

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
TRABAJO FIN DE GRADO

***DISEÑO DE UN MOLDE DE INYECCIÓN
PARA REJILLA DE VENTILACIÓN***

DOCUMENTO 3- CALCULOS

Alumno: Nieto Irureta, Eneko

Director: Lobato Gonzalez, Roberto

Curso: 2018-2019

Fecha: 20/10/2018

3. CÁLCULOS

3.1 INTRODUCCIÓN.....	4
3.2 OBJETO DEL DOCUMENTO.....	5
3.3 Diseño de la pieza	6
3.3.2 Análisis de la pieza	7
3.3.2.1 ELECCIÓN DEL MATERIAL.....	7
3.3.2.2 IDONEIDAD DE LAS ENTRADAS	7
3.3.2.3 ANÁLISIS DE LLENADO	8
3.4 Diseño del molde	10
3.4.1 Análisis de compactación.....	10
3.4.2 Análisis de refrigeración.....	12
3.4.3 Análisis de llenado, compactación y refrigeración	14
3.4.3.1. ESTUDIO DE LLENADO.....	14
3.4.3.2 ESTUDIO DE COMPACTACIÓN.....	17
3.4.3.3 ESTUDIO DE REFRIGERACIÓN.....	18
3.5 Dimensionamiento general del molde.....	20
3.6 Antecedentes	21
3.6.1. ÁREA PROYECTADA.....	21
3.6.2. FUERZA DE CIERRE	21
3.6.3. TIEMPO DE INYECCIÓN	21
3.6.4. CÁLCULO DE LA COLADA.....	23
3.6.5. CÁLCULO DE LA CONTRACCIÓN	25
3.7 Cálculos mecánicos	26
3.7.1. CAPACIDAD DE CIERRE.....	26
3.7.2. RESISTENCIA DE LOS EXPULSORES A PANDEO.....	28

3.1 INTRODUCCIÓN

El proyecto a realizar constará de tres partes diferenciadas:

Primero se procederá a realizar el diseño de la pieza deseada de acuerdo con las condiciones establecidas por el cliente.

En segundo lugar, se procederá a realizar los análisis necesarios para la posible fabricación del producto. Para ello, se utiliza el software de simulación *Moldflow*, que permite obtener los análisis mediante el método de elementos finitos.

Con él, se realizarán numerosos cálculos: tiempo de llenado, fuerza de cierre, calidad de las piezas inyectadas. También se podrá saber si se han producido faltas de llenado o líneas de soldadura. Estos datos permitirán optar por distintas alternativas para el diseño correcto del molde. Así con toda la información recogida se podrá calcular el tipo y la disposición de la refrigeración del molde, elegir el material más adecuado y cuales son el tamaño y las secciones de la distribución más adecuada para el diseño del molde. Asimismo, se calculará el tiempo de llenado del molde y el tiempo de la refrigeración y se podrá obtener una estimación del tiempo total del ciclo de moldeo.

En cuanto se cerciore que la fabricación de la pieza es viable, se procederá a iniciar la tercera parte del proyecto que consiste en el diseño del molde de donde posteriormente se sacarán los planos necesarios para la fabricación de las piezas no comerciales, así como la obtención de los elementos comerciales que sean necesarios para proceder a un buen montaje y funcionamiento del molde. También se utilizaran los resultados para la creación de piezas que no estén normalizadas.

3.2 OBJETO DEL DOCUMENTO

El presente documento tiene como fin justificar cada una de las decisiones adoptadas para el diseño de un molde dirigido a la producción de una pieza de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).

Para el correcto dimensionado de las piezas que compondrán el molde, para la realización del estudio de la pieza a moldear y para el cálculo del molde se dispondrá de distintos programas y sistemas informáticos (CAD, CAE, CAM). Los mencionados programas permiten un amplísimo análisis de diferentes factores. Entre ellos se calcula la fuerza de cierre del molde, peso aproximado de la pieza, calidad de la misma, etc.

Todos los cálculos y análisis presentados a continuación permiten la correcta elección de los elementos constituyentes del molde de inyección.

3.3 Diseño de la pieza

Para el diseño final de la pieza se ha optado por estudiar los antecedentes a la familia de ésta. Las rejillas de ventilación de los automóviles de hoy en día están fabricadas en la gran mayoría de los casos en acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).

Por otro lado, este tipo de piezas están fabricadas mediante moldeo y por ello tienen unas características específicas tales como: el espesor, el peso, la rigidez... entre otras. La pieza en la cual se basa este proyecto realmente pertenece al Volkswagen Polo 2012.16.c por lo que en cuanto a la geometría de la pieza no se realizarán cambios en el diseño original.

Por lo tanto, la parte de diseño de la pieza se centrará en diseñarla de tal forma que su fabricación mediante moldeo por inyección sea lo más eficiente posible, ya que se supone que se fabricarán muchos lotes de la pieza.

El CAD final de la pieza es el siguiente:

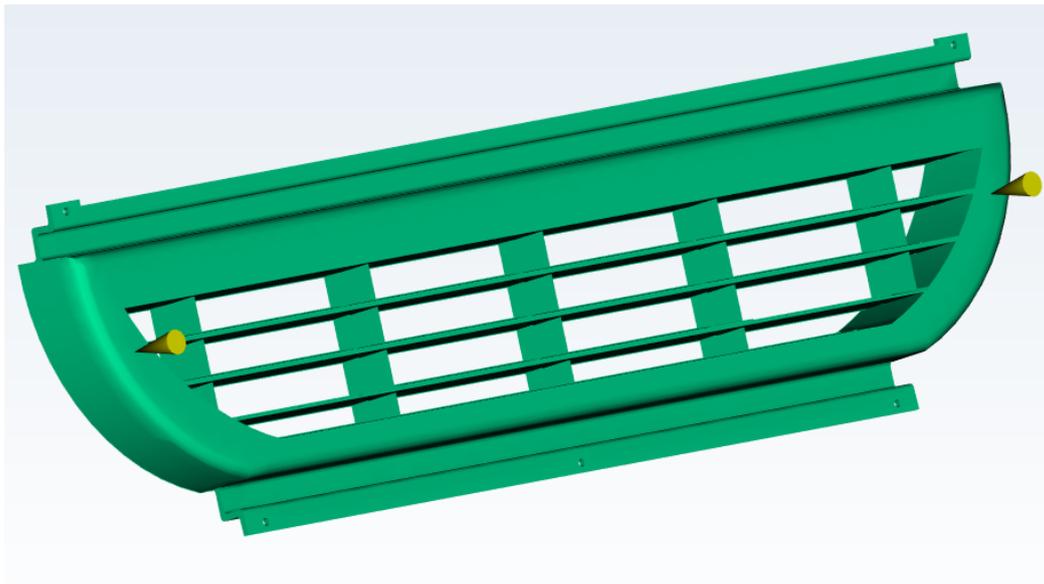


Figura 1. CAD de la pieza

3.3.2 Análisis de la pieza

Una vez se tiene la pieza final se exporta al programa de simulación de moldes (Moldflow), donde se escogerá el material que se va a inyectar y se estudiarán los puntos óptimos para inyectar la colada, los rechupes que pueda tener la pieza y si el llenado de ellas será bueno.

3.3.2.1 ELECCIÓN DEL MATERIAL

Mediante un estudio acerca de los materiales que más se utilizan en este tipo de piezas en automoción se ha obtenido que el material más utilizado es el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Por lo que se va a analizar la pieza a fabricar para este tipo de material.

Primeramente se realizará un análisis de “ventana de procesos” el cual sirve para escoger unas buenas condiciones de procesamiento para su análisis y para comparar material.

Se van a comparar dos tipos de ABS que son producidos por dos fabricantes distintos, comparando las tablas que brinda el programa en función de la temperatura del molde, la temperatura de masa fundida y el tiempo de inyección.

Pero antes de seleccionar definitivamente el material con el cual se va a trabajar se va a realizar un estudio sobre la idoneidad de la entrada del material en el molde de la pieza.

3.3.2.2 IDONEIDAD DE LAS ENTRADAS

Antes de seleccionar el material con el que se va a trabajar se procede a realizar el análisis correspondiente para determinar la idoneidad de entrada del material en el molde. Para ello se realiza un primer análisis que estudia la geometría de la pieza y en función de la misma el programa indica donde se encuentran los puntos de entrada óptimos:

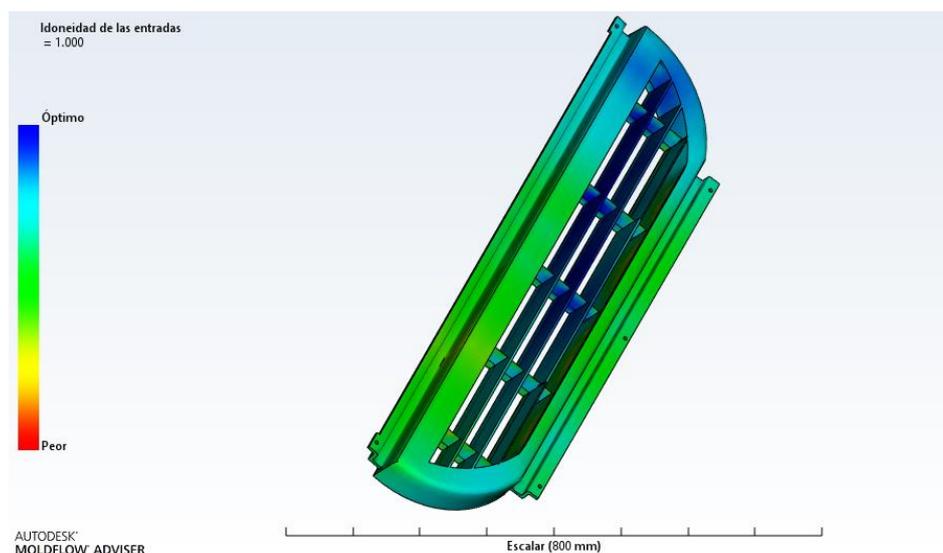


Figura 2. Idoneidad de las entradas

Como se puede observar los puntos de inyección óptimos se encuentran en los extremos de la pieza. Sin embargo, la máquina de inyección sólo tiene un único punto de inyección por lo que solamente existirá una única entrada de material.

Una vez determinado el punto de inyección, se procede a la elección del material ABS definitivo.

3.3.2.3 ANÁLISIS DE LLENADO

Los materiales que se van a comparar son:

- Lustran ABS 248 del fabricante INEOS ABS (Material A)
- Lustran ABS Elite HH 1891 del fabricante INEOS ABS (Material B)

Para ambos materiales se va suponer los valores que el programa calcula por defecto:

- T^a del molde: 80 C°
- T^a masa fundida: 260 C°

Para determinar el material que se va a utilizar para fabricar la pieza se van a estudiar dos parámetros claves:

- Tiempo de llenado
- Confianza del llenado

Los resultados obtenidos para ambos tipos de materiales son los siguientes:

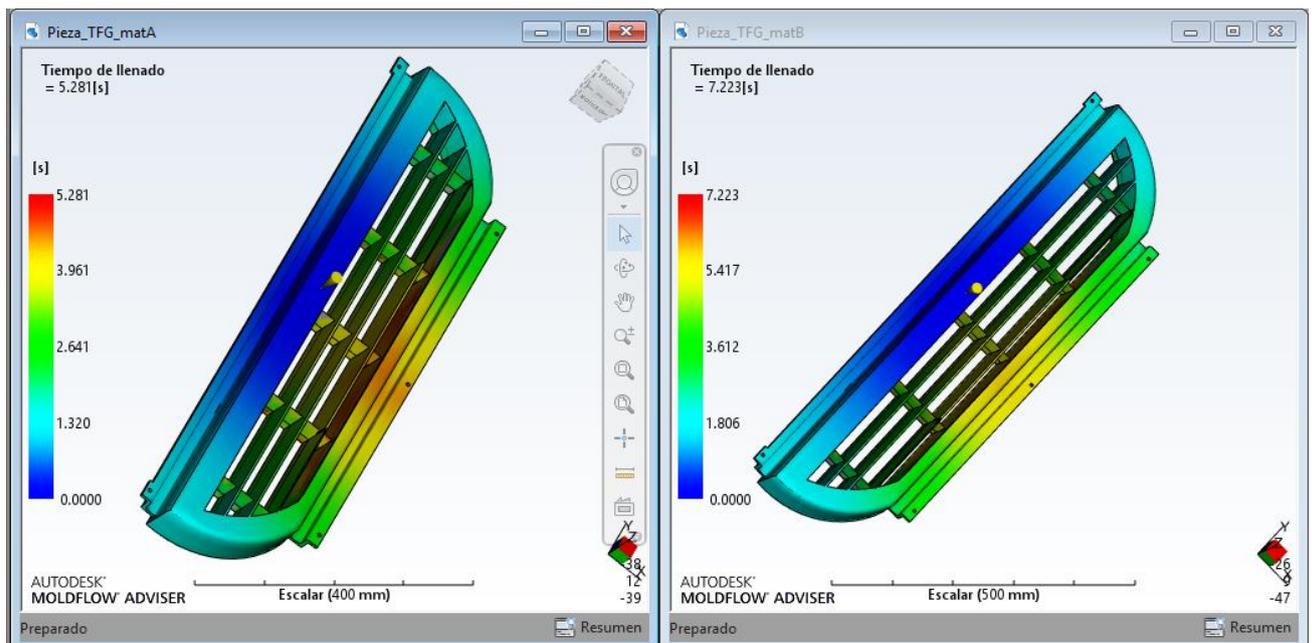


Figura 3. Tiempos de llenado

Sabiendo que se la pieza se va a fabricar en serie, lo que interesa es obtener un tiempo de llenado del molde lo más pequeño posible. Para este caso para el material A se ha obtenido un tiempo de llenado; como se puede observar en la figura 3, de 5,28 segundos, mientras que para el material B se ha obtenido un tiempo de llenado de 7,22 segundos.

A priori, parece que el mejor material para la fabricación de la pieza es el material 1 pero antes de seleccionarlo definitivamente, se debe analizar la confianza del llenado de la pieza para ambos materiales:

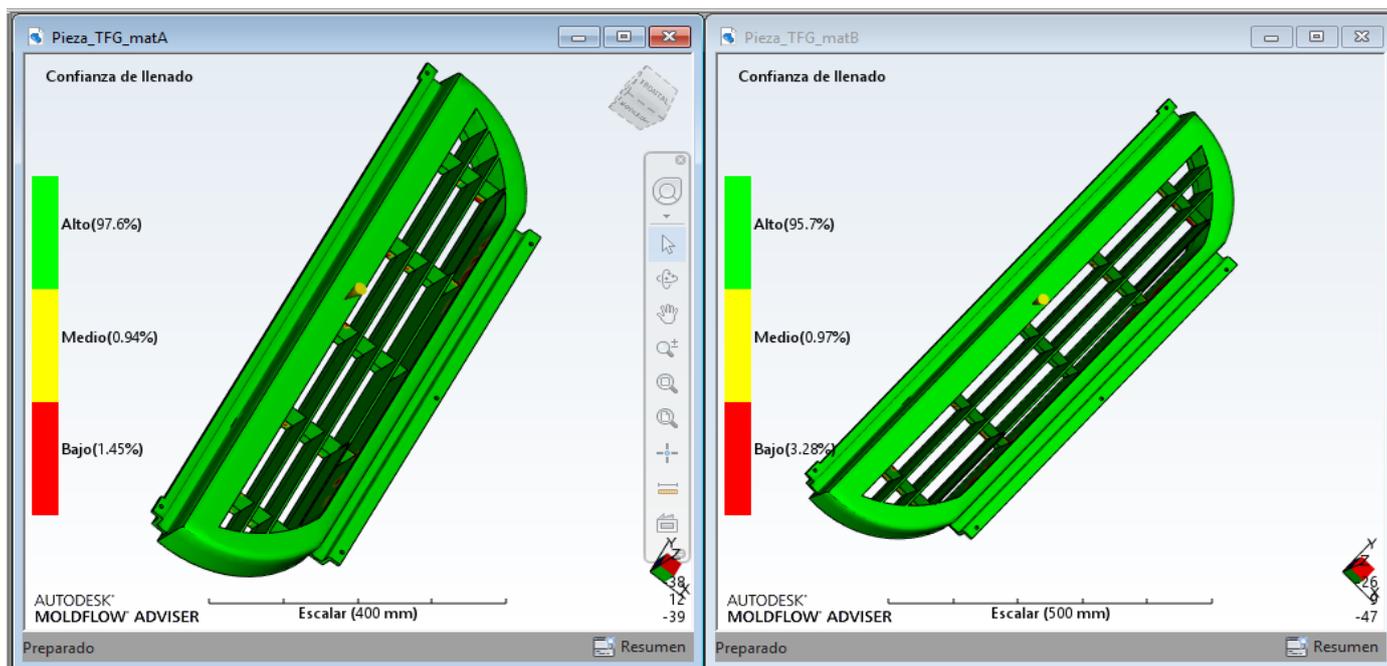


Figura 4. Confianza de llenado

En la figura 4 se puede observar la confianza del llenado para ambos materiales y ahora sí que se puede seleccionar el material A como definitivo para la fabricación de la pieza puesto que tiene una confianza de llenado del 97%. Sin embargo, el material B también posee un buen porcentaje de confianza de llenado, un 95,7 % casi tanto como el material A.

Pero como en este caso se quiere diseñar un proceso de fabricación de la pieza lo más eficiente posible, se ha de seleccionar el material A como definitivo ya que posee un tiempo de llenado menor y una confianza de llenado mayor.

3.4 Diseño del molde

En este apartado se realizarán el análisis de compactación, refrigeración y un análisis final de todo el proceso de inyección que constituyen: llenado, compactación y refrigeración.

El primer paso es recrear el molde. Para ello, se define el molde como “cavidad única” y mediante las diferentes herramientas de las que ofrece el programa se construyen las dos placas portafiguras del molde que contendrán la pieza a moldear, las dimensiones de estas placas son:

- Placa portacavidad: 350x1200x60 mm
- Placa portanucleos: 350x1200x80 mm

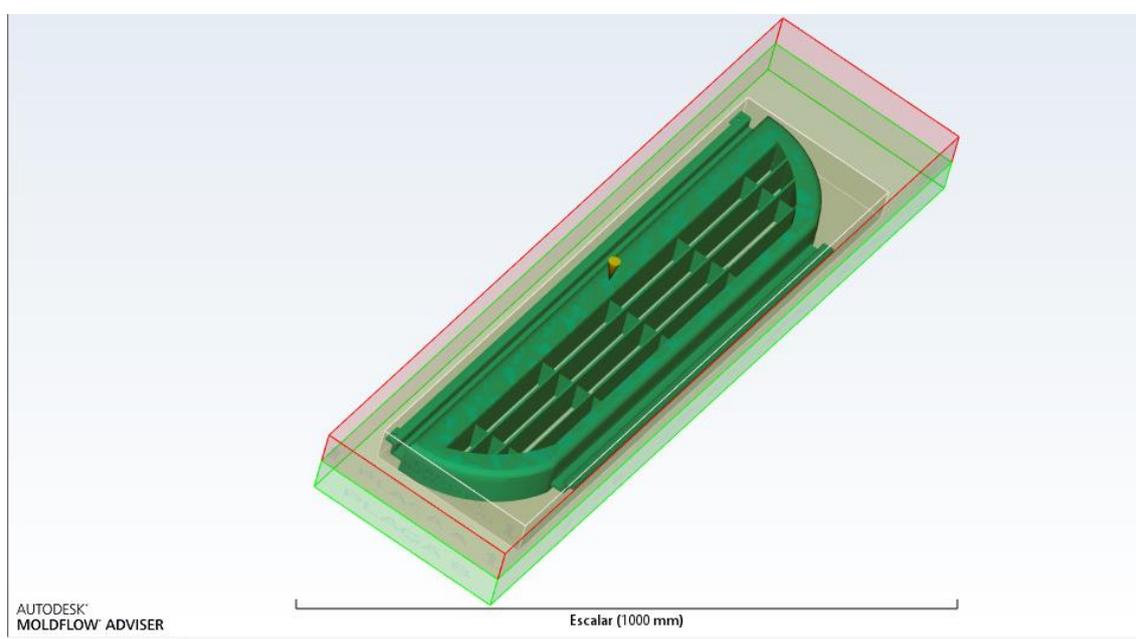


Figura 5. Molde

3.4.1 Análisis de compactación

En este caso, al ser un molde de una sola cavidad no será necesario colocar canales de distribución puesto que el material entrará directamente en los puntos de inyección colocados anteriormente. Sin embargo hay que establecer los diámetros de los puntos de inyección.

Mediante el análisis de entrada del material que realiza el programa se ha optado por unos diámetros para los puntos de inyección de:

- Diámetro inicial: 10 mm
- Diámetro final: 4,5 mm

A continuación se realiza el análisis de compactación mediante el cual se estudiará: la presión de inyección, los rechupes y la temperatura de la pieza para determinar si se necesitará un sistema de refrigeración.

En primer lugar analizamos la presión de inyección:

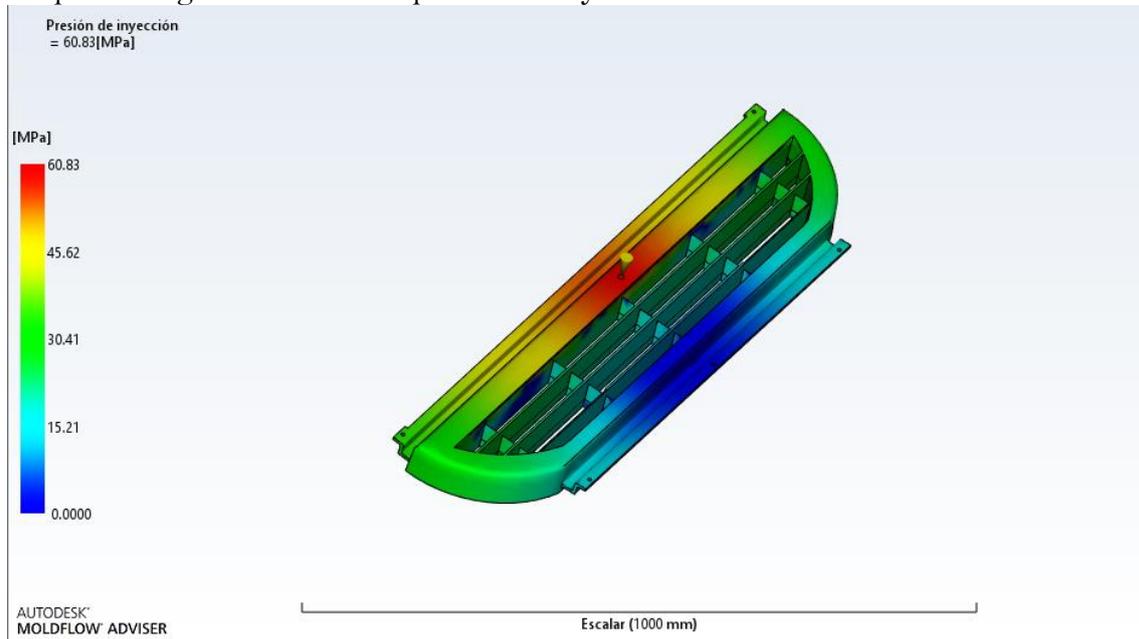


Figura 6. Presión de inyección.

En la imagen se observa que la presión de inyección es de 60,83 MPa. Teniendo en cuenta que el nuestra máquina de inyección alcanza hasta los 180 MPa de presión (siendo bastante conservadores) se podrá realizar la inyección del material sin ningún problema.

Ahora, analizamos la presencia de posibles rechupes:

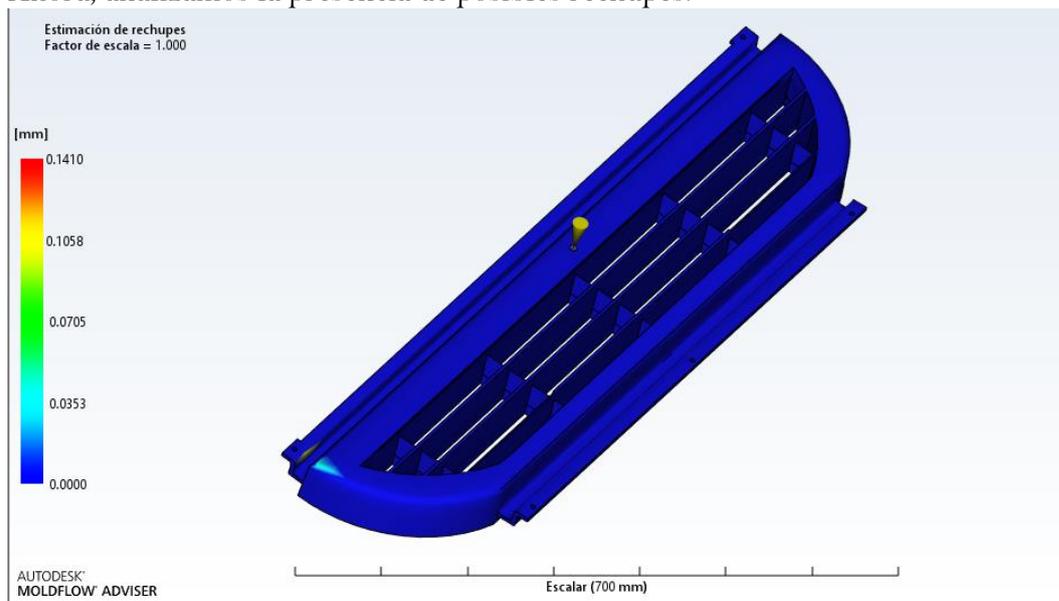


Figura 7. Rechupes

En la figura 7 se puede apreciar que apenas aparecen rechupes en la pieza la mayor presencia de los mismos en las zonas de la pieza que indica el programa superan por poco el 10% por lo que no suponen ningún problema en cuanto al diseño de la pieza ni al proceso de fabricación.

Por último, se va analizar la temperatura de la cavidad para determinar si se necesitará un sistema de refrigeración.

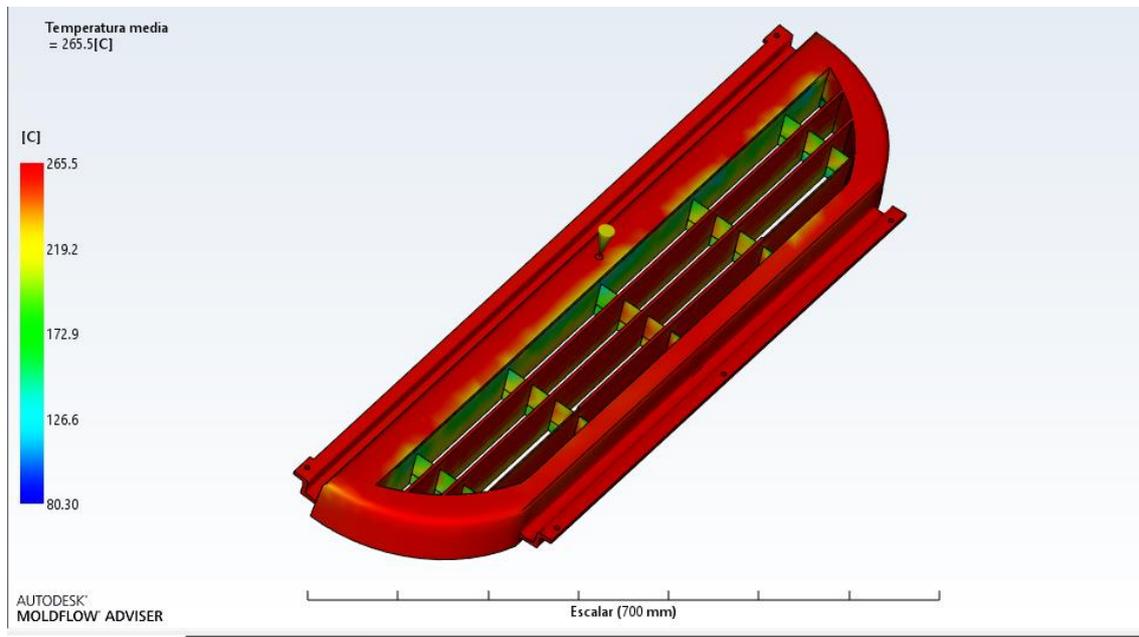


Figura 8. Temperatura de la cavidad

Como se puede apreciar en la figura 8, es evidente que será necesario diseñar un sistema de refrigeración puesto que de lo contrario, la cavidad alcanza una temperatura de casi 270 C° por lo que se procede a continuación a diseñar el sistema de refrigeración.

3.4.2 Análisis de refrigeración

Para la construcción del sistema de refrigeración lo primero es saber las zonas del molde que necesitan una refrigeración extra, para eso lo primero es correr un análisis de la “calidad de refrigeración”, con este análisis se puede identificar las modificaciones necesarias en la geometría de la pieza con objeto de evitar la refrigeración diferencial, que pueda producir deformaciones. En el nivel del molde, se puede identificar las áreas que requieren más refrigeración.

Realizando en análisis de calidad de refrigeración se obtiene:

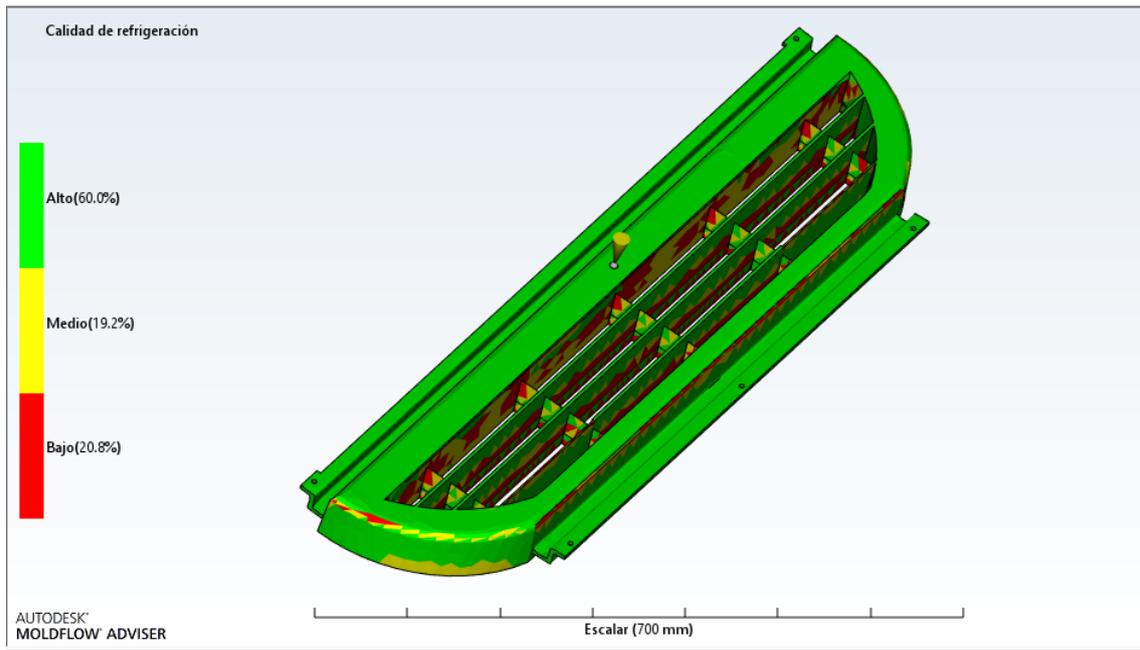


Figura 9. Calidad de refrigeración.

Se puede apreciar en la figura 9 que las zonas de las rejillas son aquellas que más van a necesitar una refrigeración, asique con estos datos se ha realizado el siguiente planteamiento:

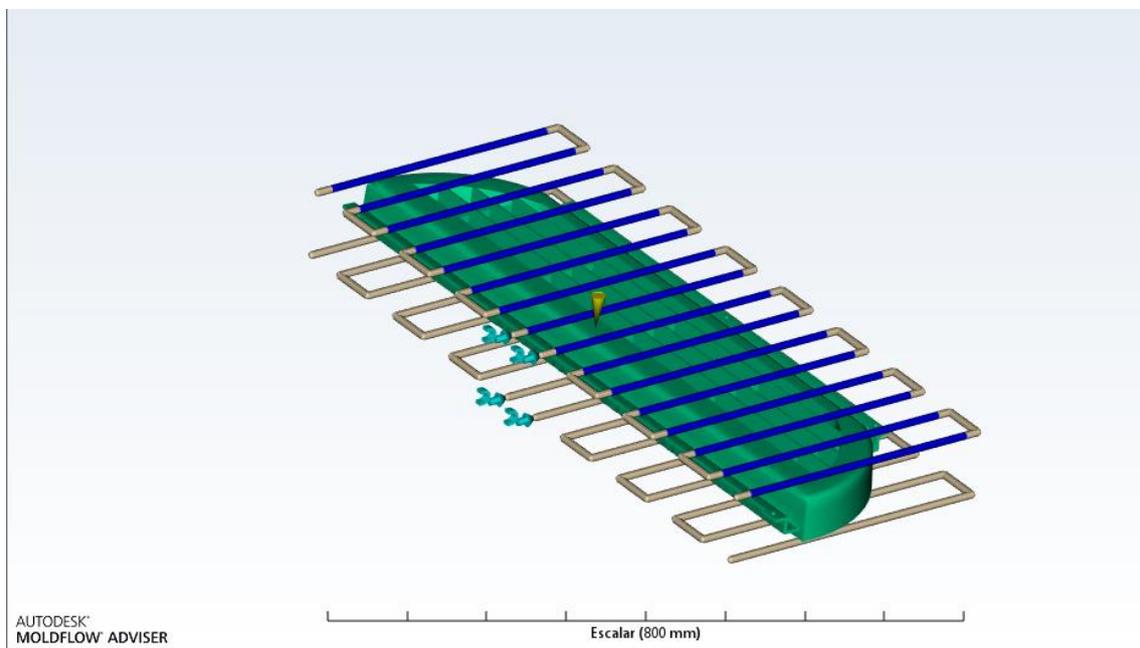


Figura 10. Sistema de refrigeración

Se ha optado por diseñar dos planos de refrigeración de la pieza ya que al fabricarse en largas series, es necesario una refrigeración lo más rápida posible.

La distancia entre canales de refrigeración será de 50 mm y a una distancia de 10 mm de la pieza y la longitud de la manguera será de 20 mm. Como refrigerante se ha optado por utilizar agua pura a una temperatura de 25 C ° y con una velocidad de flujo de 10 l/min. Todos los canales de refrigeración serán de diámetro 10 mm.

Los puntos de entrada del líquido refrigerante se han colocado de tal forma que enfríen de la mejor manera posible la parte central de la pieza la cual es la que se encuentra a mayor temperatura durante el proceso de inyección.

El próximo paso es realizar un análisis completo del molde, en él se podrá comprobar si los sistemas definidos hasta el momento son válidos, en caso contrario se realizarán ajustes hasta conseguir el diseño óptimo.

3.4.3 Análisis de llenado, compactación y refrigeración

Una vez construido el sistema de alimentación y de refrigeración del molde se analiza el llenado, refrigeración y compactación de la pieza.

Este análisis muestra por un lado que influencia tienen los canales de refrigeración, los materiales del molde y las propiedades refrigerantes sobre la transferencia de calor durante el proceso de moldeo, y por otro proporciona los resultados relativos a la fase de llenado y compactación.

3.4.3.1. ESTUDIO DE LLENADO

Los datos que lanza el software y que definen completamente las características de la pieza y los parámetros de la fase de inyección son:

Tiempo real de llenado	4.76 (s)
Presión real de inyección	59.418 (MPa)
Área de fuerza de cierre	1688.2908 (cm ²)
Fuerza de cierre máx. durante el llenado	508.077 (tonelada)
Conmutación de velocidad/presión a % volumen	98.16 (%)
Conmutación de velocidad/presión en tiempo	4.54 (s)
Peso total de la pieza al final del llenado	2200.773 (g)
Volumen de inyectada	2197.0319 (cm ³)
Volumen de la cavidad	2196.9276 (cm ³)
Volumen del sistema de canales	0.1043 (cm ³)

Tabla 1. Datos inyección

3.4.3.1.1. Tiempo de llenado

Se observa que el tiempo total de llenado de las piezas del molde es de 4,74 s, este tiempo es más que aceptable para piezas de este tamaño, es por ello que se da como válido lo que implica que si la calidad final de la pieza es buena se habrá conseguido diseñar un sistema de alimentación que garantiza las necesidades de este molde.

También se verifica que el flujo del llenado es correcto y que no existen huecos sin rellenar en ningún punto de la pieza.

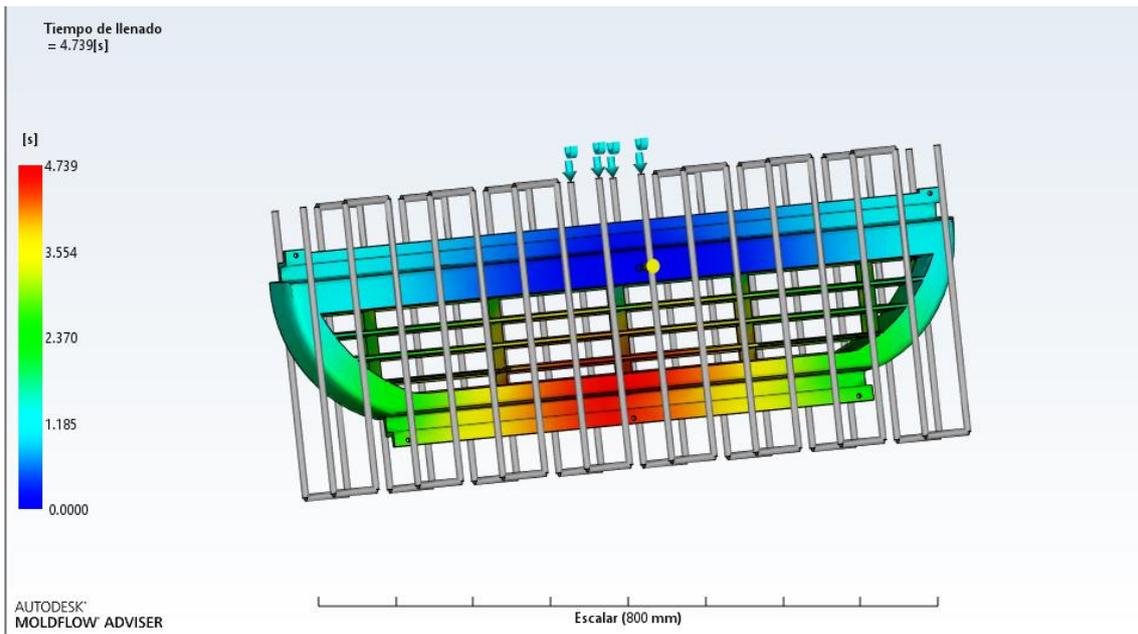


Figura 11. Tiempo de llenado final

3.4.3.1.2. Atrapamientos de aire

Se utiliza para calcular la calidad de las propiedades mecánicas y apariencia de la pieza. Este resultado se deriva de la presión, la temperatura y otros resultados.

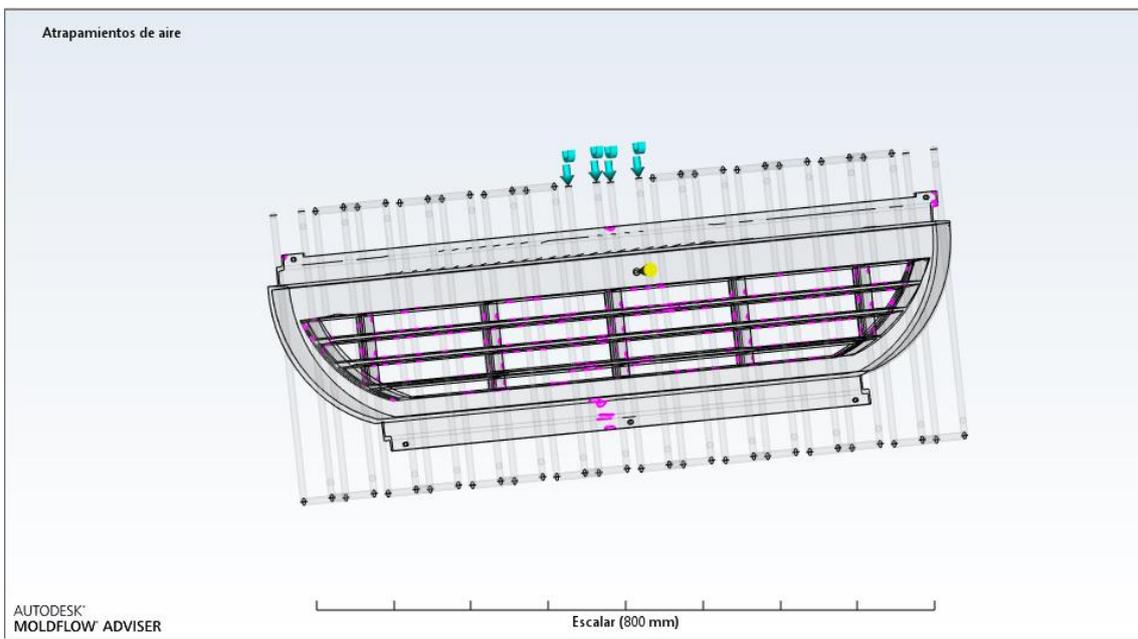


Figura 12. Atrapamientos de aire

El programa nos muestra los posibles atrapamientos de aire que pueden llegar a darse en la pieza. Estos posibles defectos se solucionarían mediante venteos que son unos agujeros de orden infinitesimal por los cuales es capaz de escapar el aire pero no el fluido inyectado.

3.4.3.1.3. Líneas de soldadura

Son zonas donde se encuentran dos flujos de material distinto en el proceso de llenado del molde. Se deben a la geometría de la pieza o a la alimentación por diferentes puntos de inyección. Normalmente son inevitables y debe disminuirse su influencia en las características de la pieza.

Se sabe que para conseguir que las líneas de soldadura no perjudiquen la calidad estructural de las piezas, éstas deberán formarse a una temperatura no inferior a 20 °C entre la temperatura de inyección y la temperatura existente en la línea de soldadura, con lo que, para conseguir un resultado óptimo se debe comprobar que estas líneas no aparezcan en zonas donde la temperatura sea inferior a 250 °C.

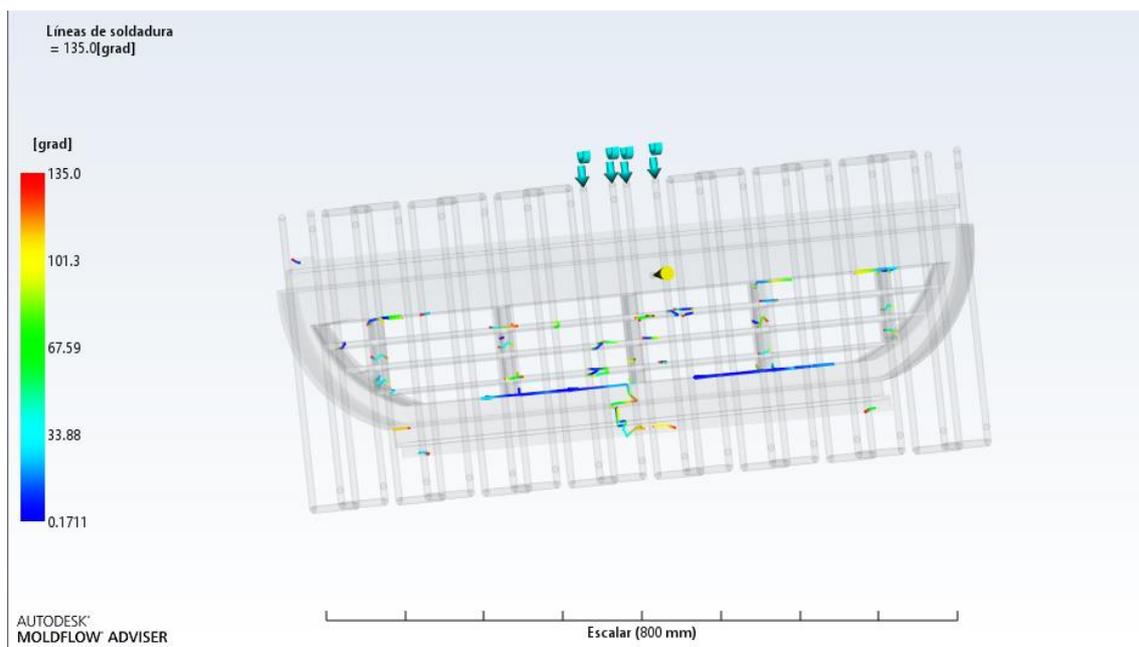


Figura 13. Líneas de soldadura

Se comprueba que la temperatura en el frente de flujo en ningún momento baja de 260 °C lo que hace que las líneas de soldadura que aparecen no sean preocupantes.

3.4.3.2 ESTUDIO DE COMPACTACIÓN

El estudio de compactación determina muchos de los factores que definirán posteriormente la pieza. El resultado principal de este estudio es el tiempo necesario para alcanzar el tiempo final del ciclo, además también indica la fuerza de cierre necesaria en el molde a estudio.

Como se puede ver en la siguiente figura el tiempo que dura la compactación es de 10 s y en ese tiempo es necesaria una presión constante de 47,535 MPa.

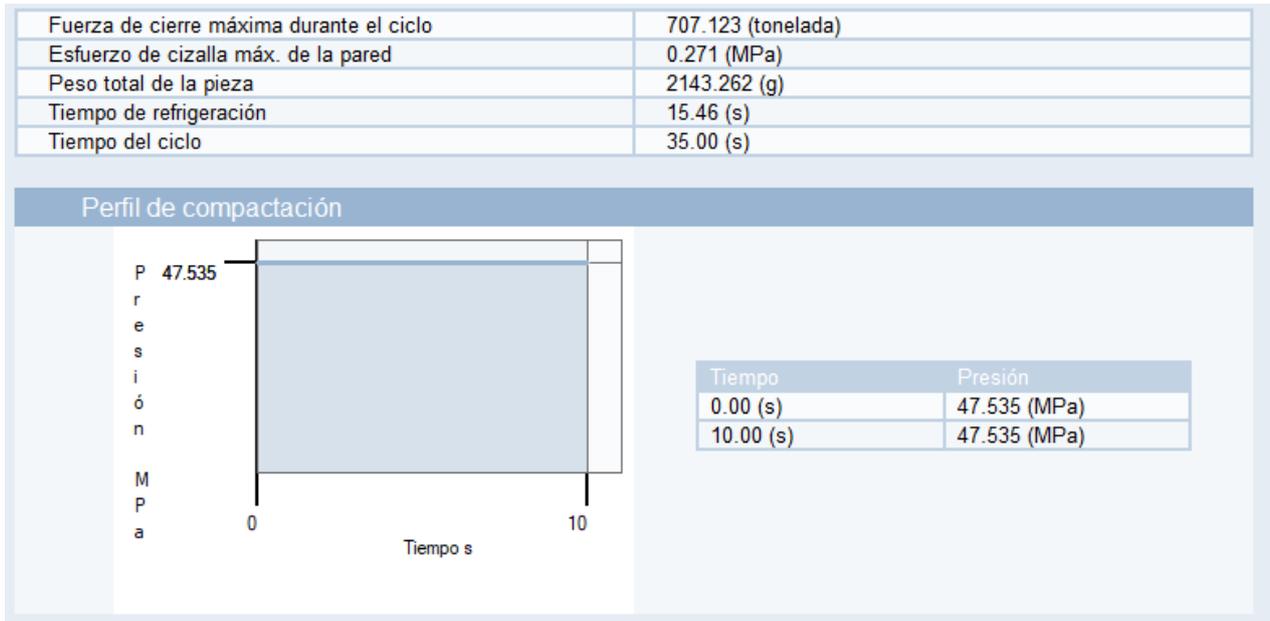


Tabla 2. Datos compactación

Siendo la fase de compactación la última del ciclo, se consigue conocer que el peso final de la pieza es de 2143 g. El siguiente gráfico muestra los tiempos de todas las fases del ciclo de inyección.

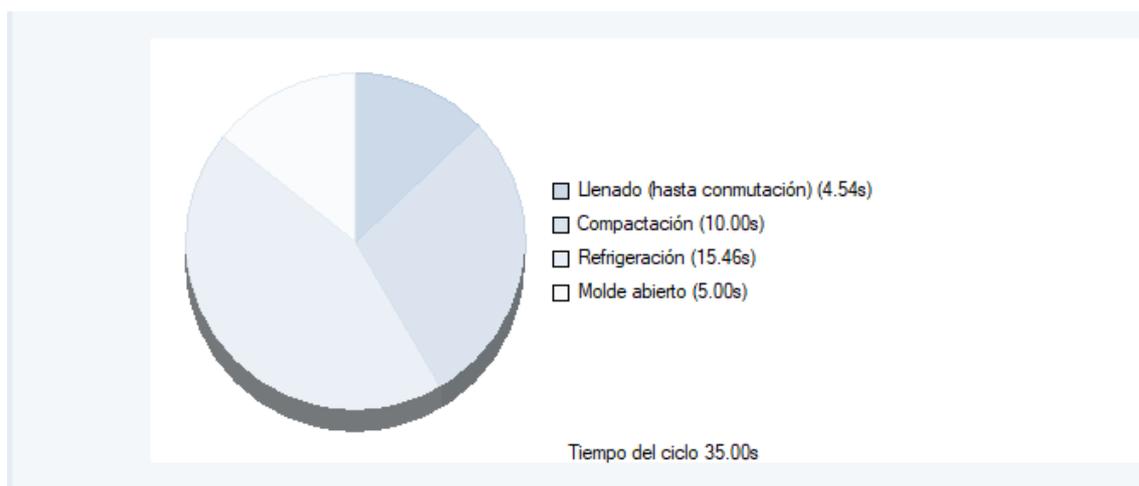


Gráfico 1. Tiempos de ciclo

3.4.3.3 ESTUDIO DE REFRIGERACIÓN

El análisis de refrigeración muestra que influencia tienen los canales de refrigeración, los materiales del molde y propiedades refrigerantes sobre la transferencia de calor durante el proceso de moldeo.

Los datos obtenidos de este estudio son:

Temperatura máxima, pieza	140.7 (C)
Temperatura mínima, pieza	93.1 (C)
Temperatura media, pieza	120.1 (C)
Temperatura exterior del molde	39.6 (C)

Tabla 3. Datos refrigeración

3.4.3.3.1. Temperatura del líquido refrigerante

Este resultado muestra como varia la temperatura del refrigerante dentro del circuito de refrigeración.

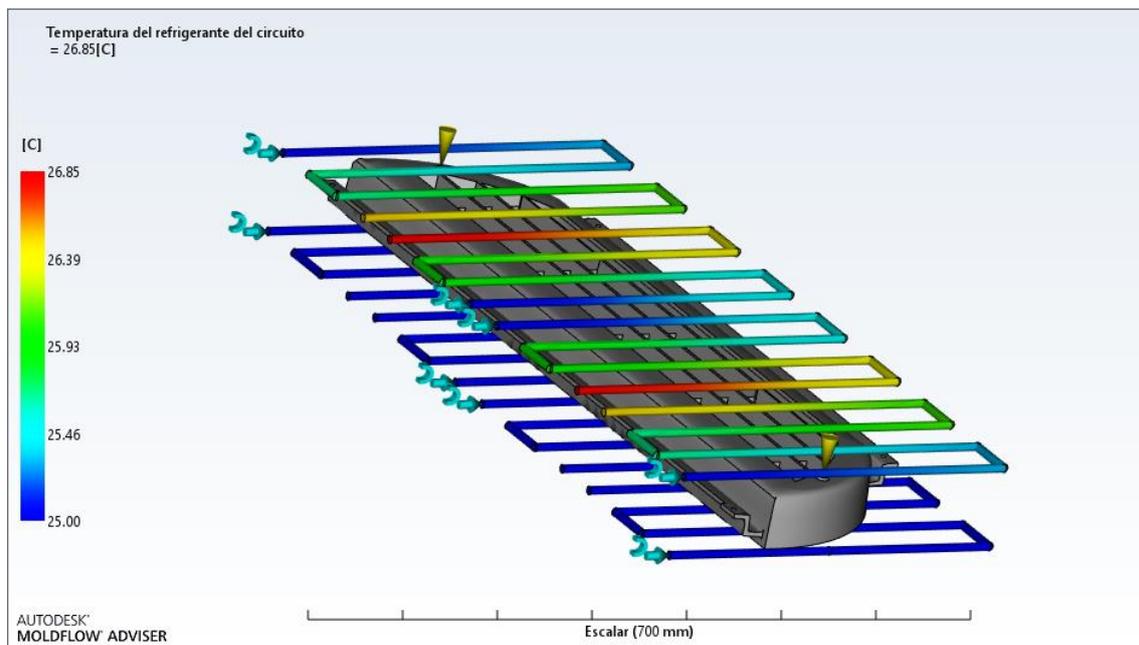


Figura 14. Temperatura líquido refrigerante

La subida de temperatura desde la entrada hasta la salida no debe ser superior a 2-3 °. Si fuera un valor más alto, puede indicar un rango de temperaturas de molde más amplio y esto sería muy importante. Como se puede ver en la figura para este sistema de refrigeración la varianza de temperatura entre la entrada y la salida es de 1,85 °C, lo que quiere decir que se ha realizado un buen diseño del sistema de refrigeración.

3.4.3.3.2 Temperatura de la pieza

La siguiente figura muestra la temperatura media de la pieza, como se puede ver la mayor parte es de color verde, lo que indica que la temperatura es uniforme en la mayor parte de la pieza.

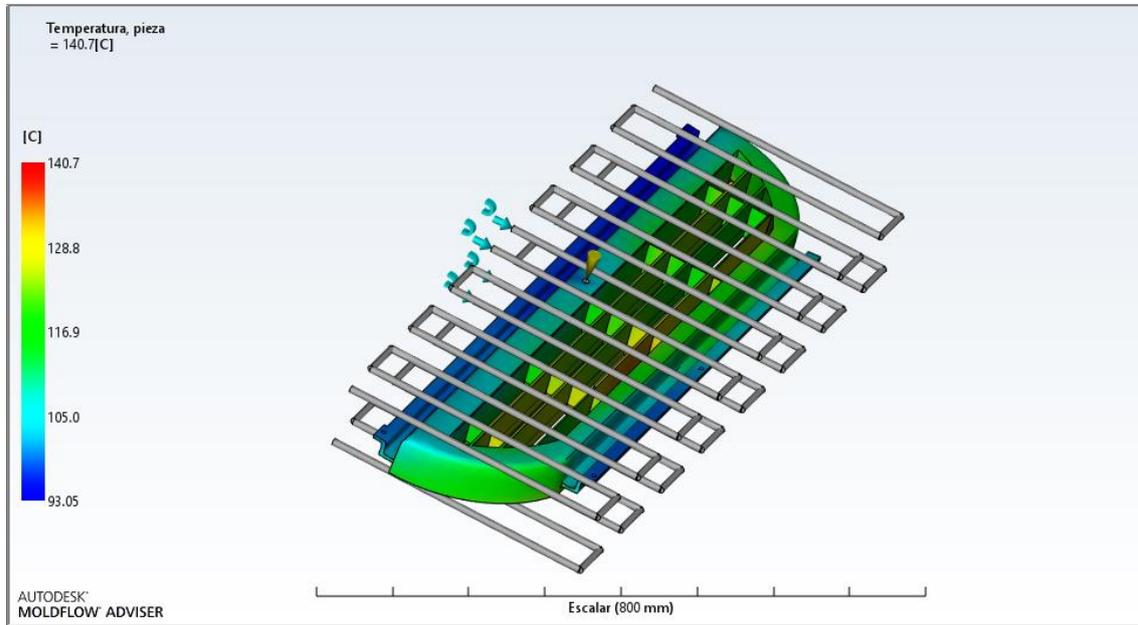


Figura 15. Temperatura de la pieza

3.6 Antecedentes

En este apartado se pretende mostrar, de forma resumida, la base teórica que fundamenta los programas de simulación de moldes, como el utilizado en el apartado anterior, para facilitar el análisis de los moldes que se diseñan.

3.6.1. ÁREA PROYECTADA

El área proyectada en un molde es el área que es llenada con plástico fundido en la línea de partición.

3.6.2. FUERZA DE CIERRE

Durante la fase de llenado y sostenimiento se genera presión dentro de la cavidad del molde, esta presión es debida a la fuerza de inyección con la que la unidad de plastificación empuja al polímero fundido dentro de la cavidad.

La fuerza de cierre requerida por el molde para el mantenimiento uniforme de las presiones está en función de la presión dentro de la cavidad del molde, de acuerdo con la siguiente fórmula.

$$P_i = \frac{F_c}{A_p}$$

Donde:

P_i Presión de inyección (kg/cm²)

F_c Fuerza de cierre requerida de la maquina (kg)

A_p Área proyectada de la pieza(cm²)

3.6.3. TIEMPO DE INYECCIÓN

El cálculo del tiempo de inyección se expresa a través de la siguiente fórmula.

$$t_i = \frac{V_p}{Q_m}$$

También es posible calcular el tiempo de inyección en función de la velocidad de inyección. Se encontrará este valor en catálogos y hojas de datos técnicos de las máquinas de inyección en función del PS. Para conocer la velocidad de inyección se utiliza la siguiente formula.

$$S_i = \frac{S_{ps} \cdot \rho_n}{\rho_{PS}}$$

Donde:

S_i Velocidad de inyección del material (g/s)

S_{PS} Velocidad de inyección del PS (g/s)

ρ_n Densidad del material (g/cm³)

ρ_{PS} Densidad del PS (g/cm³)

Con esta información se calculará el tiempo de inyección en función de la velocidad de inyección.

$$t_i = \frac{W_p}{S_i}$$

Donde:

w_p Peso de la pieza (g)

Además de los dos métodos anteriores, el tiempo de inyección se puede conseguir mediante la siguiente ecuación:

$$t_i = \frac{\left(\frac{e_{\min} \cdot D_{\max}}{R_{fe}} \right)^3}{8 \cdot \left(\frac{T_{\text{exp}} - T_{\text{mold}}}{T_{\text{mat}} - T_{\text{mold}}} \right)^3}$$

Donde:

e_{\min} Espesor mínimo de la pieza (cm)

D_{\max} Recorrido máximo del fundido desde la entrada del molde (cm)

R_{fe} Relación entre recorrido del flujo y el espesor de pared (cm/cm)

T_{exp} Temperatura de la pieza en la expulsión (°C)

T_{mold} Temperatura del molde (°C)

T_{mat} Temperatura del material fundido (°C)

La ecuación supone que el material comienza a solidificarse al entrar en contacto con las paredes de la cavidad del molde, reduciendo así el área a través de la cual puede circular el material fundido que va entrando. Por lo cual, si se aumenta la temperatura del molde, mayor será el tiempo de inyección, pues mayor tiempo se requerirá para que el material se solidifique.

3.6.3.1 Tiempo de solidificación o enfriamiento

El tiempo de enfriamiento inicia desde que termina el tiempo de inyección, durante la aplicación de la presión de sostenimiento y hasta la apertura del molde. Es la etapa más larga del ciclo. En ella se debe asegurar que el material ha solidificado. Suele alcanzar del 50% al 85% del tiempo total.

$$t_{ENF} = \frac{-e_{\max}^2}{2 \cdot \pi \cdot \alpha_n} \cdot \ln \left[\frac{\pi \cdot (T_{\text{exp}} - T_{\text{molde}})}{4 \cdot (T_{\text{mat}} - T_{\text{molde}})} \right]$$

Donde:

e_{\max} Espesor máximo de la pieza (cm)

α_n Difusividad térmica del material (cm² /°C)

La difusividad térmica es un valor que se puede encontrar en las hojas de datos del material.

Sin embargo, es posible calcularlo:

$$\alpha_n = \frac{\lambda_n}{\rho_n \cdot c_p}$$

Donde:

λ_n Conductividad térmica (J/s·cm·°C)

c_p Calor específico (J/g·°C)

3.6.3.2. Tiempo total del ciclo de inyección

El tiempo de ciclo es un valor que se determina con exactitud hasta que se está produciendo masivamente, ya que son muchos los factores que afectan a la inyección. Aún así para el diseño del molde es necesario hacer una estimación aproximada. El tiempo de ciclo esta expresado en la siguiente ecuación.

$$t_c = t_{cm} + t_i + t_{enf} + t_{ap} + t_{exp}$$

Donde:

t_c Tiempo de ciclo esperado (s)

t_{cm} Tiempo de cierre de molde (s)

t_i Tiempo de inyección (s)

t_{enf} Tiempo de enfriamiento (s)

t_{ap} Tiempo de apertura del molde (s)

t_{exp} Tiempo de expulsión de la pieza (s)

3.6.4. CÁLCULO DE LA COLADA

Como ya se ha mencionado anteriormente, la colada es un componente de la pieza inyectada pero que no forma parte de la pieza propiamente dicha.

3.6.4.1. Geometría de la colada

La sección óptima de la colada es la circular, ya que esta asegura un flujo del fundido favorables y un enfriamiento uniforme. El diámetro de la colado es:

$$\phi_c = \left(\frac{\sqrt{w_p \cdot \sqrt{l_c}}}{3,7} \right)$$

Donde:

ϕ Diámetro de a colada (cm)
 l_c Longitud de la colada (cm)

3.6.4.2. Orificio de llenado

Para calcular el diámetro del orificio de llenado se necesita conocer la tasa de corte o velocidad de corte. Esta tasa se obtiene de la ley de potencia. También puede ser conseguido mediante un viscosímetro rotacional.

$$\phi_g = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot Q_m}{\pi \cdot \gamma}}$$

Donde:

ϕ Diámetro del orificio de llenado (cm)
 γ Tasa o velocidad de corte (1/s)

Además la tasa de corte puede ser calculada a través de la fórmula de Bingham para análisis de los fluidos no newtonianos independientes del tiempo.

$$\tau_r = \tau_o + \eta_p \cdot \gamma$$

Donde:

η viscosidad plástica (N·s/cm²)
 τ_p Esfuerzo cortante del fluido reológico (N/ cm²)
 τ_o Esfuerzo de fluencia del fluido reológico (N/ cm²)

3.6.5. CÁLCULO DE LA CONTRACCIÓN

El cálculo del porcentaje de contracción está en función de la longitud de la pieza y la longitud de la cavidad.

$$R_c = \frac{d_m - d_p}{d_m}$$

Donde:

Rc Rango de contracción (cm/cm)

dm Dimensión requerida en el molde (cm)

dc Dimensión requerida en la pieza (cm)

Además de la anterior ecuación, el rango de contracción puede ser elegido de las hojas técnicas de los polímeros. En estas hojas también aparecerá como un porcentaje.

La contracción en un molde se considera uniforme en todas las direcciones de la pieza a fabricar.

3.7 Cálculos mecánicos

A pesar de haber realizado la mayoría de los cálculos con el software de simulación *Moldflow*, se desea calcular de manera analítica: la **capacidad de cierre del molde** y la **resistencia a pandeo de los expulsores**.

3.7.1. CAPACIDAD DE CIERRE

La fuerza de cierre que es capaz de ejercer la máquina ha de ser mayor que la fuerza de apertura que se generó durante la inyección.

$$F_{Cierre} > F_{Apertura}$$

La presión transmitida al molde es menor que la presión de salida del cilindro, reduciéndose en función a ciertos atributos del termoplástico, especialmente la viscosidad, inversamente proporcional a la capacidad de transmisión. El material que entra en la cavidad se enfría continuamente, desde el exterior hasta el interior, creándose así un diferencial de temperatura a lo largo de la línea de cierre, que influirá en la distribución de presiones. Por lo tanto, la presión media tiene el valor de la presión de inyección aplicándole sus pérdidas de transmisión y diferencia de temperatura.

En conclusión, la fuerza que tiende a abrir el molde ($F_{apertura}$) durante la inyección es el producto de la presión media (P_m) a lo largo del cierre y del área proyectada de la pieza (A_p), donde el área proyectada es el área que abarca la huella de la pieza y de los canales en el plano de cierre.

$$F_{Apertura} = P_m \cdot A_p$$

El valor de la presión media se ha obtenido mediante *Moldflow*, haciendo la simulación completa del proceso el programa calculaba directamente el valor de dicha presión:

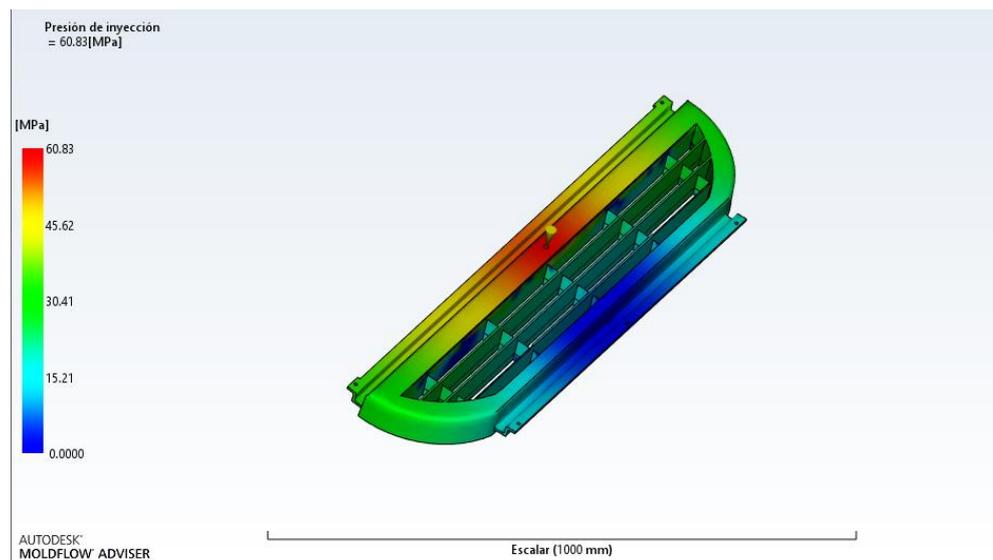


Figura 17. Presión media de inyección

Siendo:

$$P_m = 35,85 \text{ MPa} = 620,29 \text{ kg/cm}^2$$

A continuación, para determinar si la máquina es capaz mantener el molde cerrado, habrá que calcular en el área proyectada de la pieza.

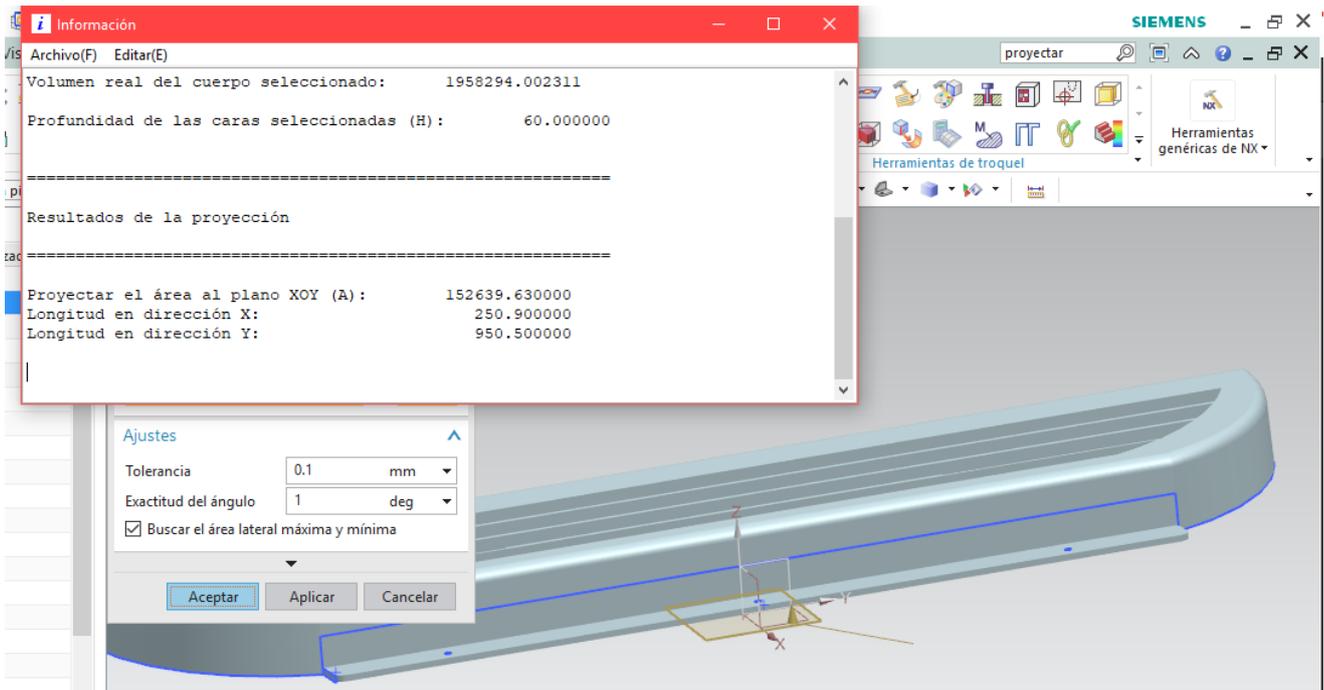


Figura 18. Área proyectada de la pieza

$$F_{Apertura} = P_m \cdot A_p = 620,29 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] \cdot \frac{0,001[T]}{1[kg]} \cdot 152639,63 [mm^2] \cdot \frac{0,01[cm^2]}{1[mm^2]} = 946,8 [T]$$

La capacidad de cierre del modelo DEMAG Ergotech system es de hasta 20000 kN, de ahí que:

$$F_{Cierre} > F_{Apertura}$$

$$2041[T] > 946,8 [T]$$

$$CS = \frac{2041[T]}{946,8 [T]} = 2,15$$

La máquina es capaz de sobreponerse a la presión de apertura con un coeficiente de seguridad de **2,15** por lo tanto, no habrá riesgo de apertura del molde durante el proceso de inyección.

3.7.2. RESISTENCIA DE LOS EXPULSORES A PANDEO

Debido a su esbeltez, los expulsores son los elementos más susceptibles a deformarse por influencia del pandeo. Al estar orientados axialmente en paralelo a la dirección de inyección, sufren una gran carga de compresión durante el proceso de llenado. Todos los expulsores son de la misma longitud $L = 442$ mm y de diámetro $D = 16$ mm.

La base del expulsor va anclada entre las placas expulsoras, que evitan la translación y el giro del mismo en todas las direcciones. Por lo tanto, habrá un amarre fijo en la base y un apoyo móvil en la punta. La longitud de pandeo del mismo será 0,7 veces su longitud real, puesto que este tipo de sujeción favorece a la resistencia al pandeo.

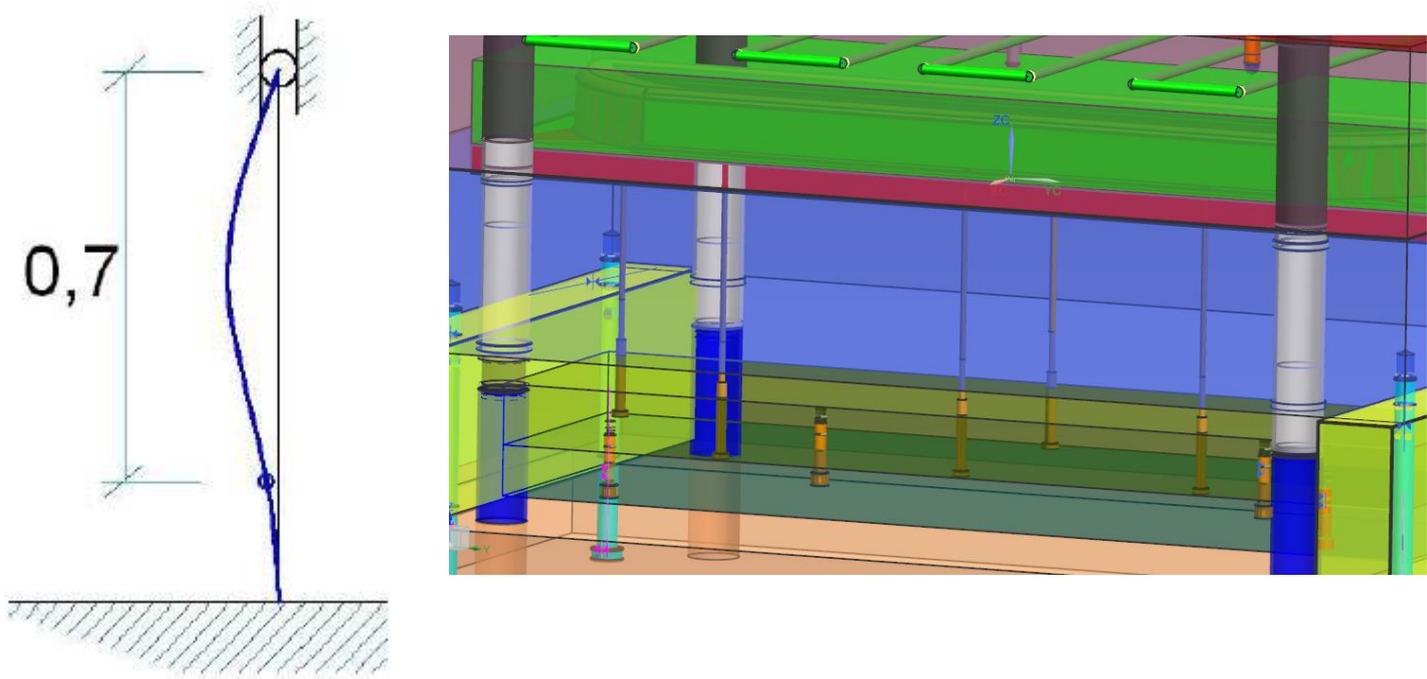


Figura 19. Expulsores y longitud de pandeo.

Para comenzar, se va a determinar la esbeltez del expulsor:

$$\lambda = \frac{Lp}{\rho_{min}}$$

$$\rho_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}}$$

λ : Esbeltez.

A: Área de la sección.

ρ_{min} : Radio de giro en el eje débil.

I_{min} : Momento de inercia en el eje débil.

Lp : Longitud de pandeo

Al ser la sección del expulsor circular, los momentos de inercia son iguales en los dos ejes transversales.

$$\rho_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{4}\pi r^2}{\pi r^2}} = 7,089[mm]$$

$$\lambda = \frac{Lp}{\rho_{min}} = \frac{442[mm] \cdot 0,7}{7,089[mm]} = 43,64$$

La sección del expulsor es admisible, debido a que su esbeltez es menor que 250. No obstante, al superar el valor de 20, será necesario comprobar el pandeo para garantizar la vida del mismo.

El valor de la esbeltez del expulsor es menor de 100, que supone que el pandeo se dará en un estado de deformación del expulsor dentro de la zona plástica. Consecuentemente, no es posible utilizar las fórmulas de Euler, que se delimitan a la zona elástica.

Como la esbeltez es menor de 60, tampoco se recurrirá a la fórmula de Tetmajer, sino a la parabólica de Johnston-Ostenfeld, algo más conservadora.

$$\sigma_k = \sigma_f - a \cdot \lambda^2$$

λ : Esbeltez.

a: Coeficiente cuyo valor es de 0.03 kg/cm²

σ_k : Tensión crítica

σ_f : Tensión de fluencia

$$\sigma_k = \sigma_f - a \cdot \lambda^2 = 2400 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] - 0,03 \left[\frac{kg}{cm^2} \right] \cdot 43,64^2 = 2342,86 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

Siendo la presión de inyección del ABS de 365,56 [kg/cm²]:

$$\sigma = \frac{P \cdot A}{A} = P = 365,56 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$$

$$CS = \frac{\sigma_k}{\sigma} = \frac{2342,86}{365,56} = 6,4$$

Los resultados indican que el riesgo de pandeo es mínimo, aun así, no se hace uso de expulsores de menor diámetro por las posibles marcas que puedan dejar en la pieza durante la expulsión, antes de que se haya endurecido del todo. Cuanto menor es su diámetro de contacto, mayor la presión que se ejerce sobre la pieza, es decir, mayor la probabilidad de dejar marca.

Eneko Nieto Irureta
Bilbao, a 13 de Septiembre de 2018
Fdo.: