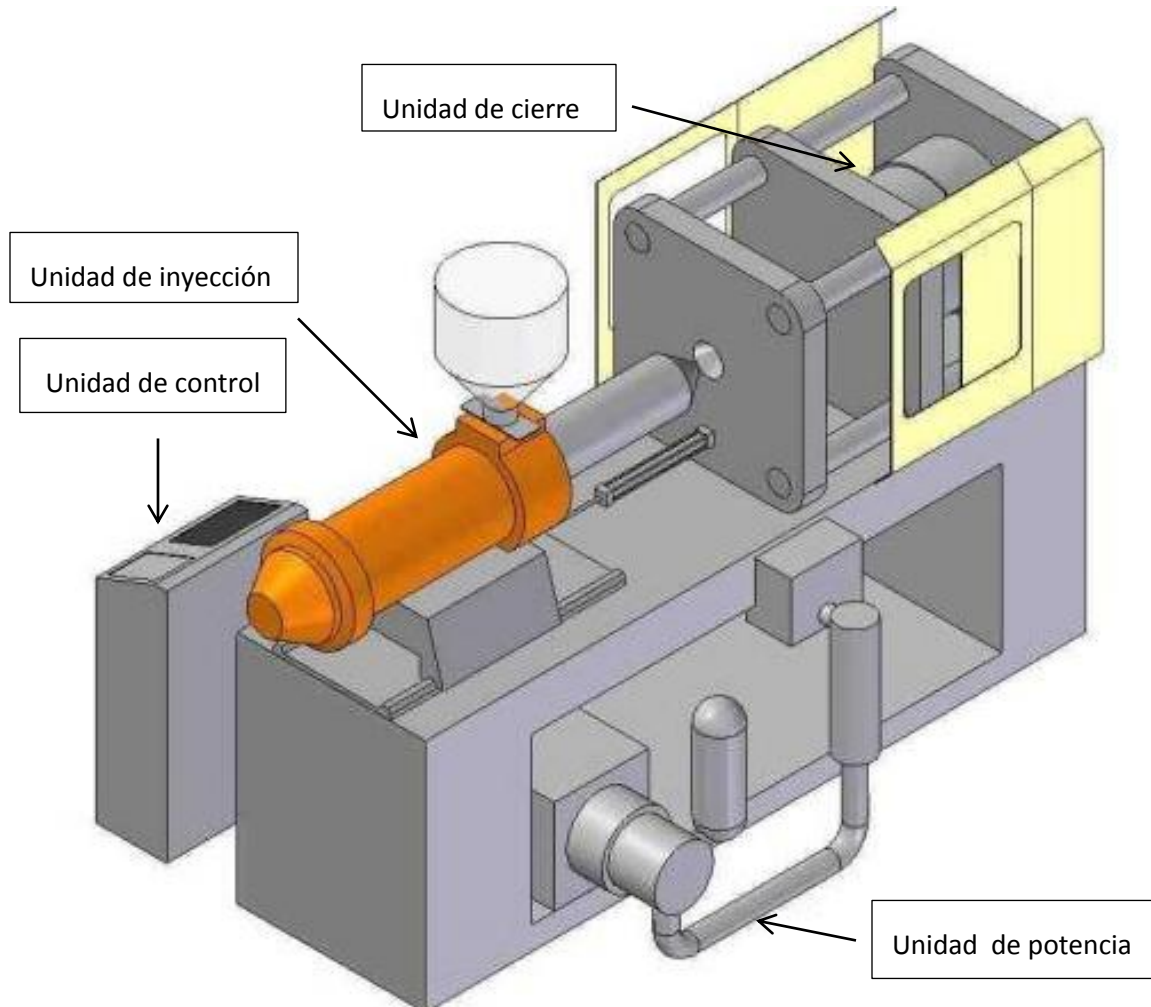



Figura 4. Componentes principales de una máquina de inyección.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

2.3 Unidad de cierre

Consiste de una prensa conformada por dos placas porta-moldes, una móvil y otra fija. El sistema de accionamiento de la placa móvil puede ser un mecanismo de palancas acodadas, accionado hidráulicamente, un cilindro hidráulico o un sistema eléctrico de tornillo sin fin accionado por un motor. El parámetro fundamental para dimensionar una unidad de cierre es su fuerza para mantener el molde cerrado. Usualmente se da este valor en toneladas (ton). Otros parámetros importantes en una unidad de cierre son: la distancia mínima entre placas, la distancia máxima de apertura, las dimensiones de las placas y la distancia entre columnas, la carrera del sistema de expulsión. Estos datos se utilizan para dimensionar los moldes.

2.4 Unidad de inyección

La unidad de inyección está conformada por el tornillo y el barril de inyección, la boquilla y las resistencias alrededor del barril. El material sólido ingresa por la tolva a la zona de alimentación del tornillo, en esta zona es transportado, por efecto de la rotación del tornillo dentro del barril, hacia la zona de fusión donde se plastifica; finalmente el material es bombeado hacia la parte delantera del tornillo en la zona de dosificación. Durante el proceso de plastificación del material el tornillo gira constantemente. Cuando se va a realizar la inyección hacia el molde, el tornillo deja de girar y actúa a manera de pistón, haciendo fluir el plástico fundido hacia el molde y llenando las cavidades (figura 5)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

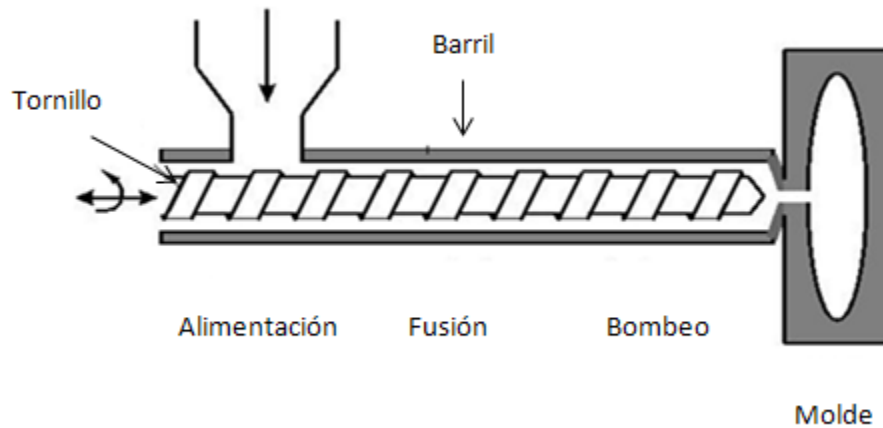



Figura 5. unidad de inyección

2.5 La unidad de potencia

Es el sistema que suministra la potencia necesaria para el funcionamiento de la unidad de inyección y de la unidad de cierre. Los principales tipos de sistemas de potencia se pueden clasificar como.

- a) Sistema de motor eléctrico con unidad reductora de engranajes.
- b) Sistema de motor hidráulico con unidad reductora de engranajes.
- c) Sistema hidráulico directo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

2.6 La unidad de control

Este sistema básicamente contiene un controlador lógico programable (PLC) y controladores PID para las resistencias eléctricas del barril y de la boquilla. El PLC permite programar la secuencia del ciclo de inyección y recibe señales de alarma, por sobrepresión o finales de carrera, para detener el ciclo. Los controladores PID son los más adecuados para el control de temperatura debido a su elevada velocidad de respuesta para mantener la temperatura a los niveles requeridos.

2.7 Parámetros de una inyectora

Las principales características utilizadas para dimensionar y comparar máquinas inyectoras son:

1. Capacidad o fuerza de cierre (F_c): es la fuerza desarrollada por el sistema de cierre de la máquina para garantizar que el molde no se abra cuando se introduce el material a presión dentro de la cavidad.

La fuerza máxima que puede desarrollar la máquina depende de sus características constructivas y no debe ser superada durante el proceso de inyección para no dañar la máquina y evitar la obtención de piezas defectuosas

2. Capacidad de inyección: es el volumen de material que es capaz de suministrar la máquina en una inyección ($\text{cm}^3/\text{inyección}$). Es común dar este valor en gramos, tomando como referencia la densidad del poliestireno.
3. Presión de inyección: es la presión máxima a la que puede bombear la unidad de inyección el material hacia el molde. Usualmente se trabaja a un 60% de esta presión o menos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

4. Capacidad de plastificación: es la cantidad máxima de material que es capaz de suministrar el tornillo, por hora, cuando plastifica el material; se da en kg/h.
5. Velocidad de inyección: consiste en la velocidad de desplazamiento que se comunica al tornillo de inyección para que introduzca el material en el interior del molde, lo cual condiciona el caudal de material que accede a la cavidad. Esta velocidad puede ser parametrizada entre 5 y 10 intervalos del recorrido del tornillo (dependiendo de las características de la maquina), de forma que puede ser variable en función de la posición del tornillo durante el proceso de inyección; se da en cm^3/s .

2.8 Partes importantes de la máquina de inyección para plástico

2.8.1 Cámara de plastificación

Su función es introducir en la cavidad del molde una cantidad de material previamente determinada, que corresponde al volumen de las cavidades del molde, su otra función es fundir los polímeros. Ver (figura 6).

El sistema de plastificación y la rotación del tornillo. Sus componentes más importantes son:

- a) **El tornillo:** es un tornillo sinfín que tiene profundidad variable de los filetes. Esto determina la razón de compresión del material fundido, y es la que asegura que podrá ser conducido hacia delante bajo el efecto de una presión positiva. La primera sección del tornillo, donde los gránulos ingresan, se llama zona de alimentación (que está debajo de la tolva), la segunda zona se llama zona de compresión. Es aquí donde se lleva a cabo la transferencia de calor por acción friccional del tornillo hacia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

paredes del cilindro, y la tercera zona, que es donde el material termina de plastificarse hasta quedar preparado para ser inyectado a las cavidades del molde.

- b) **Válvula anti retorno:** esta válvula está generalmente en la punta del tornillo con el propósito de evitar el reflujo del material plástico durante el período de inyección, este elemento es conocido como válvula cheque.

- c) **Tobera:** permite el paso del material fundido hacia la cavidad del molde, guiándolo como un camino estrangulado. Se encarga de asegurar el sello hermético entre el cilindro y el molde.

- d) **Sistema de plastificación:** para la plastificación se debe poner a rotar el tornillo. Éste se encarga de empujar el material hacia delante dejándolo listo para la inyección. Para la rotación del tornillo se usan dos métodos, el primero es por medio de un motor hidráulico, y el segundo por medio de un motor eléctrico con algún sistema reductor de velocidad, engranajes o fajas.

- e) **Bandas de calefacción:** están situadas en la parte exterior del cilindro, Éstas son las encargadas de proporcionarle calor al cilindro para ayudar a la plastificación del material, junto con el calentamiento por fricción que genera la rotación del tornillo. Generalmente se dividen por sectores o zonas de calefacción, zona frontal, zona central, zona trasera y tobera.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

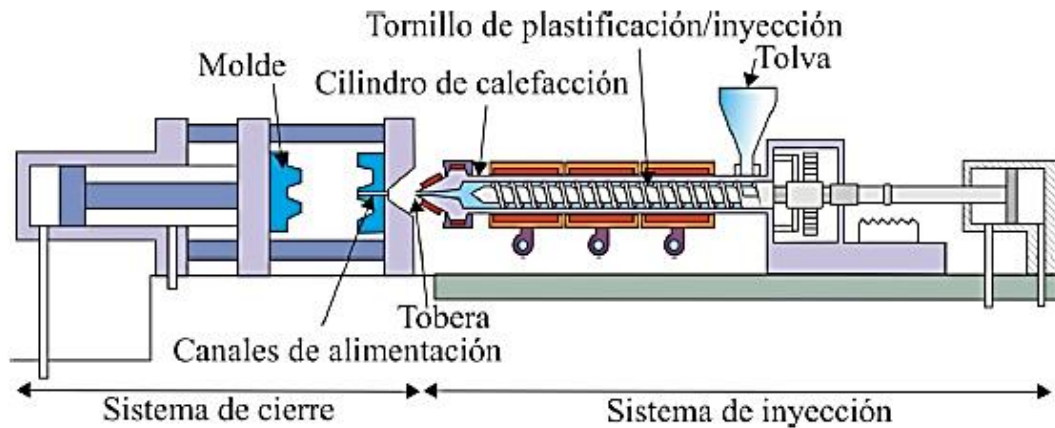



Figura 6. Máquina de inyección tornillo

2.9 Proceso de inyección.

De manera general el proceso de fabricación de una pieza por inyección de plástico es el siguiente ver (figura 7):

1. Alimentar un polímero en forma de bolitas (“pellets”) a la máquina, a través de la tolva. El material debe estar seco y a temperatura ambiente.
2. El plástico pasa hacia el cañón donde se deposita alrededor del husillo. Con ayuda de las bandas calentadoras se aumenta la temperatura del material.
3. El husillo gira hacia atrás para que el material pase hacia la parte frontal de la unidad de inyección. Con este movimiento el plástico es comprimido e inducido a un estado de esfuerzos de corte, con lo cual se funde de una forma más eficiente.
4. Una vez cargada de plástico la punta del husillo, éste se mueve hacia el frente, empujando el polímero fundido a través de la nariz y dentro de la cavidad del molde. La unidad de inyección mantiene la presión durante

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

unos segundos para evitar que el material fundido regrese antes de que solidifique dentro del molde.

5. El material fundido es mantenido dentro del molde durante unos segundos para que solidifique, obtenga una dureza adecuada y se enfríe. Una vez lista la pieza, el molde se abre y los eyectores la empujan fuera de las cavidades. La pieza cae por gravedad.

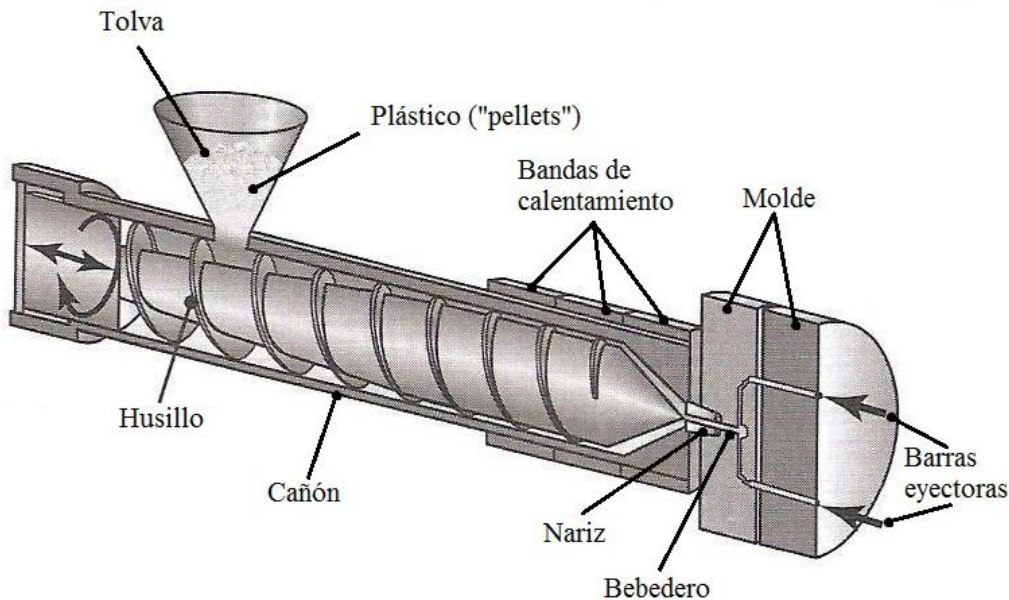


Figura 7. Estructura de la unidad de inyección.

A continuación se describe en una forma más detallada lo que ocurre en los pasos del proceso de moldeo por inyección.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

2.9.1 Tiempo de ciclo de inyección:

- a) **Cierre del molde**, durante el cual actúa el sistema de cierre, la maquina ejecuta el movimiento necesario y cierra el molde. Ver (figura 8)

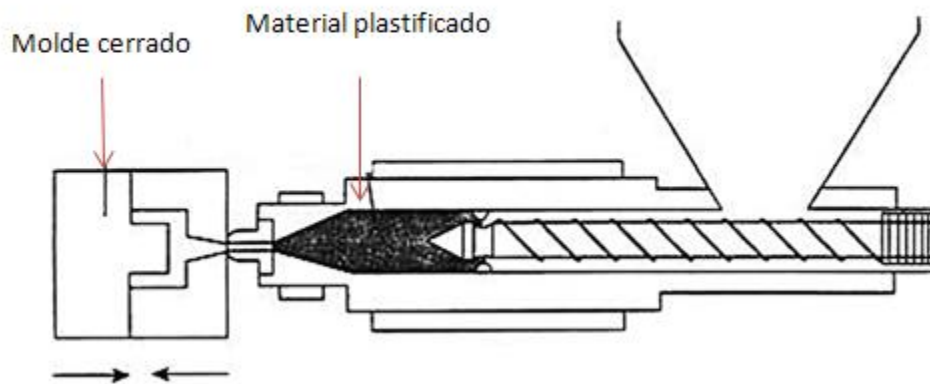


Figura 8. Cierre del molde e inicio de inyección

- b) **Tiempo de avance de la unidad de inyección**, durante el cual la unidad de, que hasta el momento se encuentra separada del molde, avanza hasta que la boquilla se posa sobre el bebedero del molde (punto de entrada al molde)
- c) **Tiempo de inyección (T_i)**, Período en el que comienza a ingresar el material a la cavidad y que es proporcional tanto a la velocidad de inyección como a la presión de inyección hasta que se llena el volumen de la cavidad. Ver (figura 9)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

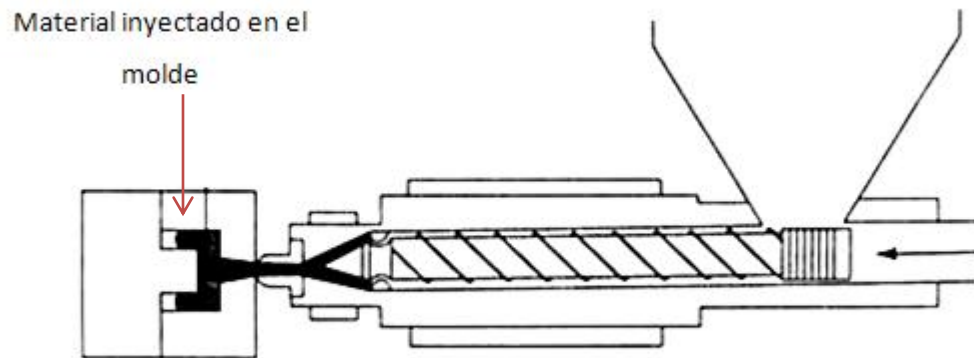



Figura 9. Inyección de material

d) Tiempo de compactación(T_c), durante el cual el molde permanece cerrado y el polímero comienza a enfriarse se contrae, por lo que para mantener la presión en el molde durante este periodo se suele introducir lentamente algo más de material dentro de la cavidad de moldeo, lo que compensa la contracción. este periodo puede variar entre unos segundos y varios minutos. El peso final de la pieza, su estabilidad dimensional y las tensiones internas que pudieran aparecer depende de cómo se realice esta etapa que finaliza en el momento en el que el material que ocupa la entrada del molde solidifica, de modo que ya no es necesario mantener la unidad de inyección avanzada para seguir manteniendo la presión. Ver (figura 10)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

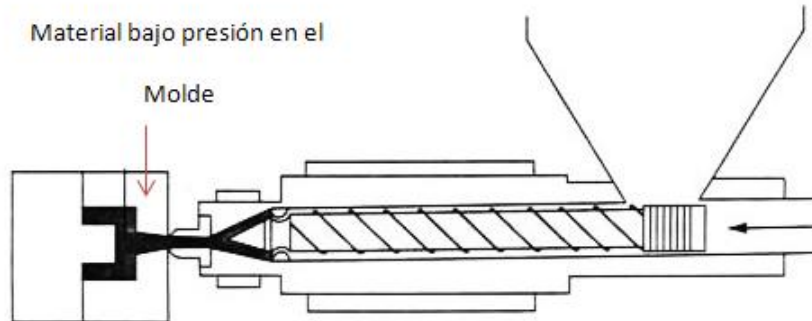


Figura 10. Aplicación de la presión de sostenimiento.

- e) **Tiempo de retroceso de la unidad de inyección.** Cuando la entrada a la cavidad solidifica la unidad de inyección retrocede, y comienza el movimiento rotatorio del husillo para plastificar el material para la siguiente etapa simultaneándose con la fase de enfriamiento, apertura del molde y extracción de la pieza y acelerando a si el tiempo total del ciclo. Ver (figura 11)

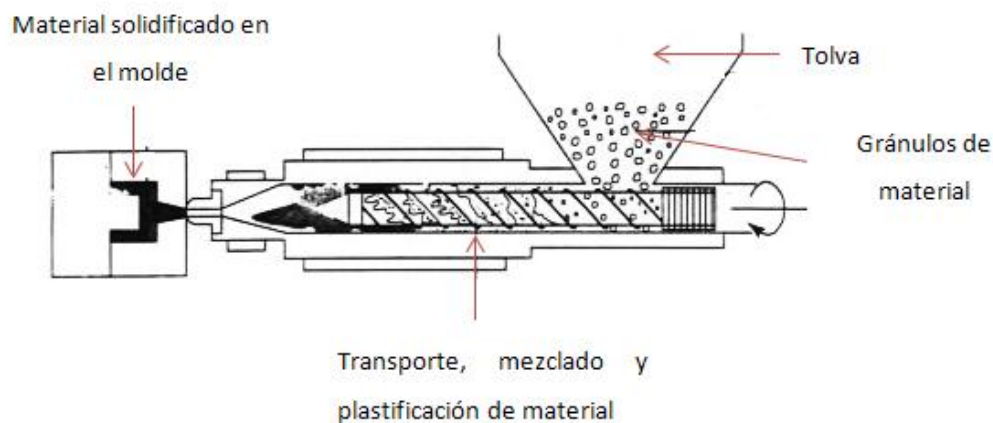


Figura 11. Plastificación del material.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

f) **Tiempo de enfriamiento (T_s)**, necesario para enfriar el polímero que ocupa las cavidades del molde. Generalmente se toma este tiempo desde que acaba la etapa de compactación hasta que abre el molde, sin embargo realmente el enfriamiento del material comienza tan como el polímero toca las paredes fría del molde, y finaliza cuando se extrae la pieza, por lo que el enfriamiento tiene lugar también durante las etapas de llenado y compactación.

g) **Tiempo de apertura del molde**, durante el cual se abre el molde. Este tiempo viene a ser aproximadamente constante para cada máquina. Ver (figura 12)

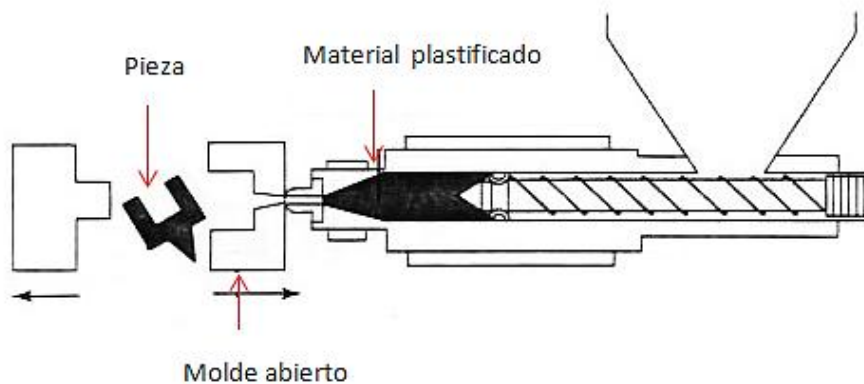


Figura 12. Enfriamiento y extracción de la pieza.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

- h) **Tiempo de extracción de la pieza**, durante el cual se sacan las piezas moldeadas de las cavidades de moldeo.
- i) **El molde cierra y se reinicia el ciclo.** En cuanto al consumo de potencia en cada una de las etapas del ciclo, se observa que en el cierre del molde apenas se requiere la potencia necesaria para vencer la fricción generada al desplazar la placa móvil. La etapa de inyección necesita la potencia máxima durante un período muy corto. El desplazamiento de la unidad de inyección y la apertura del molde requieren muy poca potencia. Ver (figura 13)

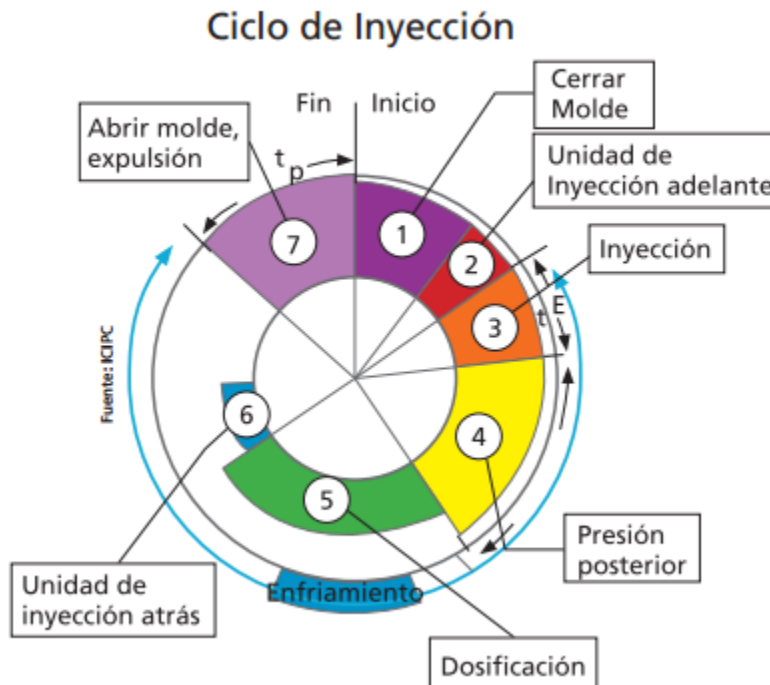


Figura 13. Esquematzación del consumo de potencia durante el ciclo de inyección.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

2.9.2 Defectos de inyección

Al igual que en los demás procesos de manufactura, en la inyección de plástico pueden presentarse piezas defectuosas. Los defectos pueden ser de diversa índole. Podemos agrupar las causas de éstos de la siguiente manera:

- Por temperaturas de proceso inadecuadas
- Por presión de inyección inadecuada
- Por fuerza de cierre inadecuada
- Por tiempo de enfriamiento inadecuado
- Por mal manejo del material
- Por mal diseño del molde

A continuación se enumeran algunos de los defectos más comunes:

- Burbujas: Son huecos en la pieza debidos a aire atrapado dentro del material.
- Rechupes: Son huecos en la pieza debidos a contracción durante la solidificación y una insuficiente inyección de material o presión de sostenimiento baja.
- Piezas incompletas: Se refiere al mal llenado de la cavidad del molde, debido a una inyección insuficiente de material.
- Rebabas: Son sobrantes de material en la pieza, que aparecen en forma de aletas a lo largo de la línea de unión del molde. Sus posibles causas son una presión de inyección muy alta, una presión de cierre baja, una inyección excesiva de material, viscosidad del material baja, un mal cierre

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

del molde o un mal funcionamiento del mismo por desgaste o por mal diseño.

- Deformación: Puede deberse a una mala expulsión de la pieza o a un tiempo de enfriamiento insuficiente.
- Quemado: Es la degradación del material debido a un calentamiento excesivo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

3. METODOLOGÍA

3.1 Análisis de la pieza a inyectar

La pieza objeto de estudio es un estuche kit (figura 14) que ha partido de un modelo tridimensional con un espesor de 1.4mm con bisagras intermedias lo cual dificulta el patrón de llenado. Su punto de inyección se encuentra 30mm desplazado del centro del molde, es decir del punto de inyección de la máquina. De tal forma que el llenado y las fuerzas que actúan en el molde no serán uniformes. Esto nos determina que se presenta un llenado desbalanceado, es decir algunas zonas se llenan primero que otras, lo cual no es una condición ideal de llenado en el proceso de inyección.

El tipo de material que se utilizo es un polipropileno (PP) inyectado a diferentes niveles de temperatura (220, 240 y 260 °C).

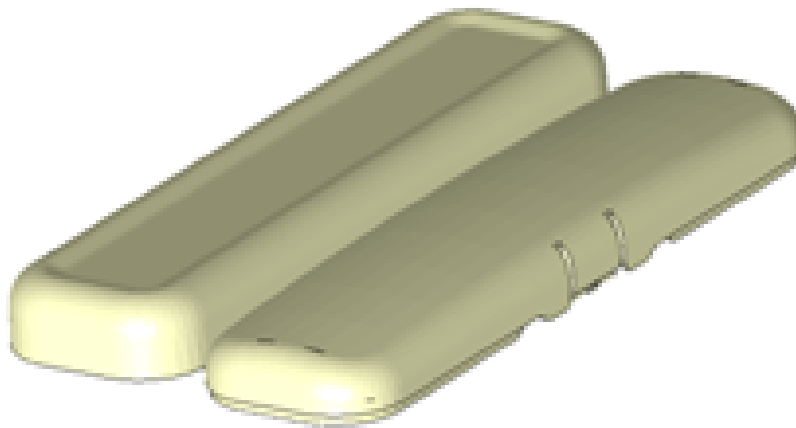



Figura 14. estuche kit que se va analizar.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

El tipo de sistema de alimentación empleado fue de colada caliente que fue el sistema empleado en el molde real fabricado.

Las etapas que deben realizarse en un proceso de simulación térmica y reológica son:

- **Definición modelo 3D.** Se diseña el modelo CAD en tres dimensiones de la pieza a fabricar.
- **Mallado.** La densidad de la malla define el tamaño de los elementos en que se divide la pieza a analizar. Una elevada densidad define una malla fina que requiere de un mayor tiempo de cálculo y permite obtener resultados más precisos.
- **Definición de variables del proceso.** Definición de las condiciones de procesamiento: temperatura de entrada del material en la cavidad, Temperatura de refrigeración, temperatura del molde, tipo de material a inyectar, material del molde, entre otras.
- **Cálculo.** A través de algoritmos de cálculo se determinan los resultados para cada uno de los elementos. Estos resultados son almacenados en un fichero para su post-procesado posterior.
- **Post-procesado.** Consiste en tratar toda la información obtenida y representarla de forma gráfica del modelo CAD. El post- procesado permite ver los resultados sobre la misma cavidad indicando mediante colores cómo varía la presión, la temperatura, las tensiones, las deformaciones o los lugares

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

dónde se prevea que se produzcan contracciones o atrapamientos de aire, entre otros muchos resultados.

- **contracciones y compactaciones.** Permite determinar las contracciones así como el perfil de la segunda presión. De esta forma puede asegurarse el dimensionado en las piezas inyectadas de forma más precisa.
- **Sistema de llenado.** Permite prever el comportamiento del plástico durante la fase de primera presión o llenado de la cavidad.
- **Sistema de refrigeración.** Simula el comportamiento del proceso de inyección teniendo en cuenta el intercambio de calor producido entre la pieza y los circuitos de refrigeración.


3.2 Descripción del molde existente.

El molde fabricado es de una cavidad, con el sistema de enfriamiento y alimentación indicada.

Se pretende con el molde actual optimizar las condiciones de proceso para obtener una pieza de buena calidad minimizando las deformaciones finales de la pieza.

El diseño del molde no se encuentra muy desfasado con el análisis hecho con el software MOLDEX3D

Inicialmente se importó la pieza ya diseñada directamente al programa de simulación desde otro software de diseño (CAE).

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

Para obtener un mejor cálculo, El tipo de malla que se utilizó fue una de tamaño (5) más fina que la de tamaño (3), ya que fueron más precisos los cálculos en el momento de evaluarlos.

Se tomaron distintos niveles y perfiles de pos-presión, con distintos tiempos de llenado en el molde para obtener un análisis adecuado acercándonos al diseño ya existente


Para el análisis térmico y reológico se tuvieron diferentes variables de temperatura de inyección para un mismo tiempo de enfriamiento en el molde.

3.3 Objetivo del análisis

El estudio de llenado es el primer análisis que se realiza y permite conocer el comportamiento del plástico durante el proceso de llenado de la cavidad.

En esta fase del estudio se informa del tiempo, la presión y la temperatura del plástico durante el llenado.

Los análisis de llenado permiten optimizar los parámetros de inyección. Además, permite predecir los problemas de inyección según las condiciones indicadas pudiéndose modificar el diseño de la pieza, del molde o seleccionar una máquina de inyección más adecuada.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

3.3.1 Presión.


Representa la distribución de presiones en cada una de las zonas de la cavidad al final del llenado. Para este análisis se tomó como referencia una presión media entre (220, 240 y 260 °C). para evitar una alta deformación en la pieza.

En la siguiente (tabla 1) y (figura 15) se observa los datos obtenidos del análisis hecho con diferentes variables en la temperatura de inyección, presión de empaquetamiento y tiempo de enfriamiento de la cavidad.

Hay que tener en cuenta que de acuerdo con el cambio de la temperatura el tiempo de enfriamiento, y la presión de compactación se puede obtener una mejor inyección en la pieza. Con menos deformaciones, obteniendo una pieza con menos márgenes de ensamble.

Temp. Iny	P. Packing	Tiempo enf.	Llenado		Empaque		Deformación		
			Presión [Mpa]	Fuerza cierre [ton]	Presión [Mpa]	Fuerza cierre [ton]	Desplazamiento total [mm]	Desplazamiento térmico total [mm]	Contracción volumétrica [%]
220	50	13,7	59,67	58,1	29,83	106,2	3,57	2	20
240	60	13,7	50,53	49,2	30,3	93,55	4	2,2	19,9
260	70	13,7	43,6	41,9	30,56	84	4,58	2,41	2,17
220	50	15	59,85	58,64	29,9	106,7	3,49	1,89	19,19
240	60	15	50,54	49	30,325	93,68	3,94	2	20
260	70	15	43,72	41,95	30,59	84,3	4,45	2,271	20,23
220	50	20	60,28	59	30,14	107,3	3,22	1,55	19,2
240	60	20	47,5	49,5	30,53	94	3,606	1,706	20,096
260	70	20	44	46	30,85	84,8	4,09	1,862	20,42

Tabla 1. Análisis del ciclo de inyección

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

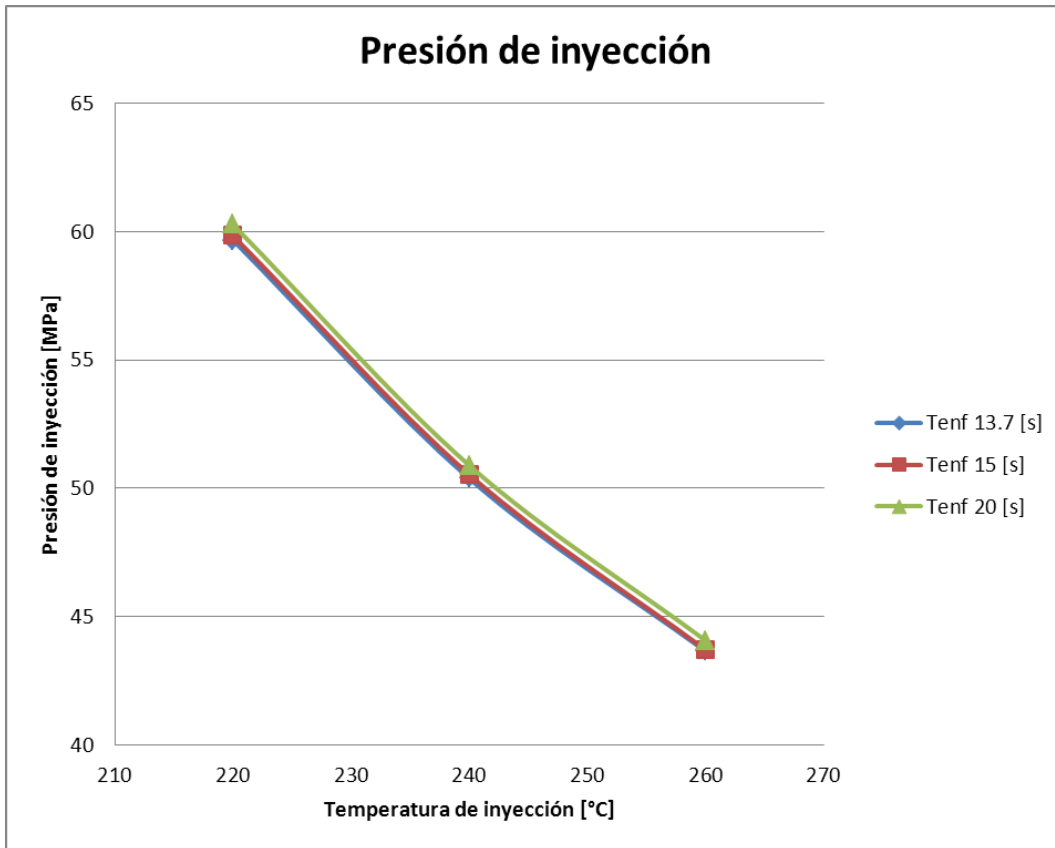


Figura 15. PvT obtenida en el análisis.

Se puede apreciar en la (figura 16) la parte máxima y mínima de presión en la pieza durante la etapa de llenado. Se observa que la zona donde finaliza el llenado tiene presión cero. Pero en la zona opuesta tiene una presión específica de 59.67 Mpa. Esta zona se está compactando ya durante la fase de llenado. La consecuencia de que el llenado de la pieza no sea simétrico para toda la pieza es el desequilibrio de presiones que se produce, que a su vez puede provocar que la pieza se deforme ligeramente perdiendo su forma.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

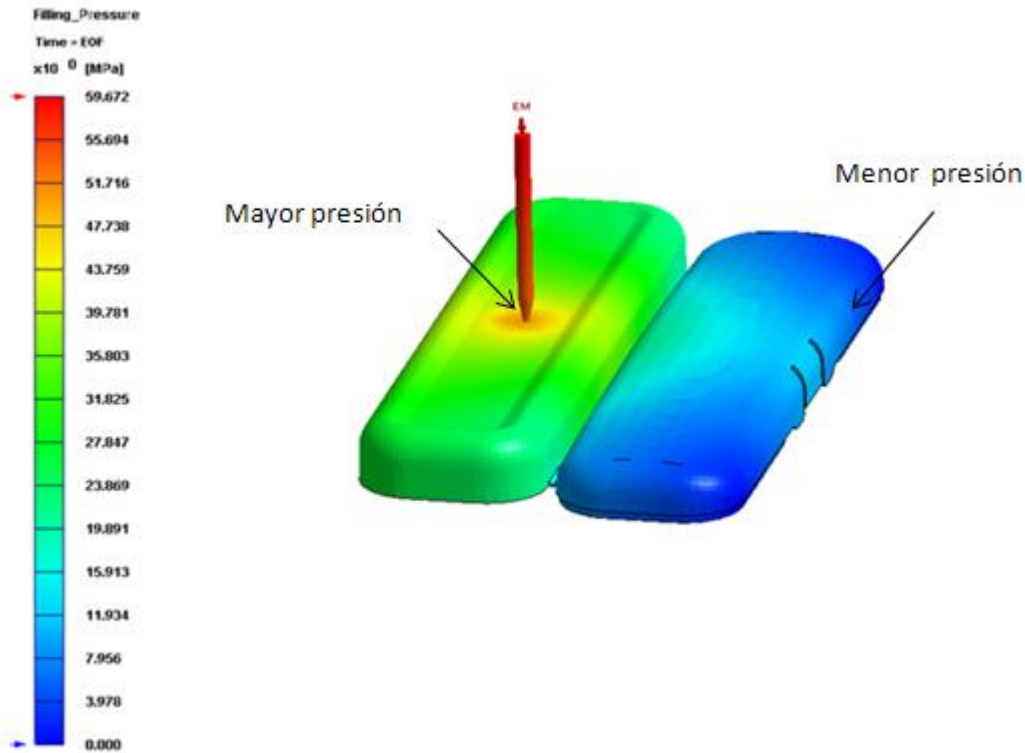


Figura 16. Distribución de presiones del estuche kit con Moldex3D.

En la (figura 17) por medio de colores se observa cual es la zona donde la presión varía respecto al cambio de temperatura en el polímero, tiempo de llenado, y restricciones de acuerdo a la geometría de la pieza. Se nota que en la zona donde hay menor presión es la de color totalmente azul con un 4.28% de la presión de llenado, la parte azul más clara obtiene un 11.54% con una presión de 5 – 6 Mpa aproximadamente, la parte verde obtiene un 8.8% con 37 Mpa, la parte de mayor presión es la de color rojo que es donde se encuentra la entrada de material con 1.07% con una presión de 55 hasta 59.67 Mpa.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

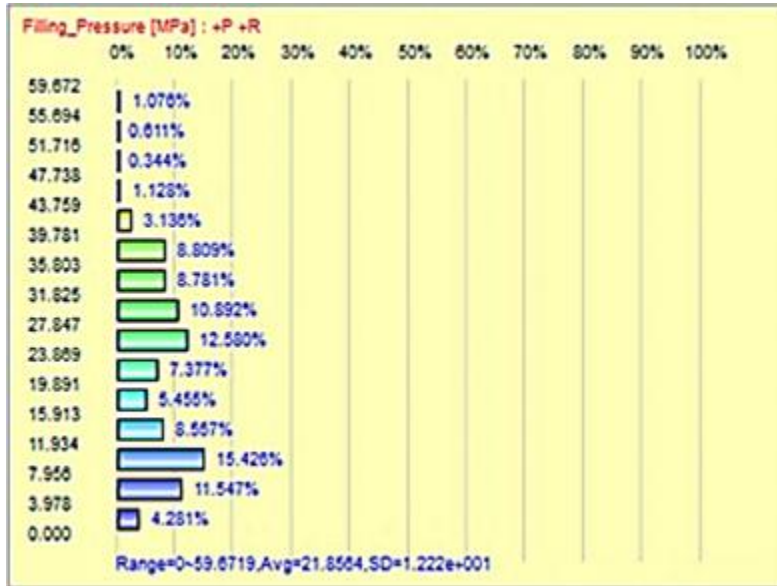


Figura 17. Análisis del llenado respecto a la presión de inyección

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Tiempo de inyección.

4.1.1 Proceso de llenado.

En el proceso de moldeo por inyección, el llenado de la cavidad es el primer paso. Básicamente, es un problema tridimensional transitorio con un frente de flujo de material polimérico en movimiento. Es un proceso complicado con acoplamiento fluido-térmico que incluye el flujo de un fluido no-Newtoniano + transmisión de calor acoplada. En general durante la fase de llenado pueden aparecer defectos si el diseño no es bueno, o el material, o las condiciones de contorno del proceso no son adecuadas.

El análisis del llenado de moldes por inyección se define como el proceso mediante el cual un material polimérico se inyecta en la cavidad de un molde por presión. Esta presión forzaría al material a llenar la cavidad del molde. La presión decrece debido a las pérdidas de carga del fluido por rozamiento con las paredes del molde. Al mismo tiempo, la presión menor aparece en el avance del frente de flujo. La diferencia de presión es la primera fuerza propulsora del material termoplástico. Normalmente, durante el proceso de llenado el material polimérico tiende a fluir hacia las cavidades de menor resistencia. Las regiones del molde donde el plástico avanza más rápido indican que en esa área se ejerce una menor resistencia contra el flujo de material. De forma similar, un menor avance del frente de flujo representa un área con mayor resistencia contra el flujo de material.

Durante el proceso de llenado, la viscosidad es una importante característica de los materiales poliméricos. Una elevada viscosidad indica una elevada resistencia al flujo de material. En efecto, la viscosidad de un polímero se puede ver como la medida de la resistencia al flujo. Además, existen numerosos factores que afectan a la viscosidad (básicamente la temperatura local, coeficiente de transferencia de calor y espesor) que deberán tenerse en cuenta para obtener un proceso de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

llenado de buena calidad. De todos ellos, el espesor es uno de los factores más críticos. Una pieza de plástico gruesa tendrá una menor resistencia al flujo, y al mismo tiempo como la conductividad térmica de los materiales termoplásticos es muy mala, la parte gruesa no podrá evacuar su calor con facilidad. Además, en la parte gruesa es muy fácil compensar la pérdida de energía debida a la baja resistencia al flujo. Por tanto, las partes más gruesas son habitualmente las zonas más calientes del molde, y por otro lado, las partes más finas de la pieza de plástico tienen una elevada resistencia al flujo y por tanto el moldeo es más complicado.

El proceso de llenado representa el avance de flujo durante el proceso desde el inicio de la inyección hasta la llegada del flujo plástico a cada uno de los extremos de la pieza .el tiempo de llenado obtenido durante la simulación es de 8.19 [seg]

Este tiempo es el requerido para llenar el volumen de la cavidad y compactar el material para compensar la contracción debido al enfriamiento en el molde.

En la siguiente (figura.18) se determina por medio de colores cómo van cambiando estos debido al tiempo de llenado, esto quiere decir que la parte azul es la parte que se tarda más en llenar siendo esta la parte más fría.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

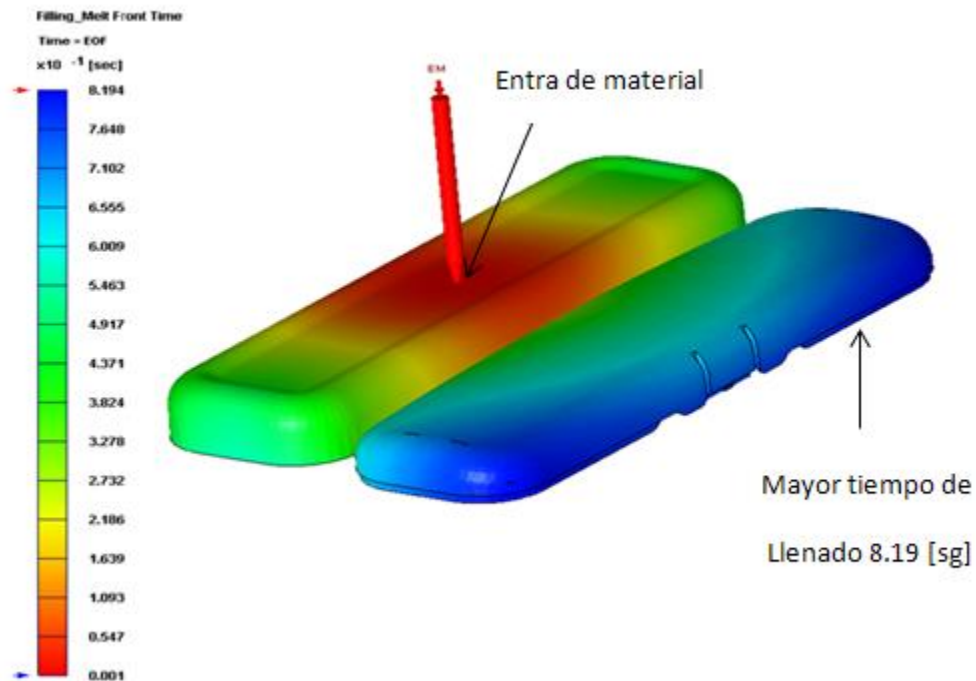



Figura 18. Llenado de la pieza con Moldex 3D.

Se observa como el llenado de la pieza no es completamente homogéneo, llenando de último la parte más alejada al punto de inyección. Esto se debe al punto de colada caliente se encuentra a 30mm desplazado del centro del molde.

En la (figura19) vemos por medio de porcentajes como es el llenado de la cavidad, de acuerdo al tiempo de inyección de la pieza donde la parte de color rojo llena con el más mínimo tiempo y un porcentaje de 8.42% de la cavidad, mientras que en el extremo del punto de inyección la pieza se llena en 8.19 seg teniendo un porcentaje de 5.94% del llenado de la pieza.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

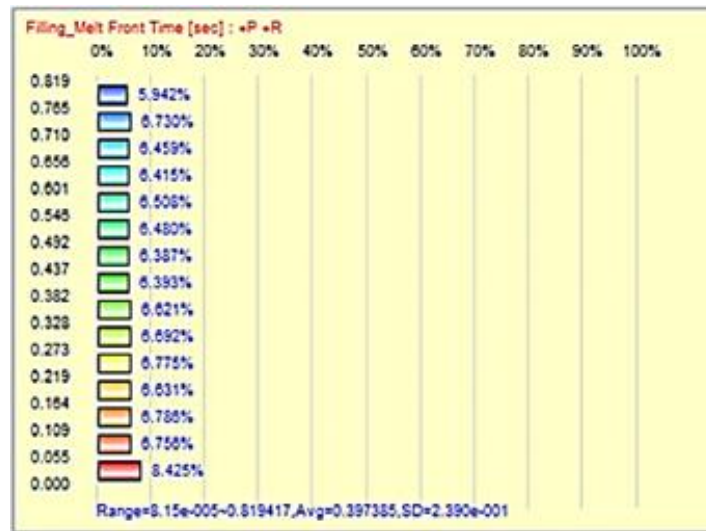



Figura 19. Estadísticas del Proceso de Llenado.

4.1.2 Análisis del llenado.

- Garantizar el llenado de la cavidad.
- Balancear el flujo de la cavidad.
- Determinar la localización de las líneas de soldadura y su calidad.
- Identificar atrapamientos de aire.
- Identificar las condiciones de proceso óptimas.
- Verificar la orientación de flujo a lo largo de la pieza.
- Determinar el tamaño de la máquina de inyección al predecir la fuerza de cierre y el peso.
- Identificar ares de alta tensión de cizalla o alta temperatura.
- Mejorar el acabado superficial y reducir el alabeo programando la velocidad de llenado.

En siguiente (figura 20) vemos la fuerza de cierre máxima es de 58.1 (ton) cuando el molde ha llenado completamente con un tiempo de 8.19 seg y una presión de 59.67 Mpa.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

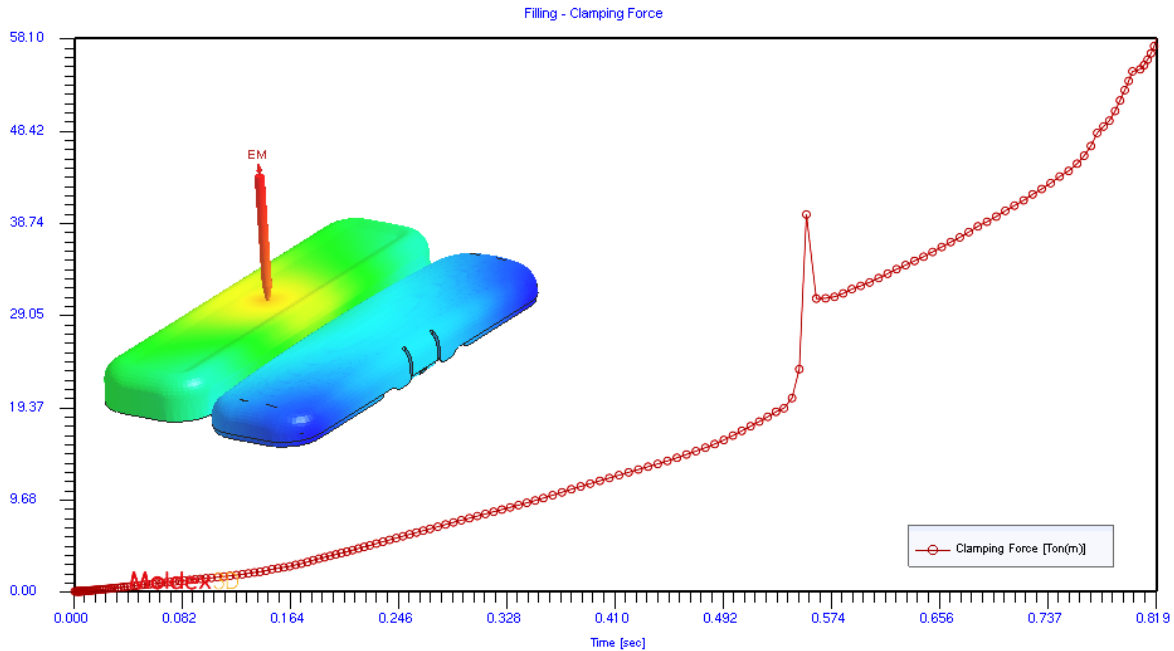


Figura 20. Perfil, fuerza de cierre para el llenado.

4.2 Proceso de la compactación.

Durante la etapa de compactación se añade el material para acabar de llenar la cavidad, compensando los efectos de contracción térmica que sufre el material durante su enfriamiento y solidificación. Durante esta fase se consigue evitar la presencia de aire atrapado y rechupes así como minimizar la contracción final de la pieza y las deformaciones que algunas partes pudieran sufrir. La fase de compactación finaliza cuando la entrada a la cavidad solidifica, de modo que la maquina ya no puede transmitir la presión de compactación al interior de la cavidad.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

La etapa de llenado se realiza a una velocidad de avance del pistón elevada y por ello el control de esta etapa se realiza bajo el control de la velocidad. La fase de compactación se realiza bajo el control de la presión. Durante esta etapa el tornillo de inyección se mantiene en posición avanzada, de modo que transmite una determinada presión, que puede ser variable, y en la mayoría de las maquinas se encuentra parametrizada en una serie de intervalos. Transición entre la fase de llenado y la de compactación debe realizarse de forma que evite picos de presión dentro de la cavidad, lo que provocaría apariciones de tenciones en la pieza.

La eficacia de la compactación termoplástica tiene un importante efecto en la deformación, la contracción y la incidencia de defectos como los rechupes. El resultado principal de un análisis de compactación es la contracción volumétrica, cuya distribución y magnitud desempeñan un papel fundamental en calidad de la pieza.

El análisis de compactación debe realizarse después de haber optimizado la pieza para el llenado, dimensionado y equilibrado los canales y, preferiblemente, haber realizado un análisis de refrigeración. Además de las entradas de un análisis de llenado, un análisis de compactación requiere las tres entradas siguientes:

- Presión de compactación.
- Tiempo de compactación.
- Tiempo de refrigeración.
-

a) Determinar una presión de compactación adecuada, La presión de compactación se utiliza para compactar una pieza y suele estar relacionada con la presión de llenado. De forma aproximada, la presión de compactación debe ser aproximadamente el 80% de la presión de llenado;

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

sin embargo, la presión de compactación puede variar considerablemente. Las presiones de compactación suelen estar entre el 20% y el 100% de la presión de llenado, y pueden ser más altas o más bajas. Un aspecto importante de la presión de compactación es que no puede ser tan alta que supere el límite de cierre de la máquina. La fórmula siguiente se usa para estimar la presión máxima que se debe utilizar. Esta fórmula determinará una presión suponiendo un gradiente constante a lo largo de la pieza, de forma que se utilice el 80% de la capacidad de la máquina. Este enfoque es conservador, pero se puede usar como punto de partida.

$$P_{max} = \frac{F}{A} 100 \times 0.8MPa$$

Dónde:

- F es la fuerza de cierre (toneladas).
- A es el área proyectada total del modelo (cm²).

b) Determinar un tiempo de compactación adecuado Para identificar el tiempo en que se solidifica la entrada, puede comprobar repetidamente el peso de la pieza y aumentar el tiempo de compactación. Cuando se produce la solidificación de la entrada, el peso de la pieza deja de aumentar. Por ejemplo, establezca un tiempo de compactación de dos segundos, seguido de otro análisis con un tiempo de compactación de cuatro segundos. Si el peso de la pieza aumenta, la solidificación de la entrada se produce después de dos segundos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

c) Optimizar un perfil de compactación La deformación se debe a una variación en la contracción y, por tanto, cuando se reduce la contracción, también se reduce la deformación. Para crear un perfil de compactación hay que optimizar el llenado y la refrigeración de la pieza. Como la manera de refrigerar una pieza influye en la compactación, el perfil de compactación se debe basar en una secuencia de análisis de refrigeración + llenado + compactación que tenga en cuenta los efectos de la refrigeración del molde en los resultados de llenado + compactación. El tamaño de la pieza y el tipo de material utilizado determinarán el intervalo de contracción. Normalmente, las piezas más grandes tienen un intervalo de contracción aceptable más amplio. Debido a que la deformación se debe a una variación en la contracción, la contracción volumétrica de una pieza influye en la posible deformación y la estabilidad dimensional de la pieza. Si una pieza se contrae uniformemente, cambia de tamaño, pero los plásticos moldeados por inyección no se contraen uniformemente. La magnitud de la deformación se reducirá si se minimiza la contracción volumétrica. El intervalo de contracción volumétrica a lo largo de la pieza tiene un efecto en la deformación que supera el efecto de la magnitud de la contracción En la (figura 21). Se muestra la Distribución de la presión de la cavidad, se observa en diferentes colores en el instante actual. Sobre la base de la caída de presión y la distribución.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

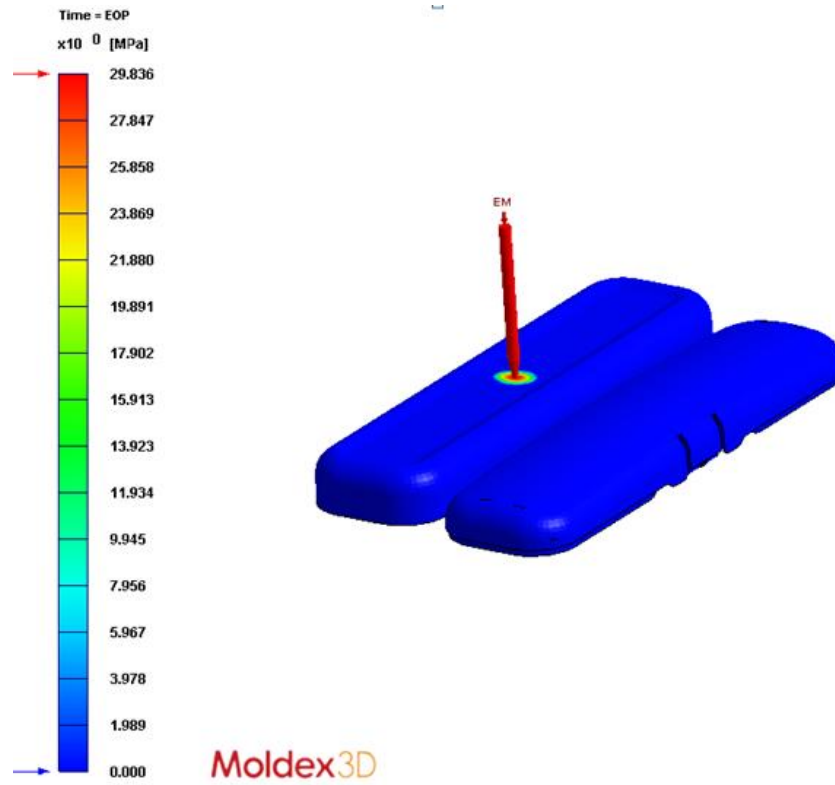


Figura 21. Presión de compactación.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

En la siguiente (figura 22) podemos notar como el 97% de la presión es aproximadamente de 2 Mpa.

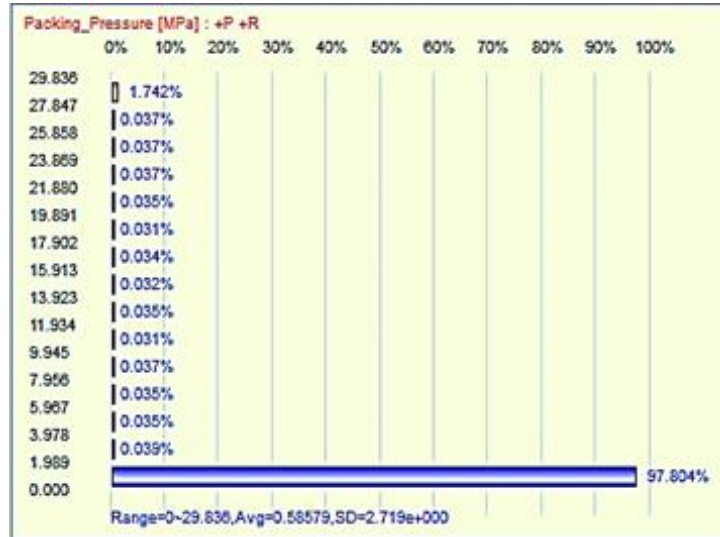


Figura 22. Estadística del proceso de compactación.

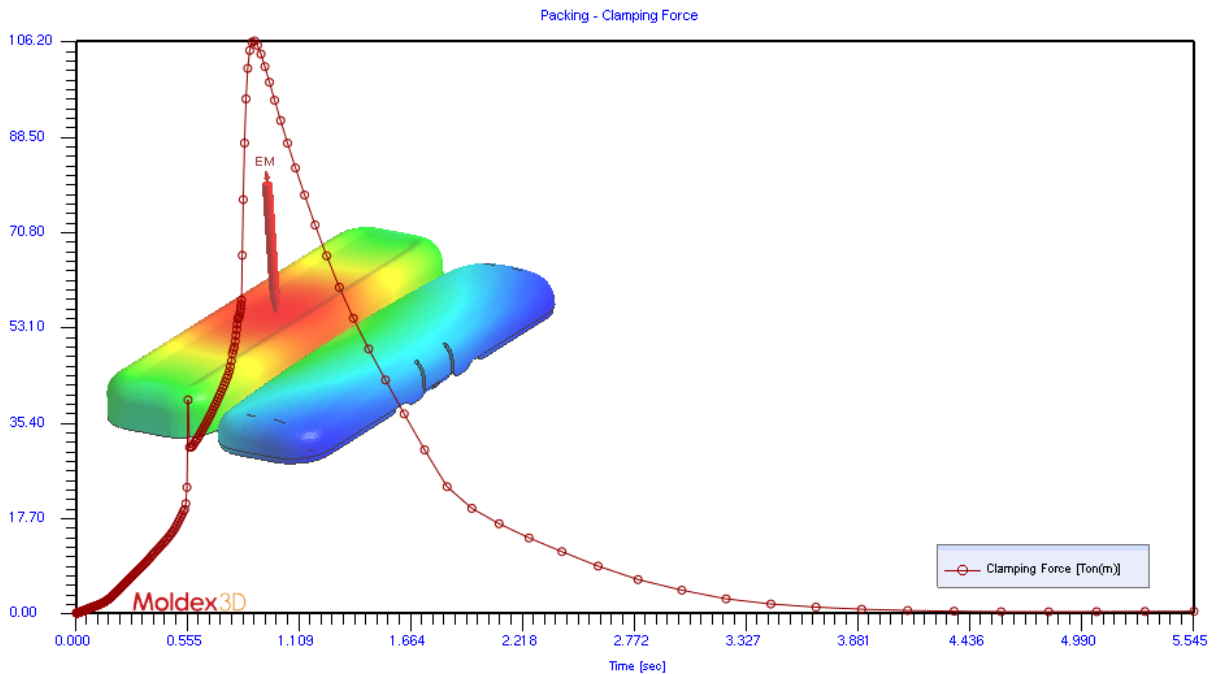



Figura 23. Perfil, fuerza de cierre 106 (Ton). Para la compactación.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

4.3 Temperatura.

Se refiere a la temperatura de todas las paredes del molde. Donde la temperatura debe ser lo más uniforme posible a lo largo de todos los puntos del molde.


Un ajuste correcto de la temperatura del molde permite

- Reducir los costos de producción por menor tiempo de enfriamiento
- Conseguir contracciones uniformes
- Obtener la calidad superficial de la pieza exigida
- Alcanzar las características mecánicas adecuadas en todas las partes de la Pieza.

En las (figuras 24,25) se nota de acuerdo con sus colores y porcentajes el valor máximo de temperatura en la pieza, se encuentra en la superficie.

Las temperaturas máximas obtenidas de acuerdo al análisis son de 219 °C aproximadamente, en un 51% de la pieza. Como lo muestra el color amarillo.

Por otra parte el color verde nos muestra un porcentaje y una temperatura de 173°C con 1.2% de la pieza. Lógicamente se puede apreciar que la mayor temperatura está dada en el área donde se encuentra el punto de inyección de igual manera este calor se distribuye rápidamente por toda el área de la cabida.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

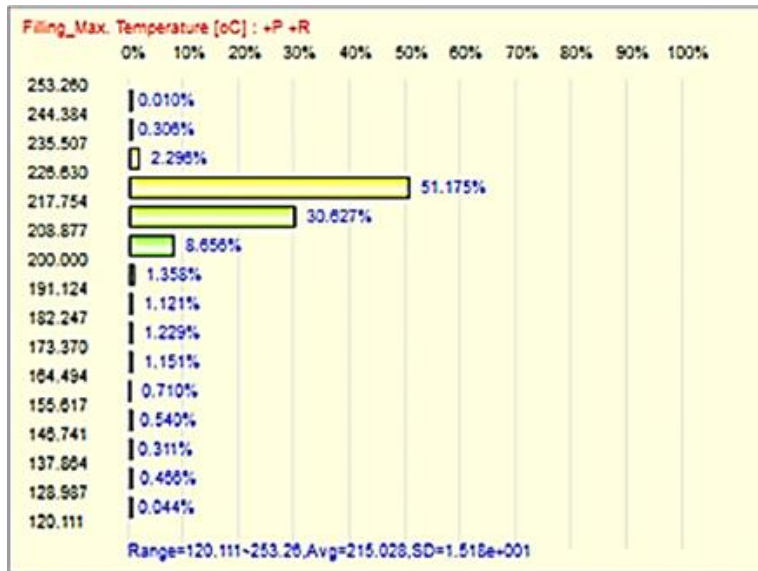


Figura 24. Estadística de máxima temperatura.

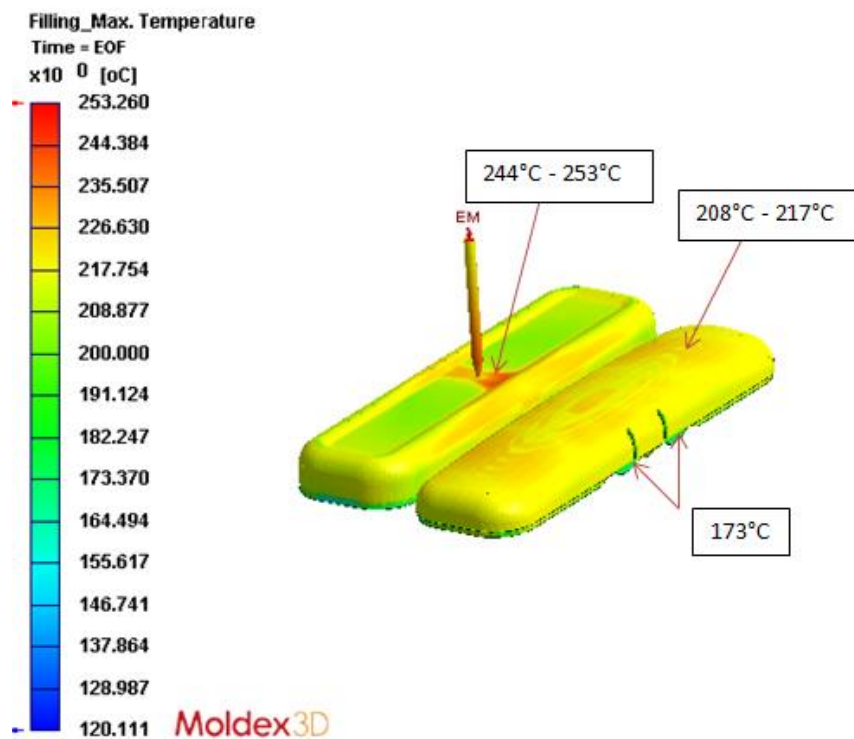



Figura 25. Máxima temperatura de la pieza.

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

4.4 Refrigeración del molde.

De los canales de refrigeración se determinan todos los factores que afectan directamente el proceso de inyección;

- Posición,
- Distancia a la pieza,
- Longitud,
- Sección de paso,
- Colocación de la entrada y salida del refrigerante,
- Material que se utiliza como refrigerante,
- Caudal,
- Y temperatura a la que se introduce el refrigerante en los circuitos.

La modificación de cualquiera de estos factores puede condicionar los resultados que se obtienen de la simulación, por este motivo es importante introducir al programa de simulación toda la geometría del molde del que obtiene la pieza a simular con mayor precisión posible. Ver (figura 26)

El sistema actual de refrigeración se encarga de evacuar el calor de la cavidad del molde. Está formado por seis circuitos de refrigeración en el macho y cuatro circuitos en la hembra de diámetros 8 mm. Como refrigerante se emplea agua, a la misma temperatura en todos los circuitos, a 15°C su objetivo es obtener un enfriamiento lo más uniforme posible.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

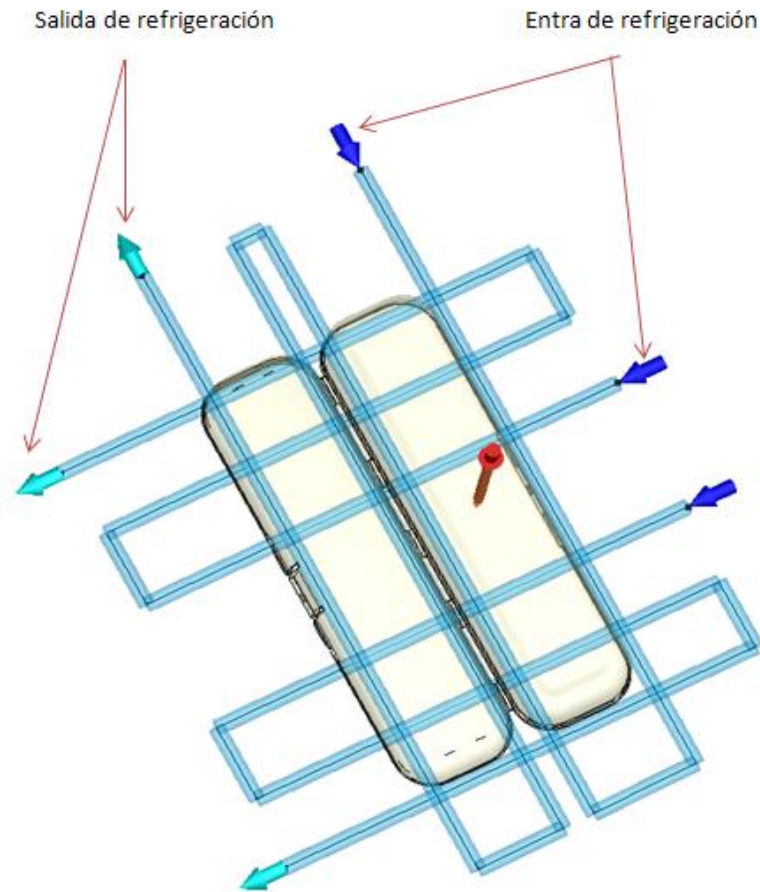



Figura 26. Canales de refrigeración.

En la (figura 27) se observa que el canal de color azul obtiene el mayor porcentaje de la refrigeración 53.33 % esto debido a que contiene más canales y está expuesto a menor temperatura ya que está en la parte del macho. Mientras que el canal de color rojo muestra menos porcentaje 48.66% de refrigeración ya que obtiene menos canales, además tiene la boquilla que es la entrada de material y esta mantiene una temperatura de (220, 240 y 260 °C).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

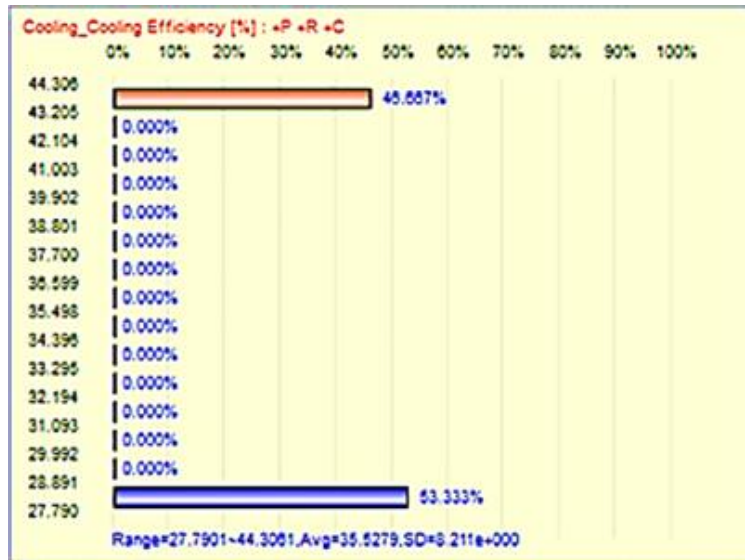


Figura 27. Análisis de la refrigeración.

Esta es la eficiencia de refrigeración del canal. Si Q_2 es el calor total absorbido a través de la superficie, y Q_m es el calor absorbido a través de la superficie del molde, la eficacia de la refrigeración de la canal de refrigeración se define como $Q_2 / (Q_2 + Q_m) * 100\%$. Estos datos muestran el porcentaje de calor retirado por el canal de refrigeración. Donde el valor positivo significa eficiencia de enfriamiento. Valor negativo representa la eficiencia de la calefacción. Ver (figura 28).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

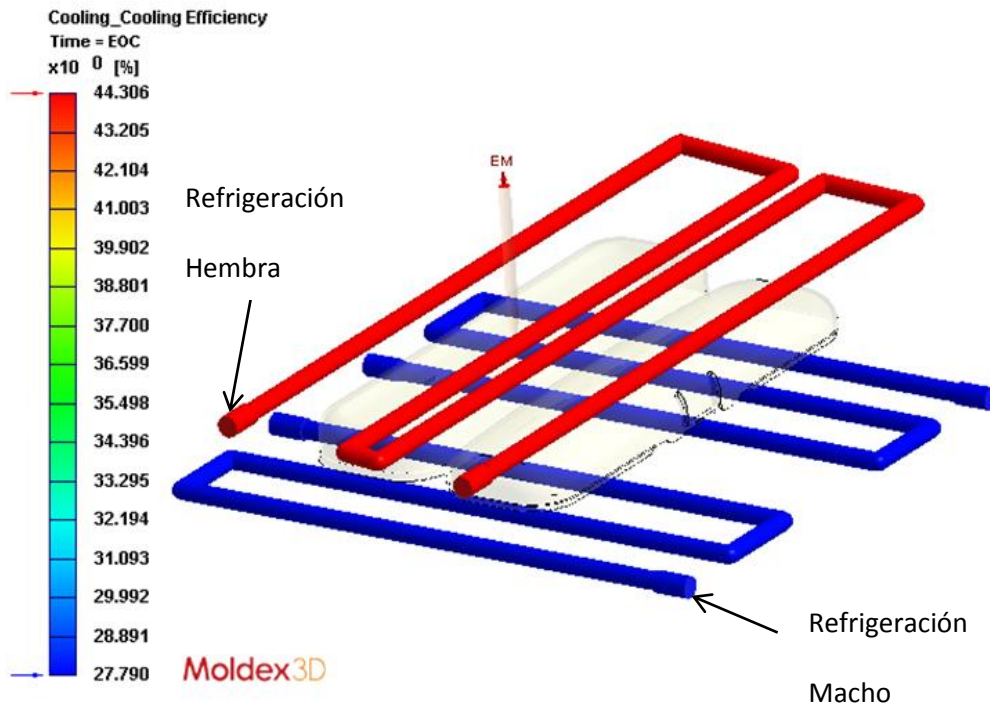


Figura 28. Eficiencia de la refrigeración.

4.4.1 Análisis de refrigeración.

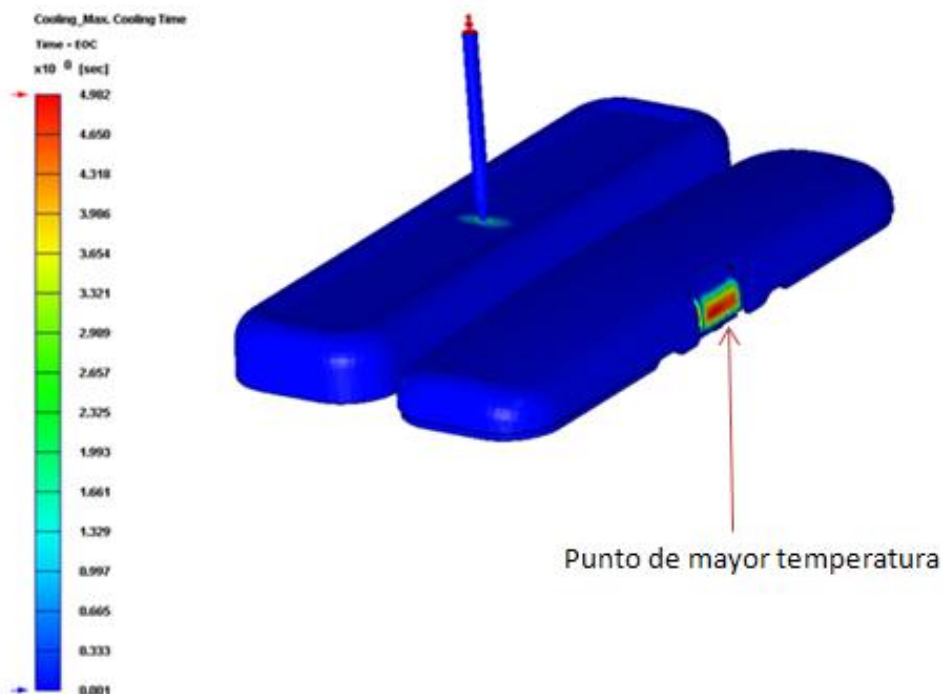
- Optimizar los parámetros de proceso correspondientes a la refrigeración.
- Evitar zonas calientes identificando los lugares en los que la refrigeración es pobre.
- Identificar los canales de refrigeración con una extracción de calor ineficiente.
- Reducir las rencias internas debido a una refrigeración no uniforme en el molde.
- Optimizar el diseño de la pieza para conseguir un enfriamiento uniforme.
- Reducir el tiempo de ciclo y por tanto aumentar la productividad.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

- Determinar los caudales necesarios en cada circuito para una correcta refrigeración.

Para optimizar el tiempo de llenado se han realizado varias simulaciones. Ver (figura 29). En las que se ha forzado la temperatura del polímero a diferentes grados, desde 220°C hasta 260°C. Se comparan los resultados de las distintas simulaciones para encontrar la mínima deformación. El proceso óptimo obtenido se simula con tres tiempos de refrigeración distintos [13.7seg, 15seg, 20seg]

Finalmente se encontró que el tipo de circuito diseñado no es el óptimo. Debido a que se hallaron partes de la cavidad sin refrigerar implicando una mayor deformación en la pieza.



Figuras 29. Tiempo de enfriamiento de la pieza inyectada.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

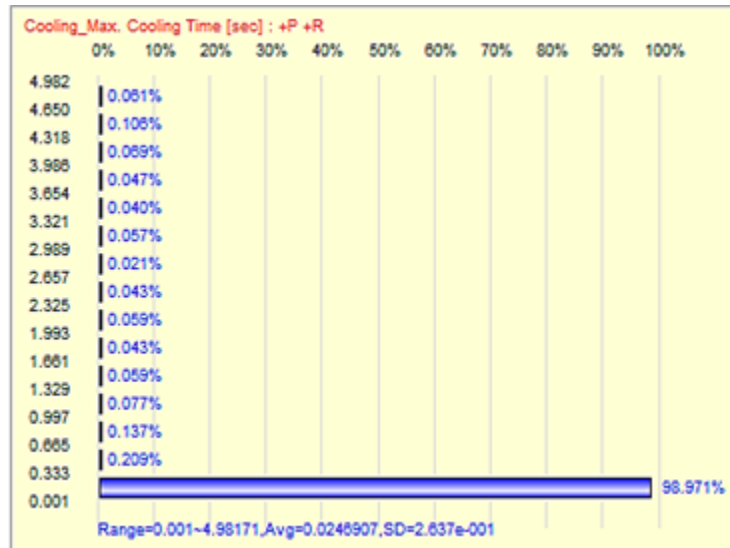


Figura 30. Tiempo máximo de enfriamiento.


En la (figura 30) muestra el tiempo de enfriamiento máximo en la dirección del espesor de la pieza.

Se observa como el enfriamiento de la pieza no es igual en el punto del enganche esta parte tarda en enfriarse 4.9seg.

En este punto no se podría colocar un canal de refrigeración ya que hay sistema de patín que forma la parte del enganche y su diseño actual no se permite modificar, por lo tanto esta parte es más fácil que se deforme por su falta de enfriamiento.

4.5 Análisis de las deformaciones.

Este análisis nos permite observar las deformaciones que se obtiene el estuche una vez enfriado. Debido a posibles tensiones internas acumuladas durante el proceso.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

Este resultado nos representa el desplazamiento en cada uno de los puntos respecto a la posición original en milímetros. Después de finalizar el proceso de enfriamiento la zona roja muestra su máximo desplazamiento de 3.5mm, que coincide con la parte del enganche, donde según su diseño la refrigeración no es la más óptima, debido a que hay un sistema de patín en este punto.

La parte de las bisagras, la zona azul es la parte donde menos deformación tenemos con 1.4% y 0.4mm de desplazamiento. Debido a su delgado espesor de material. Ver (figuras 31, 32)

Las principales causas que provocan deformación son: la refrigeración no uniforme del molde, las diferencias de evacuación de calor por diferencias de grosor y los empaquetamientos no uniformes cerca del punto de inyección.

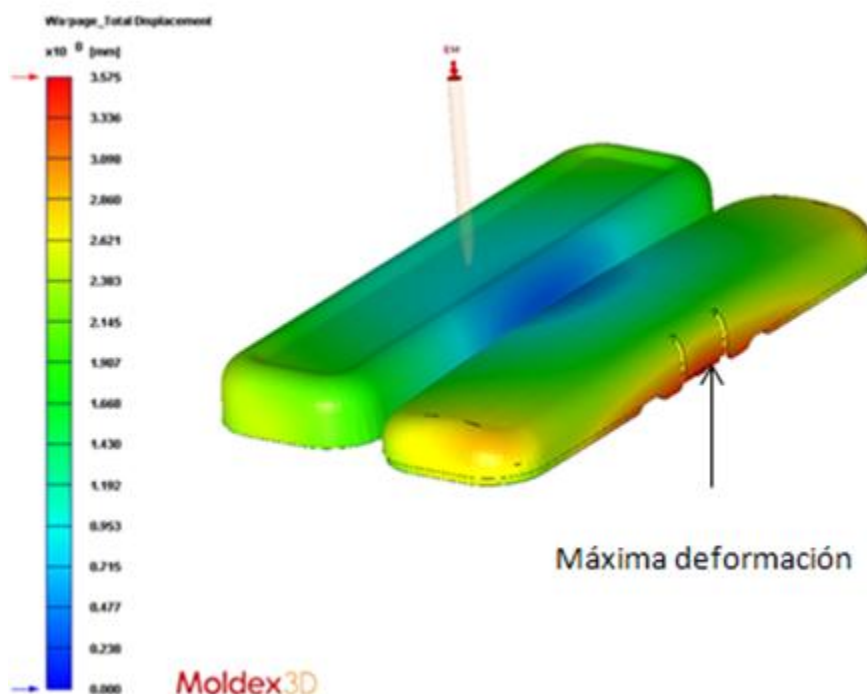



Figura 31. Deformación del estuche kit.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

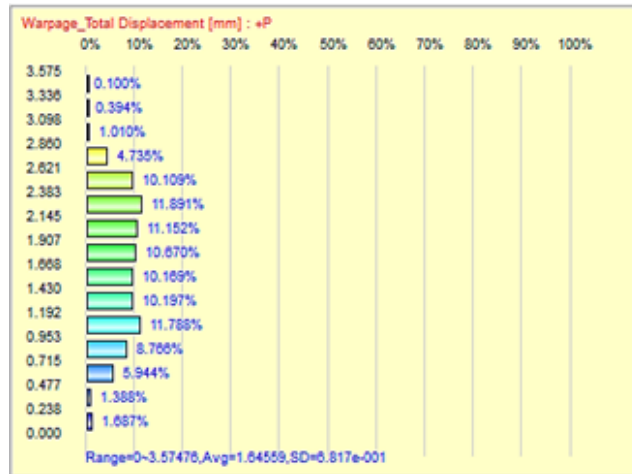



Figura 32. Estadística de desplazamiento.

En la (figura 33) muestra la longitud del desplazamiento térmico (efecto de enfriamiento del molde) después de que la pieza se expulsa y se enfría a temperatura ambiente. Este es un indicador de efecto de refrigeración equilibrada en el comportamiento parte alabeo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

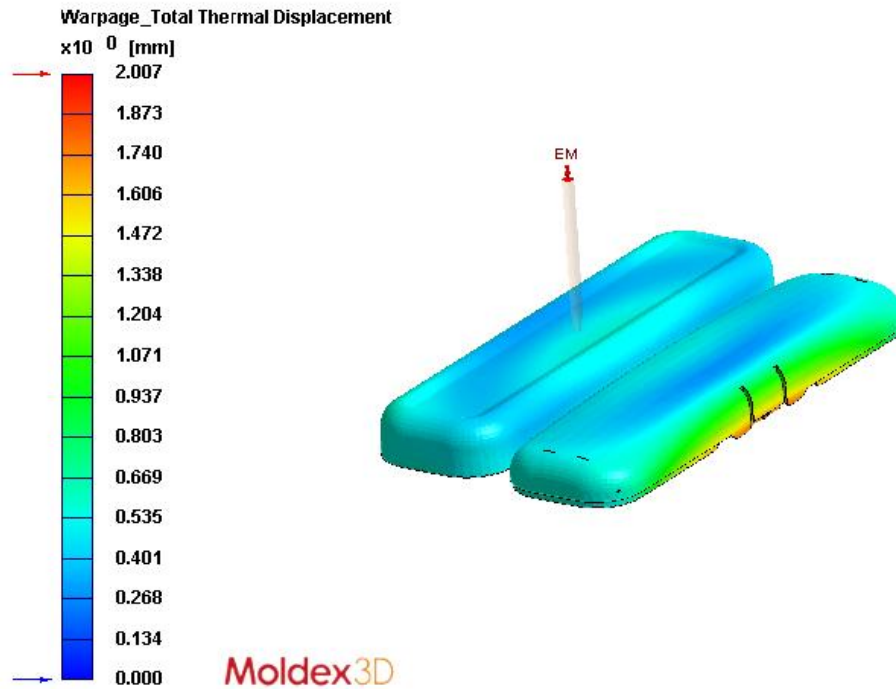


Figura 33. Desplazamiento térmico.

Estos datos muestran el porcentaje de contracción volumétrica de la pieza moldeada debido al cambio PvT, (figura 34). Condición de alta presión después de la etapa de empaquetamiento a temperatura ambiente, el Valor positivo representa el volumen de contracción, mientras que un valor negativo es un indicador de la expansión de volumen. Contracción volumétrica no uniforme dará lugar a la deformación y distorsión de las piezas desmolda.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

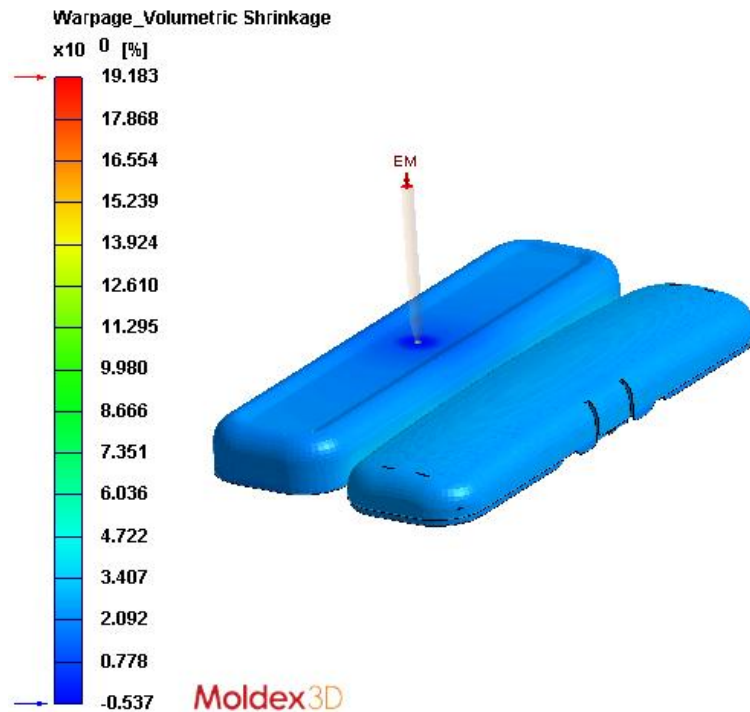


Figura 34. Contracción volumétrica.

De acuerdo con los análisis ya hechos por Moldex3D, y un cálculo en Excel se puede observar como las deformaciones no varían mucho con distintos niveles de pos-presión teniendo en cuenta que se variaron tiempos de enfriamiento y temperatura de presión.

Para esto se utilizó un tiempo de enfriamiento de 15 segundos con una temperatura de inyección de 240°C, con una post-presión de 60 Mpa, con la finalidad de obtener una deformación inferior a los 4 mm. De igual manera se obtiene una fuerza de cierre no tan alta en el momento de hacer la inyección y a si mismo no darle tanta presión al molde para evitar que se deformen las cavidades.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

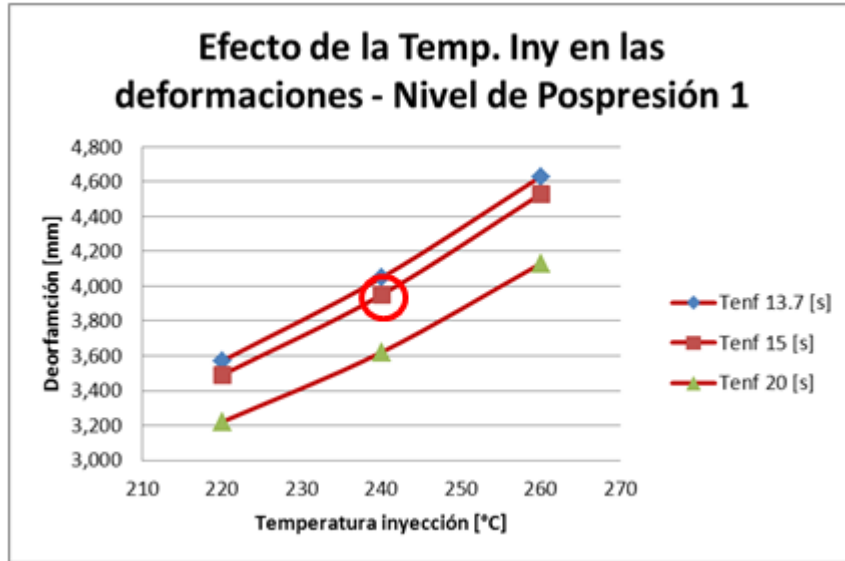


Figura 35. Deformación nivel 1

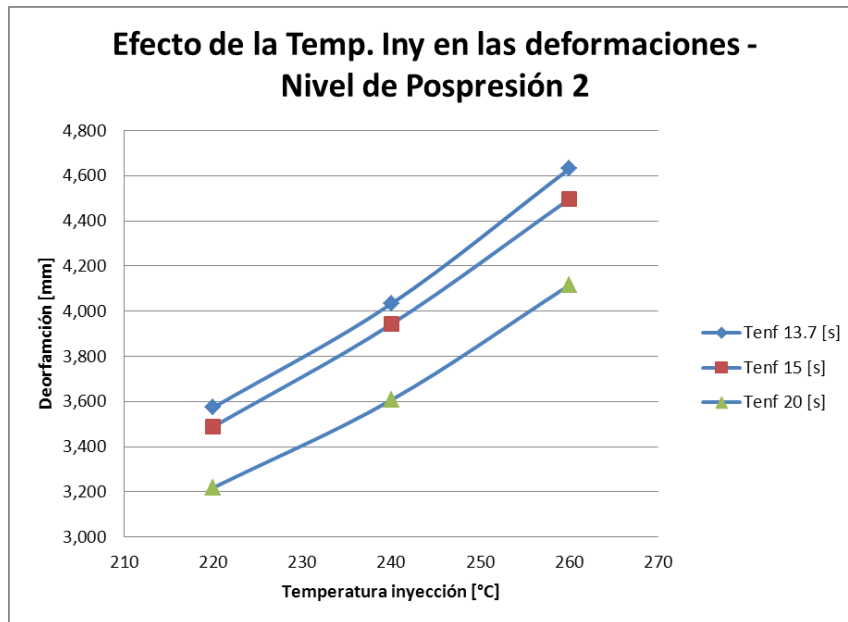


Figura 36. Deformación nivel 2

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

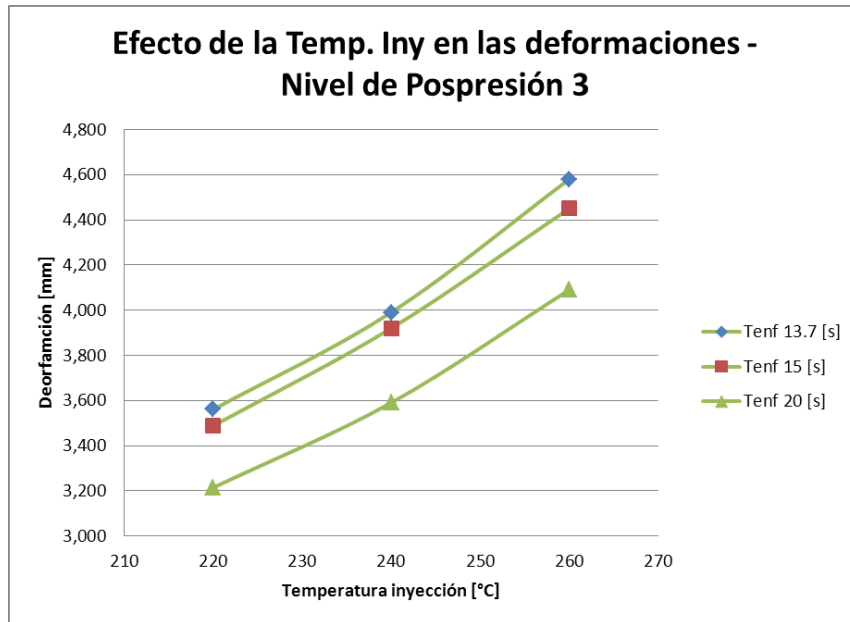


Figura 37. Deformación nivel 3

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 Conclusiones.

Los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones del sistema actual muestran como la aplicación de Análisis por elementos finitos de simulación reológica Moldex3D es una herramienta adecuada para conocer el comportamiento del material plástico durante todo el ciclo de inyección.

No es una tarea fácil ajustar una máquina de inyección y controlar el proceso para obtener piezas de calidad, ya que los parámetros de proceso son los que van a determinar el comportamiento del polímero en la cavidad del molde.

Las simulaciones de llenado realizadas muestran como el tiempo de inyección de 8.19 segundos para diferentes niveles de temperatura como varía la fuerza de cierre en el molde. Actualmente por mostrar un mínimo en la fuerza de cierre, menor presión máxima de inyección y presentar un perfil de temperatura en el flujo de avance de llenado muy equilibrado.

Las simulaciones de refrigerado en el molde se observa como la eficiencia es óptima con este tipo de canales, esto gracias a que se puede utilizar una herramienta con la cual se puede tener más criterio en el momento diseñar un molde.

Con este trabajo se puede ver que la estrategia de optimización nos proporcionó una manera de conocer cómo opera el proceso y con esto predecir el comportamiento de nuestras variables de respuesta. Dado que por lo general en la industria no están interesados en buscar la solución con respecto a un único criterio, los mejores balances entre las medidas de desempeño que se desea optimizar resultan de mucha utilidad. El proporcionar un conjunto de soluciones

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

posibles ayudará al tomador de decisiones a seleccionar la elección que más le convenga.

5.2 RECOMENDACIONES.

Luego del análisis reológico de la pieza por Moldex3D, se determina que todo el proceso de inyección tiene algunas diferencias respecto al diseño existente. Estos resultados son aceptables y están dentro de los valores esperados.

Se debe tener en cuenta las deformación en la parte del enganche se debe a que la refrigeración en esta parte no es la óptima debido a su diseño existente, esto determina que para optimizar el molde se debe mejorar esta zona de la cavidad para que la inyección sea más homogénea y su deformación sea la más mínima. Ya que esta es una pieza de poco espesor y sus contracciones no son tan altas.

Con los estudios obtenidos durante todo este trabajo y el molde ya diseñado y construido se puede recomendar que no es necesario hacer un rediseño de este, ya que esto nos implicaría un alto costo.

5.3 TRABAJO FUTURO

Comprar los perfiles térmicos reales obtenidos en el proceso real de fabricación para su comparación con los obtenidos en los procesos de simulación por ordenador y evaluar las divergencias entre ellos. También podría compararse el rendimiento de los circuitos de refrigeración del molde con los simulados ya que estos muestran deformación debido a su refrigeración.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

REFERENCIAS

Antioquia, U. D. (2012). Duración Del Ciclo De Inyección. *Diseño De Moldes De Inyección De Termoplásticos*.

LOERA, V. G., & OPC, E. ESTUDIOS DE OPTIM IO EN MOLDEO POR INYECCIÓN DE TE MOPLÁSTICOS.

tecnología de polímeros M. Beltran y A. Marcilla.

S. Steven Schmid. 2008. Manufacturing Processes for Engineering Materials

Metodologia Para La Caraterizacion De Materiales Termoplasticos En Condiciones No Convencionales Para Su Aplicación En Herramientas De Simulacion. Lorena Ponz Estaun

Diseño y Transformación de Plásticos . Análisis térmico de la inyección, Juan de Juanes MárquezSevillano.

Gómez González, S. (2010). Optimización del sistema de refrigeración de un molde de inyección para un envase de 17 litros.


<http://help.autodesk.com/cloudhelp>.

www.iberisa.com/productos/moldex3d/eDesign/flow.htm

http://docencia.udea.edu.co/ingenieria/moldes_inyeccion/unidad_2/tiempo_ciclo.html

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

FIRMA ESTUDIANTES *Fabian Vargas*



FIRMA ASESOR _____

FECHA ENTREGA: 19-08-2014

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ___ ACEPTADO ___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	01
		Fecha	2014-08-19

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____
ACTA NO. _____
FECHA ENTREGA: _____