



Universidad de Sevilla. Escuela Politécnica
Superior de Sevilla



Trabajo Fin de Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y
Desarrollo del Producto

Optimización y Simulación del Moldeo por Inyección de Plásticos con el Uso de SolidWorks Plastics

Alumno: Vicente Lozano Román

Tutor: Antonio Cascajosa Fernández

Fecha: Junio 2022

Resumen

El moldeo por inyección de plástico puede resultar un proceso costoso si no se configura con los conocimientos adecuados sobre un óptimo ciclo de fabricación. Por ello, es importante realizar un estudio previo y el uso de programas CAD es de gran ayuda en el proceso.

El objetivo de este estudio es aprender y aplicar el software de SolidWorks Plastics para ver qué resultados nos ofrece y poder responder a la cuestión: *¿Qué factores son importantes para tener en cuenta en el moldeo por inyección de plástico?* De esta forma, los factores son las variables que nos proporcionarán un proceso de fabricación óptimo y eficaz.

Esta cuestión será resuelta mediante el análisis y simulación de una pieza en el software, variando parámetros y comparando los resultados obtenidos. Además, permitirá aprender a manejar la interfaz del programa y ver las posibilidades de elección de las que se disponen para que cada usuario pueda configurar el estudio a su gusto.

Abstract

Plastic injection molding can be an expensive process if it is not configured with the proper knowledge about an optimal manufacturing cycle. Therefore, it is important to carry out a preliminary study and the use of CAD programs is quite helpful in the process.

The objective of this study is to learn and apply SolidWorks Plastics software in order to see what results it offers us and to be able to answer the question: *What factors are important to keep in mind in plastic injection molding?* In this way, the factors are the variables that will provide us an optimal and efficient manufacturing process.

This issue will be solved by analyzing and simulating a 3D part in the software, switching parameters and comparing the obtained results. In addition, it will allow learning how to handle the program's interface and see the possibilities of choice that are available, so that each user can configure the study to their liking.

Índice

1. Objetivo y Alcance del Proyecto.....	1
2. Antecedentes	1
2.1 Introducción. Moldeo por Inyección.	1
2.2 Diseño de piezas para Moldeo por Inyección.....	3
3. SolidWorks Plastics.....	5
3.1 Introducción. ¿Qué es Plastics?	5
3.2 Creación de un nuevo estudio	5
3.3 Especificación de dominios	6
3.4 Condiciones de contorno.....	6
3.4.1 Punto de inyección	6
3.4.2 Válvula de Control	7
3.4.3 Temperatura de la pared del molde	7
3.4.4 Fuerza de cierre	8
3.4.5 Cara de simetría	8
3.4.6 Respiraderos.....	8
3.4.7 Canales calientes prellenados	8
3.5 Malla	9
3.5.1 Malla sólida	9
3.5.2 Malla de vaciado.....	10
3.6 Materiales	10
3.7 Parámetros del Proceso	10
3.7.1 Ajustes de Llenado	10
3.7.2 Ajustes de Empaquetado.....	11
3.8 Ejecutar	11
3.9 Resultados	11
3.9.1 Resultados de Flujo	11
3.9.1 Resultados de Empaquetado.....	14
4. Aplicación práctica de SolidWorks Plastics.....	15
4.1 Creación del modelo 3D	15
4.2 Estudio.....	17
4.2.1 Punto de inyección 1 (Central)	20
4.2.2 Punto de inyección 2 (Extremo)	32
4.3 Análisis de los resultados.....	40
4.4 Justificación del diseño del modelo.....	41
5. Conclusión.....	44
6. Bibliografía	45

1. Objetivo y Alcance del Proyecto

El uso de programas CAD en el sector industrial ha supuesto un gran avance en términos de ahorro de tiempo y análisis de posibles problemas. Para este proyecto analizaremos el uso de un software simulador del moldeo por inyección viendo sus características y posibilidades y lo usaremos para simular el proceso de producción de una carcasa de maquinilla eléctrica. Con este tipo de programas veremos cómo se puede optimizar el proceso de moldeo por inyección estudiando los diversos parámetros que podemos modificar y revisar para una correcta resolución de la geometría de la pieza, obteniendo además resultados que nos ayuden a interpretar lo que en un futuro se fabrique en las industrias.

De esta manera, partiremos del uso de uno de los programas de diseño paramétrico más conocidos, como es SolidWorks para diseñar una pieza a la que someteremos a un estudio con el complemento SolidWorks Plastics, encargado de simular el proceso de inyección de plástico. SolidWorks Plastics simula la forma en que el plástico fundido fluye durante el proceso de moldeo por inyección para predecir los defectos relacionados con la fabricación de modo que pueda evaluar rápidamente las posibilidades de fabricación de una pieza durante el diseño.

SolidWorks Plastics consta de tres paquetes SolidWorks Plastics Standard para el análisis de la fabricación de piezas, SolidWorks Plastics Professional, que incorpora análisis de moldes para una o varias cavidades y SolidWorks Plastics Premium que ofrece una simulación avanzada con diseño de líneas de refrigeración de moldes y deformación de las piezas. En este proyecto se desarrollará el paquete Professional ya que es el que disponemos en el dispositivo. Además, aunque el complemento nos permite hacer un estudio del molde, nosotros nos centraremos en el examen de la pieza.



Figura 1. Máquina de moldeo

2. Antecedentes

2.1 Introducción. Moldeo por Inyección.

El moldeo por inyección es un proceso de fabricación destinado a la producción de piezas de metal, vidrio, caucho o plástico en grandes cantidades y en cortos períodos de tiempo. El proceso se basa en la inyección de material fundido en la cavidad formada en un molde, y que,

tras su llenado, se deja enfriar hasta que pasa a estado sólido para después ser expulsado de la máquina.

El moldeo por inyección de plástico es el proceso de inyección en el que se producen piezas de plástico al introducir gránulos de polímero en la unidad de inyección, donde se funden para posteriormente ser inyectados como plástico fundido en un molde metálico que constituye la forma final de la pieza.

El primer contacto con la máquina de moldeo por inyección de plástico ocurrió en 1872 cuando el inventor estadounidense John Wesley Hyatt quiso encontrar la manera de sustituir las bolas de marfil del billar por bolas de plástico. Fue entonces cuando patentó la primera máquina de inyección, que, aunque no triunfó para su cometido, sí que sirvió como referente para la producción futura de moldeo por inyección. Desde entonces, las máquinas de moldeo por inyección han evolucionado desde la producción de pequeñas piezas, como botones, hasta la elaboración de complejos equipos en el sector de la medicina.

El proceso de moldeo por inyección de plástico, en general, produce piezas con impurezas superficiales. Es por este motivo por lo que su uso se prioriza para la fabricación de piezas mecánicas en las que el aspecto visual no es de gran importancia.

Las fases en el proceso de moldeo se pueden dividir, en términos generales, en fundición del material, inyección del material en el molde, enfriamiento de la pieza y expulsión de la pieza del molde.

El proceso comienza con la introducción de gránulos de plástico en el barril de la máquina de inyección por medio de una tolva. Una vez dentro, el barril consta de una barrena con forma de tornillo que gira para alimentar y empujar al material a través del barril y que, con la ayuda de bandas calentadoras en el exterior del barril, consiguen fundir el plástico para la siguiente fase.

Una vez que el material está listo para ser inyectado, el molde se cierra y la barrena se mueve empujando el material hacia el canal de inyección. El polímero fundido es introducido en la cavidad del molde por el punto de inyección hasta rellenarla por completo. Canales por los que fluye refrigerante rodean la cavidad en el molde para generar un rápido enfriamiento y solidificación de la pieza.

Finalmente, cuando la pieza ha solidificado, el molde se abre y unas varillas empujan la pieza para expulsarla de la máquina. Con la pieza fuera de la máquina de moldeo, el proceso vuelve a comenzar.

La producción de piezas por moldeo por inyección de plástico ha tenido un gran crecimiento desde los años 80 hasta la actualidad, llegando a superar al sector manufacturero con un promedio de 1,5 % cada año. Las razones de este incremento se exponen a continuación:

- Producción en masa

El proceso de moldeo de una pieza generalmente dura menos de un minuto, llegando a realizarse en ocasiones en solo unos pocos segundos. Es por esta razón por la que este método de fabricación es ideal para la producción en masa. Además, existen moldes diseñados para producir varias piezas en un ciclo, aumentando el nivel de producción. Estos factores, hacen al moldeo por inyección de plástico unos de los procesos de fabricación más rápidos del mundo

- Ahorro de material

Si comparamos el proceso de moldeo con el de mecanizado CNC, en este último los desechos son mucho mayores mientras que el moldeo por inyección de plástico produce muy pocos residuos siendo más eficiente a la hora de ahorrar material.

- Piezas complejas

El moldeo por inyección permite crear piezas realmente complejas y con detalles como roscas u orificios que ahorran las posibles operaciones secundarias. Además, muchos objetos que con otros procesos se harían en piezas separadas, con el moldeo se consiguen hacer de una vez gracias a la gran versatilidad de los moldes.

- Bajo costo

A largo plazo, el moldeo por inyección de plástico supone un proceso menos costoso debido a factores como la reducción de residuos, el uso de materiales más económicos o el reciclaje. El reciclaje se caracteriza por la reutilización del material sobrante del proceso triturándolo y volviéndolo a usar junto a material virgen o usándolo para piezas con requisitos estéticos bajos.

- Calidad consistente

Con el moldeo por inyección de plástico se pueden fabricar miles de piezas en un día y gracias a un buen diseño del molde y un buen material se puede asegurar una buena calidad en todas las piezas.

2.2 Diseño de piezas para Moldeo por Inyección

A la hora de fabricar una pieza por medio del moldeo por inyección de plástico, la geometría de la pieza es un factor clave para optimizar lo máximo posible el proceso. Un buen diseño de la pieza puede prevenir posibles problemas y defectos de llenado, ahorrar tiempos de ciclo o minimizar el uso de material. A continuación, se exponen diversos factores que debemos tener en cuenta en el diseño de la pieza a fabricar para mejorar los resultados.

Grosor de la pared

El grosor de la pared es uno de los requisitos más importantes para tener en cuenta. Para prevenir defectos de alabeo o deformaciones, es conveniente mantener un grosor de pared constante. Se recomienda que el grosor de la pared sea como mínimo el 40 o 60 por ciento del de las paredes adyacentes.

Otra forma de reducir el grosor de pared es mediante el diseño de piezas ahuecadas. Es posible minimizar las paredes gruesas sin sacrificar la funcionalidad mediante una geometría ahuecada, que además mejore la consistencia.

Transiciones suaves

Las esquinas bruscas en el diseño de la pieza aumentan las tensiones en el moldeo. Para corregir estas transiciones podemos hacer uso de caras de unión entre dos paredes. Otro método, que ayuda a conservar la estructura de las paredes y previene el alabeo, es la utilización de nervios entre las paredes de unión.

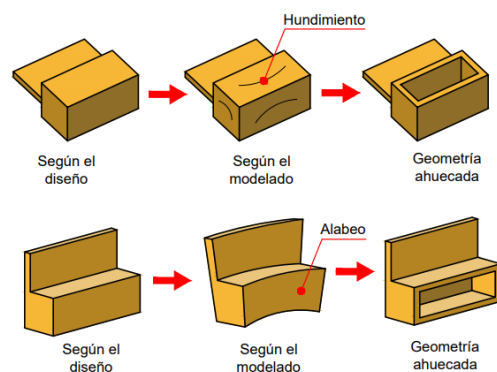


Figura 2. Geometría ahuecada en piezas de moldeo

Para liberar tensión en el posterior uso de la pieza en aplicaciones de esfuerzo es conveniente sustituir las esquinas definidas por regiones redondeadas que mejoran la fortaleza de la pieza.

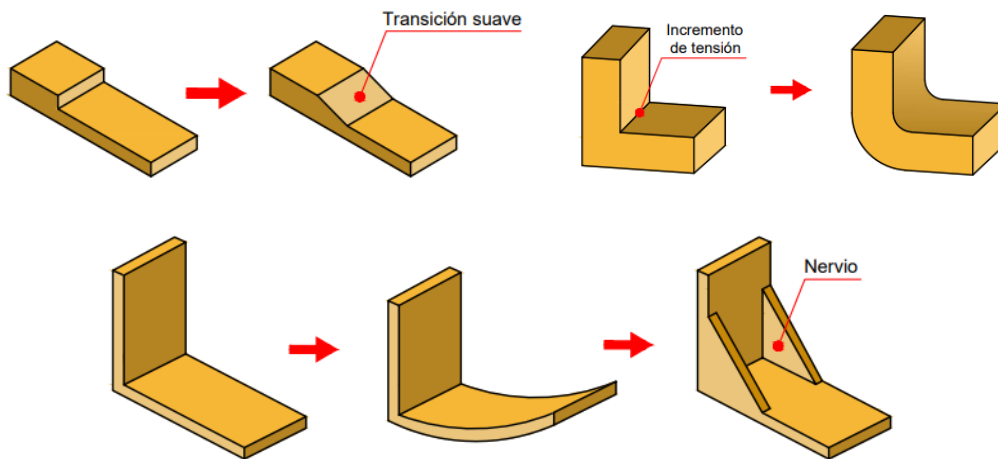


Figura 3. Transiciones suaves en piezas de moldeo

Piezas sesgadas y de fácil expulsión

Sesgar consiste en inclinar las paredes verticales de la pieza con el objetivo de mejorar su expulsión y prevenir marcas de arrastre o de empuje del eyector. También es conveniente hacer uso del sistema núcleo-cavidad a la hora de usar sesgos en lugar de nervaduras en el molde. Con esto conseguimos mantener el grosor de la pared constante y acelerar la fabricación

Existen otras modificaciones que podemos incorporar a la pieza para facilitar su expulsión como las proyecciones, que se trata de muescas en la pieza que ayudan a la retirada sin acciones laterales

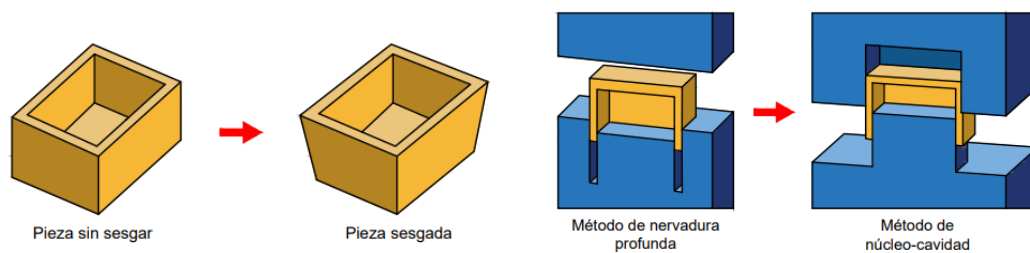


Figura 4. Piezas de moldeo sesgadas

Piezas de auto-acople

A la hora de diseñar piezas con varias partes debemos pensar en la manera de solucionar el problema de ensamblaje, en la manera de lo posible, sin tener que fabricar varios moldes para cada elemento. Una manera de aplicar este principio es con el diseño de piezas idénticas que se dan la vuelta y encajan entre sí mediante sistemas de gancho y orificio, aros entrelazados o enganches y cierres.

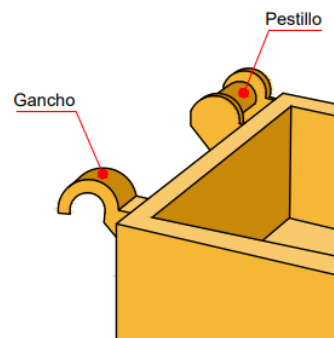


Figura 5. Piezas de auto-acople

3. SolidWorks Plastics

3.1 Introducción. ¿Qué es Plastics?

SolidWorks Plastics es un software de simulación y análisis del moldeo por inyección de piezas de plástico y el diseño de moldes. Se encuentra integrado como complemento en el programa de modelaje CAD SolidWorks y nos permite simular la forma en la que, en un proceso de moldeo por inyección, el polímero fundido fluye para rellenar la cavidad de la pieza de estudio.

Con Plastics se pueden predecir posibles problemas o defectos de fabricación durante la fase de diseño de la pieza y molde. De esta manera, errores en un mal diseño del molde se pueden corregir evitando el elevado coste de fabricar uno nuevo y ahorrando en recursos y energía del proceso fallido. Además, también ahorramos en tiempo, ya que es mucho más rápido y sencillo cambiar un parámetro en el software que de manera física.

Para correr un estudio en SolidWorks Plastics se necesitan definir tres aspectos fundamentales, el punto de inyección, la malla y el material de la pieza de diseño. Con Plastics no es necesario crear cavidad y core para la simulación, únicamente se requerirá la pieza de estudio.

El diseño intuitivo y la sencilla de interfaz de SolidWorks Plastics Estándar hace que cualquier diseñador sin mucha experiencia en plásticos ni diseño de moldes pueda controlar el software tan solo especificando los parámetros de la pieza de estudio. La interfaz intuitiva guía al usuario paso a paso y muchos de los valores vienen preestablecidos automáticamente para que el proceso sea aún más sencillo. Entre los materiales que se pueden escoger existe una gran base de datos con miles de plásticos a elegir, además de los que se pueden personalizar. Para usuarios más experimentados, el paso a Plastics Profesional les permitirá adentrarse en el mundo del diseño de moldes.

Con los resultados que nos ofrece la simulación en SolidWorks Plastics podemos predecir posibles defectos de fabricación y solucionarlos respetando las fechas establecidas en el proyecto y siempre dentro del presupuesto acordado. Además, nos permite generar un informe automático para el intercambio e interpretación de los resultados con otros departamentos o equipos del proyecto.

3.2 Creación de un nuevo estudio

Para el estudio de Plastics, debemos partir de una pieza importada o creada en SolidWorks, o un conjunto de sólidos a los que se les asignará distintos dominios. En la ventana de Plastics podemos crear un nuevo estudio para el análisis de la simulación. Al nuevo estudio podemos asignarle un nombre y elegir el tipo de proceso de inyección que deseamos utilizar. Disponemos de diversos procesos de inyección según el número de materiales que se inyectan o la asistencia recibida por el polímero inyectado.

El procedimiento de análisis nos va a determinar la manera en la que se va a estudiar el paso del flujo a través de la pieza. Podemos asignarle:

- **Sólido:** es el procedimiento más utilizado para piezas con alto nivel de detalle, cambios de espesor o rejillas y nos permite crear varios dominios de distintos tipos como molde, canal, etc. El procedimiento de análisis por sólido crea un mallado sólido para el estudio del flujo en las tres dimensiones.
- **Vaciado:** este procedimiento es menos efectivo para reproducir piezas con cambios de espesor o zonas con detalles, pero nos proporciona un análisis más rápido

computacionalmente, pues hace uso de menos elementos de malla. El mallado que podemos crear es de tipo vaciado y únicamente disponemos de un dominio de tipo cavidad. Este modo estudia el flujo principalmente en la dirección paralela a los límites de la pieza y solo es compatible con el proceso de inyección de material único.

3.3 Especificación de dominios

Una vez creado el estudio, el siguiente paso es asignarle un tipo de dominio a cada sólido, es decir, el tipo de elemento en nuestro proceso de inyección que desempeñará cada sólido. Para ello, en la lista de dominios, hacemos clic derecho en el sólido al que queremos asignar dominio y seleccionamos entre los que aparecen. Podemos asignar dominios tipo cavidad, colada, inserción, canal de refrigeración y molde. Para un estudio con un único sólido, el dominio se asigna automáticamente como tipo cavidad.

3.4 Condiciones de contorno

Para el estudio es necesario asignar elementos y características propias de la máquina de inyección que van a afectar a como se produce la simulación, a esto llamamos condiciones de contorno. Para definir las, hacemos clic derecho en Condiciones de contorno sobre el árbol de Plastics y seleccionamos la que queremos especificar.

3.4.1 Punto de inyección

Los puntos de inyección nos van a especificar el lugar por el que el polímero fundido va a introducirse en la cavidad de la pieza. Al menos debe haber un punto de inyección por cavidad, pero también podemos asignárselos a los dominios de tipo canal en la entrada.

A la hora de asignar la situación del punto de inyección, podemos hacerlo en mediante la selección de una cara de geometría o un punto, ya bien de la pieza o de un boceto previo. Para la selección como punto podemos establecer además el diámetro del puntero.

En las simulaciones con varios puntos de inyección podemos especificar el intervalo de inyección de material de cada punto según la relación de llenado en porcentaje de volumen, porcentaje de tiempo o tiempo total en segundos.

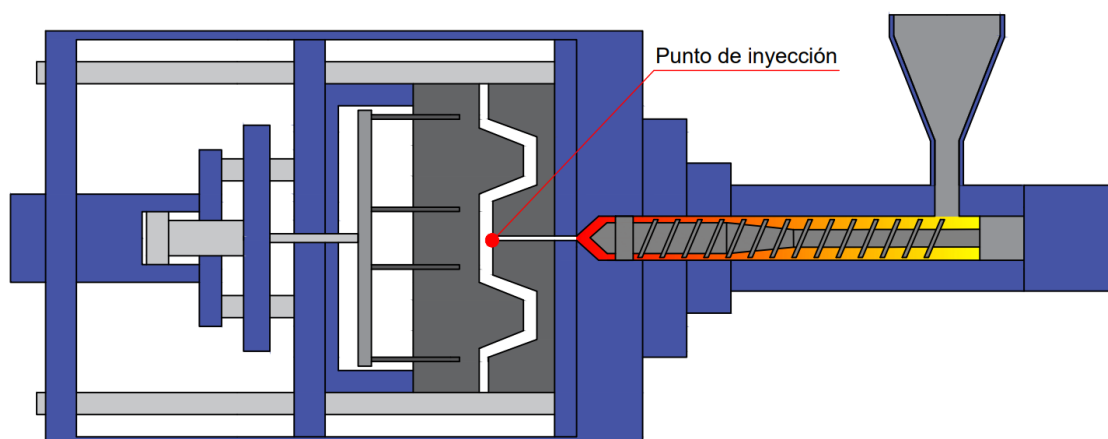


Figura 6. Esquema del punto de inyección

3.4.2 Válvula de Control

Una forma de controlar el llenado y el empaquetado de la pieza es mediante el uso de válvulas de control. Estas válvulas permiten abrir o cerrar compuertas con la finalidad de mejorar el aspecto final de la pieza y la facilidad de llenado. De esta manera se evita que el material fundido regrese a los filetes del husillo durante la fase de inyección.

Las válvulas se pueden situar de forma automática en la intersección de dos sólidos o de forma manual seleccionando una cara o plano de referencia.

De la misma forma que para los puntos de inyección, para las válvulas de control también podemos controlar el intervalo de apertura según la relación de llenado en porcentaje de volumen o porcentaje de tiempo. También se puede establecer la apertura de forma automática en el instante que el material fundido pasa por la ubicación de la válvula.

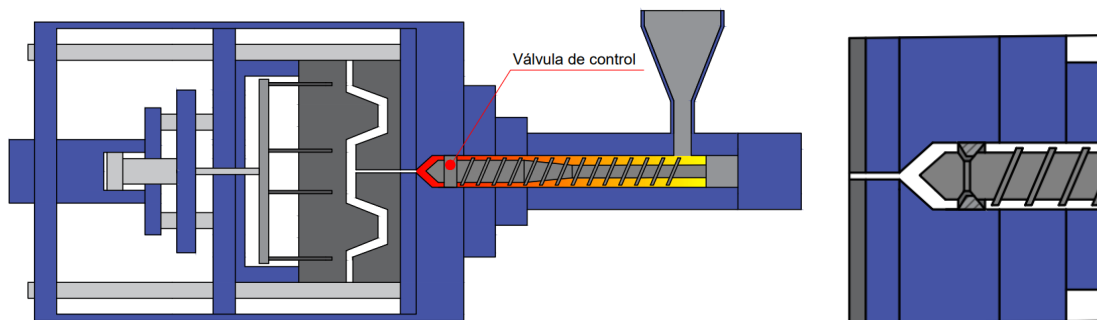


Figura 7. Esquema de la válvula de control

3.4.3 Temperatura de la pared del molde

Con esta opción podemos definir la temperatura de la pared del molde a una cara o un conjunto de caras seleccionadas de la cavidad. La temperatura la indicamos en grados Celsius y si no definimos ninguna, se establecerá por defecto la indicada para la temperatura del molde en los ajustes de llenado.

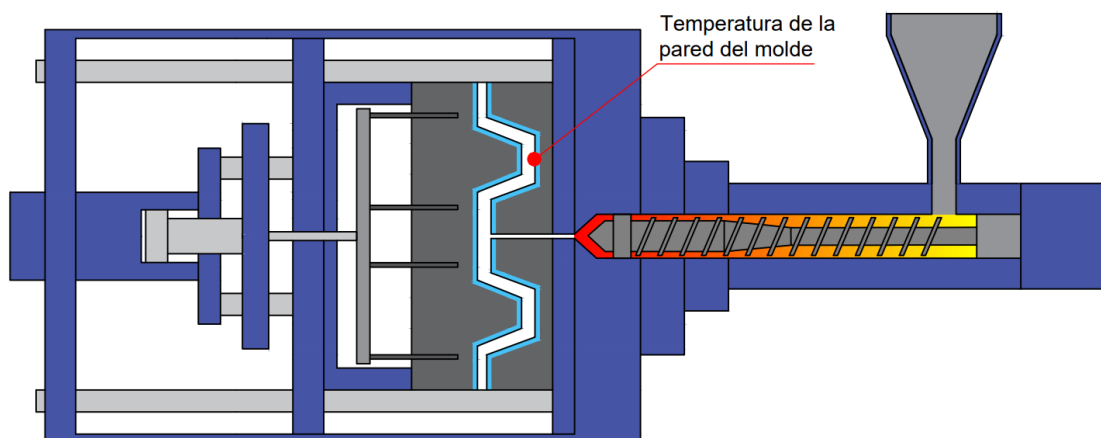


Figura 8. Esquema de la temperatura de la pared del molde

3.4.4 Fuerza de cierre

Otro parámetro que podemos especificar es la dirección de apertura de la máquina de moldeo por inyección. Esto nos permitirá obtener una estimación sobre la fuerza de cierre. Para definirlo seleccionaremos uno de los ejes de coordenadas o un plano, cara o arista lineal de la pieza.

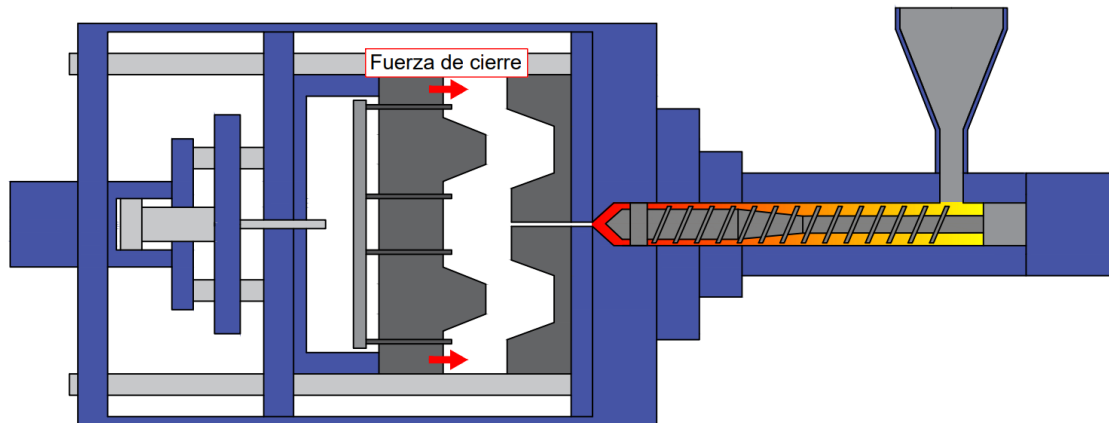


Figura 9. Esquema de la dirección de la fuerza de cierre

3.4.5 Cara de simetría

Con esta función se pueden identificar dominios pertenecientes a planos de simetría para obviar la simulación de ambos considerando el diseño simétrico, ahorrando tiempo.

3.4.6 Respiraderos

Nos permite especificar las ubicaciones, por medio de puntos en el croquis, de los respiraderos que proporcionarán una salida del aire a medida que el material fundido llena el molde.

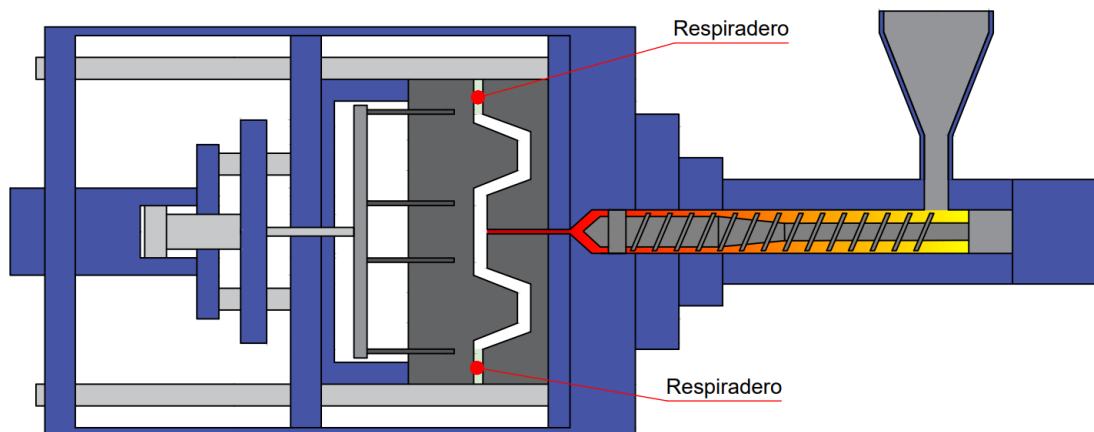


Figura 10. Ubicación de los respiraderos

3.4.7 Canales calientes prellenados

Con esta opción podemos seleccionar los componentes que funcionarán como canales llenos de polímero caliente al inicio de la simulación y su correspondiente temperatura.

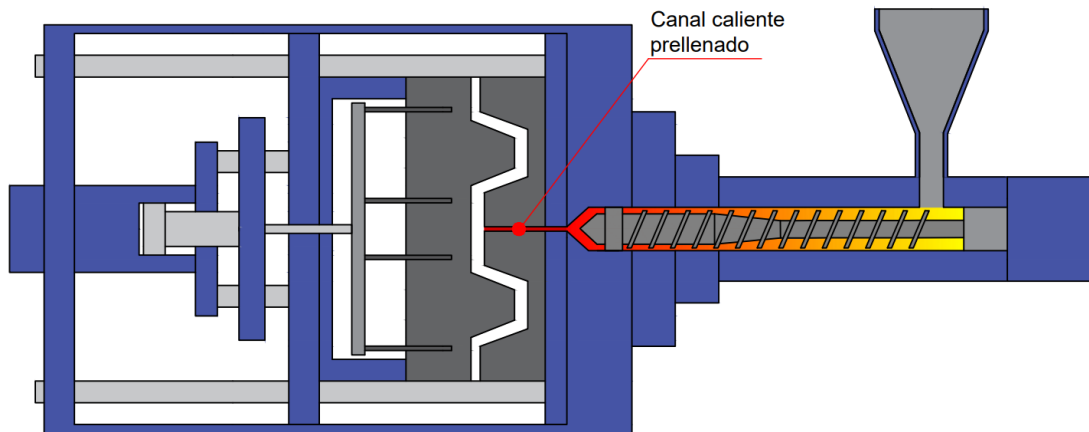


Figura 11. Ubicación del canal caliente prellenado

3.5 Malla

La creación de una malla permitirá al software de simulación aplicar ecuaciones de conservación a las distintas celdas creadas en la malla. Es el paso fundamental para poder realizar el cálculo deseado y obtener los resultados a medida que el material fundido fluye y rellena la cavidad hasta enfriarse. Según el procedimiento que hayamos elegido previamente (de vaciado o de sólido) tendremos distintos parámetros a especificar para la creación de la malla.

3.5.1 Malla sólida

Antes de definir los parámetros de malla debemos seleccionar el tipo de mallado que vamos a generar: tetraédrico híbrido, hexaédrico o automático.

- **Tetraédrico híbrido:** este mallado combina elementos de volumen tetraédricos con capas de límite en la zona superficial del sólido, consistentes en capas de elementos prismáticos. Se puede configurar el número de capas de límite según la necesidad de la pieza y sus características, aunque por defecto se le asignan dos capas.

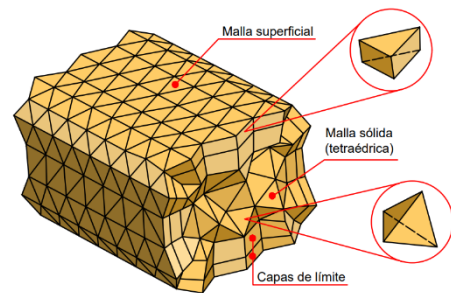


Figura 12. Malla tetraédrica híbrida

- **Hexaédrico:** obtiene un mallado de elementos hexaédricos a partir de un mallado superficial triangular previo y en las zonas donde no se puede generar elementos hexaédricos, los sustituye por elementos tetraédricos. Se suele utilizar para piezas en las que los elementos hexaédricos se alinean con la cavidad generando soluciones más efectivas. Por otro lado, para formas más complejas puede generar más error debido a las aproximaciones efectuadas a través de la sustitución del mallado triangular al hexaédrico.

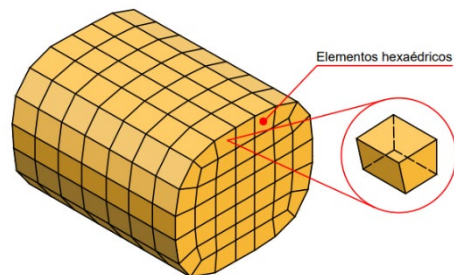


Figura 13. Malla hexaédrica

- **Automático:** crea un mallado tetraédrico híbrido como primera opción y, si la geometría de la pieza ocasionara fallos en el mallado, se crearía un mallado vóxel cartesiano. Este tipo de mallado no es el más recomendable para análisis precisos ya que no siempre asegura una geometría satisfactoria.

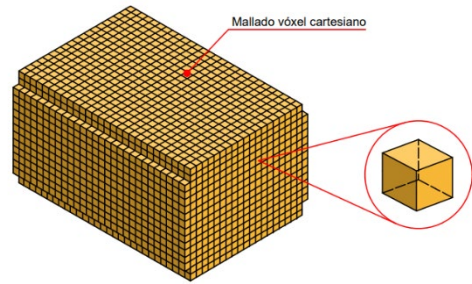


Figura 14. Mallado vóxel cartesiano

Una vez elegido el tipo de mallado podemos crear la malla. Primeramente, se crea la malla superficial en la que podemos ajustar varias opciones como la densidad de malla o el número de triángulos. A continuación, configuramos la malla sólida con ajustes en el espesor de los elementos, el número de capas de límite o el tamaño de las celdas, entre otras opciones.

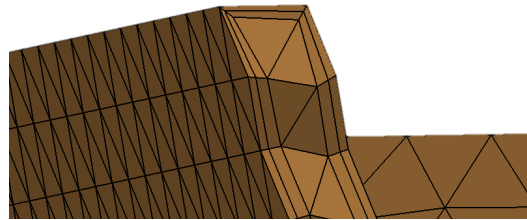


Figura 15. Capas límite y mallado interno

3.5.2 Malla de vaciado

La malla de vaciado se genera a partir de un algoritmo que establece una densidad de malla triangular en función de las dimensiones de la cavidad.

Para la generación de la malla de vaciado podemos elegir el método de refinamiento que deseemos entre refinamiento uniforme y basado en curvatura. El refinamiento uniforme utiliza un tamaño de malla uniforme en todo el sólido, incluso para regiones con operaciones pequeñas. Por otro lado, el refinamiento basado en curvatura refina la malla según la zona en la que se encuentre, ofreciendo un resultado más exacto, pero aumentando el tiempo de cálculo.

3.6 Materiales

En esta sección podemos asignarles un material a nuestros sólidos implicados en la simulación. Para nuestro caso, con un único dominio de tipo cavidad, podemos elegir un polímero de la base de datos que nos proporciona el complemento de Plastics o desde la base de datos definida por el usuario donde se guardan los materiales personalizados o importados directamente desde nuestro dispositivo.

3.7 Parámetros del Proceso

Esta opción nos permite ajustar según nuestras preferencias los parámetros de las distintas fases de la simulación de moldeo por inyección como son la fase de llenado y empaquetado.

3.7.1 Ajustes de Llenado

Entre los ajustes de llenado que podemos definir tenemos:

- **Tiempo de llenado:** esta opción calcula de forma automática según la geometría de la pieza el tiempo que tarda el material fundido en rellenar la cavidad. Aunque el programa hace una estimación, podemos editarlo seleccionando el icono del reloj.
- **Temperatura del material (°C):** define la temperatura a la que se encuentra el material fundido en los puntos de inyección especificados. El programa establece una de forma predeterminada en función de la base de datos del polímero.

- **Temperatura del molde (°C):** establece la temperatura del molde en función de los datos del polímero utilizado.
- **Presión máxima de inyección (MPa):** define la presión máxima que puede soportar el polímero en los puntos de inyección, reduciendo el flujo de entrada si en la simulación se alcanza este valor, lo que provoca un aumento del tiempo de llenado con respecto al establecido.
- **Límite de fuerza de cierre (Tonelada):** establece el máximo valor que puede tomar la fuerza de cierre, que mantiene el molde cerrado, informando en los resultados si se supera este valor.

3.7.2 Ajustes de Empaquetado

El empaquetado tiene la finalidad de conseguir que el plástico fundido se distribuya de forma igualitaria por toda la cavidad para obtener una pieza de peso uniforme, con calidad geométrica y buenas propiedades mecánicas. El proceso cuenta con dos fases, en la primera de ellas se inserta más material en el molde por medio de presión generada en el sistema de inyección y que compensa la contracción térmica generada por el enfriamiento del molde. En la segunda fase, se deja de aplicar presión y cuando termina el proceso de solidificación de la pieza se calcula su temperatura.

Entre los parámetros que podemos modificar para la fase de empaquetado tenemos:

- **Tiempo de mantenimiento de la presión (sec):** establece la duración en segundos de la fase del empaquetamiento en la que se aplica presión en los puntos de inyección, contando desde el momento de cambio de fase de llenado a empaquetado, hasta el punto final de empaquetado. El valor predeterminado viene dado por la geometría del sólido y las propiedades del plástico.
- **Tiempo de refrigeración pura (sec):** es la duración de la segunda fase del empaquetado, calculada, de forma predeterminada, a partir de la temperatura de expulsión especificada para el material usado en su base de datos. A esta temperatura, la pieza está lista para ser expulsada, aunque el núcleo de la pieza no se haya solidificado, ya que lo hará a la temperatura ambiente fuera del molde.

Otras opciones para el control de la fase de empaquetado son el cálculo de la tensión residual o los ajustes del perfil de presión de empaquetado, que nos muestra la variación de la presión a lo largo del proceso.

3.8 Ejecutar

Una vez que se han configurado todos los parámetros necesarios para la simulación, podemos ejecutar el análisis y obtener los resultados. Existen tres métodos de análisis en esta versión de SolidWorks Plastics, el análisis “Flujo”, que se ejecuta teniendo en cuenta solo la fase de llenado, el análisis de “Empaquetado”, que tiene en cuenta la fase de empaquetado y el análisis “Flujo + Empaquetado”, que considera ambas fases.

3.9 Resultados

Tras la ejecución del análisis del software, el apartado de resultados se encuentra disponible mostrando toda la información necesaria para evaluar los posibles problemas en el proceso.

3.9.1 Resultados de Flujo

Los resultados de flujo se muestran enumerados en lista en la pantalla de resultados. En la zona de gráficos se representan mediante gradientes o zonas de color acompañados de los valores

numéricos correspondientes a cada zona. Los principales resultados de flujo se especifican a continuación.

- **Tiempo de llenado:** se representa con un gradiente de color sobre la pieza el tiempo al que se ha llenado cada zona desde los puntos de inyección.
- **Presión al final del llenado:** muestra la presión en el sólido al finalizar la fase de llenado, tomando valores cercanos a cero en las últimas zonas que se llenan.
- **Temperatura al final del llenado:** para el mallado de tipo sólido, muestra la temperatura de la pieza al final del llenado, siendo inferior en la zona externa de la pieza debido al contacto con los canales de refrigeración.
- **Temperatura central al final del llenado:** para el mallado de tipo vaciado, indica la temperatura en la capa de núcleo del sólido tras la fase de empaquetado.
- **Temperatura media al final del llenado:** para el mallado de vaciado, muestra la temperatura media al final del empaquetado en todo el espesor de la pared de la pieza.
- **Temperatura ambiente al final del llenado:** es la temperatura media del plástico fundido al final de la fase de llenado, excluyendo las capas en las que ya se ha solidificado.
- **Temperatura de frente de flujo:** para el mallado sólido muestra la temperatura en el momento de llenado de cada zona. Este dato nos proporciona información sobre la estabilidad de las líneas de soldadura, siendo problemáticas si en esas zonas la temperatura es demasiado baja.
- **Temperatura central de frente de flujo:** para la malla de vaciado muestra la temperatura de llenado en la capa del núcleo del sólido, dato que nos da información sobre el efecto fuente producido en el núcleo en el que el plástico fundido se desplaza del centro hacia las paredes de la cavidad.
- **Aumento de la temperatura al final del llenado:** representa si ha aumentado la temperatura en la fase de llenado (normalmente cero) debido a un comportamiento viscoso en algún momento producido por deformaciones, aristas vivas o cambios de grosor de la pared de la pieza.
- **Tensiones de cizalla al final del llenado:** la tensión de cizalla es la fuerza cortante a la que es sometido el plástico dentro de la cavidad y se mide al final del llenado estableciendo si el material es sensible o no al corte. Las tensiones del material máximas vienen preestablecidas según su base de datos en las propiedades del material y son comparadas con las obtenidas en la simulación viendo si superan ese valor recomendado.

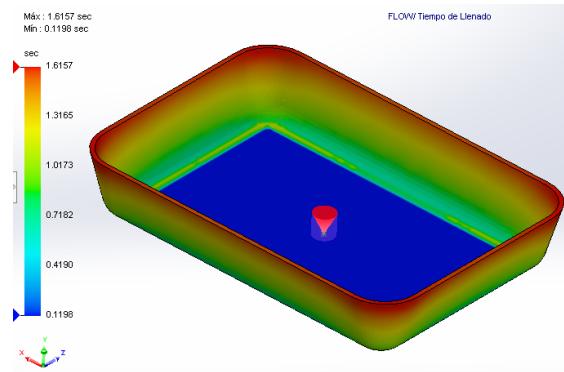


Figura 16. Trazado tiempo de llenado

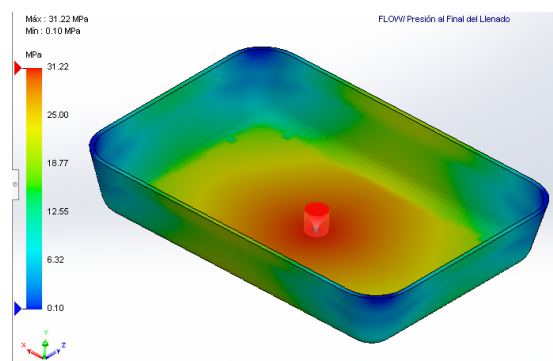


Figura 17. Trazado presión al final del llenado

- **Tasa de cizalla al final del llenado:** mide el cambio de velocidad del fluido a través de la pieza debido a la tensión de cizallamiento al final del llenado y la compara con la velocidad de cizallamiento máxima recomendada del material en su base de datos determinando si la supera o no.

- **Contracción del volumen al final del llenado:** la contracción mide la relación en porcentaje entre el volumen del plástico fundido y el volumen del plástico en su estado sólido final. El encogimiento varía según la relación de presión, volumen y temperatura de la base de datos del material.

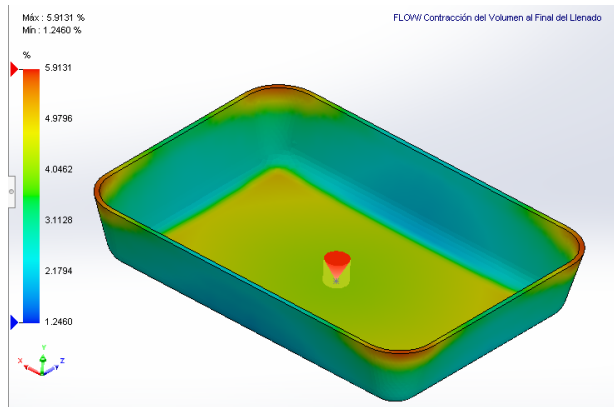


Figura 18. Trazado de la contracción de volumen al final del llenado

- **Tiempo de solidificación al final del llenado:** para el mallado sólido, muestra el tiempo que tarda el plástico fundido dentro de la cavidad en enfriarse hasta la temperatura de transición. Esta duración dependerá de la diferencia de temperatura entre el plástico fundido y la temperatura del molde, teniendo en cuenta que habrá zonas que aún no hayan solidificado al final del llenado.

- **Tiempo de refrigeración:** representa el tiempo que tarda la pieza en refrigerarse en función de la temperatura del molde, la temperatura tras el llenado y la temperatura a la que se expulsa la pieza.

- **Temperatura al final de refrigeración:** muestra, a partir del tiempo de refrigeración y los resultados de flujo obtenidos, la distribución de temperatura después de la refrigeración de la pieza.

- **Rechupes:** el rechupe es la cavidad formada en la pieza como consecuencia de la contracción y solidificación. En el gráfico se indica, en milímetros, la profundidad de las depresiones superficiales generadas en la simulación.

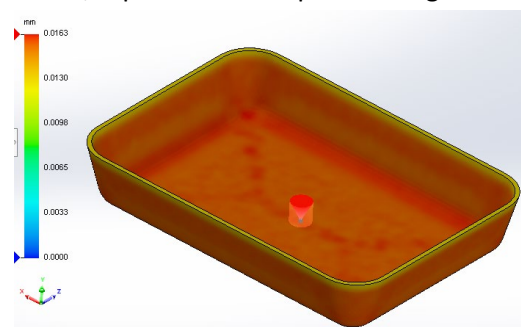


Figura 19. Trazado de rechupes

- **Contribución al llenado por punto de inyección:** el gráfico nos muestra que compuerta ha rellenado con material cada zona de la cavidad

- **Facilidad de llenado:** muestra en el gráfico como fácil, difícil o aviso, la viabilidad de que el llenado de la cavidad sea satisfactorio. Este resultado se ve afectado por el valor del límite de presión de inyección, obteniéndose datos no fiables si se considera un límite no realista con la simulación.

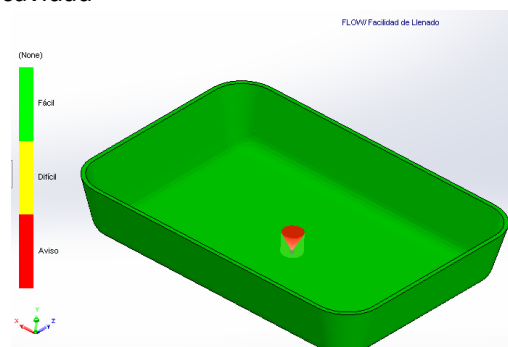


Figura 20. Trazado de la facilidad de llenado

- **Región solidificada al final del llenado:** para el mallado sólido, indica que zonas de la pieza se han congelado al finalizar el llenado.

- **Fración solidificada al final del llenado:** para el mallado de vaciado, indica que zonas de la pieza se han congelado al finalizar el llenado.

3.9.1 Resultados de Empaquetado

Los resultados de empaquetado se muestran enumerados en una lista en la pantalla de resultados. En la zona de gráficos se representan mediante gradientes o zonas de color acompañados de los valores numéricos correspondientes a cada zona. Los principales resultados de empaquetado se especifican a continuación.

- **Presión al final del empaquetado:** muestra la presión en la pieza después de la fase de empaquetado, esperándose valores próximos a cero tras un buen empaquetado.

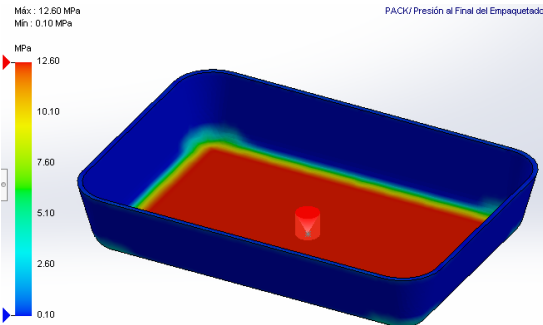


Figura 21. Trazado de la presión al final del empaquetado

- **Temperatura al final del empaquetado:** especifica la temperatura en la pieza al terminar la fase de empaquetado. La zona externa de la pieza tendrá una temperatura inferior que la interior debido al

contacto con la refrigeración. Para poder observar la temperatura interior es necesario hacer uso de las herramientas de sección.

- **Temperatura central al final del empaquetado:** para la malla de vaciado, muestra la temperatura final en el núcleo de la pieza tras el empaquetado.

- **Temperatura promedio al final del empaquetado:** para la malla de vaciado, muestra la temperatura en el espesor de pared de la pieza tras el empaquetado.

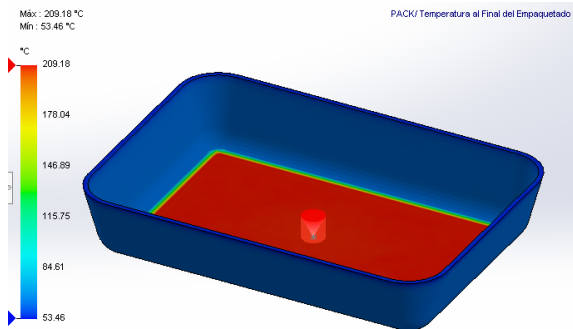


Figura 22. Trazado de la temperatura al final del empaquetado

- **Temperatura ambiente al final del empaquetado:** indica las zonas donde el plástico se ha solidificado a la temperatura del molde y las zonas en las que aún está en estado fundido a partir de datos como el tiempo, la temperatura del molde o el espesor de pared.

- **Temperatura al final tras el relleno:** para la malla sólida, nos proporciona la temperatura de la pieza en el momento previo de ser expulsada del molde, tras finalizar la fase de refrigeración.

- **Temperatura central al final tras el llenado:** para la malla de vaciado, muestra la temperatura en el núcleo de la pieza antes de ser expulsada del molde.

- **Temperatura promedio al final tras el llenado:** para la malla de vaciado, muestra la temperatura en el espesor de pared de la pieza antes de ser expulsada del molde.

- **Densidad al final del empaquetado:** indica la densidad de la pieza tras la fase de empaquetado, siendo preferibles unas densidades uniformes en toda la pieza para evitar problemas de contracciones o zonas con vacíos.

- **Tensiones de cizalla al final del empaquetado:** mide las tensiones de cortadura experimentadas por la pieza tras la fase de empaquetado, indicando si supera el valor máximo recomendado del material polímero.
- **Contracción de volumen al final del empaquetado:** indica la tasa de contracción experimentada por la pieza después del empaquetado. Un mal empaquetado causará unas contracciones de volumen mayores en la pieza.
- **Tiempo de solidificación al final del post-llenado:** muestra el tiempo que tarda el polímero en alcanzar la temperatura de transición y depende de la diferencia de temperatura entre el material y el molde y de la conductividad térmica de ambos.
- **Tensiones residuales al final del post-llenado:** muestran las fuerzas en el interior del material al enfriarse desde el estado fundido a la temperatura de transición.
- **Región solidificada al final del post-llenado:** muestra como zonas verdes las regiones solidificadas al final del post-llenado y como zonas rojas las regiones que no han alcanzado la temperatura de transición cristalina.

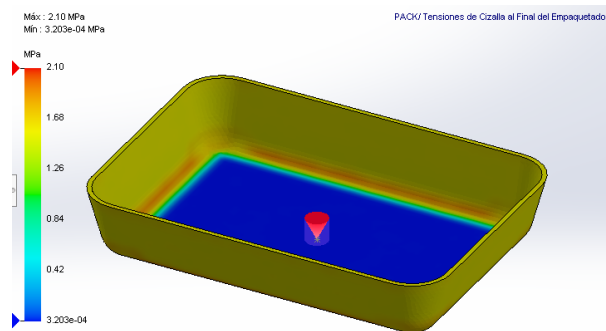


Figura 23. Trazado de las tensiones de cizalla al final del empaquetado

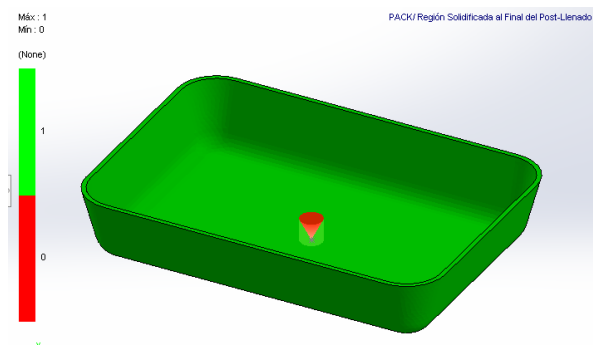


Figura 24. Trazado de la región solidificada al final del post-llenado

4. Aplicación práctica de SolidWorks Plastics

Para hacer el estudio de simulación de moldeo, primero necesitamos la pieza de estudio. En nuestro caso usaremos la carcasa de una maquinilla de cortar pelo, que modelaremos y someteremos a simulación para obtener una idea de su proceso de fabricación y para ver posibles mejoras en su diseño.

4.1 Creación del modelo 3D

Para el modelado de la maquinilla usaremos fotografías de las vistas principales del objeto para usarlas como imágenes de croquis y así poder tener una referencia para la construcción del cuerpo.

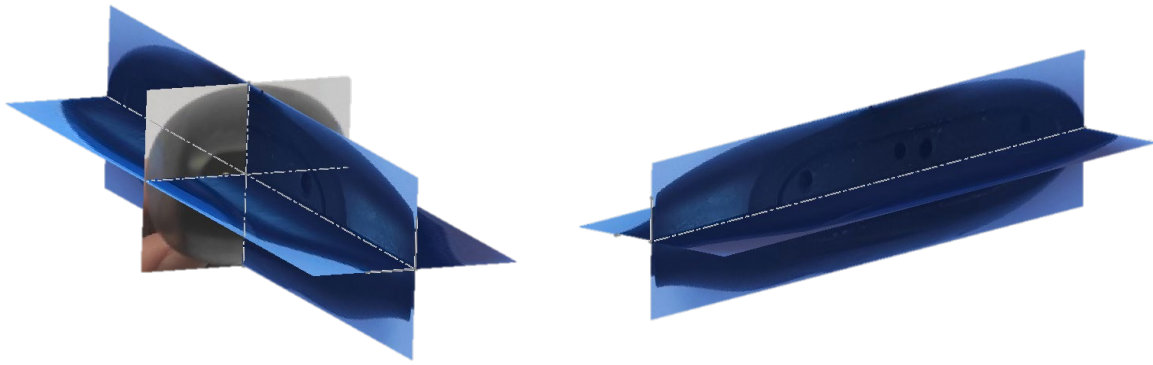


Figura 26. Imágenes para croquis

Primero construiremos la parte inferior de la carcasa. Para ello dibujamos con splines los perfiles ayudándonos de las imágenes. Con los perfiles marcados, usamos la herramienta *superficie limitante* para crear una superficie delimitada por los croquis. A continuación, unimos todas las superficies creadas con la herramienta *coser superficie* y marcamos la opción de crear sólido para tener un sólido compacto. Con la operación *envolver* y un croquis con la forma de los embellecedores construimos el hueco donde se insertarán estas piezas. Como la carcasa es simétrica con respecto a un plano medio, solo necesitamos construir la mitad del sólido y posteriormente realizar una simetría.

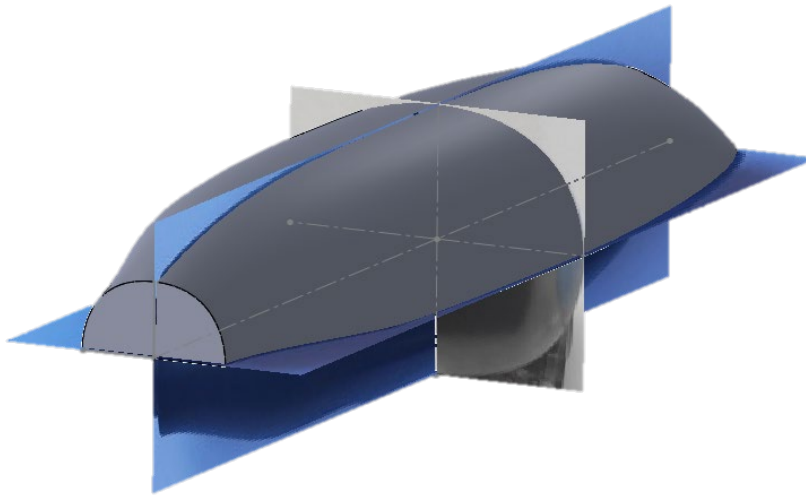


Figura 25. Modelo creado a partir imágenes de referencia

El siguiente paso es realizarle un vaciado al sólido para obtener una pieza de espesor correspondiente a la carcasa real, en nuestro caso de espesor 2 mm. Por último, se realizan todas las operaciones necesarias para replicar los detalles de la carcasa, consistentes en extrusiones y operaciones básicas.

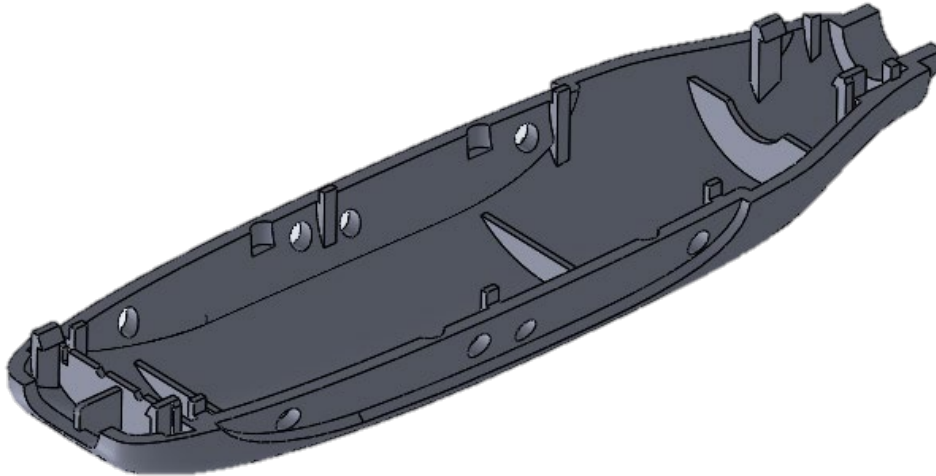


Figura 27. Modelado 3D de la carcasa

Con el modelo creado podemos someterlo a simulación con Plastics para obtener y analizar resultados sobre su proceso de fabricación por inyección de plástico.

4.2 Estudio

Para el estudio del modelo realizaremos varias simulaciones variando parámetros como la ubicación del punto de inyección. Como nuestro modelo 3D de la carcasa tiene pequeños detalles como snapfits o elementos de sujeción, usaremos el método de análisis de sólido ya que el de vaciado es menos preciso para estas zonas. Para ello, primeramente, creamos un nuevo estudio y seleccionamos el método de análisis de sólido. Nuestra maquinilla está fabricada con un mismo tipo de plástico por lo que seleccionaremos la simulación con material único. Los primeros pasos para cada estudio son similares, identificaremos cada uno de ellos con una denominación distinta la cual se expondrá en su correspondiente apartado.

Una vez creado el estudio, el software asignará de manera automática a la carcasa como dominio de tipo cavidad pues es el único sólido que ha podido detectar. A continuación, configuraremos la malla del modelo antes de establecer las condiciones de contorno. De manera que probaremos que tipo de mallado es el más adecuado para representar la pieza.

Por un lado, tenemos el mallado tetraédrico híbrido que crea un mallado superficial y un mallado sólido interno. Para el mallado superficial podemos configurar la densidad de malla, aunque nosotros usaremos el ajuste predeterminado. La malla superficial está conformada por elementos prismáticos. A la hora de elegir el método de refinamiento podemos elegir entre refinamiento uniforme o basado en superficie.

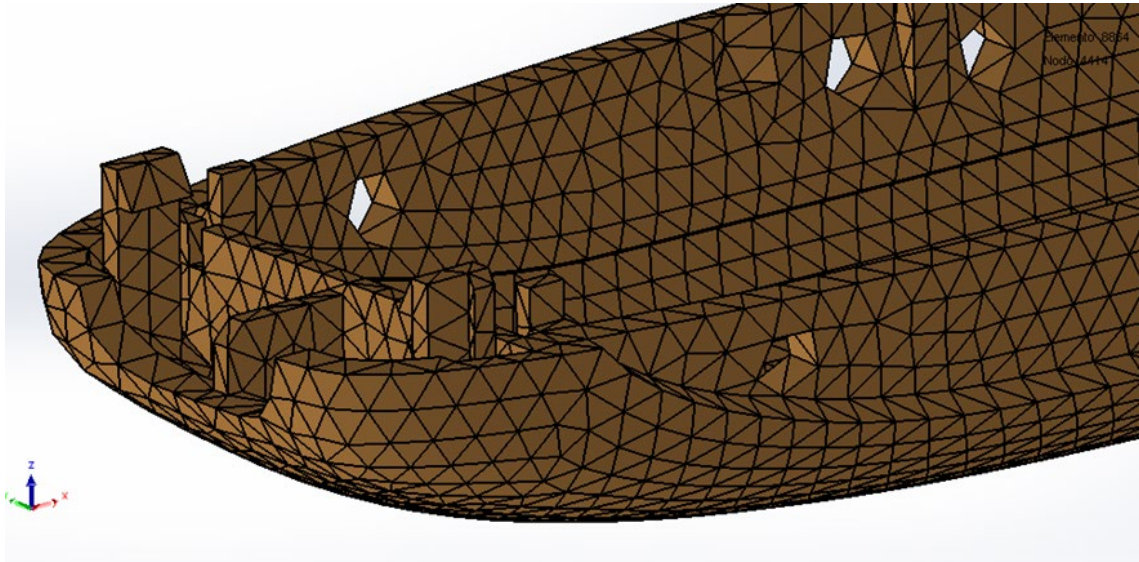


Figura 28. Refinamiento uniforme del mallado superficial

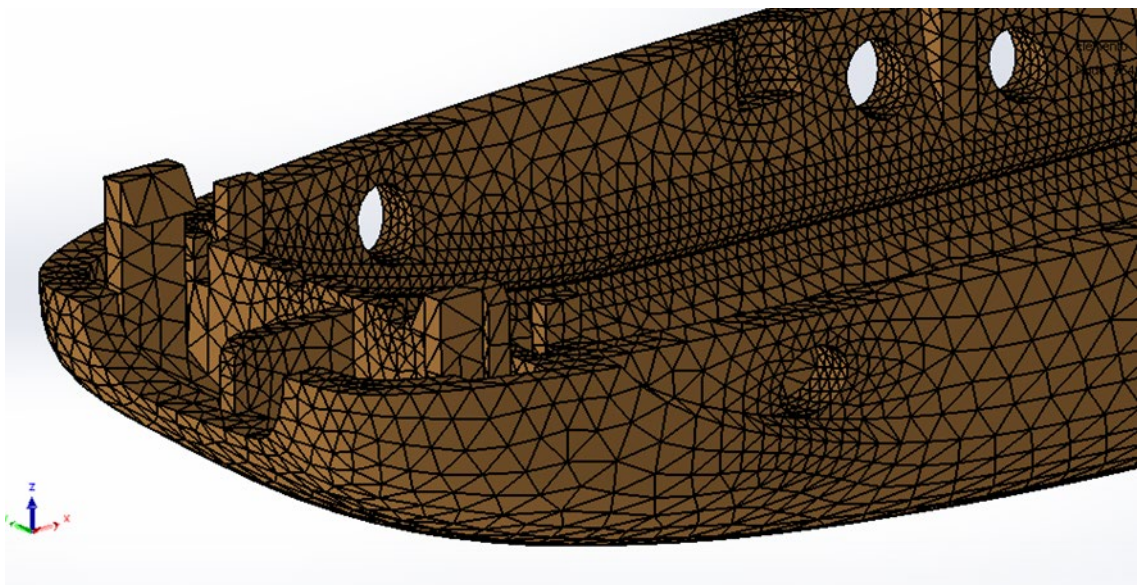


Figura 29. Refinamiento basado en curvatura del mallado superficial

Como se puede observar en el refinamiento uniforme se pierde mucha información geométrica debido al uso en todo el modelo del mismo tamaño de malla. Donde más se aprecia esta pérdida es en las zonas con pequeños detalles como los cortes cilíndricos de los laterales de la carcasa. Con el refinamiento basado en curvatura, estos problemas se minimizan ya que, en las zonas más complejas geométricamente, el tamaño de malla se reduce para adaptarse a la curvatura de la pieza. Por lo tanto, entre estos dos métodos de refinamiento elegiremos el basado en curvatura para representar con más exactitud la geometría del modelo.

Una vez creado el mallado superficial, podemos establecer los parámetros de nuestro mallado interno. En este apartado podemos configurar el número de capas límites y su espesor, que serán las capas que conformarán los elementos prismáticos de la malla superficial. Usaremos el valor predeterminado de dos capas límites para nuestra pieza. El resto de volumen se rellenará con elementos tetraédricos.

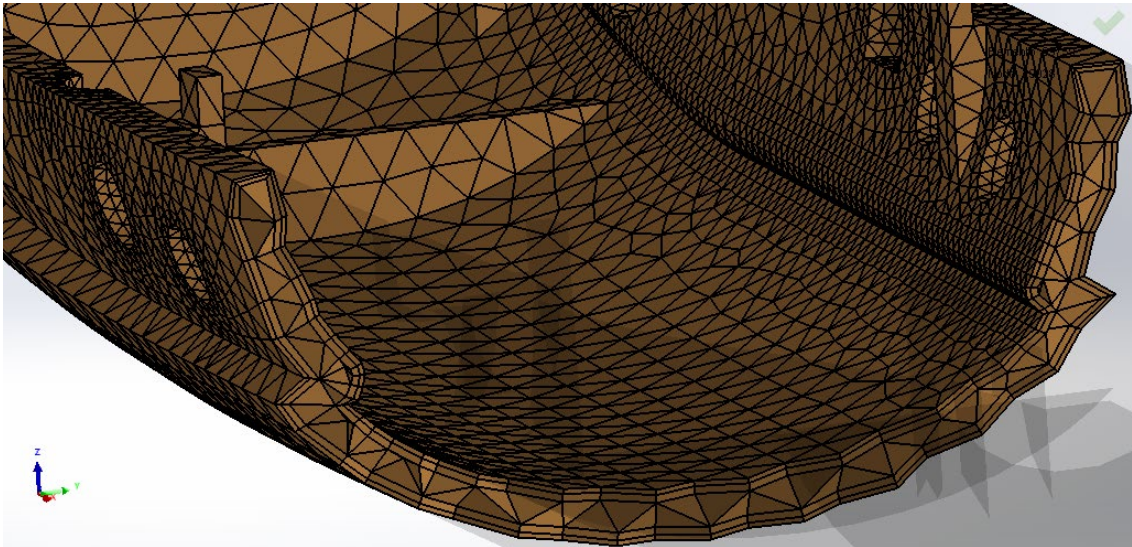


Figura 30. Mallado sólido interno tetraédrico

El otro tipo de mallado que probaremos es el mallado hexaédrico. Este mallado está formado por elementos hexaédricos tanto para el mallado superficial como para el mallado sólido. En el mallado superficial podemos configurar los mismos parámetros que para el mallado tetraédrico híbrido, por lo que elegiremos el método de refinamiento basado en curvatura para obtener un mejor resultado.



Figura 31. Mallado superficial hexaédrico

Para el mallado sólido podemos establecer el tamaño mínimo y máximo de los elementos hexaédricos que conformaran el volumen de la pieza. Para esta opción usaremos los ajustes predeterminados.



Figura 32. Mallado sólido hexaédrico

El tipo de mallado automático lo descartamos de la elección, pues este método de creación de malla, aunque es el más rápido, puede crear más imprecisiones en zonas con detalles.

Así, viendo los resultados obtenidos con el mallado tetraédrico híbrido y el hexaédrico, vemos que el tetraédrico híbrido crea un mallado más uniforme y unas transiciones a zonas detalladas y complejas más suaves. Además, observamos que el mallado hexaédrico es más correcto para piezas en las que los elementos hexaédricos se alineen con la superficie de la pieza. En nuestro caso tenemos un modelo con cambios de curvatura que no se adaptan correctamente a esos elementos de malla. Por lo tanto, elegiremos el tipo de malla tetraédrico híbrido para una mejor simulación de nuestro modelo.

El siguiente paso será asignar el punto de inyección. A continuación, se exponen los distintos estudios según la ubicación del punto de inyección.

4.2.1 Punto de inyección 1 (Central)

En este caso de estudio ubicaremos el punto de inyección en la zona central de la cara interna de la carcasa. Para ello previamente creamos un croquis en nuestro modelo en el que situaremos un punto en la ubicación donde queramos colocar el punto de inyección. En nuestro caso, colocamos el punto de nuestro croquis en la intersección de los planos medios del modelo con la cara interna de la carcasa.

En la pantalla de creación del punto de inyección seleccionamos la opción de punto para seleccionar un vértice del modelo o croquis. De esta manera, seleccionamos el croquis creado con la ubicación deseada y en la zona gráfica aparecerá representado el punto de inyección. El diámetro de inyección lo dejamos en el predeterminado y confirmamos lo seleccionado.

Las demás condiciones de contorno no las podemos establecer ya que son características propias de la máquina de inyección en la que se fabrique la pieza, por lo tanto, usaremos los ajustes preestablecidos.

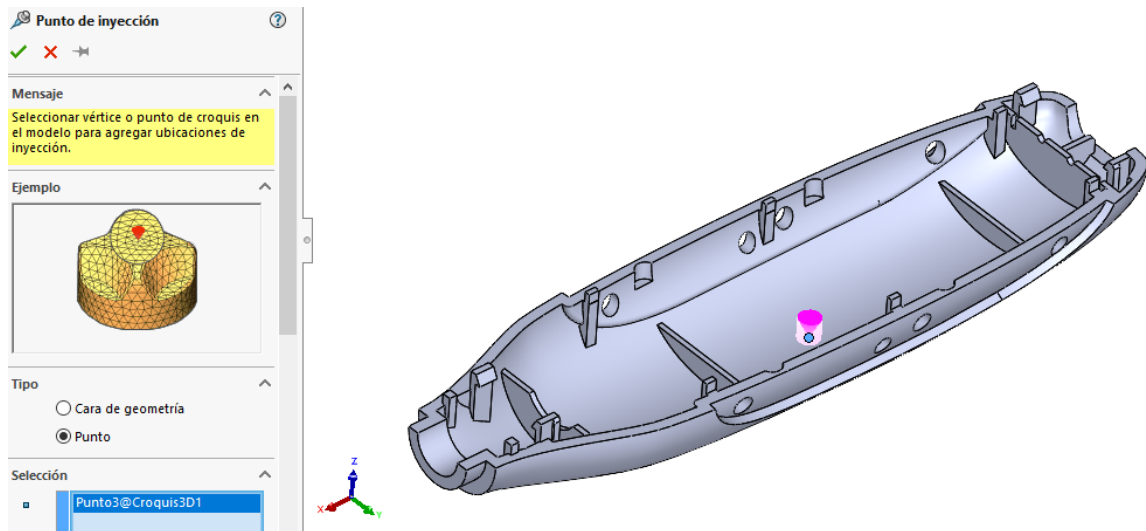


Figura 33. Ubicación del punto de inyección en la cara interna de la pieza

Con el punto de inyección situado, podemos asignar el material deseado a nuestra pieza. Si desplegamos en el árbol de opciones de Plastics la sección de material, nos aparece la opción polímero. En esta sección, damos clic derecho y seleccionamos la opción de abrir base de datos. Aquí nos aparecen miles de materiales que podemos seleccionar para nuestro modelo. Como nuestra carcasa está fabricada en ABS, buscaremos el material y entre las opciones de ABS seleccionamos el genérico. Una vez seleccionado, confirmamos y cerramos la ventana de polímero.

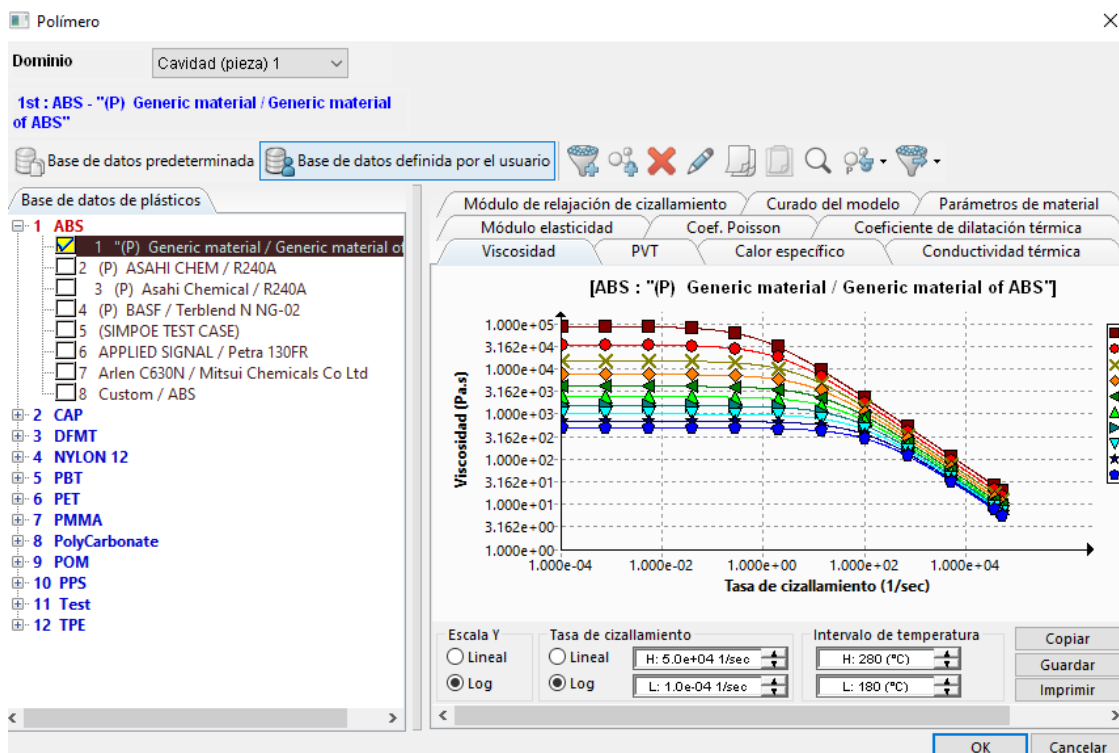
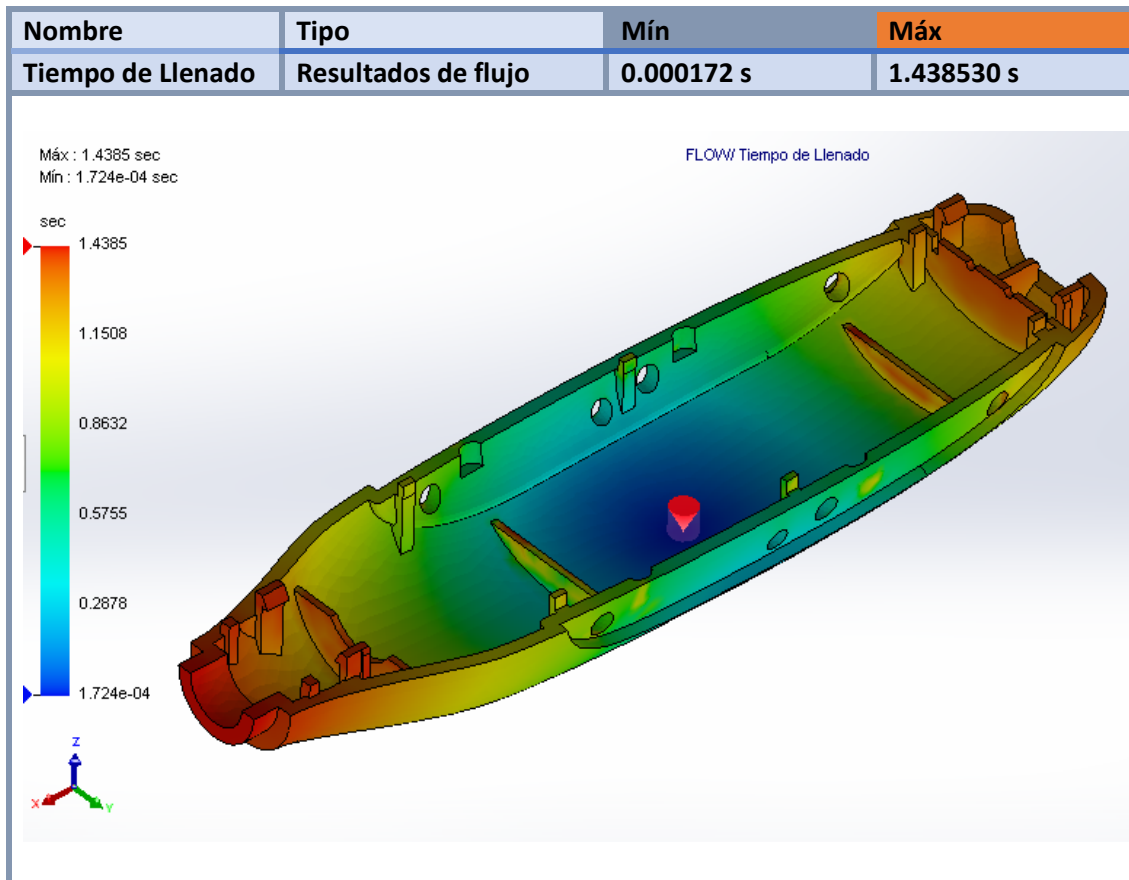


Figura 34. Base de datos de polímeros

A continuación, dejaremos los ajustes de llenado y empaquetado que vienen configurados por defecto y pasaremos a la ejecución de la simulación. Para ello desplegamos la sección de ejecutar y veremos todas las opciones disponibles. Para esta versión de SolidWorks Plastics,

podemos hacer un análisis de llenado, de empaquetado o de ambos. Elegiremos el análisis de llenado y empaquetado para tener unos resultados más completos. De esta forma, hacemos clic derecho en la opción y ejecutamos la simulación. Tras unos minutos, se nos mostrará la pantalla de resultados en la que podremos ver los distintos aspectos analizados. De entre todos los resultados que aparecen enumerados, analizaremos los más relevantes.

Tabla 1. Tiempo de llenado para estudio 1

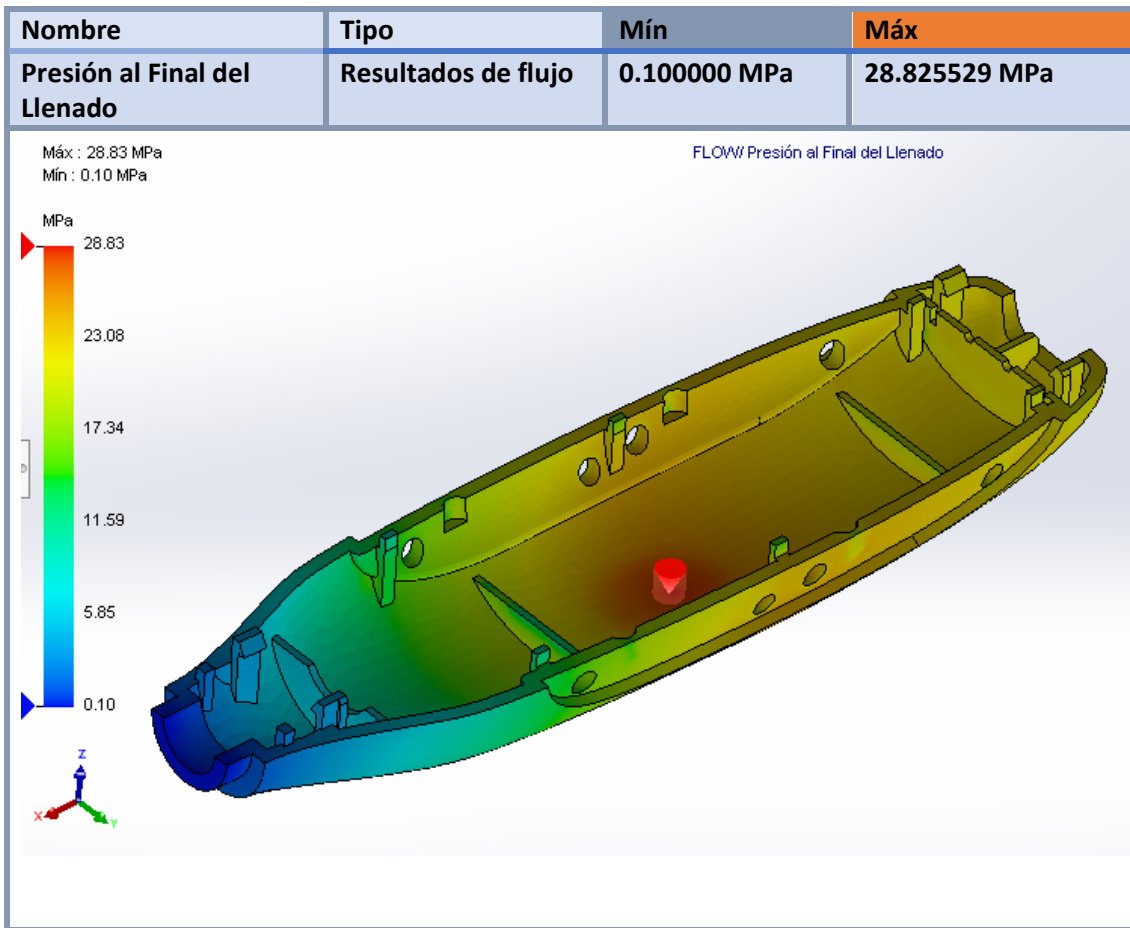


Para el tiempo de llenado el gradiente de color indica el momento en el que el frente de flujo pasa por una determinada zona del modelo. Así, en el gráfico se muestra el inicio del frente de flujo en azul y el final del llenado cuando el flujo se detiene en rojo. Las zonas más alejadas del punto de inyección son las últimas en llenarse. Las zonas más altas con respecto al punto de inyección también tardarán más en completar su llenado.

En nuestro caso, la ubicación del punto de inyección favorece un llenado uniforme de la pieza, llegando el flujo a los extremos de la pieza en tiempos similares y llenando la totalidad de la cavidad.

De este modo, un llenado uniforme hará que se reduzcan los requisitos de presión de inyección.

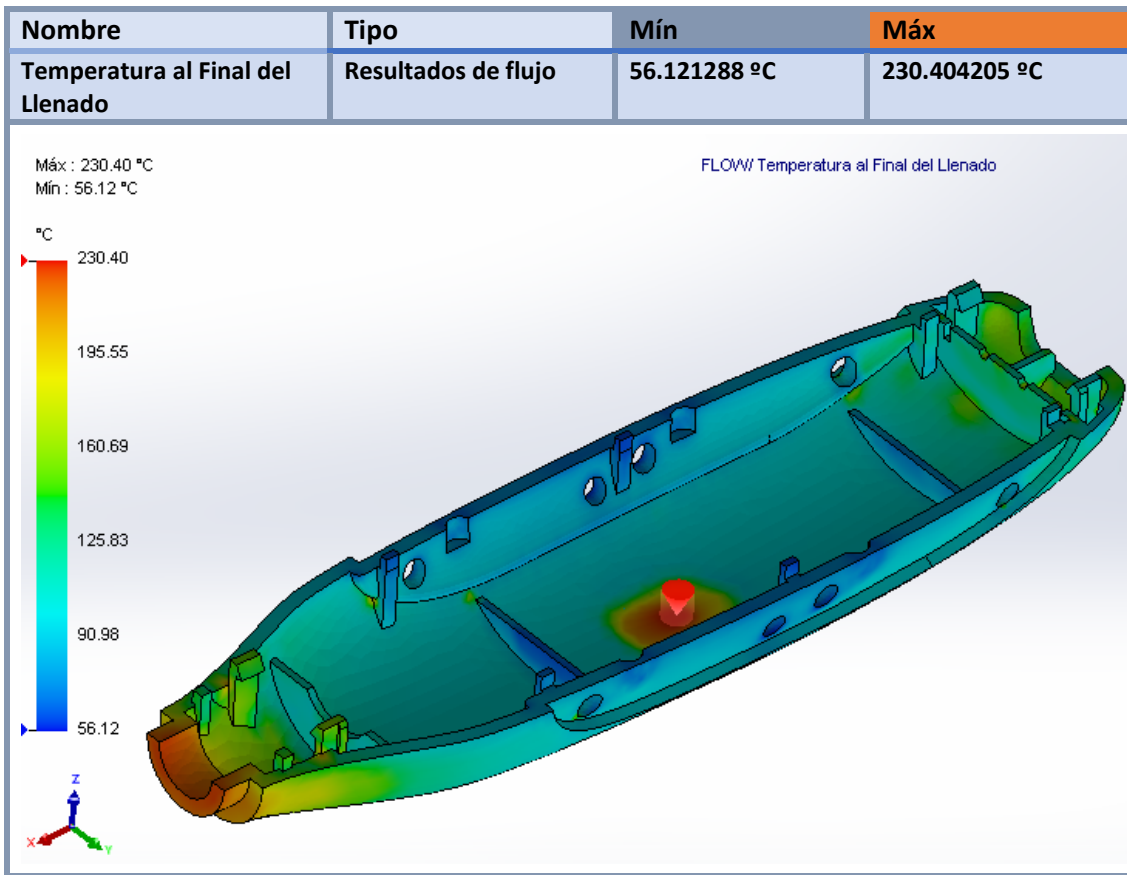
Tabla 2. Presión al final del llenado para estudio 1



En el gráfico se muestra la presión al final del llenado de cada zona de la pieza. La velocidad de inyección se controla con un movimiento de vaivén del husillo, generando así una presión de inyección que genera esa velocidad deseada. Esa presión se propaga con el plástico fundido y provoca una caída de su magnitud a medida que el frente de flujo llega a los extremos de la cavidad. La presión debe distribuirse uniformemente por la cavidad para conseguir unos mejores efectos en las presiones de empaquetado y en la refrigeración de la pieza moldeada.

Para nuestro caso, el gráfico muestra una distribución desigual de la presión. Para mejorar este aspecto, lo ideal sería reubicar el punto de inyección en la dirección contraria a los extremos donde se han obtenido presiones altas para obtener una distribución uniforme de presión en los resultados de flujo.

Tabla 3. Temperatura al final del llenado para estudio 1



En el gráfico de la temperatura al final del llenado se nos muestra la temperatura de las paredes de la cavidad que están en contacto con el molde al final de la fase de llenado. Esto crea una fina capa solidificada en las zonas externas de la pieza y cuyo espesor depende de la temperatura del molde y la conductividad térmica del material usado. Aun así, la temperatura mostrada es ligeramente superior a la real debido a que se toma la temperatura del centro de cada determinada celda del mallado.

Para nuestro estudio, las zonas con mayor temperatura se dan en el punto de inyección y en las regiones que se llenan en el último momento. Sin embargo, podemos ver que uno de los extremos se enfría antes lo que puede generar problemas posteriormente.

También podemos comprobar como las capas internas del modelo aún se encuentran a temperaturas elevadas ya que primero se solidifican las capas que están en contacto con el molde. Para ello hacemos uso de una vista de sección y moviendo el plano se comprueba que la temperatura interna es mayor.

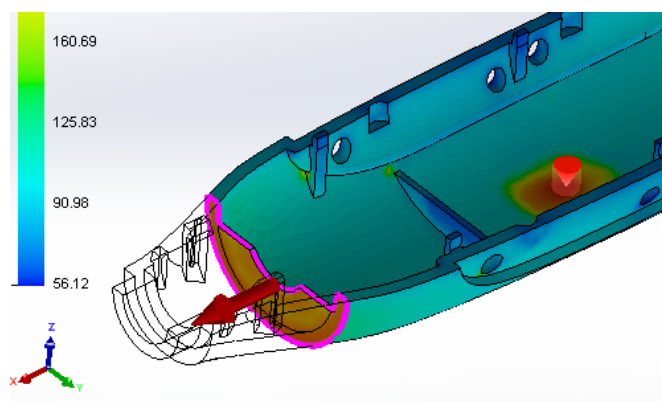
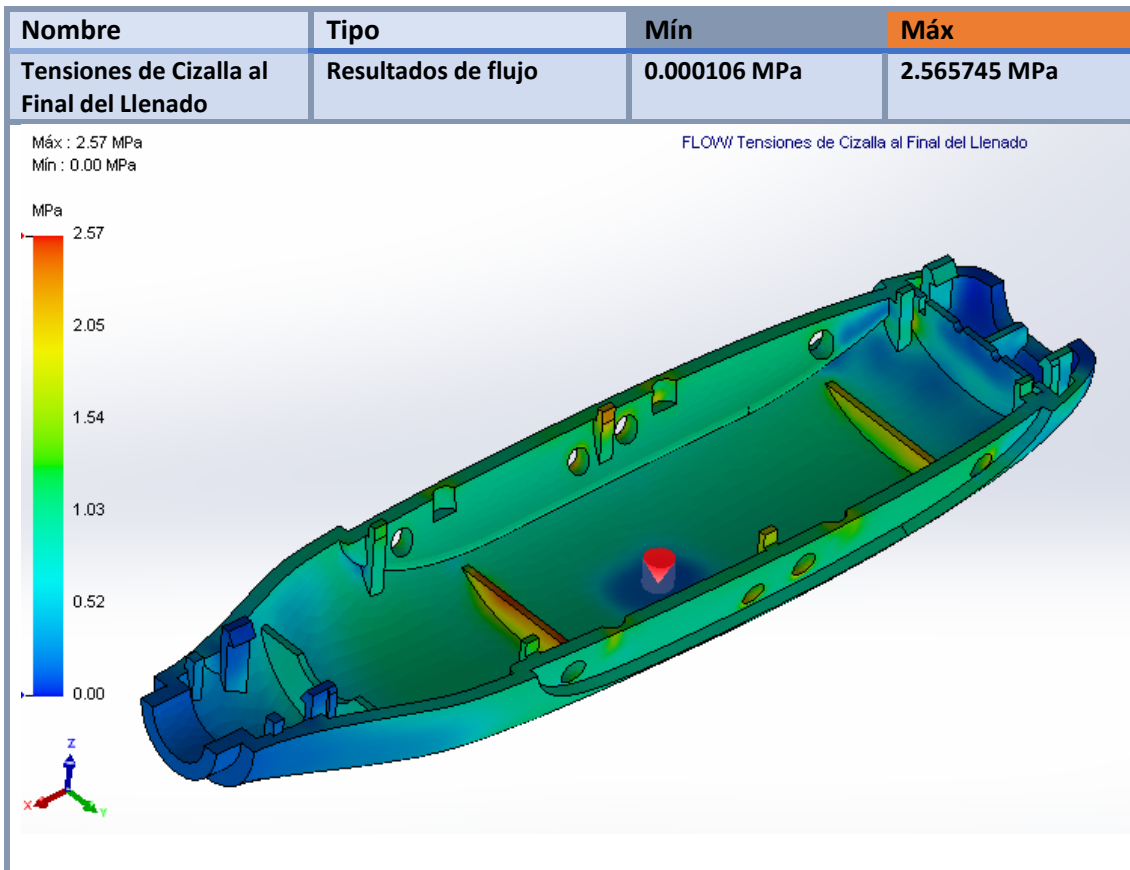


Figura 35. Temperatura interna al final del llenado en estudio 1

Tabla 4. Tensiones de cizalla al final del llenado para estudio 1



Las tensiones de cizalla al final del llenado se comparan con el máximo establecido para el material. Los valores que más se aproximan a ese valor se muestran en rojo mientras que los que se encuentran más lejanos aparecen en azul. Es conveniente no superar el valor máximo establecido para evitar posibles defectos.

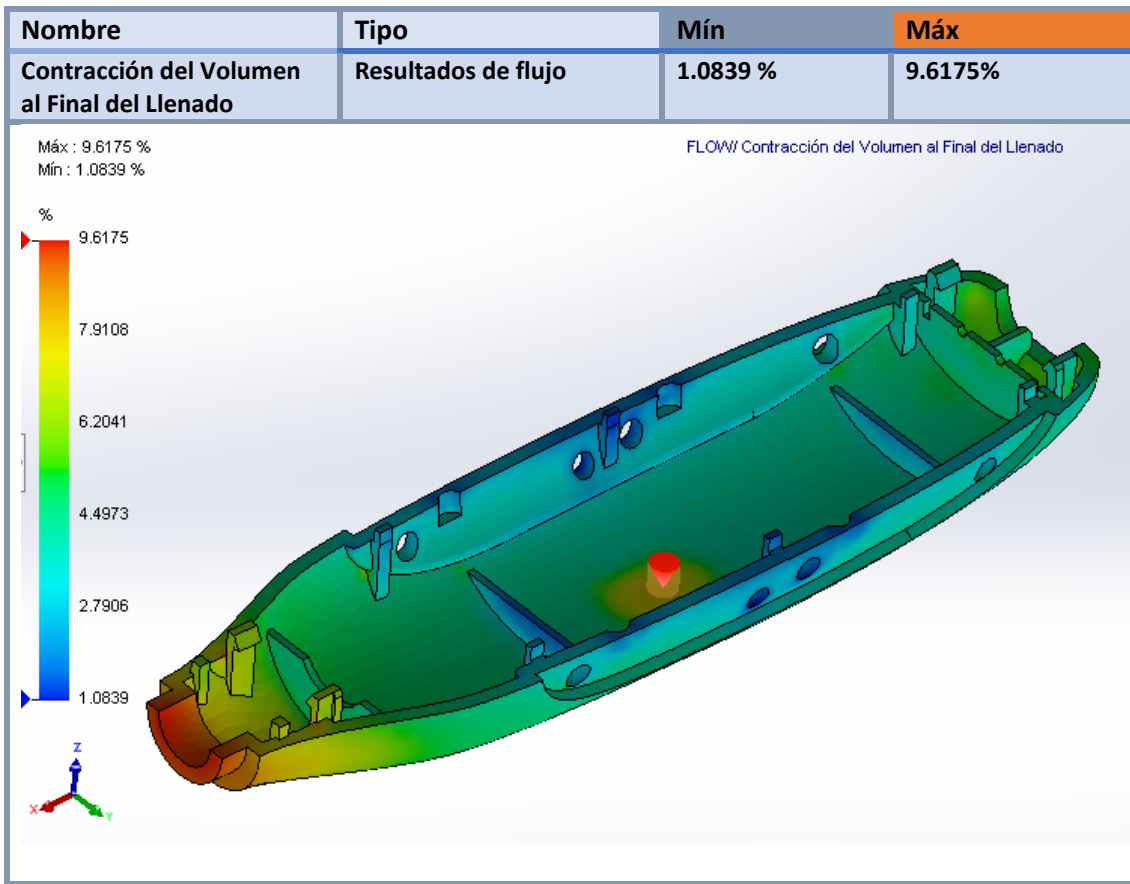
En general, en los resultados no se observan muchas zonas en rojo. Aun así, podemos mejorar los resultados aplicando algunos cambios.

Una opción sería aumentar el tiempo de llenado, para así reducir la velocidad de inyección, factor importante en la tensión de cortadura.

Otro factor que provoca tensiones de cizalla son las esquinas en ángulo de la pieza. Rediseñando estas regiones para convertirlas en esquinas en curva mejoraríamos los valores de tensión.

Por último, podemos aumentar la temperatura del material lo que reduciría los valores de tensión de cizalla, sin embargo, aumentaría el tiempo posterior de refrigeración del material.

Tabla 5. Contracción del volumen al final del llenado para estudio 1



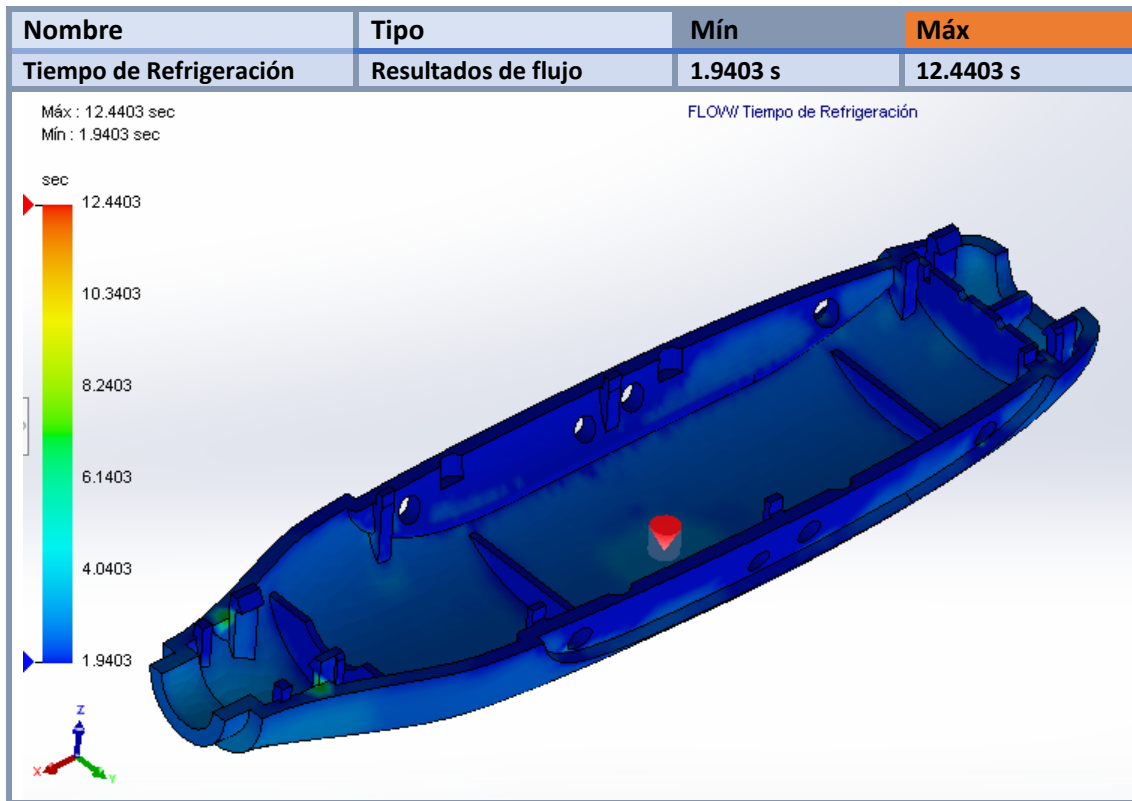
La tasa de contracción volumétrica traza el encogimiento de volumen del polímero a medida que pasa de estado fundido a sólido. Las zonas que se muestran en color amarillo o rojo pueden ser potencialmente problemáticas pues se alcanzan altas tasas de contracción.

Las altas tasas de contracción de volumen se suelen dar en regiones de más espesor y se pueden corregir con una correcta fase de empaquetado.

En ocasiones la contracción puede generar vacíos en el interior de las paredes de la pieza. Estos vacíos se generan cuando el material de la superficie es lo suficientemente rígido para no perder su forma y que el material fundido del núcleo de la cavidad se separe del interior. De esta forma se crean zonas en el interior donde no existe material. Para poder comprobar si existen en nuestra pieza usamos un plano de sección y visualizamos el núcleo de la cavidad.

En nuestro caso, no existen problemas de vacío, pero será necesaria la fase de empaquetado para solucionar los posibles problemas de contracción.

Tabla 6. Tiempo de refrigeración para estudio 1



El tiempo de refrigeración se determina como el tiempo que tarda el 90% del material en alcanzar la temperatura de eyección. Este tiempo representa un 70% del ciclo de fabricación y depende de la temperatura del material y la temperatura del molde. Los altos tiempos de refrigeración son debidos a la baja conductividad y el alto aislamiento térmico de los plásticos.

Se puede reducir el tiempo de refrigeración disminuyendo el espesor de las paredes de la pieza sin comprometer otros factores importantes para un buen resultado.

Para nuestro caso, los resultados son correctos pues, en general, el espesor de las paredes es fino y uniforme en toda la pieza.

Por otro lado, podemos ver como en el interior de las paredes encontramos regiones rojas donde se alcanzan los mayores tiempos debido a que son las zonas que no están en contacto con el molde y, por tanto, tardan más en enfriarse.

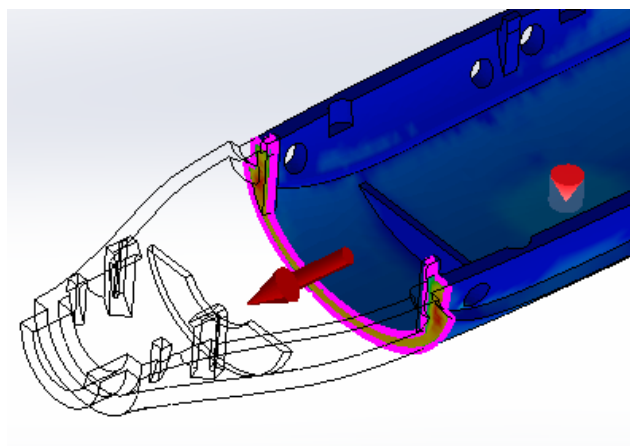
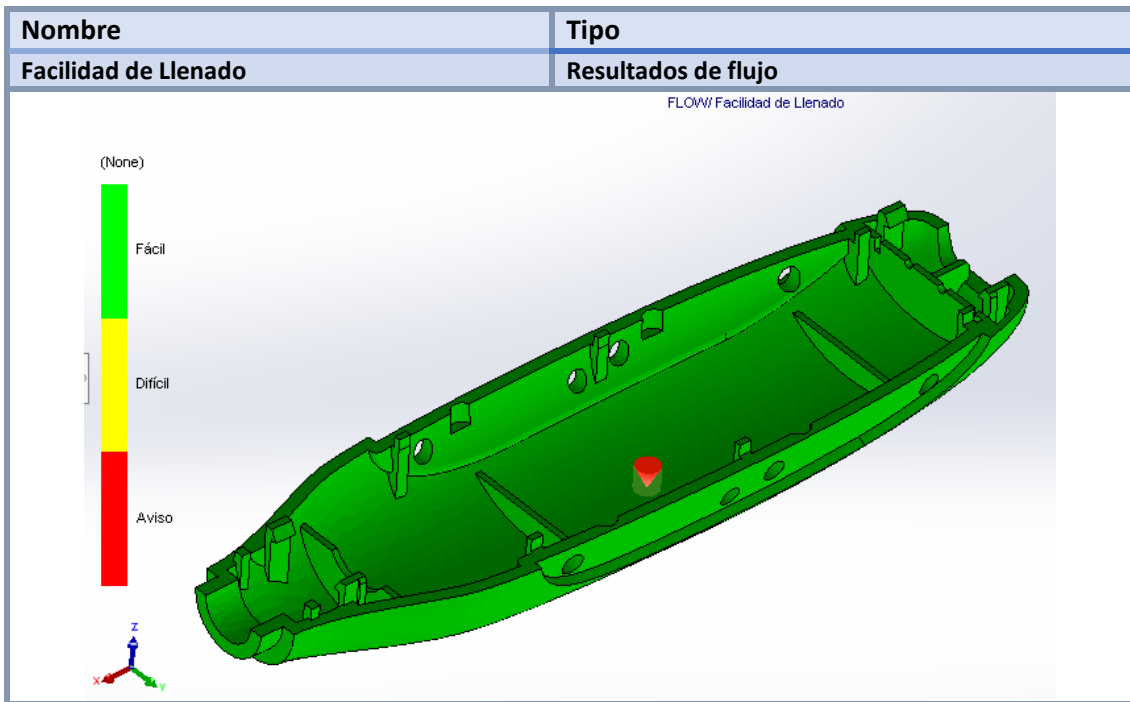


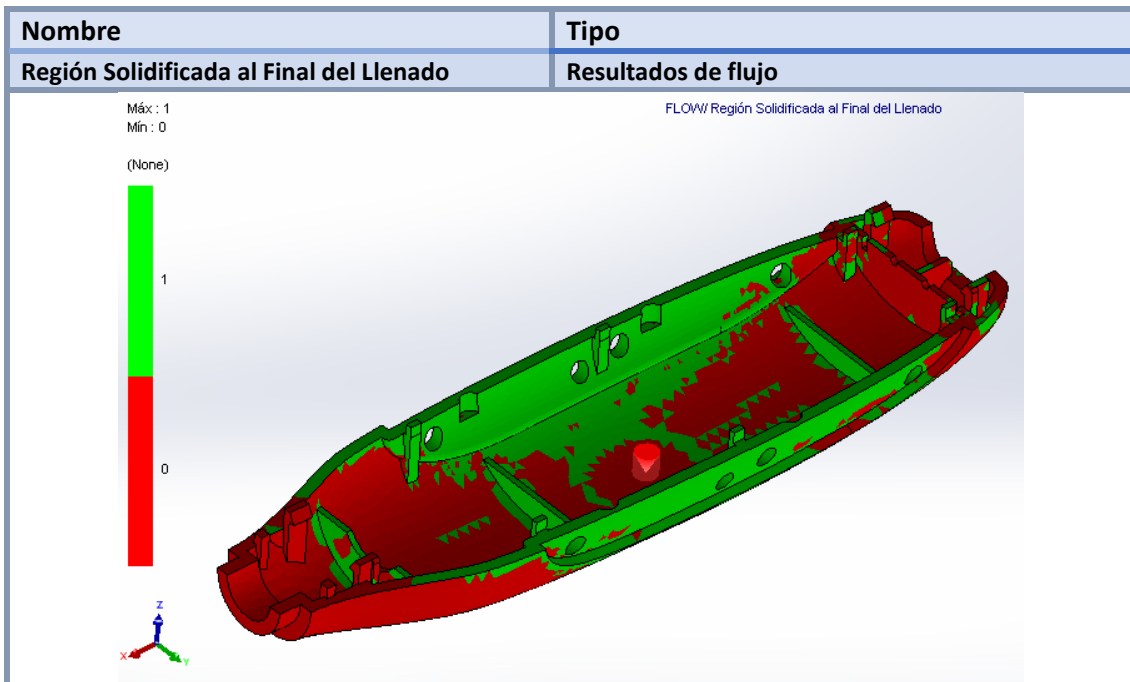
Figura 36. Tiempo de refrigeración interna para estudio 1

Tabla 7. Facilidad de llenado para estudio 1



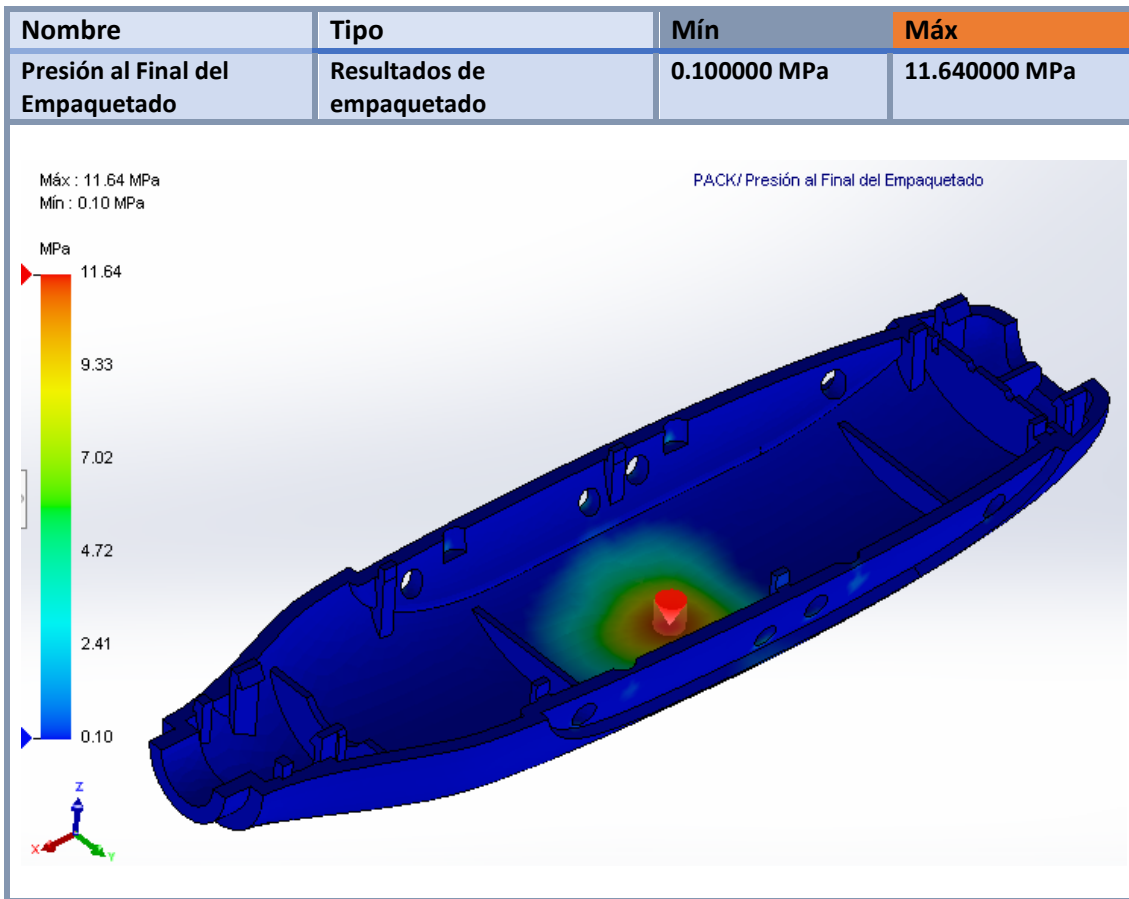
La facilidad de llenado muestra en verde las zonas que se pueden llenar con una presión normal, inferior al 70% del valor de la presión máxima establecida.

Tabla 8. Región solidificada al final del llenado para estudio 1



Las regiones verdes muestran las zonas de la pieza que han llegado a la temperatura de transición vítrea del material tras la cual el polímero pasa de ser sólido viscoso a sólido rígido. Las regiones rojas no han alcanzado dicha temperatura al final del llenado.

Tabla 9. Presión al final del empaquetado para estudio 1



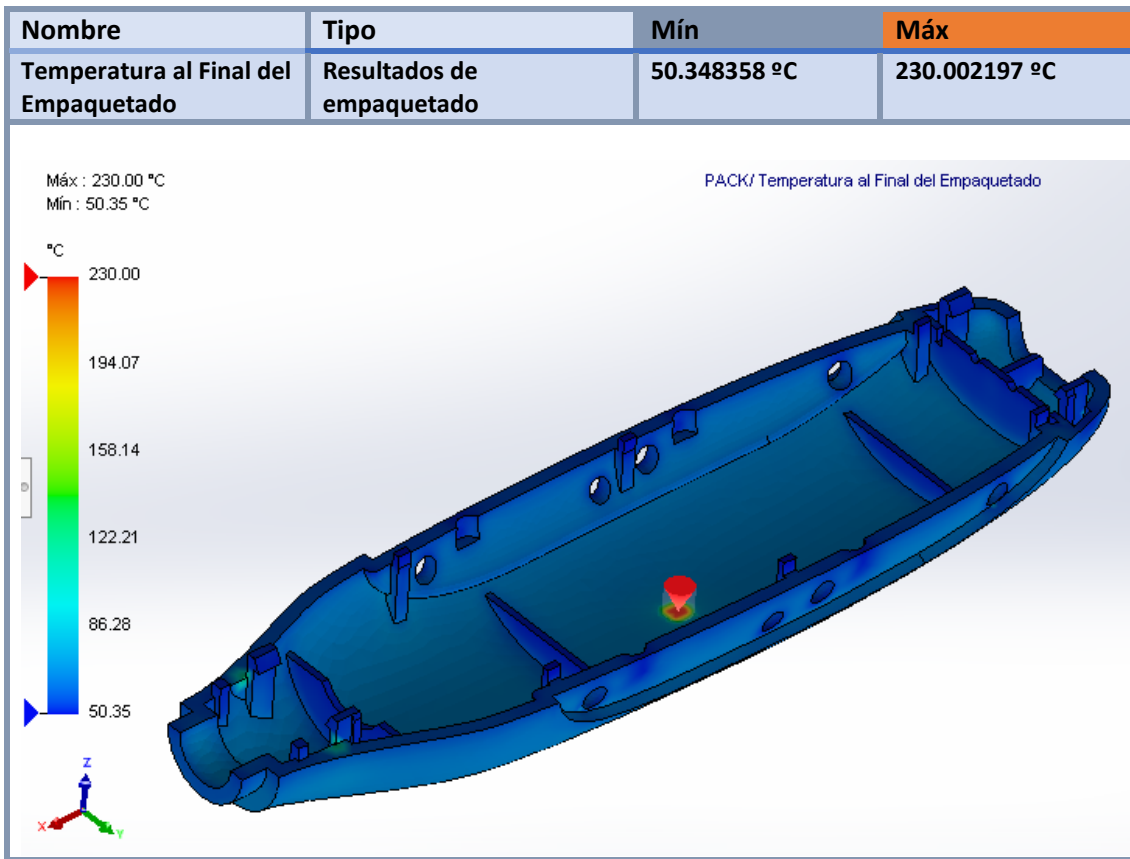
Al igual que para la fase de llenado, la presión para la fase de empaquetado se consigue controlando el movimiento de vaivén del husillo. Para las paredes finas es necesario ejercer una presión alta ya que en secciones finas la resistencia al paso del flujo es mayor.

Con una presión de empaquetado insuficiente se podrían producir defectos en la pieza, como rechupes, estancamiento del flujo y vacíos en las zonas internas de la cavidad.

En el gráfico se muestra la presión ejercida en las distintas zonas de la pieza. Para un buen empaquetado, la presión debe distribuirse uniformemente por la cavidad.

En nuestro caso, vemos como, en general, la presión al final del empaquetado es baja y uniforme en la mayor parte de la pieza. Las presiones altas se dan en el punto de inyección, como es de esperar ya que es el lugar desde donde se genera la presión.

Tabla 10. Temperatura al final del empaquetado para estudio 1



Al finalizar la fase de empaquetado se puede observar que la superficie de la pieza alcanza la temperatura del molde. En nuestro caso, vemos como la mayoría de la superficie está en azul para una temperatura del molde de 50 °C.

En el interior de la pieza el material puede encontrarse fundido a la temperatura del material o cercano a la temperatura de transición vítrea. Es aconsejable evitar temperaturas muy altas en el interior al final de la fase de empaquetado ya que puede originar rechupes o vacíos internos.

Para nuestra simulación obtenemos regiones de color verde en el interior de las paredes, es decir, temperaturas cercanas a la temperatura de transición vítrea de nuestro material. Por lo tanto, no habría problemas de temperatura al final de la fase de empaquetado.

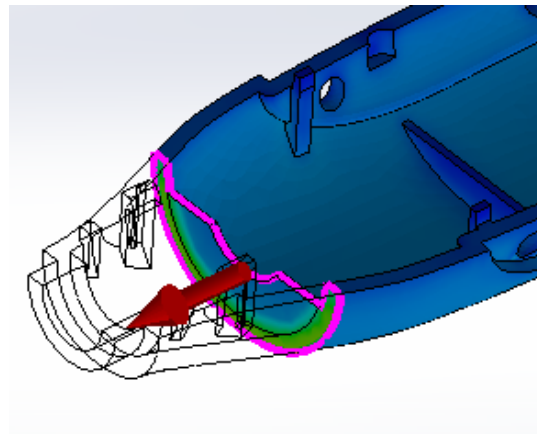
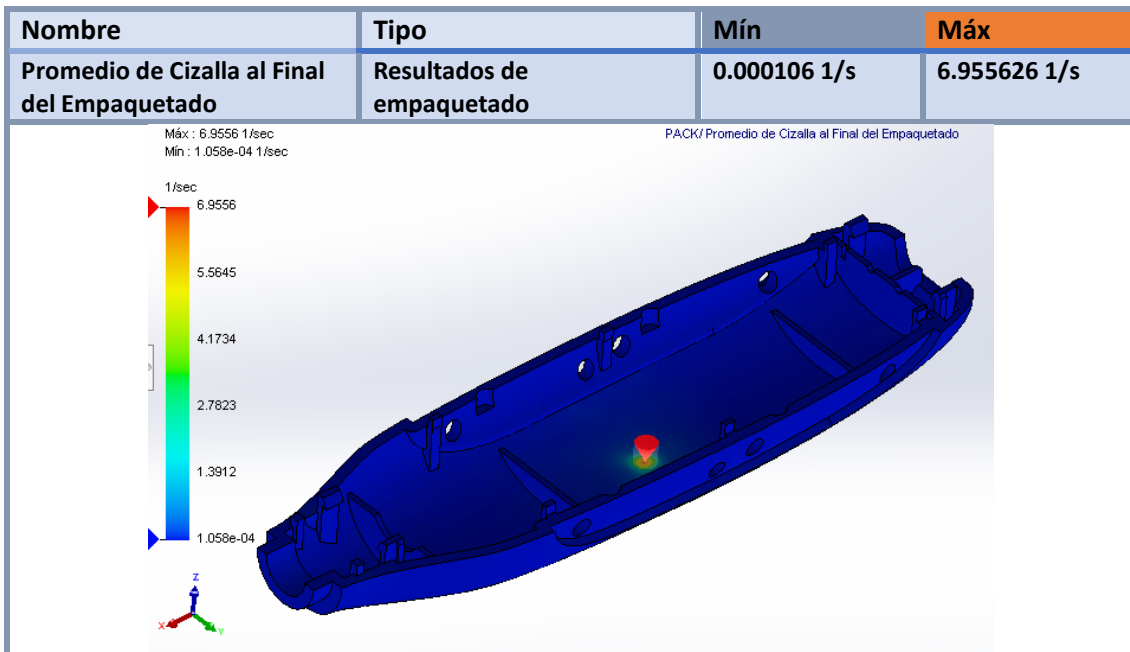


Figura 37. Temperatura interna al final del empaquetado para estudio 1

Tabla 11. Promedio de cizalla al final del empaquetado para estudio 1



El promedio de cizalla mide la velocidad de una capa de fluido sobre otra que se mueve a distinta velocidad. Este valor al final de la fase de empaquetado debe ser cercano a cero con regiones superficiales e internas en azul debido a que en este momento la mayor parte del material se encuentra inmóvil, sin que se ejerza ninguna tensión.

Podemos comprobar como en los núcleos de la cavidad encontramos zonas azules para la tasa de cizalla

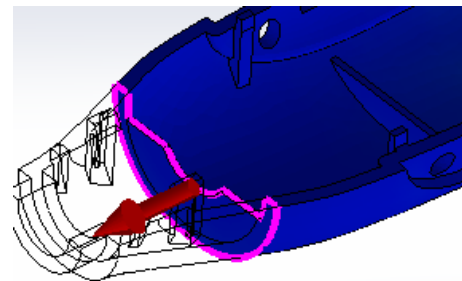
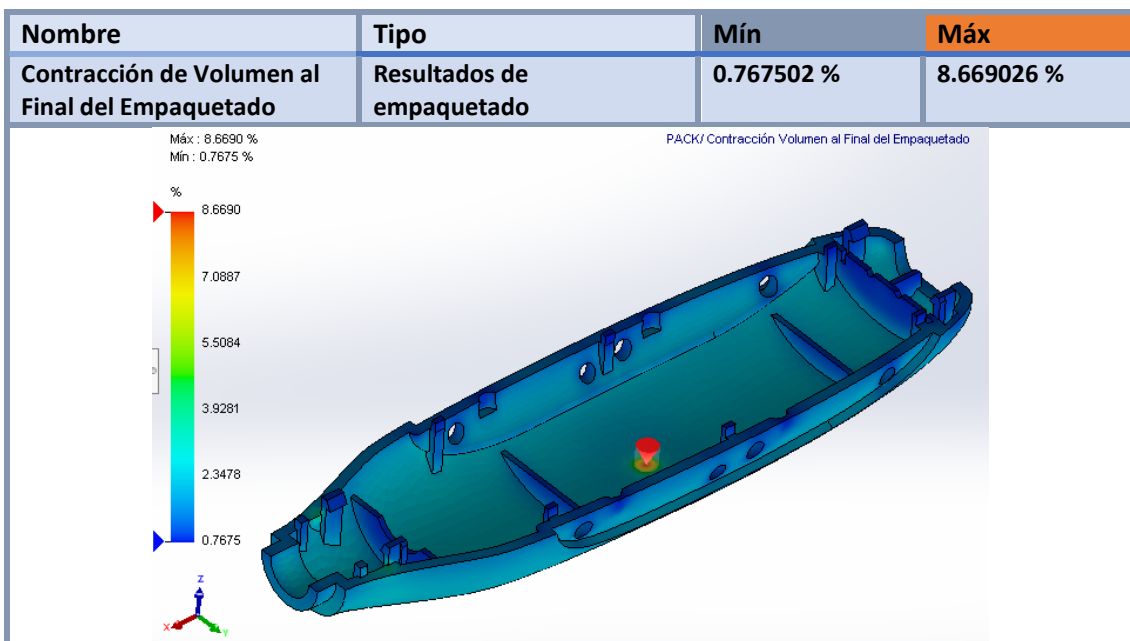


Figura 38. Tensiones de cizalla al final del empaquetado para estudio 1

Tabla 12. Contracción de volumen al final del empaquetado para estudio 1



La contracción de volumen es un aspecto considerable en materiales plásticos. Para el final de la fase de empaquetado deberían obtenerse pocas zonas rojas en el trazado del modelo como señal de un buen resultado de empaquetado. En el caso de que hubiera diversas zonas rojas podrían dar lugar a rechupes o deformaciones en la pieza.

Para nuestro estudio, vemos que se ha realizado un buen empaquetado, pues la mayor parte de la pieza se encuentra con zonas azules. Además, en la sección interna de las paredes encontramos regiones verdes, cercanas a los valores que obtenemos en la superficie, por lo que tampoco tendremos problemas de empaquetado.

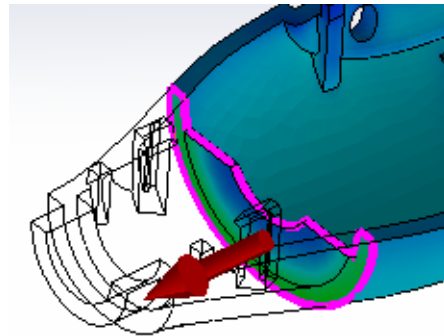


Figura 39. Contracción de volumen interno al final del empaquetado para estudio 1

4.2.2 Punto de inyección 2 (Extremo)

Para este caso de estudio, situaremos el punto de inyección en el extremo de la carcasa de la maquinilla donde se coloca el cabezal. En esta ocasión, no necesitamos crear un croquis previo ya que podemos seleccionar la cara de la pieza que se encuentra en el extremo de la carcasa. Para ello, en la sección de punto de inyección, marcamos el tipo cara para la ubicación y seleccionamos la cara deseada.

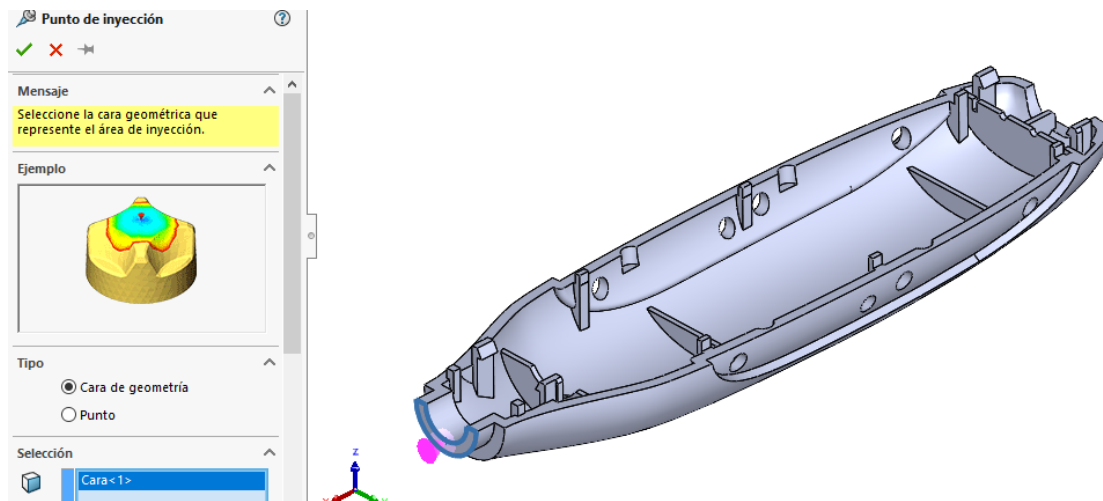


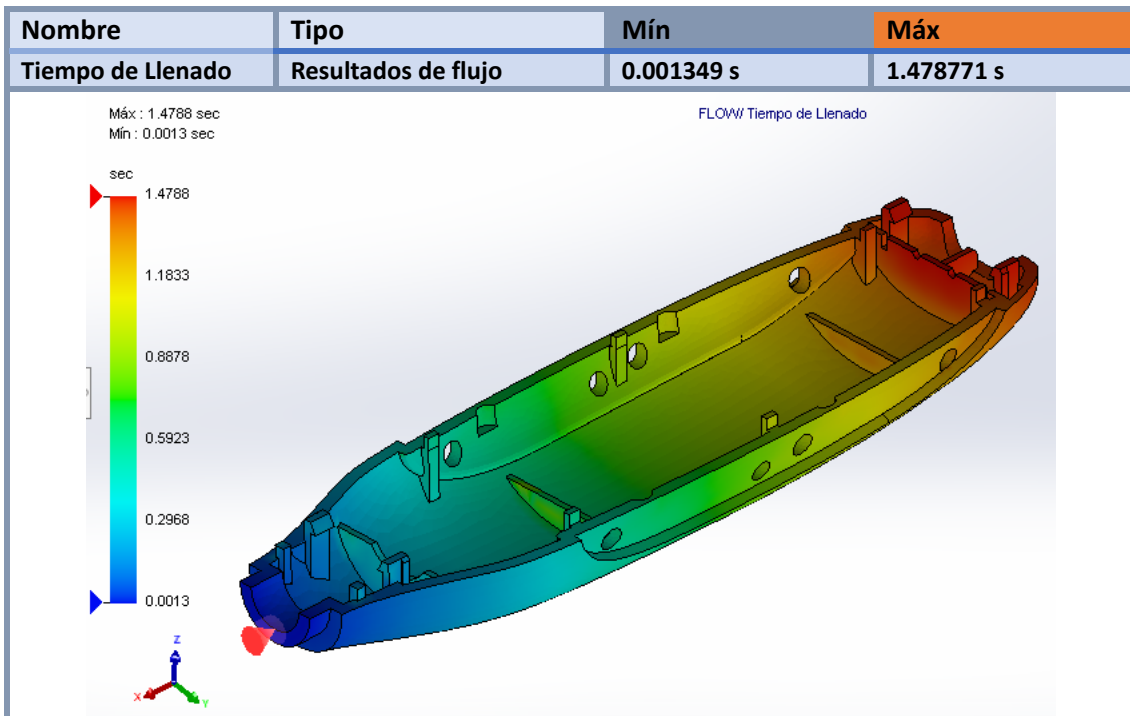
Figura 40. Ubicación del punto de inyección en cara del extremo de la pieza

Una vez confirmado el punto de inyección, elegimos "(P) Generic material / Generic material of ABS" como polímero para nuestra pieza.

En los parámetros del proceso comprobamos que los ajustes de llenado y empaquetado coinciden con los establecidos para el caso de estudio anterior y confirmamos la elección.

A continuación, ejecutamos el análisis de llenado y empaquetado para ver posibles problemas que puedan surgir con esta ubicación del punto de inyección y para comparar los resultados con el estudio anterior.

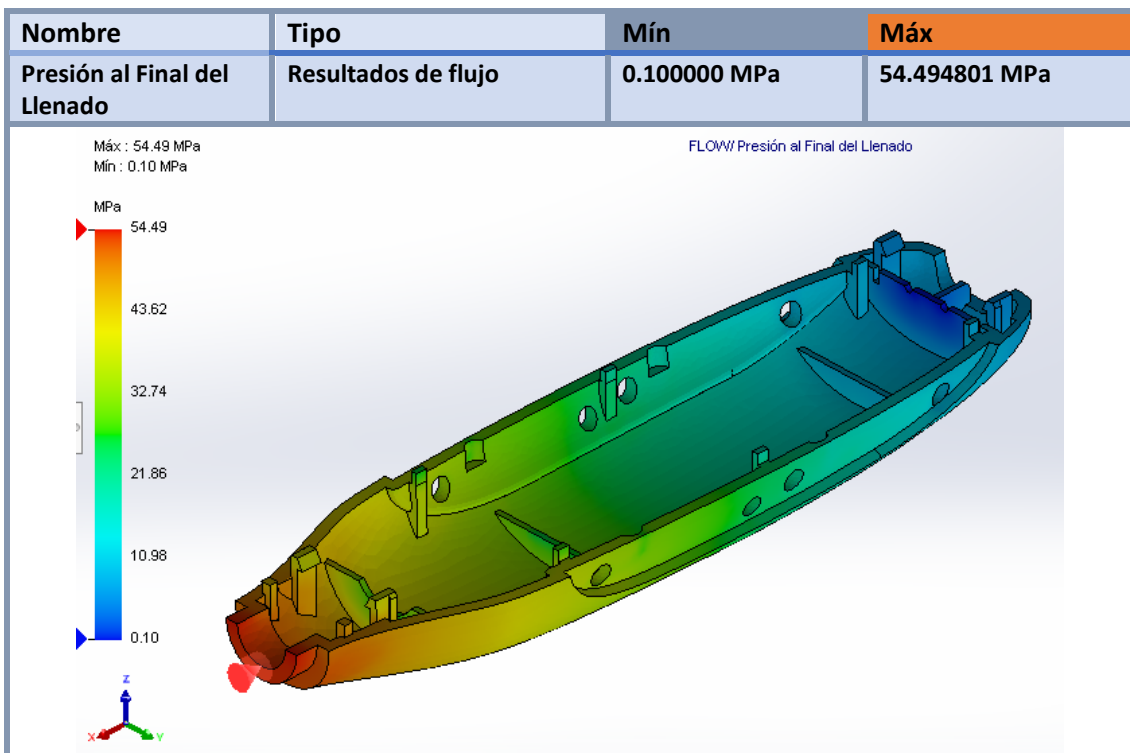
Tabla 13. Tiempo de llenado para estudio 2



Para esta ubicación del punto de inyección vemos como el tiempo de llenado no se distribuye uniformemente por toda la pieza, sino que un extremo se produce el inicio del frente de flujo y en el otro el final del llenado.

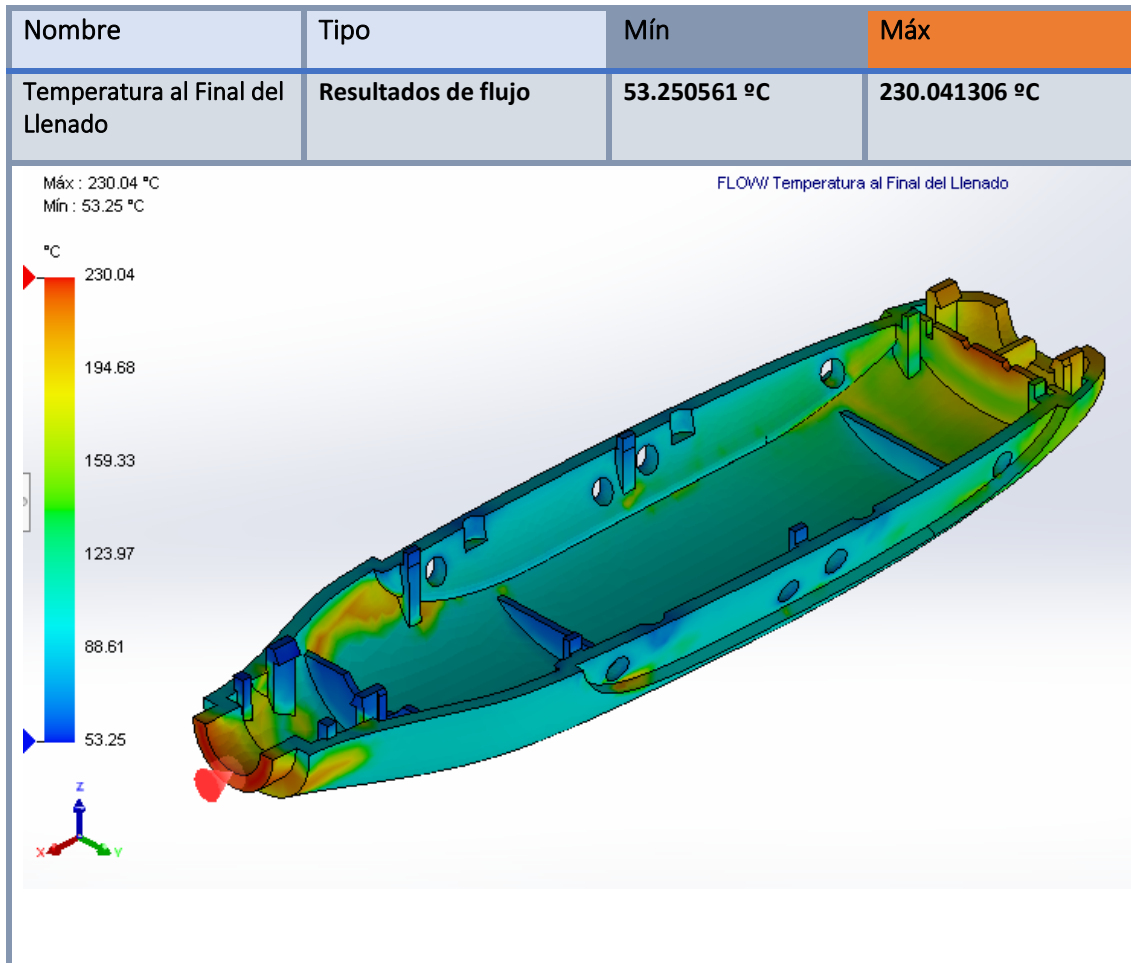
La cavidad se llena completamente, pero la longitud del flujo es excesiva, sería conveniente cambiar la ubicación del punto de inyección para generar trayectos más cortos y así, evitar posibles problemas de empaquetado y defectos por contracción de volumen desigual.

Tabla 14. Presión al final del llenado para estudio 2



Al igual que para el trazado del tiempo de llenado, para la presión al final del llenado se observa una distribución no uniforme en la cavidad. Además, si comparamos los valores con los obtenidos en el punto de inyección 1 vemos que la presión máxima que se alcanza es casi el doble, necesitando unos requisitos de presión mayores para este caso.

Tabla 15. Temperatura al final del llenado para estudio 2



En el trazado de la temperatura al final del llenado, vemos como las temperaturas más altas se dan en las zonas que se llenan más tarde y en la región del punto de inyección.

La temperatura mínima con respecto al caso anterior es ligeramente más baja debido a que, al tener el punto de inyección en un extremo y tener una longitud del flujo mayor, hay regiones que están más tiempo en contacto con la temperatura del molde, después de ser llenadas.

Podemos comprobar, además, que la región solidificada la conforma una fina capa de la superficie, pues el interior aún se encuentra a altas temperaturas.

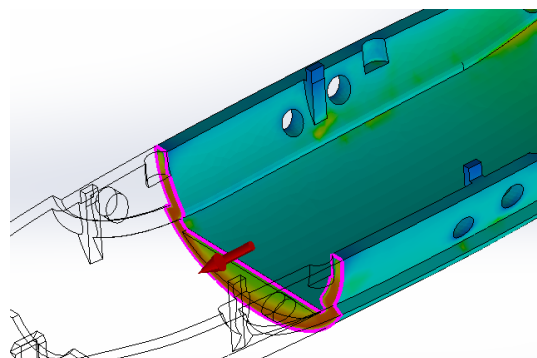
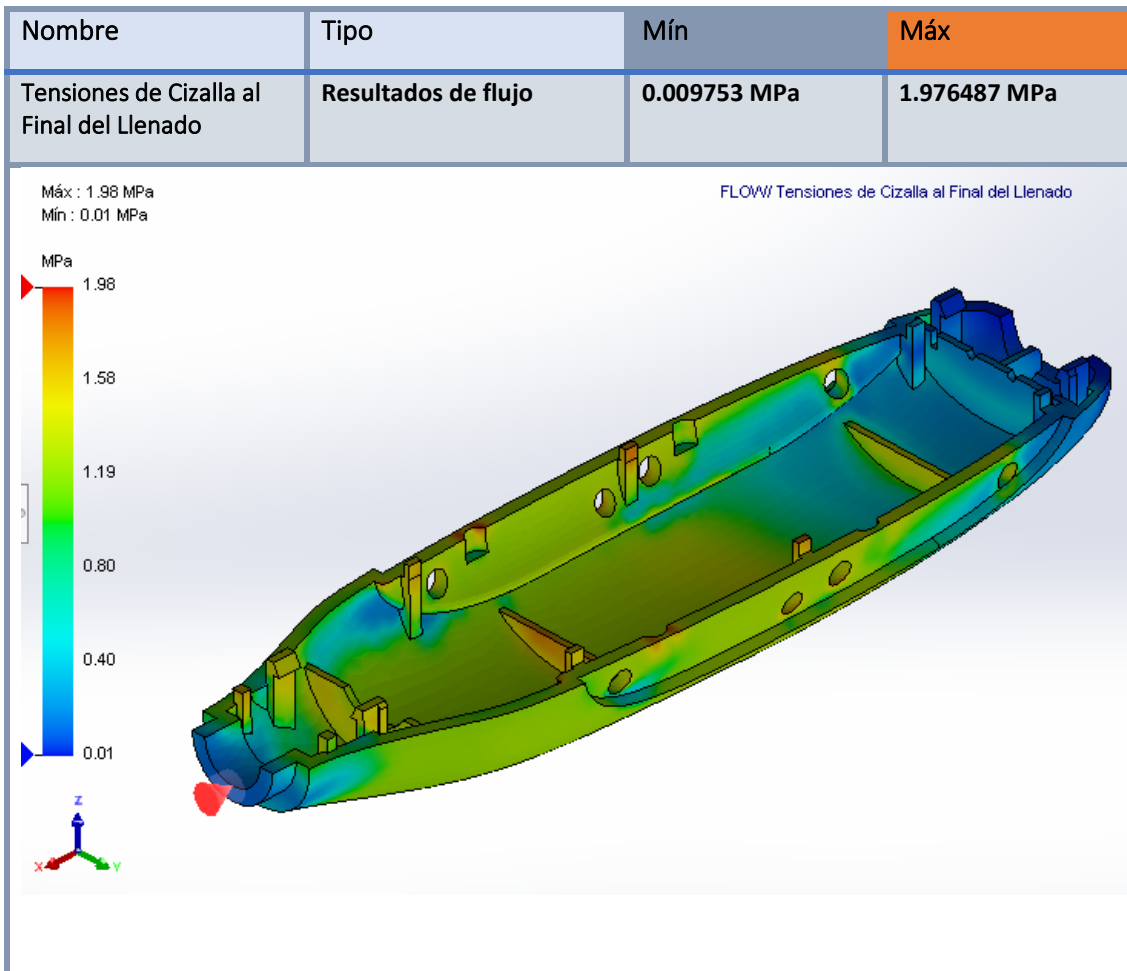


Figura 41. Temperatura interna al final del llenado para estudio 2

Tabla 16. Tensiones de cizalla al final del llenado para estudio 2



Para este caso, vemos que los valores máximos que se obtienen para el trazado de las tensiones de cizalla al final del llenado son inferiores a los obtenidos en el caso anterior. Sin embargo, estos valores siguen estando por encima del valor máximo recomendado por el material (0,3 MPa).

Por lo tanto, sería recomendable aplicar alguna de las recomendaciones expuestas para el caso anterior. Lo óptimo, sin tener que modificar la geometría de la pieza ni el tamaño del punto de inyección, sería aumentar la temperatura del material o el tiempo de llenado, aunque ambas opciones conlleven un aumento en los tiempos de ciclo de fabricación.

En la zona interna es donde se localizan los valores mínimos ya que la resistencia al flujo es mucho menor que la dada en las zonas de contacto con las paredes de la cavidad, en las que la oposición al frente es mucho mayor, generando los altos valores de tensiones de cizallamiento.

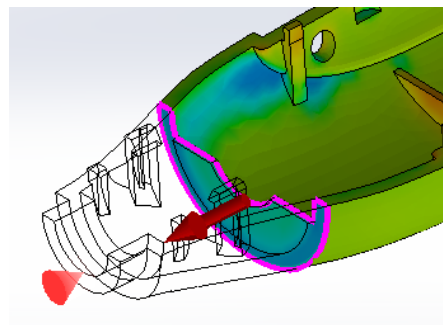
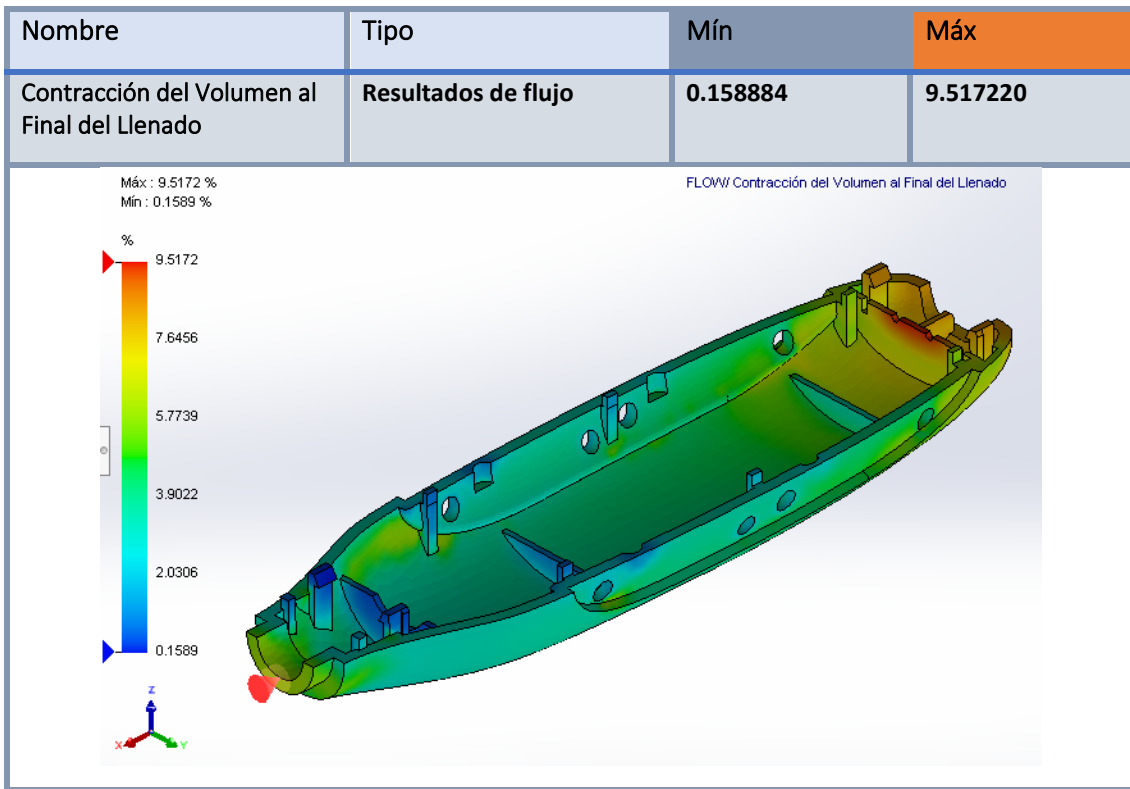


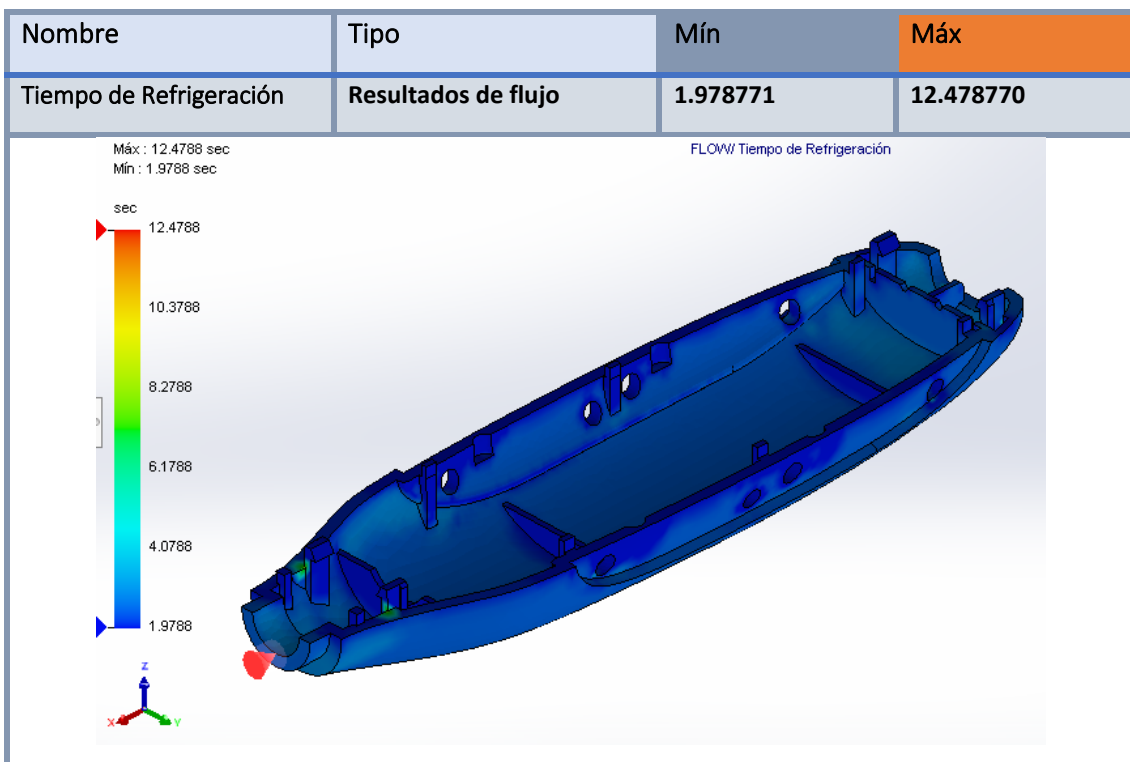
Figura 42. Tensiones de cizalla internas para estudio 2

Tabla 17. Contracción del volumen al final del llenado para estudio 2



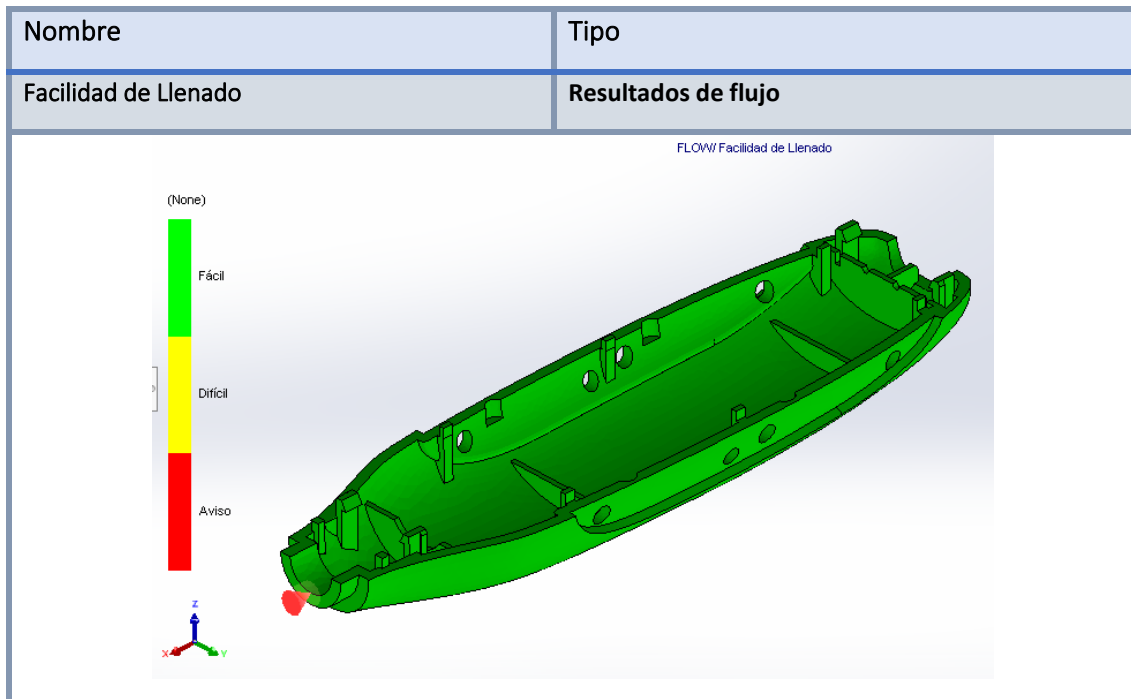
La contracción del volumen al final del llenado que obtenemos nos refleja unos resultados de contracción similares al caso anterior. En general, no supondrá un problema si se realiza una correcta fase de empaquetado.

Tabla 18. Tiempo de refrigeración para estudio 2



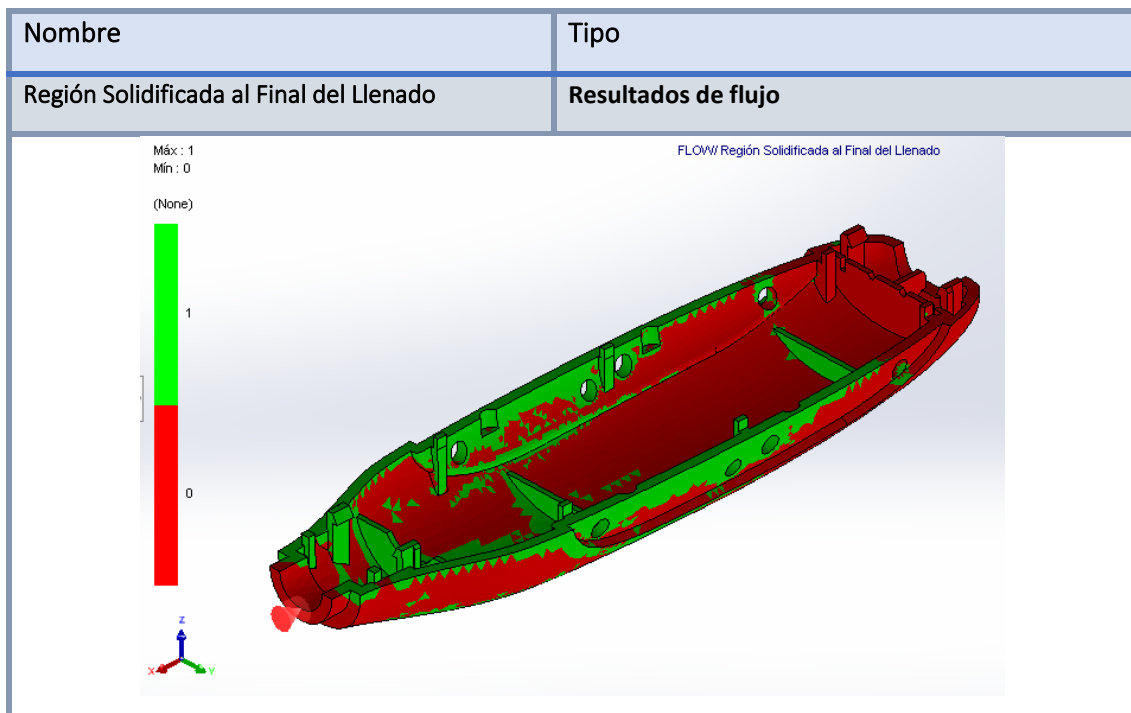
Para el tiempo de refrigeración obtenemos unos valores similares al punto de inyección 1, dándose los mayores valores en las zonas internas, las cuales no están en contacto directo con las paredes del molde.

Tabla 19. Facilidad de llenado para estudio 2



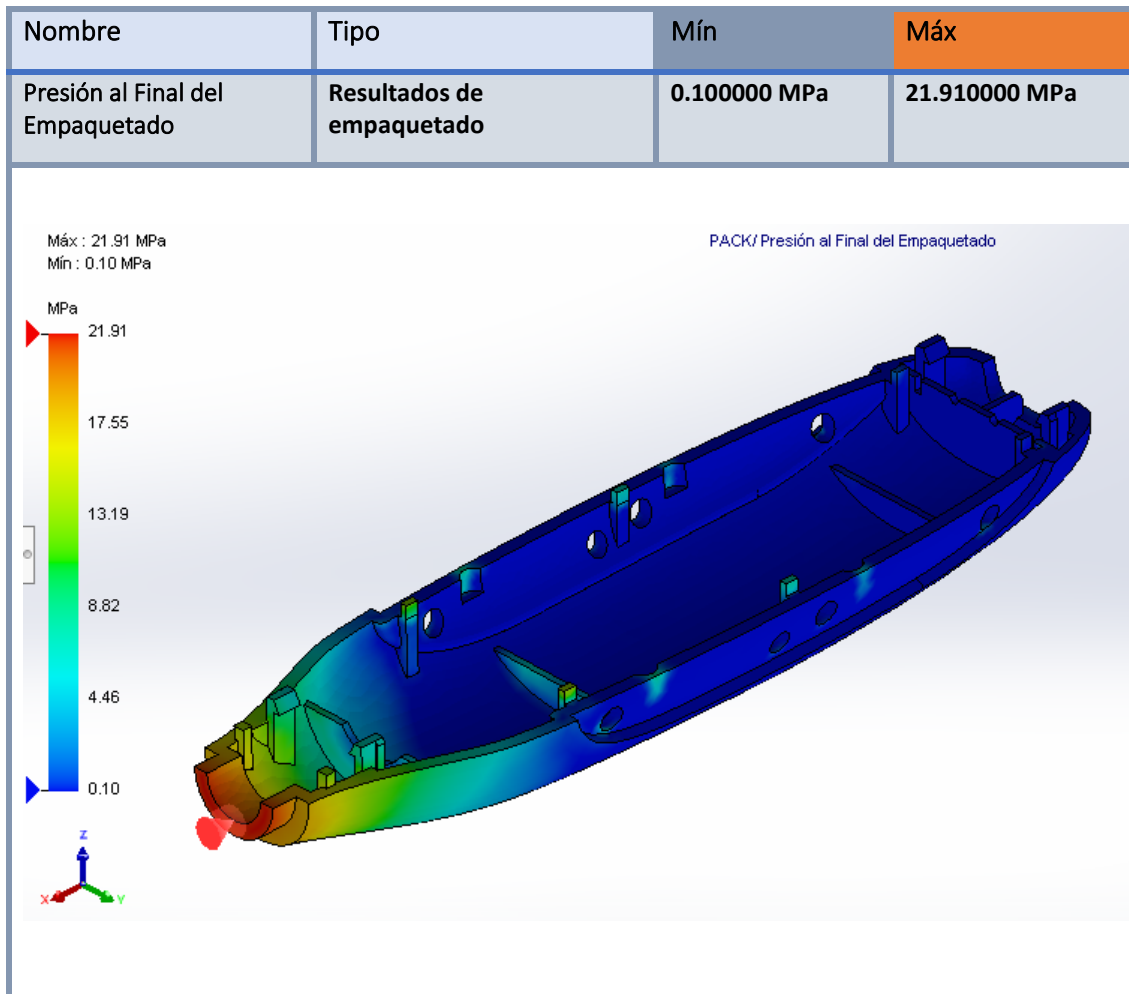
Como se muestra en el gráfico, el llenado de la cavidad se puede completar con una presión de inyección normal (inferior al 70% de la presión máxima) en toda su geometría, señal de un buen llenado.

Tabla 20. Región solidificada al final del llenado para estudio 2



Como último resultado a analizar en la fase de llenado, la región solidificada al final del llenado nos muestra que será necesario más tiempo para que las algunas zonas alcancen la temperatura de transición vítrea. Esto se resolverá con la posterior fase de empaquetado.

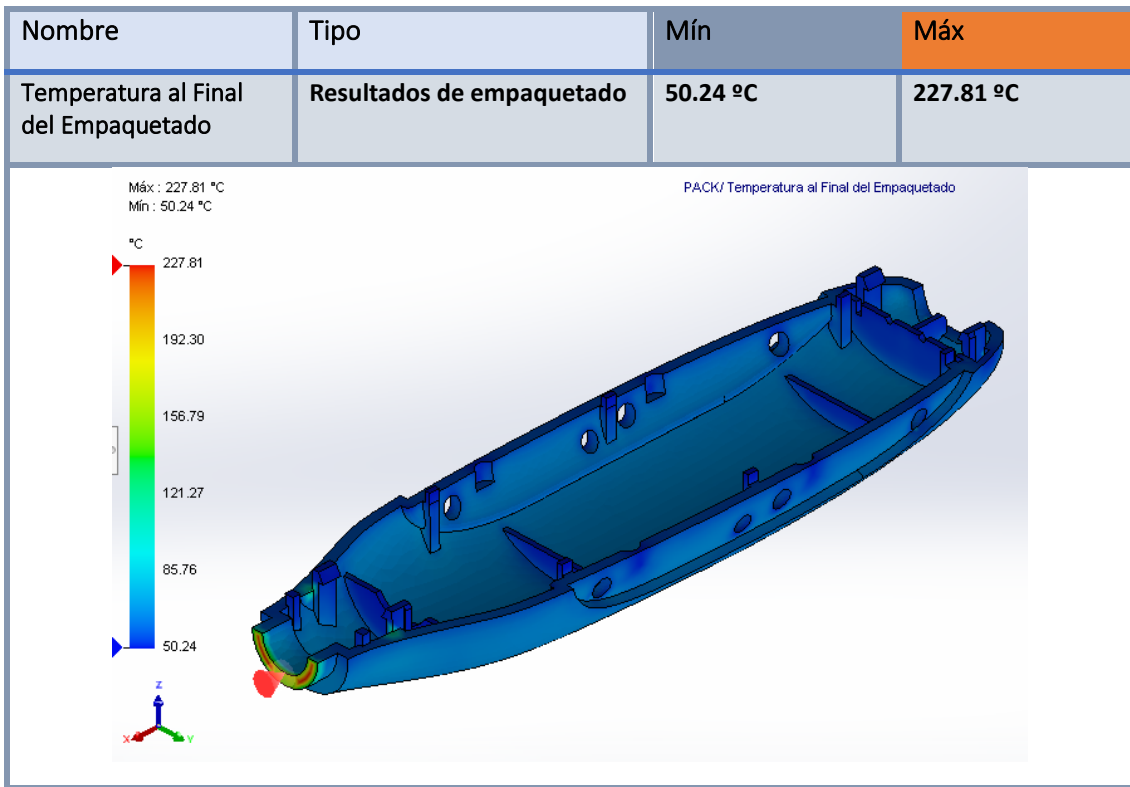
Tabla 21. Presión al final del empaquetado para estudio 2



La presión ejercida en cada zona al final de la fase de empaquetado nos muestra unos valores máximos aproximados del doble de magnitud a los obtenidos para el primer caso, con unas presiones, en general, bajas exceptuando la región del punto de inyección.

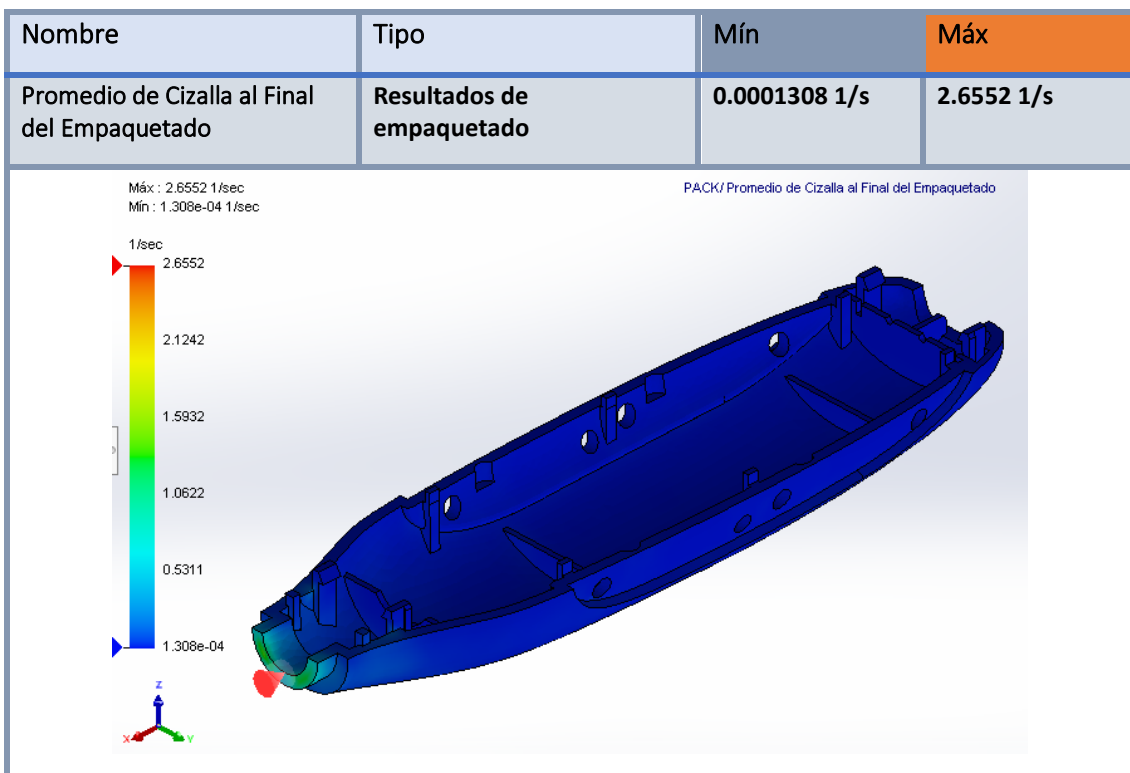
El aumento de la presión se debe a que se debe generar una velocidad de flujo mayor para alcanzar toda la cavidad en el tiempo esperado. La localización del punto de inyección en uno de los extremos de la pieza provoca este aumento.

Tabla 22. Temperatura al final del empaquetado para estudio 2



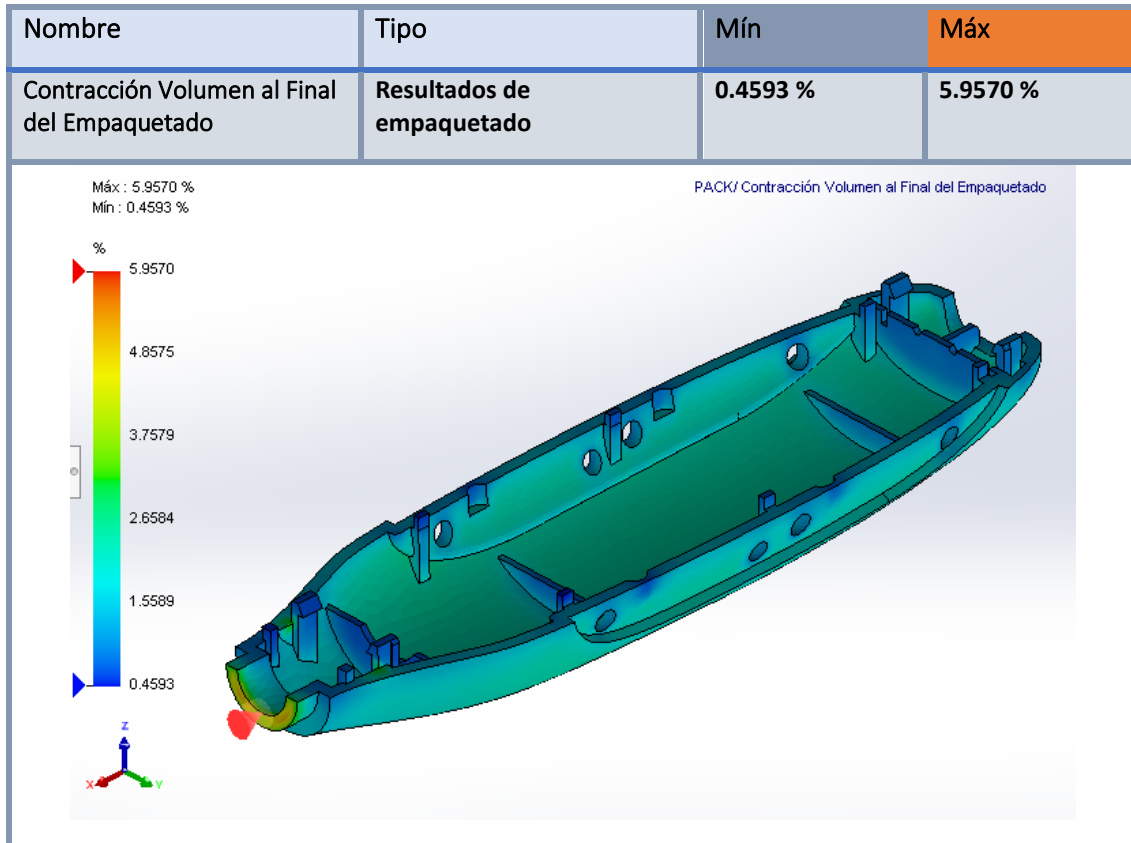
La temperatura al final del empaquetado tiende a los valores de la temperatura del molde, indicando una buena refrigeración. Las temperaturas más altas se dan en el punto de inyección y las zonas internas, pero sin ser excesivas.

Tabla 23. Promedio de cizalla al final del empaquetado para estudio 2



Para el promedio de cizalla al final del empaquetado vemos que se obtienen valores cercanos a cero, indicando un buen resultado

Tabla 24. Contracción de volumen al final del empaquetado para estudio 2



La contracción del volumen que se da para este caso de estudio es leve, solo alcanzando valores ligeramente elevados en pocas zonas, como en el punto de inyección, al igual que el caso anterior.

4.3 Análisis de los resultados

Viendo los resultados obtenidos, podemos ver que para ambos estudios conseguimos llenar la cavidad por completo. Sin embargo, encontramos algunas diferencias.

Primeramente, para un tiempo de llenado establecido para ambos de 1,5 segundos, la presión en el estudio 2 es aproximadamente el doble, pues para completar el llenado en el tiempo establecido se han de alcanzar velocidades mayores y, por lo tanto, presiones mayores de llenado. Esto se debe a que la longitud de flujo es mayor en el estudio 2. Este aspecto es determinante en la temperatura al final del llenado, que toma valores menores para el segundo caso en las regiones que se llenan al inicio del llenado, al estar más tiempo en contacto con la temperatura del molde, consiguiendo una refrigeración más prolongada.

Si pasamos a la fase de empaquetado, encontramos las mismas diferencias en cuanto a la presión para esta etapa que con la fase de llenado. La presión requerida en el estudio 2 es mucho superior por la misma razón que en el llenado, la longitud de flujo. Aun así, en el resto de los parámetros analizados, como la contracción de volumen o la temperatura al final del

empaquetado, obtenemos unos resultados similares, dándonos una visión de unos buenos resultados para ambos casos, en general.

No es particular conseguir estos resultados, pues a pesar de que algunos de los resultados varíen según se dónde se sitúe el punto de inyección, estamos analizando un modelo previamente estudiado geométricamente para que no presente graves problemas a la hora de ser fabricado por inyección de plástico. Gran parte de las complicaciones en la fabricación vienen a partir de un mal diseño de la pieza y nuestro modelo tiene en cuenta varios de los requisitos para un buen desempeño.

4.4 Justificación del diseño del modelo

Como se ha comprobado el diseño de la carcasa genera unos buenos resultados, en general. Esto se debe a una buena solución de los criterios de geometría que generarían defectos en la pieza. A continuación, se van a exponer los requisitos que se han seguido para obtener la pieza final viendo las recomendaciones de diseño para la fabricación por moldeo de inyección de plástico.

Partiendo de una estructura externa de la carcasa similar a la estudiada, la región interna que alberga el motor de la maquinilla puede estar conformada de diversas formas. Los aspectos más importantes, fijándonos en los criterios funcionales, son sujetar de forma segura al motor y dejar hueco en la región del adaptador de corriente y en la zona de enganche del cabezal. De esta forma podemos crear una estructura compacta, que nos aporte rigidez y que tenga la cavidad necesaria para albergar al motor.

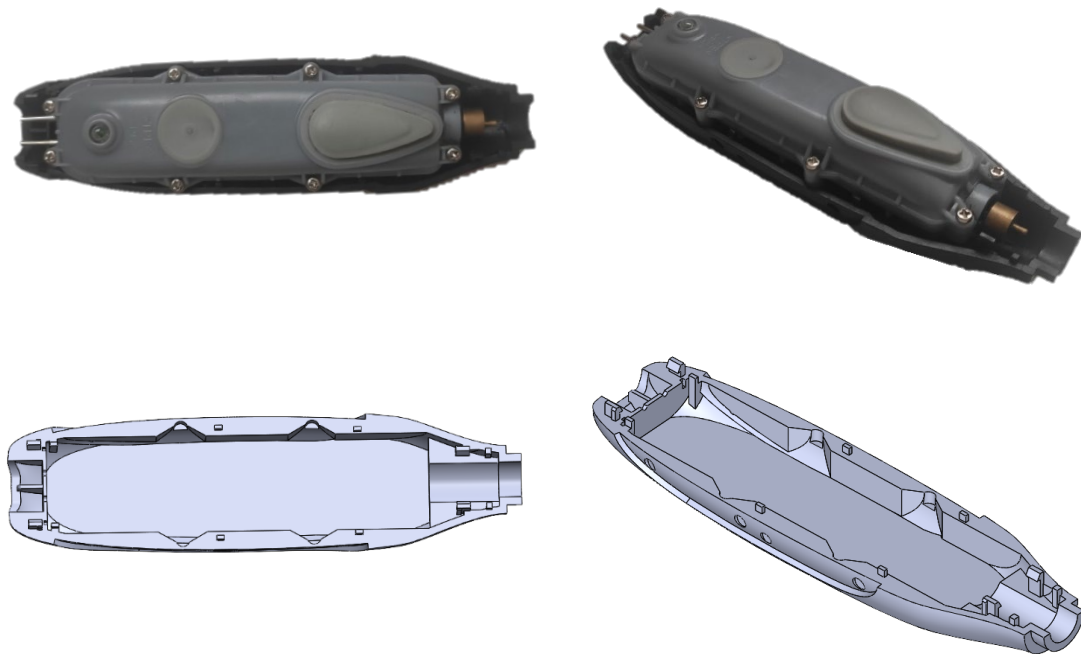


Figura 43. Diseño de carcasa compacto con paredes gruesas

Con este diseño realizamos un estudio de simulación para analizar los resultados y ver posibles defectos que pudiera ocasionar el modelo.

Los resultados obtenidos nos muestran que el modelo completa el llenado con una presión máxima inferior a la conseguida con la carcasa estudiada. Sin embargo, si nos fijamos en el tiempo de refrigeración, observamos un tiempo excesivamente grande, de 120 segundos, unas diez veces mayor que para la refrigeración del modelo final. Esto es debido a unos grosores de pared elevados, que provocan que, en su interior, el cual no se encuentra en contacto directo con el molde, se encuentre mucho material fundido y se necesite de tiempos prolongados para su enfriamiento.

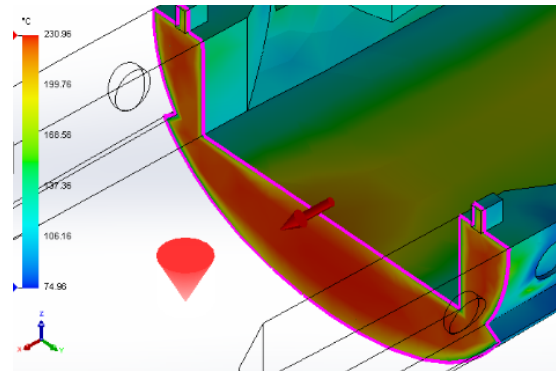


Figura 44. Temperatura al final del llenado para diseño con paredes gruesas

Por otro lado, los espesores de pared no uniformes pueden provocar defectos como hundimientos o alabeos. Los hundimientos son zonas en las que el material de la superficie, que ya se ha enfriado, se contrae hacia dentro debido a que la zona interna aún se encuentra a alta temperatura. Los alabeos consisten en contracciones de las paredes del modelo debido a diferencias de temperaturas de diferentes zonas.

Si nos fijamos en los trazados de la contracción volumétrica, vemos que existen varias regiones con valores conflictivos que podrían desencadenar en los defectos descritos.

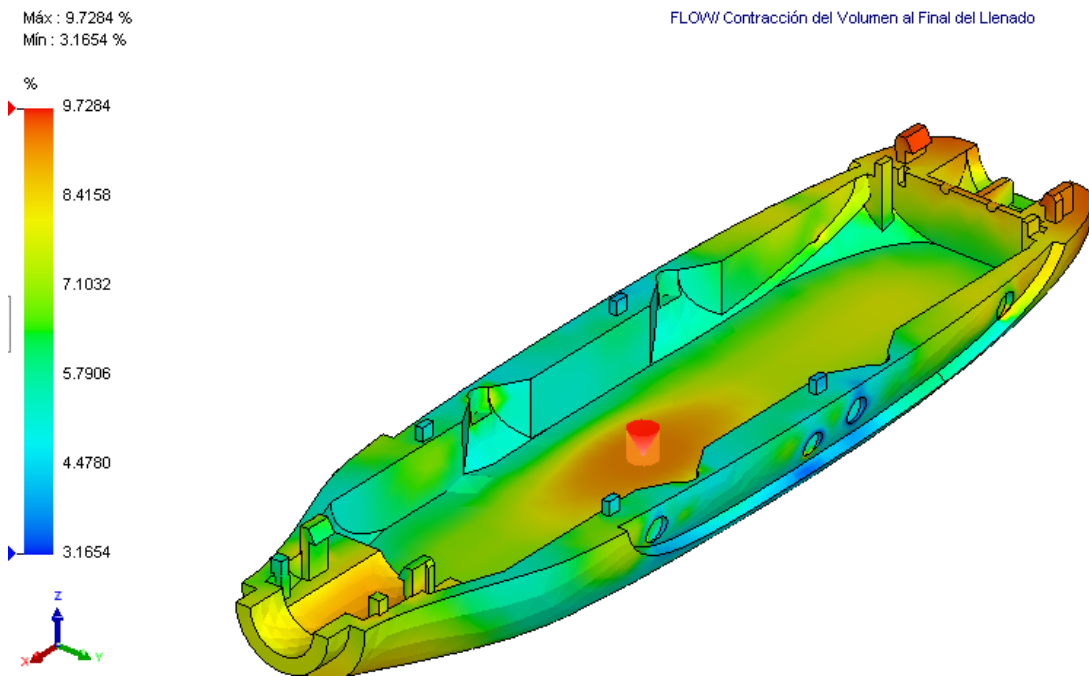


Figura 45. Contracción volumétrica al final del llenado para diseño con paredes gruesas

En vista de los resultados, sería conveniente modificar el grosor de la pieza para tener un espesor uniforme en la mayor parte del modelo. De esta forma, rediseñaremos el modelo para tener un espesor nominal fijo en la totalidad de la pieza, excepto en las zonas donde los requisitos funcionales no lo permitan, donde utilizaremos un espesor del 40% del valor nominal como máximo.

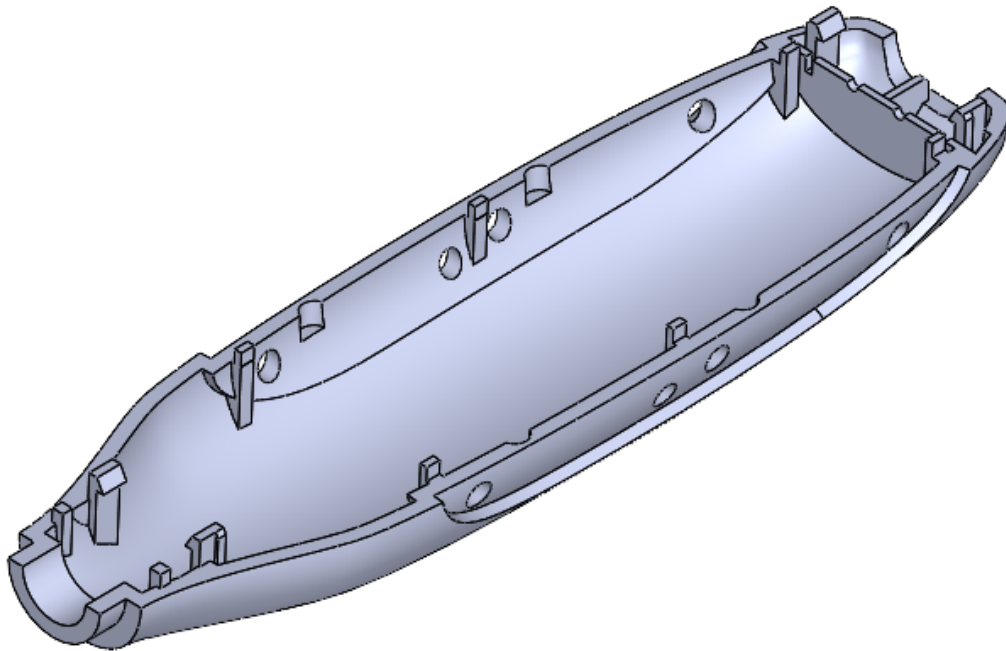


Figura 46. Diseño de carcasa con paredes de espesor uniforme

Si comprobamos el tiempo de refrigeración, vemos que se ha conseguido reducir notablemente hasta los 12 segundos aproximadamente. El trazado de la contracción volumétrica también nos muestra unos mejores resultados con respecto al análisis anterior, consiguiéndose unas tasas de contracción inferiores en la mayor parte del modelo.

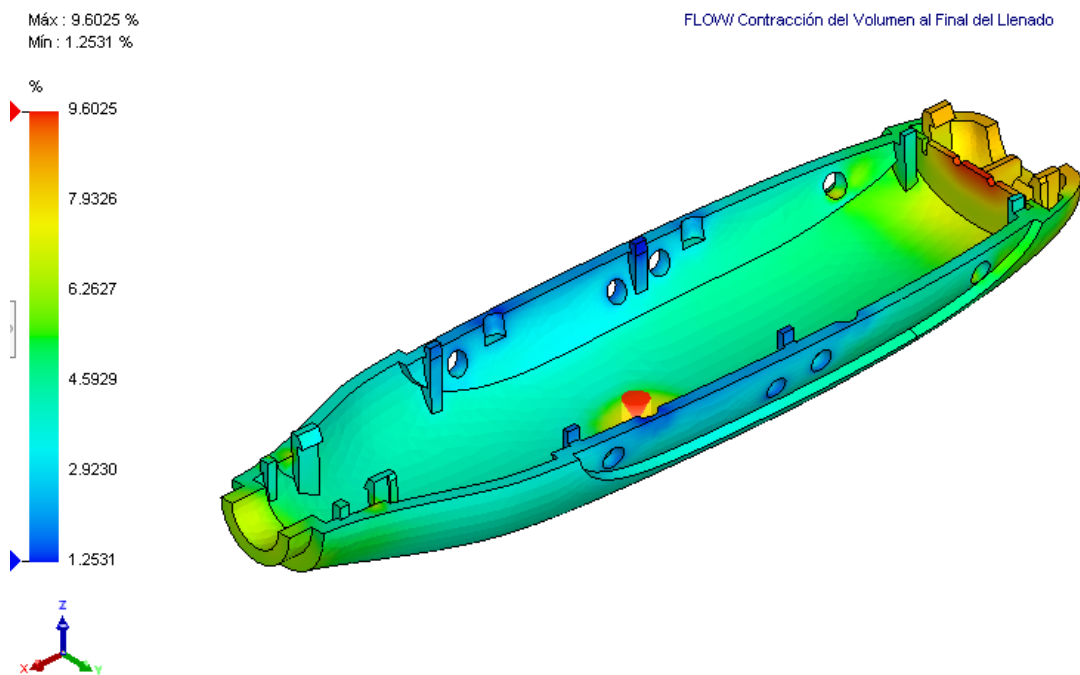


Figura 47. Contracción volumétrica para diseño con paredes de espesor uniforme

Con este diseño se solucionan o minimizan la mayor parte de los problemas originados por el grosor no uniforme y elevado del modelo. Aun así, todavía se pueden mejorar algunos aspectos como la posible contracción de las zonas laterales de la carcasa. Para ello, colocaremos paredes

transversales que funcionarán como nervios para conectar ambos lados de la carcasa y evitar su contracción. Es conveniente que los espesores de estas paredes sean inferiores a los de las paredes laterales para que solidifiquen antes y puedan cumplir su función. Además, también nos servirán como apoyos para el motor facilitando su colocación.

Finalmente, en zonas con esquinas bruscas podemos usar redondeos para suavizar la transición entre las dos caras y, así, liberar tensión de la zona.

Con estos cambios llegamos al modelo final de la carcasa estudiada en el proyecto, la cual hemos comprobado que presenta pocos problemas para una buena fabricación.

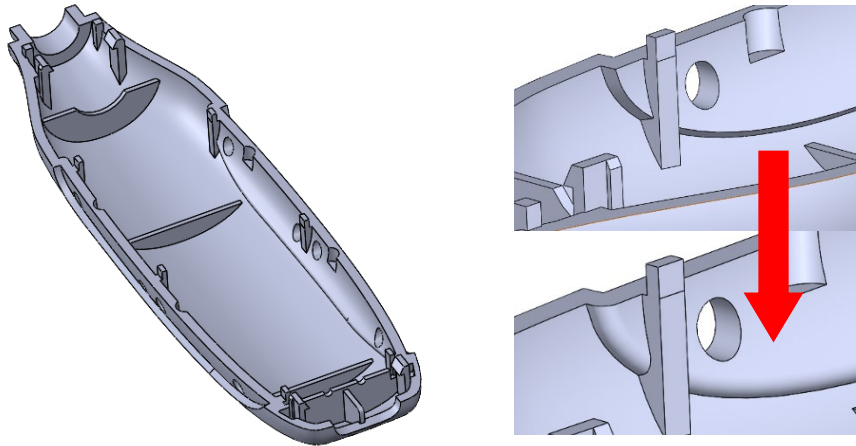


Figura 48. Diseño de la carcasa con paredes transversales (izquierda) y transformación de esquinas bruscas a redondeo (derecha)

Tras los resultados obtenidos, verificamos lo importante que es tener en cuenta factores geométricos en el diseño de nuestra pieza para minimizar o evitar los posibles defectos que pudieran surgir en el modelado por inyección de plástico.

5. Conclusión

Tras la realización de este proyecto se ha podido comprobar la importancia de la fabricación de piezas por moldeo de inyección. Se trata de un proceso que, si bien puede resultar costoso de primeras, a la larga resulta un proceso muy económico por su capacidad de producción en masa. Es, por este motivo, de vital importancia optimizar el diseño de la pieza a fabricar para evitar cualquier tipo de defecto posterior.

Con SolidWorks Plastics se puede analizar previamente la pieza de estudio para ver los posibles defectos que pudieran surgir sin tener que rediseñar los moldes o la pieza físicamente, lo que ocasionaría unos gastos adicionales. En este proyecto se ha aprendido lo necesario para analizar el factor más importante en la fabricación, la pieza.

Con el análisis de la carcasa de estudio a través del software, se ha comprobado la importancia de unos espesores uniformes y no muy gruesos, factores significativos para evitar un tiempo de ciclo excesivamente largo. Por otro lado, una ubicación correcta para el punto de inyección puede ser determinante en la magnitud de la presión de inyección suministrada, requiriendo una presión mayor para longitudes de flujo más extensas. También se justifica la importancia de una buena fase de empaquetado para que la pieza este preparada para su expulsión de la máquina de moldeo.

En definitiva, SolidWorks Plastics ofrece un abanico muy amplio de posibilidades para simular y analizar piezas de moldeo por inyección, así como distintos factores que intervienen en el proceso. Todo ello integrado en una interfaz que resulta muy intuitiva para usuarios principiantes.

6. Bibliografía

Alfredo Campo, E. (2006) *The Complete Part Design Handbook: For Injection Molding of Thermoplastics*. Cincinnati: Hanser Gardner

SOLIDWORKS Plastics (s.d.). Recuperado del sitio web de la SolidWorks:
https://www.solidworks.com/sites/default/files/2021-09/SOLIDWORKS-Plastics-Datasheet_ES.pdf

Nwmcadmin, (2019). A Rookie's Guide To Plastic Injection Molding. Recuperado de:
<https://rexplastics.com/plastic-injection-molding/plastic-injection-molding-guide>

SOLIDWORKS PLASTICS: Plastic Melt Flow Simulation Software (s.d.). Recuperado de:
<https://www.goengineer.com/solidworks/simulation/plastics>

Osman, J. (2016). Solidworks Plastics: Solución virtual al diseño de piezas de plástico desde su conceptualización a la inyección. Recuperado de: <https://www.3dcadportal.com/solidworks-plastics-solucion-virtual-al-diseno-de-piezas-de-plastico-desde-su-conceptualizacion-a-la-inyeccion.html>

SOLIDWORKS Plastics: Plastic parts and injection mold simulation software (s.d.). Recuperado de: <https://www.javelin-tech.com/3d/technology/solidworks-plastics/>

Diseño y Moldeabilidad: Una guía de consulta rápida sobre moldeo por inyección rápida para ingenieros y diseñadores (s.d.). Recuperado del sitio web de Protolabs:
<https://www.protolabs.es/media/1010695/dise%C3%B1o-y-moldeabilidad-july-2017.pdf>

SOLIDWORKS Plastics Help (s.d.). Recuperado de:
https://help.solidworks.com/2020/english/swplastics/c_plastic_injection_molding.htm

Índice de Figuras

Figura 1. Máquina de moldeo	1
Figura 2. Geometría ahuecada en piezas de moldeo	3
Figura 3. Transiciones suaves en piezas de moldeo	4
Figura 4. Piezas de moldeo sesgadas.....	4
Figura 5. Piezas de auto-acople.....	4
Figura 6. Esquema del punto de inyección.....	6
Figura 7. Esquema de la válvula de control.....	7
Figura 8. Esquema de la temperatura de la pared del molde.....	7
Figura 9. Esquema de la dirección de la fuerza de cierre	8
Figura 10. Ubicación de los respiraderos.....	8
Figura 11. Ubicación del canal caliente prellenado	9
Figura 12. Malla tetraédrica híbrida	9
Figura 13. Malla hexaédrica	9
Figura 14. Mallado vóxel cartesiano.....	10
Figura 15. Capas límite y mallado interno	10
Figura 16. Trazado tiempo de llenado.....	12
Figura 17. Trazado presión al final del llenado.....	12
Figura 18. Trazado de la contracción de volumen al final del llenado	13
Figura 19. Trazado de rechupes	13
Figura 20. Trazado de la facilidad de llenado	13
Figura 21. Trazado de la presión al final del empaquetado.....	14
Figura 22. Trazado de la temperatura al final del empaquetado	14
Figura 23. Trazado de las tensiones de cizalla al final del empaquetado	15
Figura 24. Trazado de la región solidificada al final del post-llenado	15
Figura 25. Modelo creado a partir imágenes de referencia	16
Figura 26. Imágenes para croquis.....	16
Figura 27. Modelado 3D de la carcasa.....	17
Figura 28. Refinamiento uniforme del mallado superficial	18
Figura 29. Refinamiento basado en curvatura del mallado superficial.....	18
Figura 30. Mallado sólido interno tetraédrico.....	19
Figura 31. Mallado superficial hexaédrico.....	19
Figura 32. Mallado sólido hexaédrico.....	20
Figura 33. Ubicación del punto de inyección en la cara interna de la pieza	21
Figura 34. Base de datos de polímeros.....	21
Figura 35. Temperatura interna al final del llenado en estudio 1.....	24
Figura 36. Tiempo de refrigeración interna para estudio 1	27
Figura 37. Temperatura interna al final del empaquetado para estudio 1.....	30
Figura 38. Tensiones de cizalla al final del empaquetado para estudio 1.....	31
Figura 39. Contracción de volumen interno al final del empaquetado para estudio 1.....	32
Figura 40. Ubicación del punto de inyección en cara del extremo de la pieza	32
Figura 41. Temperatura interna al final del llenado para estudio 2	34
Figura 42. Tensiones de cizalla internos para estudio 2	35
Figura 43. Diseño de carcasa compacto con paredes gruesas.....	41
Figura 44. Temperatura al final del llenado para diseño con paredes gruesas.....	42
Figura 45. Contracción volumétrica al final del llenado para diseño con paredes gruesas	42
Figura 46. Diseño de carcasa con paredes de espesor uniforme.....	43

Figura 47. Contracción volumétrica para diseño con paredes de espesor uniforme.....	43
Figura 48. Diseño de la carcasa con paredes transversales (izquierda) y transformación de esquinas bruscas a redondeo (derecha).....	44

Índice de Tablas

Tabla 1. Tiempo de llenado para estudio 1	22
Tabla 2. Presión al final del llenado para estudio 1	23
Tabla 3. Temperatura al final del llenado para estudio 1	24
Tabla 4. Tensiones de cizalla al final del llenado para estudio 1	25
Tabla 5. Contracción del volumen al final del llenado para estudio 1	26
Tabla 6. Tiempo de refrigeración para estudio 1.....	27
Tabla 7. Facilidad de llenado para estudio 1	28
Tabla 8. Región solidificada al final del llenado para estudio 1	28
Tabla 9. Presión al final del empaquetado para estudio 1	29
Tabla 10. Temperatura al final del empaquetado para estudio 1	30
Tabla 11. Promedio de cizalla al final del empaquetado para estudio 1	31
Tabla 12. Contracción de volumen al final del empaquetado para estudio 1	31
Tabla 13. Tiempo de llenado para estudio 2	33
Tabla 14. Presión al final del llenado para estudio 2	33
Tabla 15. Temperatura al final del llenado para estudio 2	34
Tabla 16. Tensiones de cizalla al final del llenado para estudio 2	35
Tabla 17. Contracción del volumen al final del llenado para estudio 2	36
Tabla 18. Tiempo de refrigeración para estudio 2.....	36
Tabla 19. Facilidad de llenado para estudio 2	37
Tabla 20. Región solidificada al final del llenado para estudio 2	37
Tabla 21. Presión al final del empaquetado para estudio 2	38
Tabla 22. Temperatura al final del empaquetado para estudio 2	39
Tabla 23. Promedio de cizalla al final del empaquetado para estudio 2	39
Tabla 24. Contracción de volumen al final del empaquetado para estudio 2	40