

---

GRADO INGENIERÍA MECÁNICA  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

***DISEÑO DE UN MOLDE DE  
INYECCIÓN PARA RUEDA DE  
JUGUETE***

***DOCUMENTO 3- CÁLCULOS***

**Alumno/Alumna:** Learra,Sagasti,Aitor

**Director/Directora:** Macareno,Ramos, Luis María

**Curso:** 2020-2021

**Fecha:** Bilbao, 15, 7, 2021



## Índice de los cálculos

3.1 Introducción.....	5
3.2 Objeto del documento.....	5
3.3 Diseño de la pieza.....	5
3.3.1 Análisis de la pieza.....	6
3.3.1.1 Comparación materiales e idoneidad entradas.....	6
3.3.1.2 Ventana de proceso.....	8
3.3.1.3 Datos del material.....	8
3.3.2 Análisis llenado.....	9
3.3.2.1 Espesor pieza.....	9
3.3.2.1 Tiempo de llenado.....	9
3.3.2.2 Confianza de llenado.....	10
3.3.2.3 Predicción de la calidad.....	10
3.3.2.4 Presión.....	11
3.3.2.5 Rechupes.....	12
3.3.2.6 Atrapamientos de aire.....	13
3.3.2.7 $T^a$ en el frente de flujo.....	13
3.3.2.8 $T^a$ media.....	14
3.3.2.9 Tiempo para alcanzar la $T^a$ de expulsión.....	15
3.3.2.10 Fracción capa solidificada al final del llenado.....	15
3.3.2.11 Líneas de soldadura.....	16
3.3.3 Análisis de refrigeración.....	17
3.3.3.1 Temperatura líquido refrigerante.....	18
3.3.3.2 Caudal del refrigerante.....	18
3.3.3.3 N.º de Reynolds del circuito.....	18
3.3.3.4 Calidad de refrigeración.....	18
3.3.3.6 Varianza de temperatura.....	21
3.3.3.7 Temperatura, pieza.....	23
3.3.3.8 Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, pieza.....	24
3.3.3.9 Contracción volumétrica en la expulsión.....	25
3.3.3.10 Deformaciones.....	27
3.3.4 Análisis de compactación.....	30
3.4 Características del molde.....	31
3.4.1 Línea de partición y tamaño portacavidades y portanúcleos.....	31

3.4.2 Sistema de canales de inyección.....	32
3.4.3 Sistema de canales de refrigeración.....	33
3.4.3.1 Dimensionado de canales de refrigeración y cálculo del caudal.....	33
3.5 Variables y Cálculos mecánicos.....	34
3.5.1 Área proyectada y volumen de pieza.....	34
3.5.2 Fuerza de cierre.....	34
3.5.3 Tiempo de inyección.....	34
3.5.4 Tiempo de enfriamiento.....	35
3.5.5 Tiempo total de inyección.....	36
3.5.6 Geometría colada.....	36
3.5.7 Cálculo contracción.....	36
3.5.8 Capacidad de cierre.....	36
3.5.9 Resistencia expulsores a pandeo.....	37
3.6 Resultados finales y dimensionamiento molde.....	38
3.6.1 Parte fija.....	38
3.6.1.1 Anillo centrador.....	38
3.6.1.2 Placa superior.....	38
3.6.1.3 Bebedero.....	39
3.6.1.4 Placa portacavidades.....	39
3.6.1.5 Cavidades.....	41
3.6.1.6 Columnas guía.....	41
3.6.2 Parte móvil.....	42
3.6.2.1 Placa base/inferior.....	42
3.6.2.2 Placa portanúcleos.....	43
3.6.2.3 Placa expulsora.....	44
3.6.2.4 Placa portaexpulsores.....	44
3.6.2.5 Núcleos.....	45
3.6.2.6 Expulsores.....	46
3.6.2.7 Placas laterales.....	46

### 3.1 Introducción

En este documento se analizarán los pasos empleados para la realización del molde.

El primer paso consiste en analizar la pieza a fabricar, en la cual además de comentar sobre el material a emplear, se determinará el punto de inyección y parámetros escogidos para la pieza.

El segundo paso consiste en realizar el análisis de moldeo mediante el programa *Moldflow*. Mediante este programa se calcularán las variables necesarias para obtener diferentes alternativas para el diseño óptimo del molde. Posteriormente, se diseñarán los sistemas de inyección y refrigeración, se elegirá el material y las secciones para diseñar el molde.

Por último, una vez alcanzada la viabilidad del proceso, se empleará tanto el programa *NX Unigraphics* como *CATIA* para el diseñar el molde y a continuación poder realizar los planos necesarios para la fabricación de las piezas no comerciales.

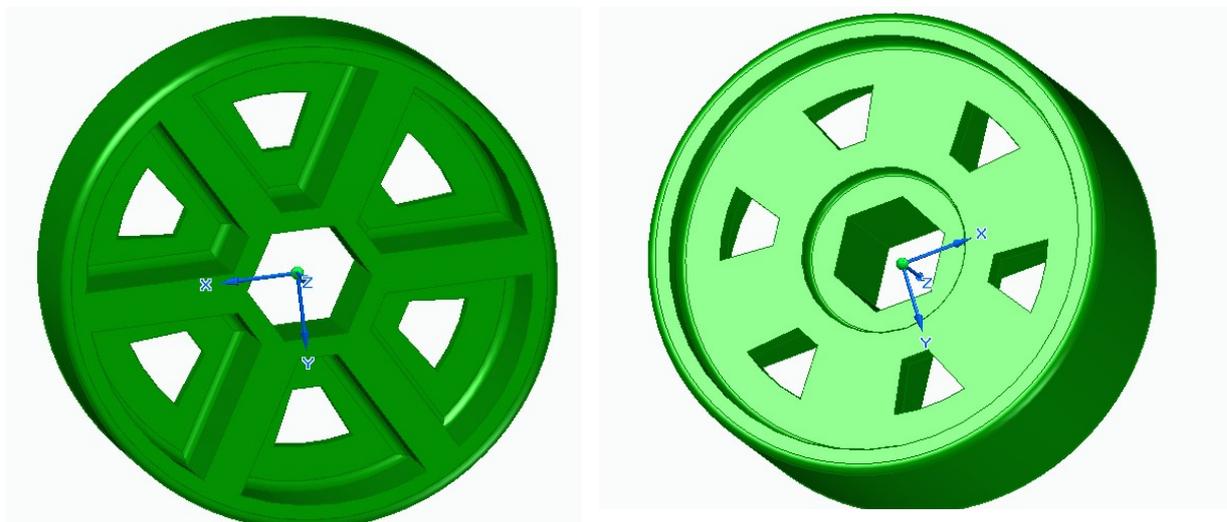
### 3.2 Objeto del documento

El objetivo de este documento es realizar los cálculos necesarios para realizar el molde de forma óptima, además de decidir que material se va a emplear (para este caso el propileno), empleando los programas antes citados, ya que ofrecen gran versatilidad.

Con todos los datos obtenidos se podrán justificar las decisiones tomadas y garantizar que el diseño sea el correcto.

### 3.3 Diseño de la pieza

Se trata de una rueda para un coche de juguete. Entre sus dimensiones a destacar se encuentra su diámetro exterior de 57,5 mm y su ancho de 20 mm. Al ser una pieza pequeña, se ha optado por realizar un molde de 4 cavidades, permitiendo así realizar ruedas para 1 coche en un ciclo. A continuación se muestran dos imágenes de la rueda. Cabe destacar que se realizó un rediseño de la rueda a fin de reducir espesores nominales, permitiendo mejorar algunos resultados.



Figuras 1 y 2: Rueda de juguete

Entre las características del material elegido, se pueden resumir en las siguientes:

- Bajo coste
- Fácil moldeo
- Baja densidad
- Buena resistencia al impacto y alta resistencia a la fractura

### 3.3.1 Análisis de la pieza

#### 3.3.1.1 Comparación materiales e idoneidad entradas

Se ha optado por realizar primero una comparativa entre 2 tipos diferentes de polipropileno del fabricante SABIC Europe B.V.:

- SABIC PP 575P (Material 1)
- SABIC PP FPC100 (Material 2)

Antes de seleccionar un material de los citados anteriormente, se seleccionará el punto de inyección para la entrada de material mediante el análisis "Posición óptima de la entrada". Es probable que el programa proporcione un punto de inyección que no sea del todo correcto o conveniente, por lo que en ese caso el propio diseñador decidirá donde ubicarlo. En este caso, el punto de inyección más óptimo se situaría por dentro de la rueda. No obstante, debido a la facilidad para posicionar el punto, se ha decidido ubicarlo en la mitad de la banda de rodadura.

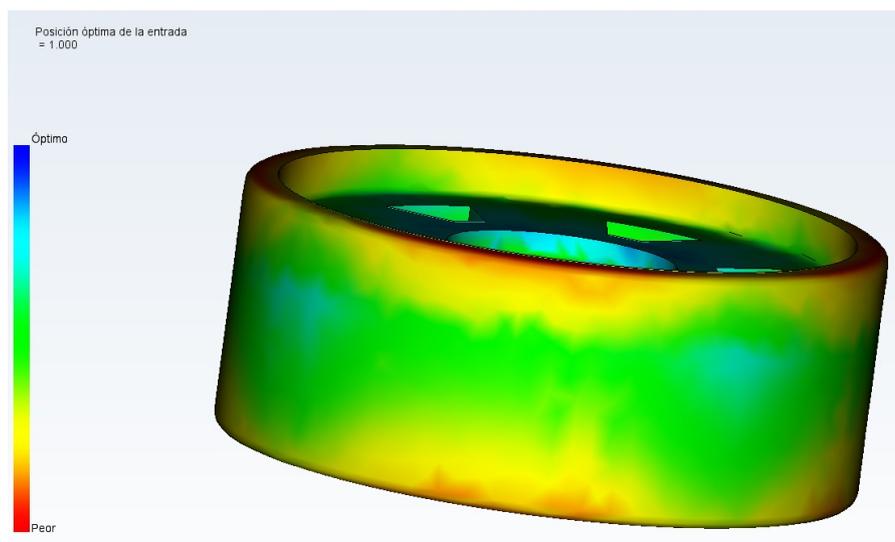
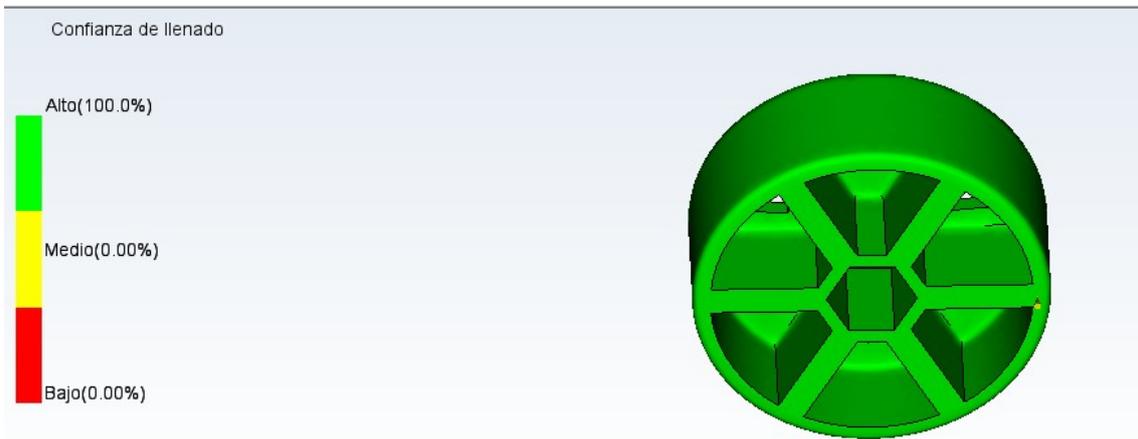


Figura 3: Idoneidad de las entradas



Posteriormente, mediante un análisis de llenado se compara tanto la confianza de llenado de los materiales como su tiempo de llenado. Para ambos casos, la confianza de llenado es de un 100%, por tanto no habrá problemas de llenado. Además, se podrá observar en la siguiente imagen el punto de inyección seleccionado.

Figura 4: Confianza de llenado

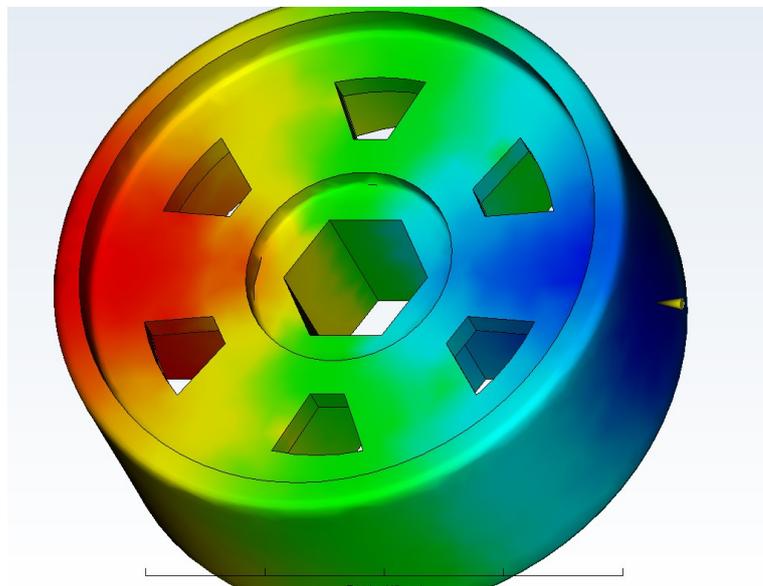


Figura 5: Tiempo de llenado SABIC PP 575P

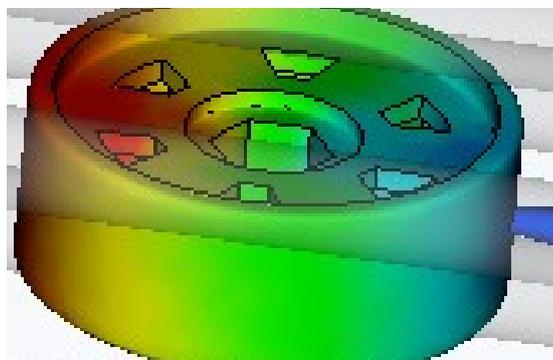


Figura 6: Tiempo de llenado SABIC PP FPC100

Visto los resultados, el Material 2 tiene un tiempo de llenado de 1,934 segundos y el Material 1 de 1,973, con lo cual se escogerá el primero (Material 2). Además de este factor, se escoge este material ya que su índice de fluidez (MFR) es mayor que el otro y permite obtener resultados aceptables en los rechupes.

### 3.3.1.2 Ventana de proceso

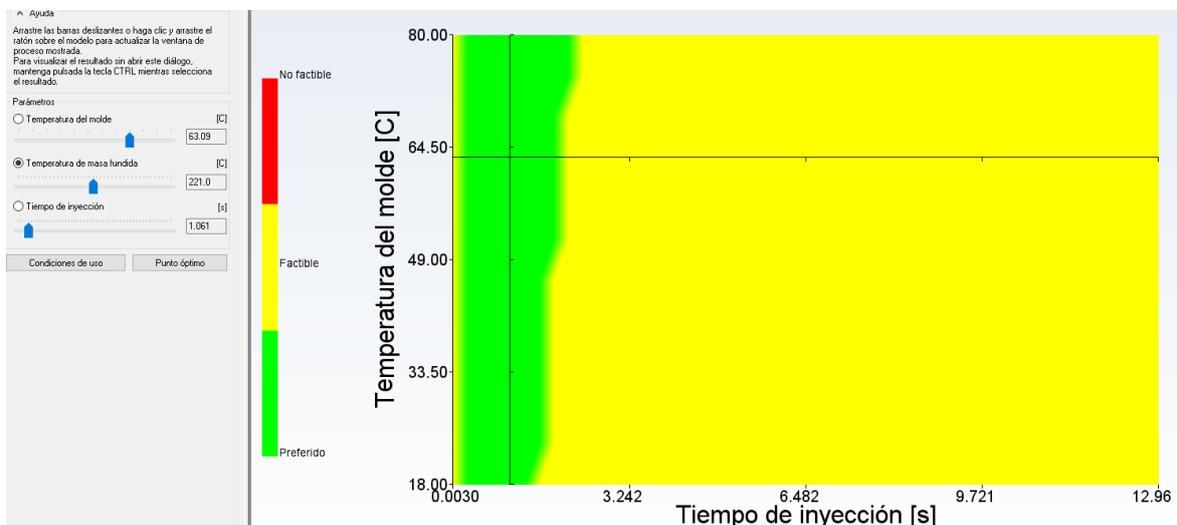


Figura 7: Ventana de proceso óptima

A pesar de que el programa proporcione que las condiciones más óptimas sean las vistas en la imagen anterior, con el fin de reducir los rechupes (en un primer análisis para estas condiciones el valor del rechupe máximo fue alrededor de 38-40 mm) se ha optado por variar ciertos valores a fin de reducir este valor.

### 3.3.1.3 Datos del material

Material y fabricante: SABIC PP FPC100, SABIC Europe B.V.

T<sup>a</sup> molde recomendada: 49 °C

Intervalo de T<sup>a</sup> molde recomendada: 18-80 °C

T<sup>a</sup> masa recomendada: 220 °C

Intervalo de T<sup>a</sup> masa recomendada: 180-260 °C

Densidad masa fundida: 0.75246 g/cm<sup>3</sup>

Densidad sólido: 0,92499 g/cm<sup>3</sup>

Volumen de la pieza: 16567,9303 mm<sup>3</sup>

Masa de la pieza (volumen\*densidad): 18,963 gr

T<sup>a</sup> molde adoptada: 29,27 °C

T<sup>a</sup> masa adoptada: 188,2 °C

tiyección adoptado=1.85 segundos

T<sup>a</sup> expulsión: 90 °C

Conductividad térmica: 0,18 W/m °C

Capacidad calorífica específica: 2696 J/kg °C

Esfuerzo de cizalla máximo: 0,25 MPa

### 3.3.2 Análisis llenado

#### 3.3.2.1 Espesor pieza

Se obtiene que el espesor nominal de la pieza es de 2,5 mm y el espesor máximo de 4,565 mm. Estos valores afectarán a variables como la calidad de refrigeración, tiempo de solidificación, calidad de la pieza etc.

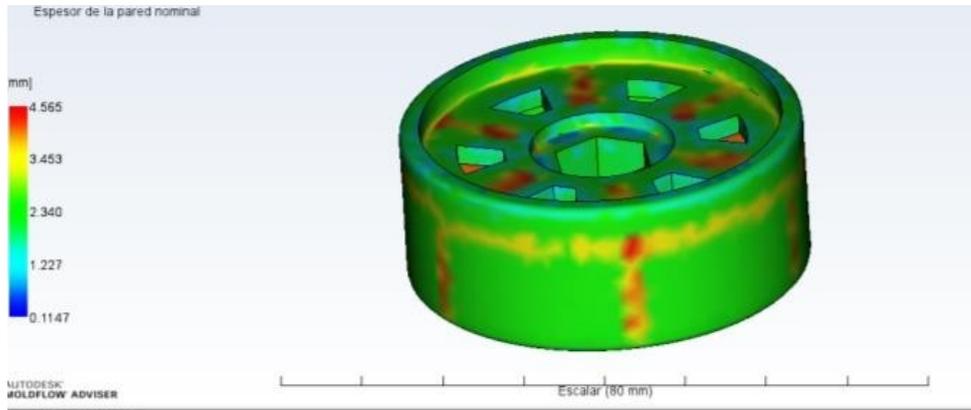


Figura 8: Espesor de pieza

#### 3.3.2.1 Tiempo de llenado

Aquí se mostrará el tiempo de llenado, donde las zonas azules se llenarán primero y las zonas rojas las últimas en hacerlo.

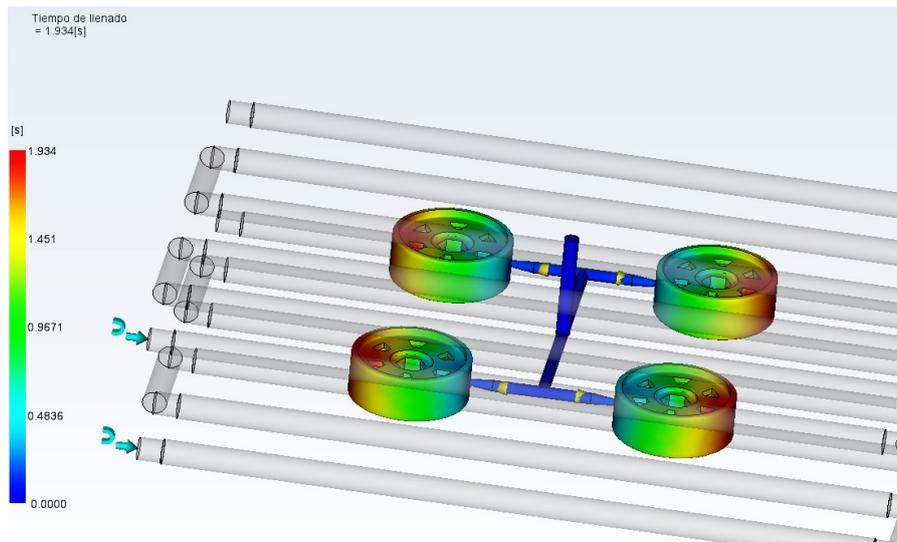


Figura 9: Tiempo de llenado

El tiempo de llenado es de 1,934 segundos, lo cual permitirá producir piezas con rapidez y un llenado de la cavidad de forma simultánea. Además se verifica que el flujo es correcto y que no hay partes sin llenar.

Por otra parte, no se dan zonas translucidas ni contornos desequilibrados, por lo que no surgirán indecisiones en el flujo.

Tabla 1: Datos de llenado

Tiempo real de llenado	1.93 (s)
Presión real de inyección	13.860 (MPa)
Área de fuerza de cierre	78.4603 (cm <sup>2</sup> )
Fuerza de cierre máx. durante el llenado	2.020 (tonelada)
Conmutación de velocidad/presión a % volumen	99.64 (%)
Conmutación de velocidad/presión en tiempo	1.93 (s)
Peso total de la pieza al final del llenado	57.259 (g)
Volumen de inyectada	71.6869 (cm <sup>3</sup> )
Volumen de la cavidad	66.1321 (cm <sup>3</sup> )
Volumen del sistema de canales	5.5548 (cm <sup>3</sup> )

### 3.3.2.2 Confianza de llenado

Este análisis nos permite identificar la probabilidad de llenado de la cavidad. Las zonas indicadas en amarillo muestran que el proceso resultará difícil de moldear o la calidad es inaceptable.

Para nuestra pieza el resultado obtenido es del 100% con lo cual no habrá problemas de llenado ni modificaciones en el proceso.

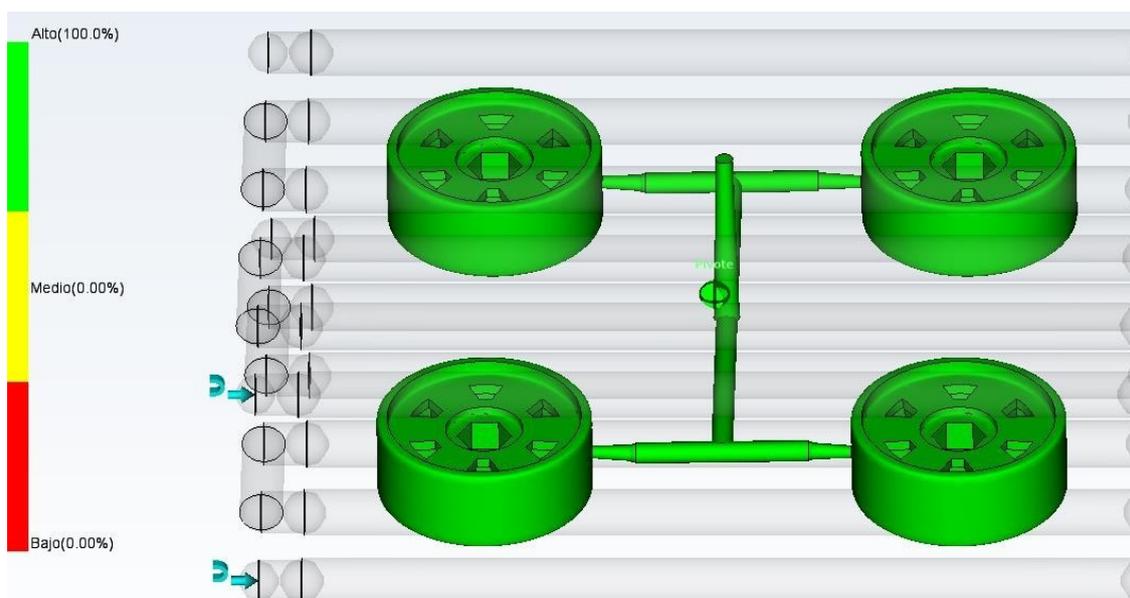


Figura 10: Confianza de llenado

### 3.3.2.3 Predicción de la calidad

Este resultado permite calcular la calidad de las propiedades mecánicas y la apariencia de la pieza.

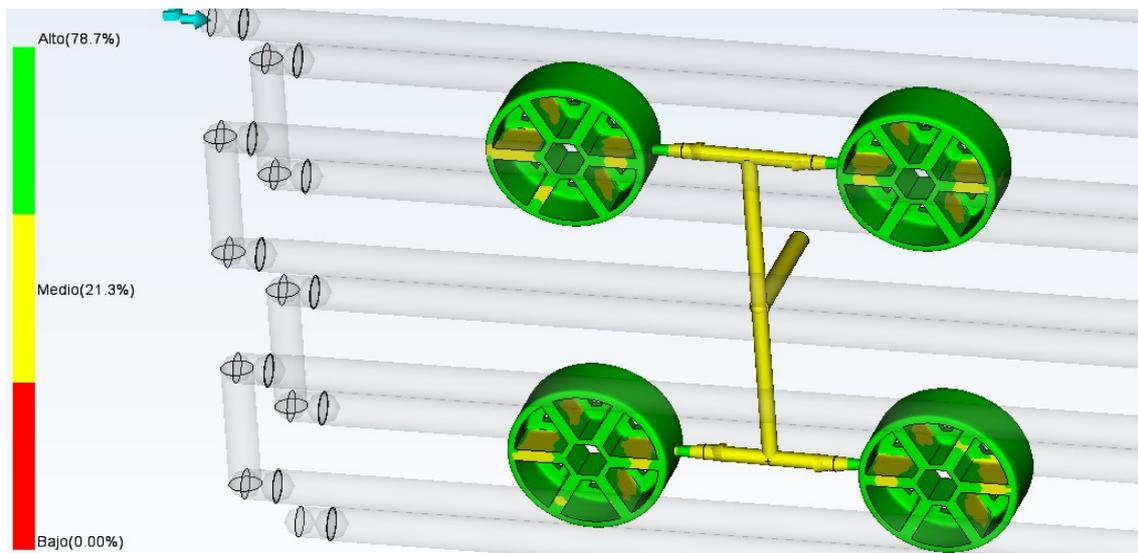


Figura 11: Predicción de la calidad

Se obtiene un nivel de calidad alta (78,7%), mientras que el 21,3% restante se divide entre el sistema de inyección y unas pequeñas partes dentro de la rueda. Esto último tiene sentido ya que son las zonas más difíciles de refrigerar y además serán las últimas en solidificar. Sin embargo, aún siendo zonas visibles y pequeñas, el resultado se da por válido.

#### 3.3.2.4 Presión

Se deberá diferenciar entre tres tipos de presión: caída o pérdida de presión, presión de llenado y presión de mantenimiento.

- La primera consiste en la presión necesaria que se debe superar para llenar la cavidad de forma exitosa. Es decir, es la dificultad que encuentra el material para llenar el molde. Si esta supera el 80% de la máxima presión de la máquina (180 MPa), se indicará con el color amarillo, que indica posibles problemas en el llenado o calidad. Si el color está en rojo quiere decir que se tendrán problemas de llenado o calidad. Para nuestro caso tiene sentido que cuanto más se aleje del punto de inyección, más costará llenar, por lo tanto se puede llegar a dar por bueno.

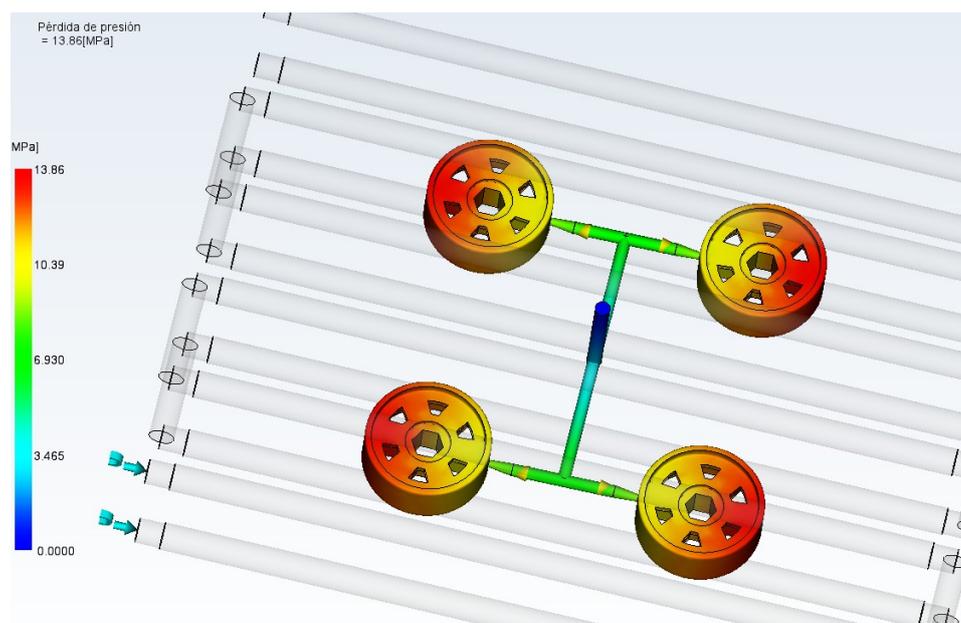


Figura 12: Caída de presión

- La presión de inyección va desde un valor máximo en las entradas hasta un valor nulo en las últimas zonas en llenar. El valor máximo para nuestro caso es de 13,86 MPa
- La presión de compactación consiste en la presión que permite compactar las piezas. El cambio entre la presión de inyección y esta última se llama conmutación. La función de esta presión es compensar las posibles contracciones de la pieza al enfriarse. Teniendo en cuenta que se ha programado una presión de compactación del 80% de la presión de inyección, se obtiene los siguientes resultados:

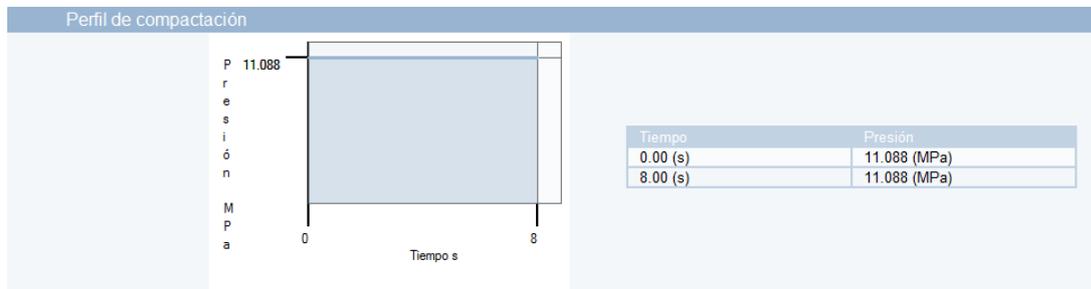


Figura 13: Presión de compactación

### 3.3.2.5 Rechupes

A continuación se muestran los resultados de este fenómeno visual y la profundidad de los mismos. Los rechupes máximos se obtienen en la parte que no va a ser visible de la pieza con un valor de 0,1222 mm (casi imperceptibles el ojo humano) y que además no supondrá problema alguno.

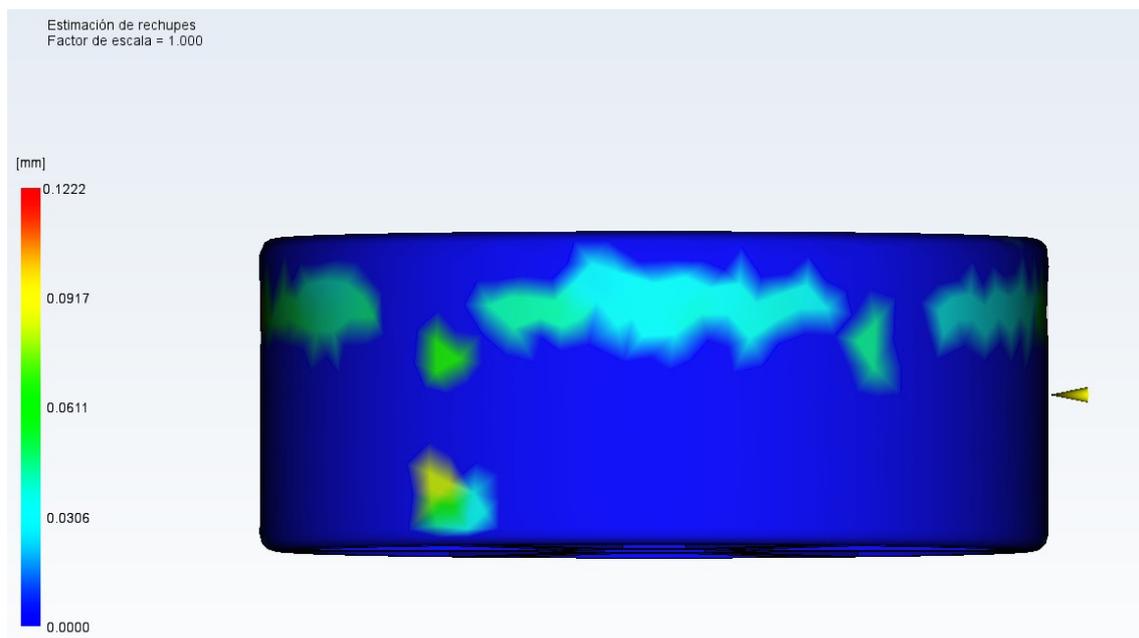


Figura 14.1: Rechupes

Sin embargo, la parte a analizar detenidamente es la banda de rodadura de la rueda, ya que es la que estará en contacto con el suelo y tendrá desgaste. Es cierto que hay una zona que alcanza el valor máximo e incluso zonas con 9 micras, pero en general no van a ser determinantes. Por otra parte, el porcentaje con propensión a rechupes es de un 3,11%, menor que el 10%, por lo tanto no suponen problema alguno en cuanto a diseño de pieza ni al proceso de fabricación.

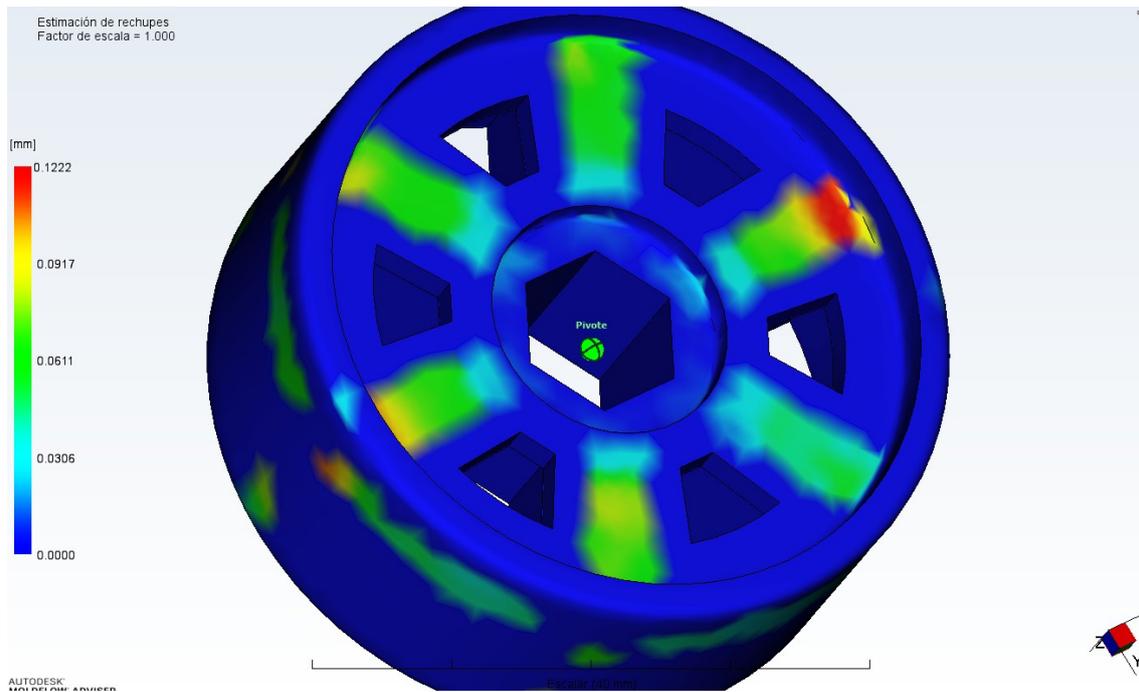


Figura 14.2: Rechupes

### 3.3.2.6 Atrapamientos de aire

Este fenómeno sucede cuando el flujo atrapa y comprime las burbujas de aire. Como consecuencia, produce agujeros o desperfectos superficiales, incluso llegando a degradar o quemar el material. En este caso el resultado es perfecto, obteniéndose piezas sin ningún atrapamiento de aire (en el caso de aparición de atrapamientos se verían pequeños círculos a lo largo de la pieza).

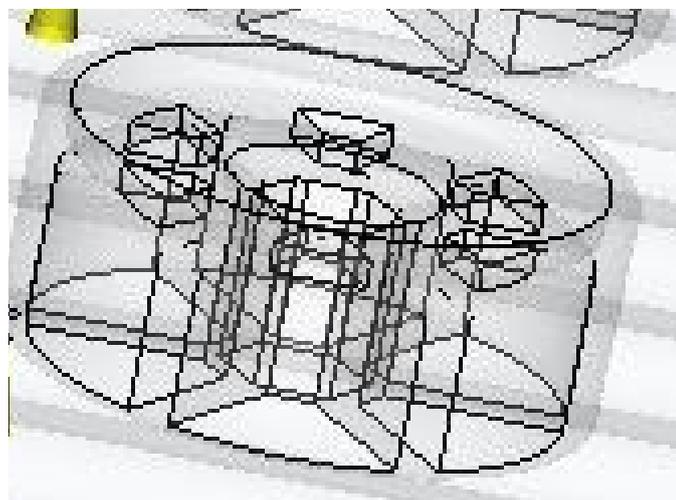


Figura 15: Atrapamientos de aire

### 3.3.2.7 $T^a$ en el frente de flujo

Es la temperatura a la que llega el flujo a un punto en específico. Emplea un intervalo de colores para indicar las regiones de menor temperatura (azul) hasta la región de mayor temperatura (rojo). Se recomienda que la variación de la temperatura del frente de flujo se encuentre entre 2-5 °C, ya que de sobrepasar este valor indicaría tiempo de llenado lento o zonas de indecisión.

Como se observa, la  $T^a$  se mantiene cercana a 191 °C a lo largo de la pieza. Hay zonas que son una excepción y marca una temperatura de alrededor de 186°C e incluso a bajar a 170°C. No obstante, teniendo en cuenta que la confianza de llenado era de un 100% y que estas zonas son relativamente pequeñas, este resultado se puede dar por válido.

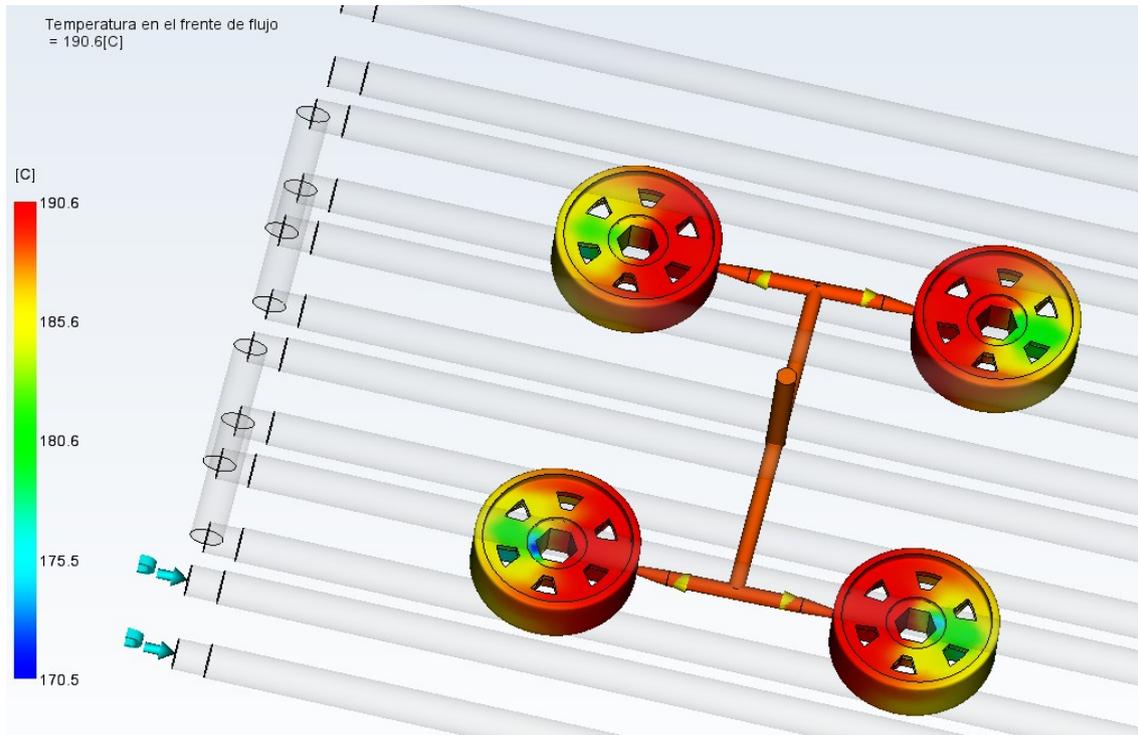


Figura 16:  $T^a$  en el frente de flujo

### 3.3.2.8 $T^a$ media

Consiste en la temperatura de la masa al final del llenado. Esta temperatura dependerá del tiempo, ubicación y espesor de la zona en cuestión. Aquellas zonas por donde pase el flujo hasta finalizar el llenado tendrán una temperatura media mayor.

La obtención de bajas temperaturas en zonas de bajo espesor puede llegar a producir indecisiones o inyectadas cortas. Por otra parte, temperaturas medias demasiado altas suponen posibilidad de defectos superficiales y degradación del material, por lo que se recomienda que la temperatura media esté siempre dentro del intervalo de temperaturas recomendado.

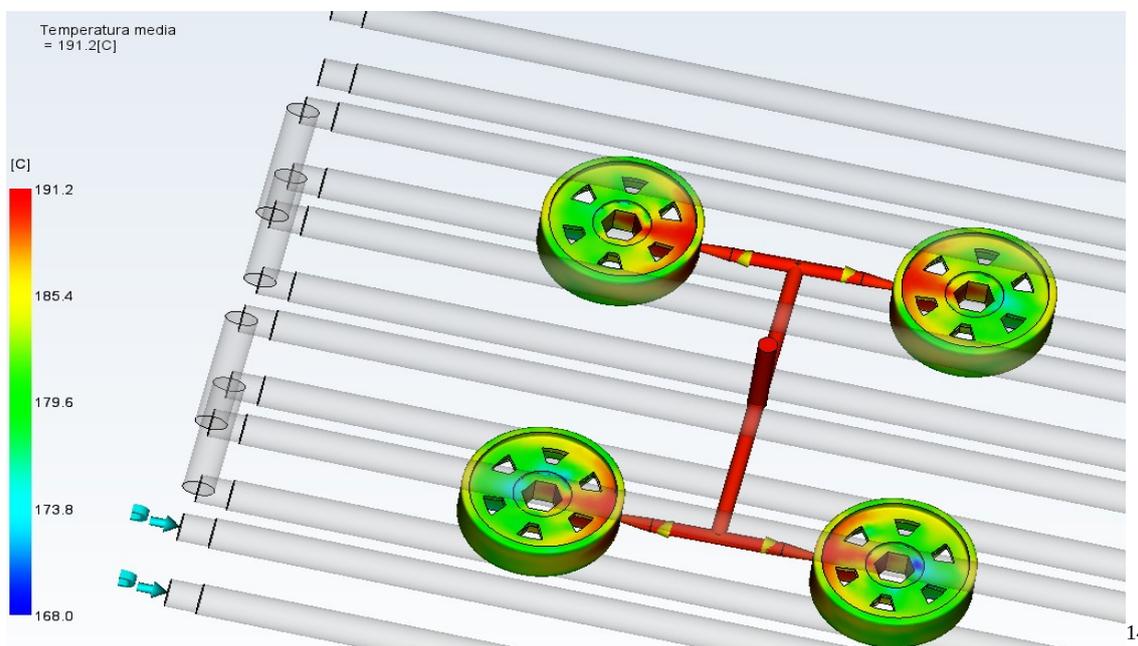


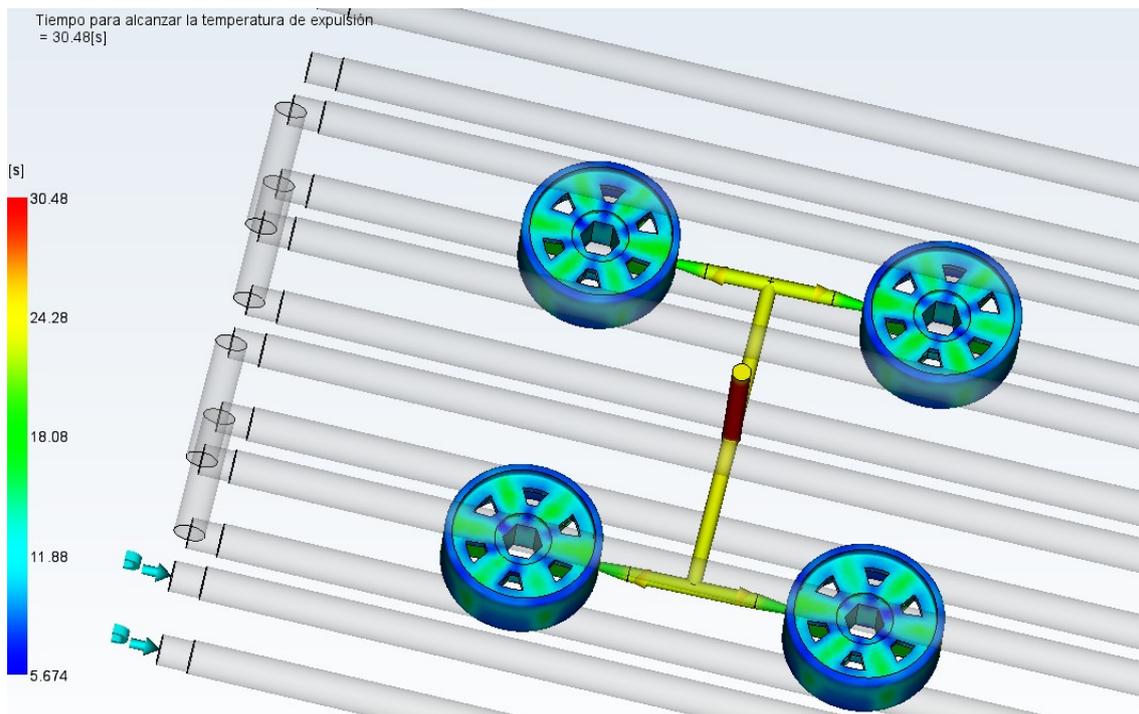
Figura 17:  $T^a$  media

Se puede observar que la temperatura media de la pieza se mantiene alrededor de 180-185 grados, llegando a una máxima temperatura de 191°C cerca de la zona de inyección, con lo cual el resultados son correctos.

### 3.3.2.9 Tiempo para alcanzar la $T^a$ de expulsión

Se considera desde el inicio del llenado. La pieza idealmente debe solidificarse de manera uniforme. Aquellas zonas que requieran más tiempo para enfriarse se podrían expulsar antes de solidificarse. Si la entrada ha solidificado demasiado pronto, las regiones delgadas solidificarán antes que las gruesas no compactando correctamente.

Para este caso, se obtiene unos resultados correctos, exceptuando en las zonas interiores de la rueda que tardarán más en solidificar y podrían ser expulsadas sin haber solidificado por completo.



Figuras 18 y 19: Tiempo para alcanzar temperatura de expulsión

### 3.3.2.10 Fracción capa solidificada al final del llenado

Este factor indica el porcentaje que se solidifica al final del llenado. La resistencia de flujo es dependiente de este factor, ya que a mayor capa solidificada mayor viscosidad, aumentando la resistencia de flujo.

Las regiones con tránsito de flujo durante la inyección no deben superar una fracción del 25%. Por otro lado, las regiones por las que el flujo no transite tendrán mayores valores de fracción de capa solidificada. La región del punto de inyección y las zonas más alejadas últimas en solidificar.

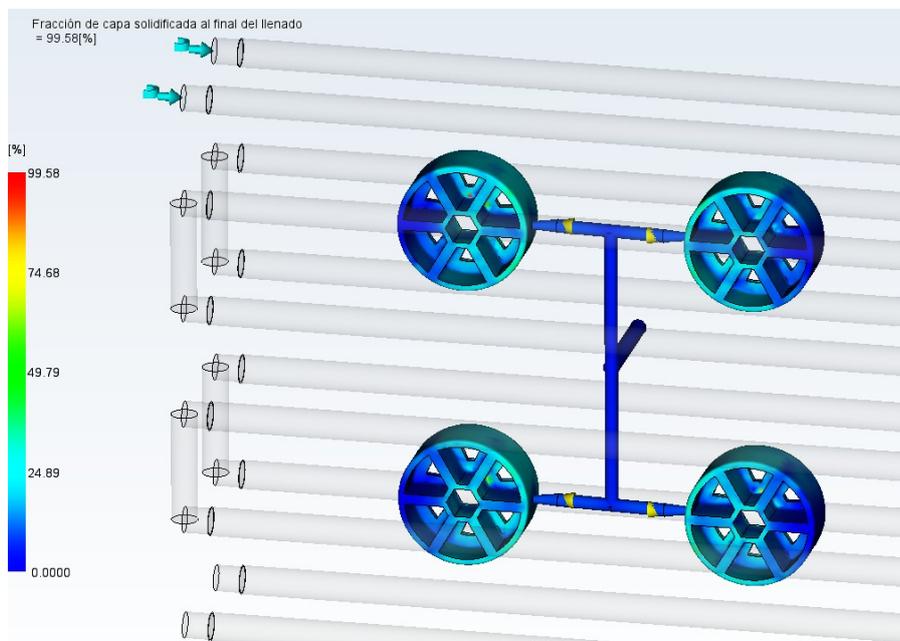
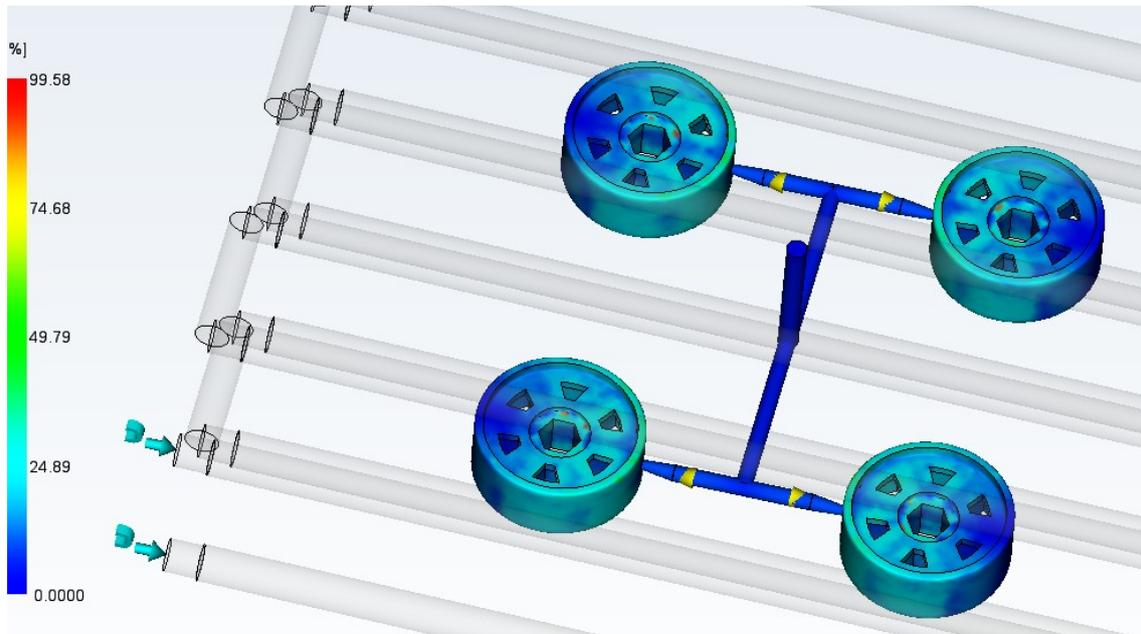


Figura 20 y 21: Fracción capa solidificada al final del llenado

Como ya se ha dicho anteriormente, tanto la zona del punto de inyección como las últimas en solidificar tendrán un valor de cero. Por otra parte, las zonas de tránsito de flujo no superan el 25% exceptuando una pequeña región en verde en el borde superior (Imagen 20) que tiene un valor del 35-40%. Por otra parte, hay unos pequeños puntos en rojo que superan también el 25%, pero que no supondrán ningún problema ya que son puntos aislados. Con todo esto se da por válido estos resultados y el material podrá fluir sin problema.

### 3.3.2.11 Líneas de soldadura

Consiste en el ángulo que se forma cuando dos flujos diferentes convergen. Estas líneas en concreto se formarán cuando dicho ángulo sea menor a 135°. Suponen un defecto visual y fragilidad estructural.

La resistencia de una línea de soldadura depende de la temperatura de formación y de la presión que se ejerce cuando la pieza solidifica. Por lo tanto, estas líneas deben producirse a temperaturas cercanas a la de inyección, pudiendo descender hasta un máximo de 20°C. Para poder comparar dichas temperaturas, se ha utilizado las temperaturas en el frente de flujo analizadas anteriormente. La temperatura a la que se inyecta es de 188 °C y las líneas de soldadura se producen a una temperatura mínima de 170 °C, por lo que se producirá una buena soldadura.

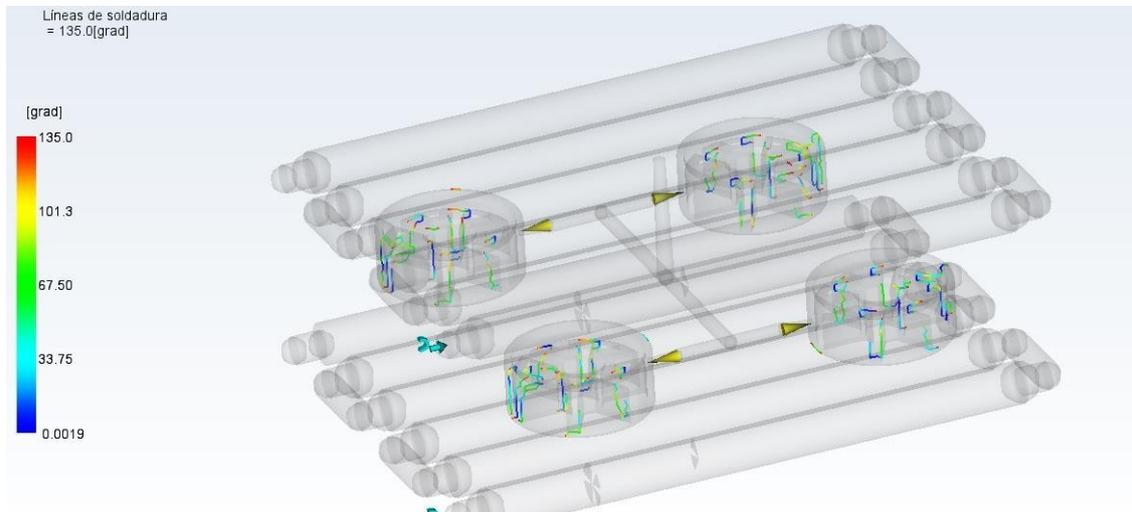


Figura 22: Líneas de soldadura

### 3.3.3 Análisis de refrigeración

### 3.3.3.1 Temperatura líquido refrigerante

Se establece que la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida de refrigerante no supere los 2-3°C, ya que supondría una refrigeración deficiente.

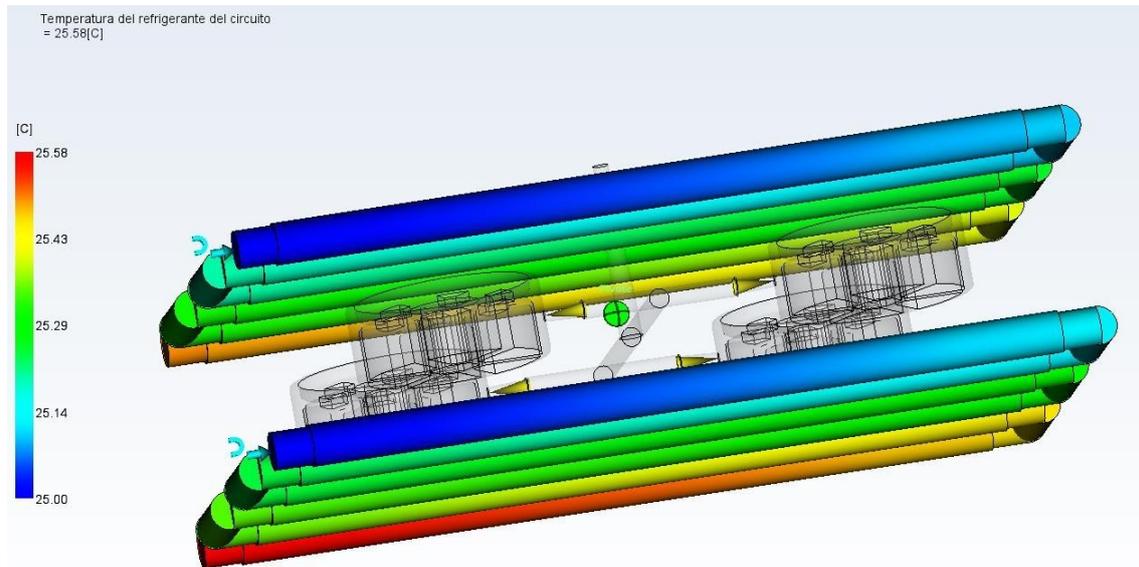


Figura 23: Tª refrigerante

Como se puede observar, dicha diferencia en el circuito superior es de 0,58 °C y en el inferior de 0,43 °C, por lo tanto se logra un valor correcto.

### 3.3.3.2 Caudal del refrigerante

El caudal debe ser el mínimo para garantizar un número de Reynolds en concreto. Para nuestro caso, se desea un n.º de Reynolds de 15000 para asegurar un flujo de régimen turbulento. El caudal calculado para un canal de 11 mm de diámetro es de 6 l/min.

### 3.3.3.3 N.º de Reynolds del circuito

El n.º de Reynolds aumentará a medida que se disminuya la sección del canal. Como ya se ha mencionado anteriormente, el objetivo a alcanzar es de 15000 y como se observa se obtiene un resultado correcto.

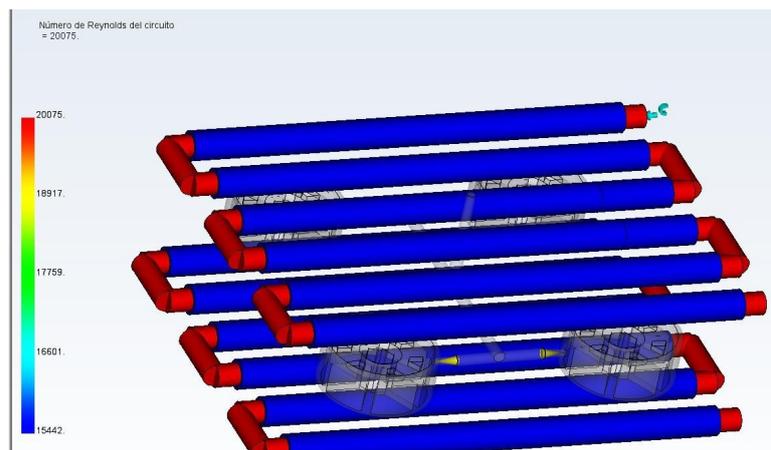
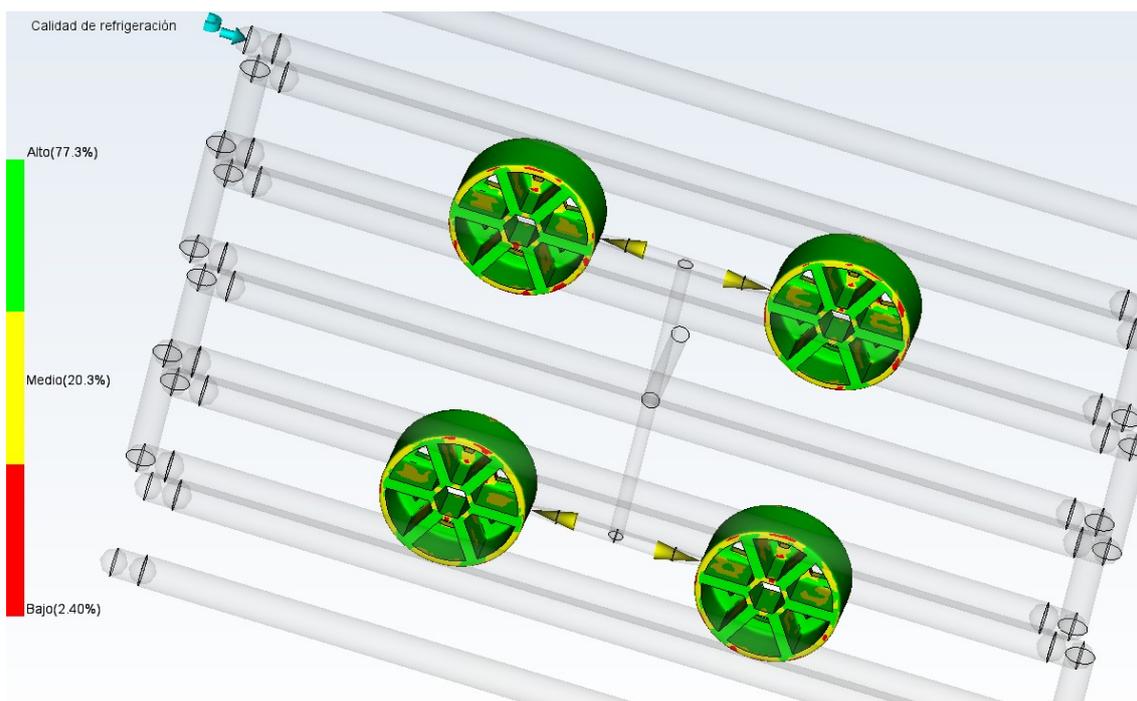
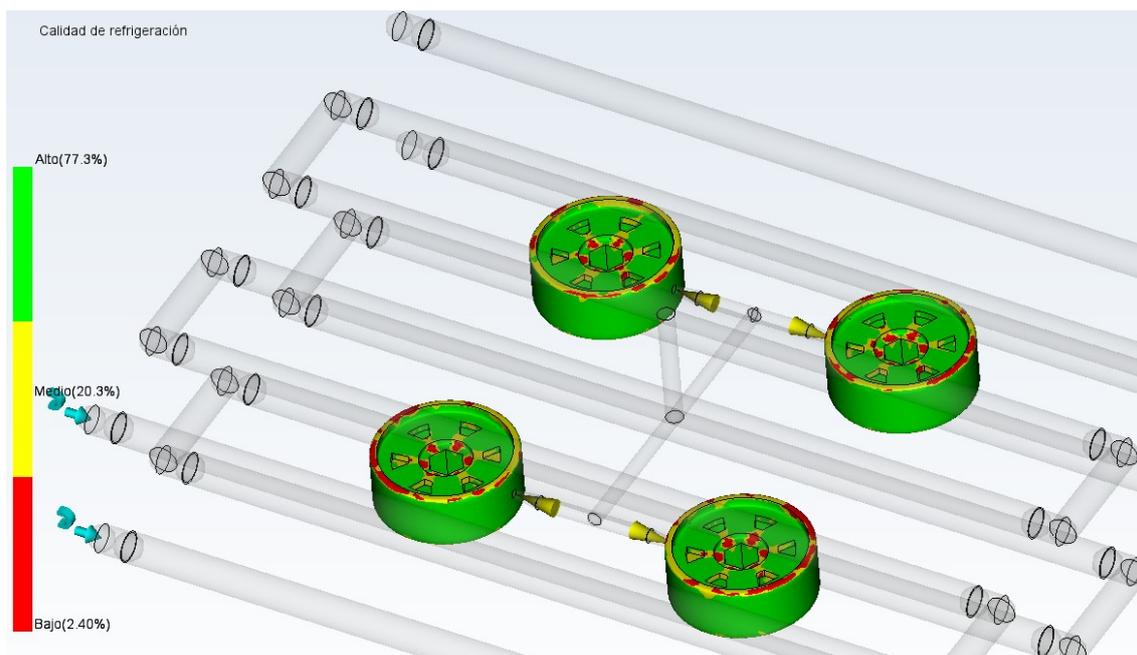


Figura 24: N.º Reynolds

### 3.3.3.4 Calidad de refrigeración

Este apartado muestra la adecuada refrigeración o no de la pieza.



Figuras 25 y 26: Calidad de refrigeración

Las calidades tanto medias como bajas se deben a varianzas de temperaturas demasiado bajas o altas y varianzas de tiempo de refrigeración más cortas o largas que el tiempo de solidificación medio, produciendo defectos visuales, inyectadas cortas y deformaciones. Sin embargo, si estas zonas son zonas no vistas y superficies mínimas se podrá tomar por bueno el resultado.

Tabla 2: Datos de las varianzas

Varianza de temperatura máxima	10,61 °C
Varianza de temperatura mínima	-8,199°C
Varianza de tiempo de refrigeración máxima	8,483 s
Varianza de tiempo de refrigeración mínima	-6,876 s

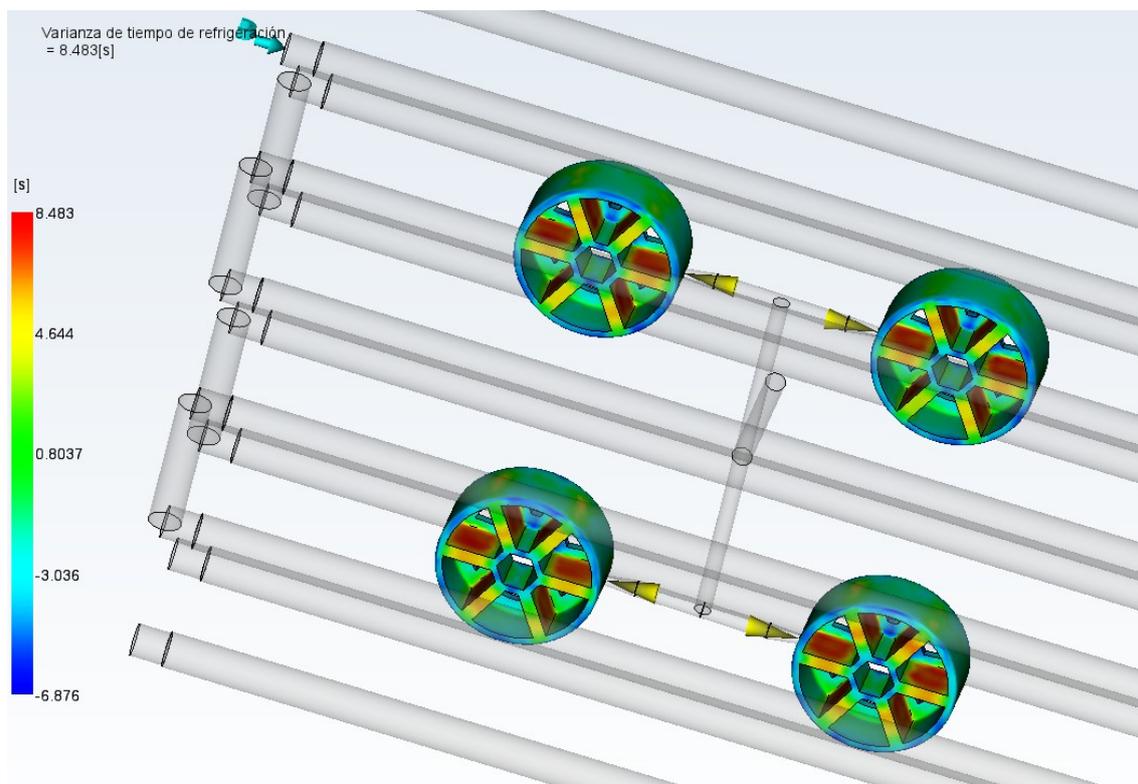
El resultado del análisis es muy bueno, a pesar de tener zonas amarillas (en los bordes de la rueda y en la zona interior de la rueda, como ya se había citado anteriormente) y pequeñas regiones rojas. No obstante y como una parte de la rueda no estará al a vista (Imagen 25), el resultado se da por bueno.

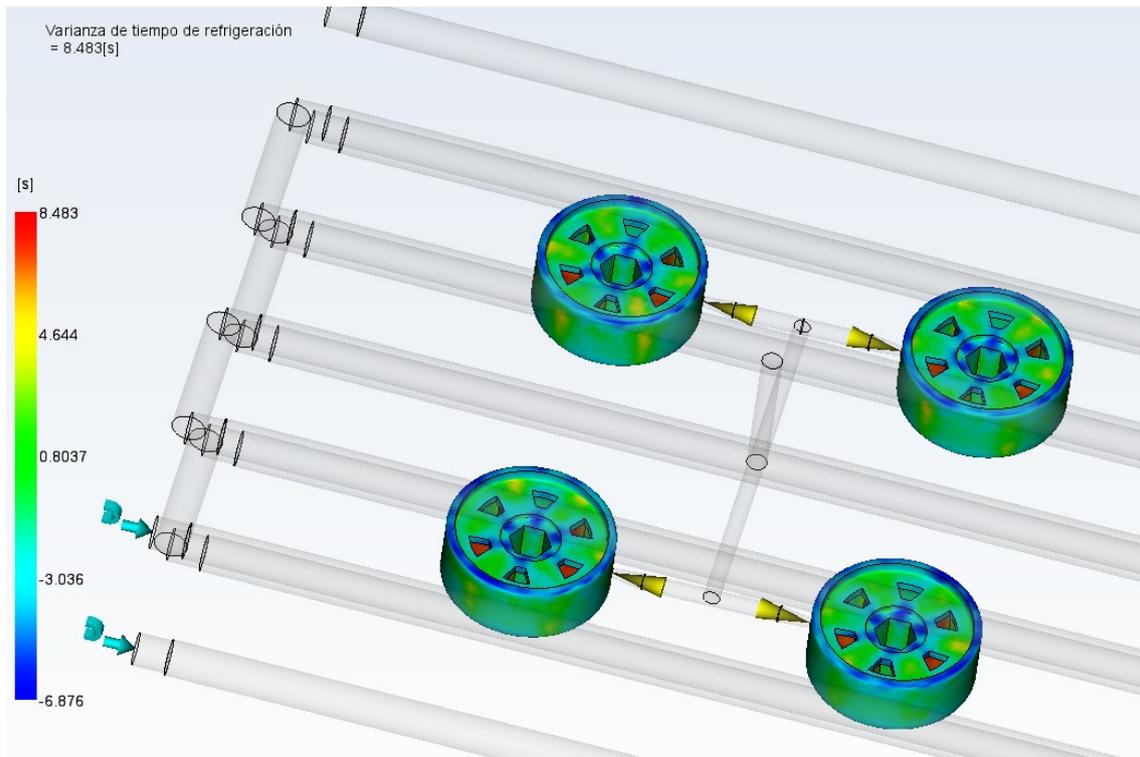
### 3.3.3.5 Varianza de tiempo de refrigeración

Consiste en el tiempo necesario para que una zona solidifique con respecto al tiempo medio. Se debe emplear junto al análisis de varianza de temperatura para decidir rediseñar el sistema de refrigeración.

En rojo se indicará la zonas que necesitan una mayor refrigeración (o tardan más en solidificar) y en azul aquellas zonas demasiado refrigeradas.

Los resultados son los que se esperaban: las zonas rojas dentro de la pieza en las paredes del interior y amarillo en la parte externa de la rueda (Imagen 27). Además, también habrá pequeñas zonas amarillas en la otra parte de la rueda (puede deberse a la profundidad del agujero) y en pequeñas zonas de la rodadura. (Imagen 28). Sin embargo, se obtiene un enfriamiento bastante homogéneo a lo largo de la pieza, dándose por válido el resultado.



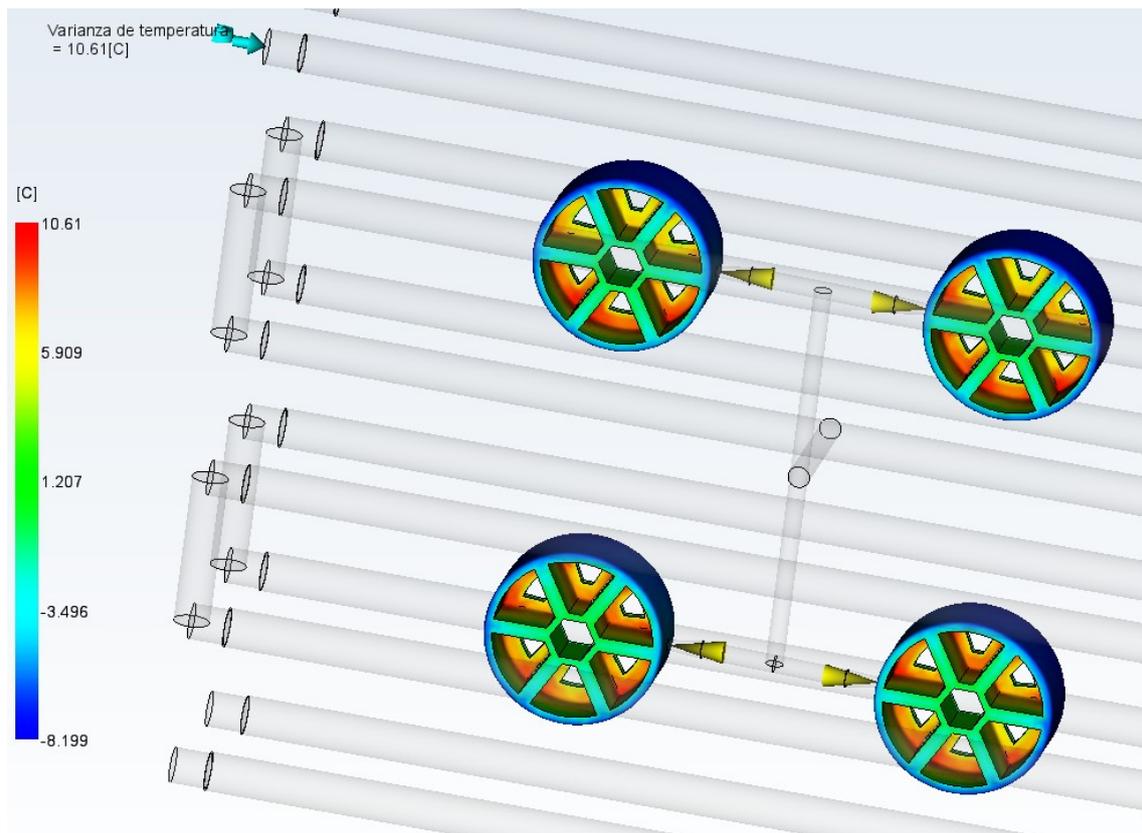
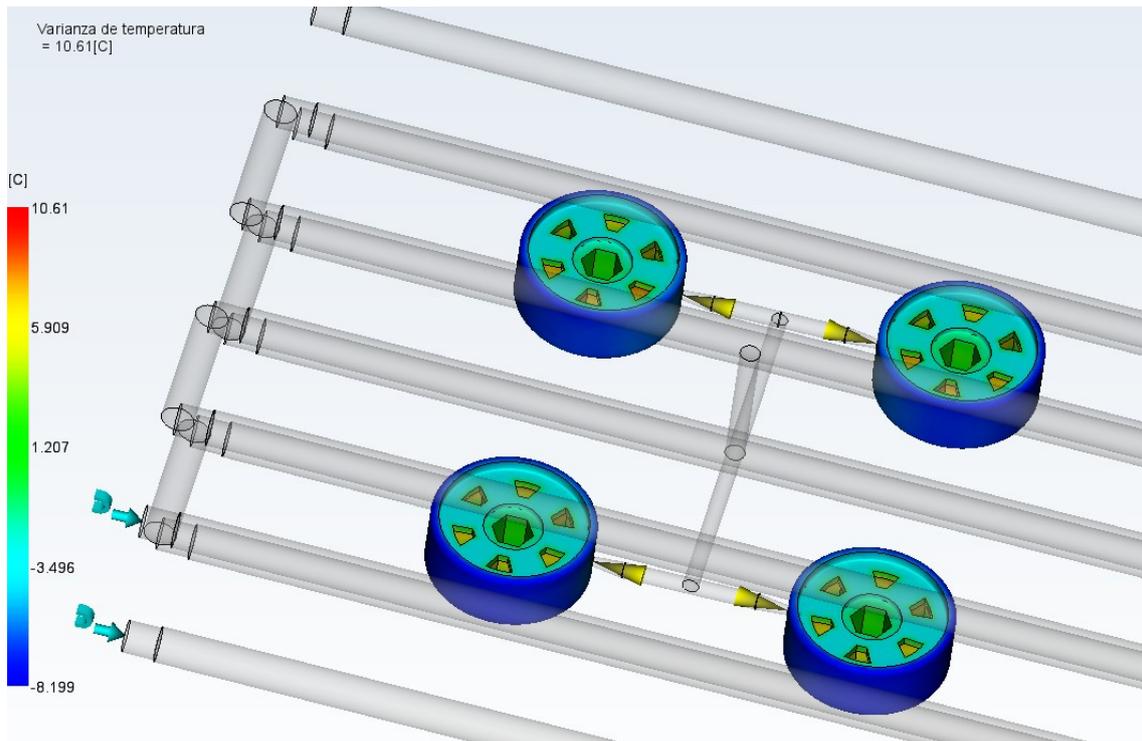


Figuras 27 y 28: Varianza  $t_{\text{refrigeración}}$

### 3.3.3.6 Varianza de temperatura

Se marcan las zonas donde la temperatura de la superficie es diferente a la temperatura media al final del ciclo. Aquellas zonas con mayor grosor tendrán una temperatura mayor en su núcleo, siendo la diferencia de temperaturas mayor.

Este resultado se debe analizar al mismo tiempo que se analiza la varianza de tiempo de refrigeración.

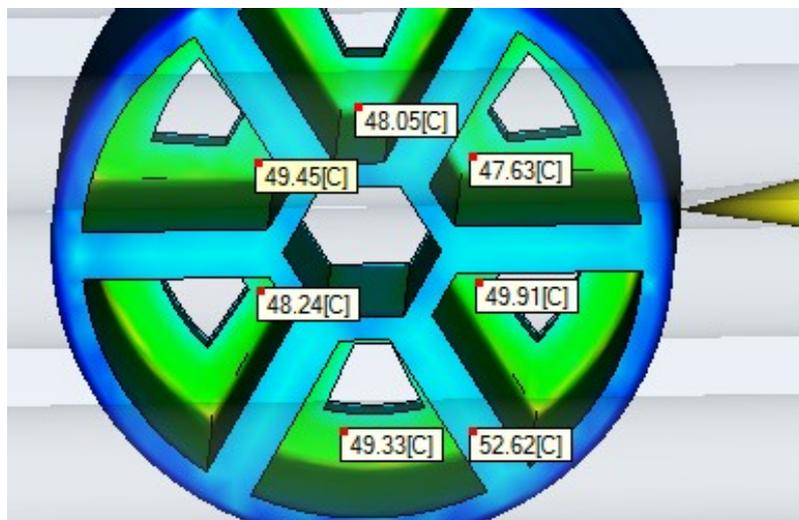
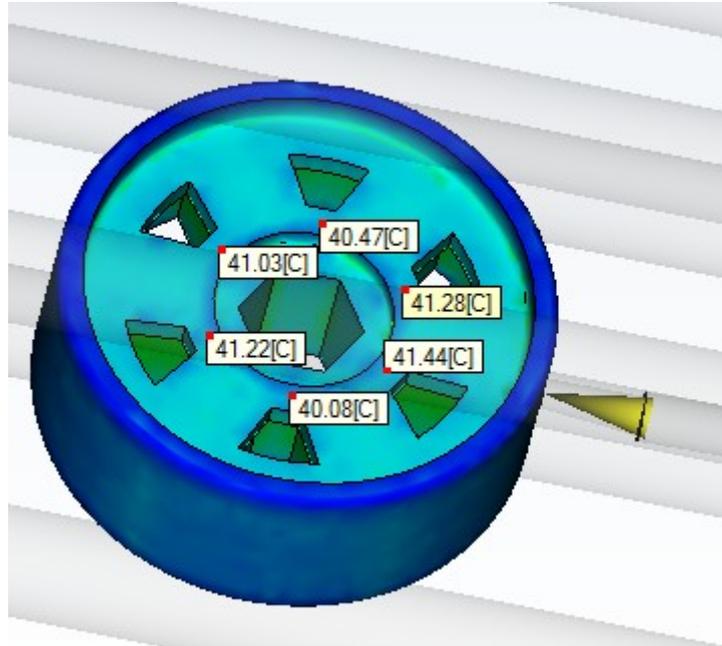


Figuras 29 y 30: Varianza temperatura

### 3.3.3.7 Temperatura, pieza

Muestra la temperatura media en el contorno de la pieza. Esto servirá para identificar zonas frías y calientes, las cuales necesitarán un rediseño del sistema de refrigeración.

Se recomienda que la diferencia entre la cara positiva y negativa de la pieza no supere la diferencia de  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ . Además, el la  $T^{\text{a}}$ , pieza máxima no debe superar la  $T^{\text{a}}$  de la entrada en más de  $10\text{-}20^{\circ}\text{C}$ ,



Figuras 31 y 32: Temperatura , pieza

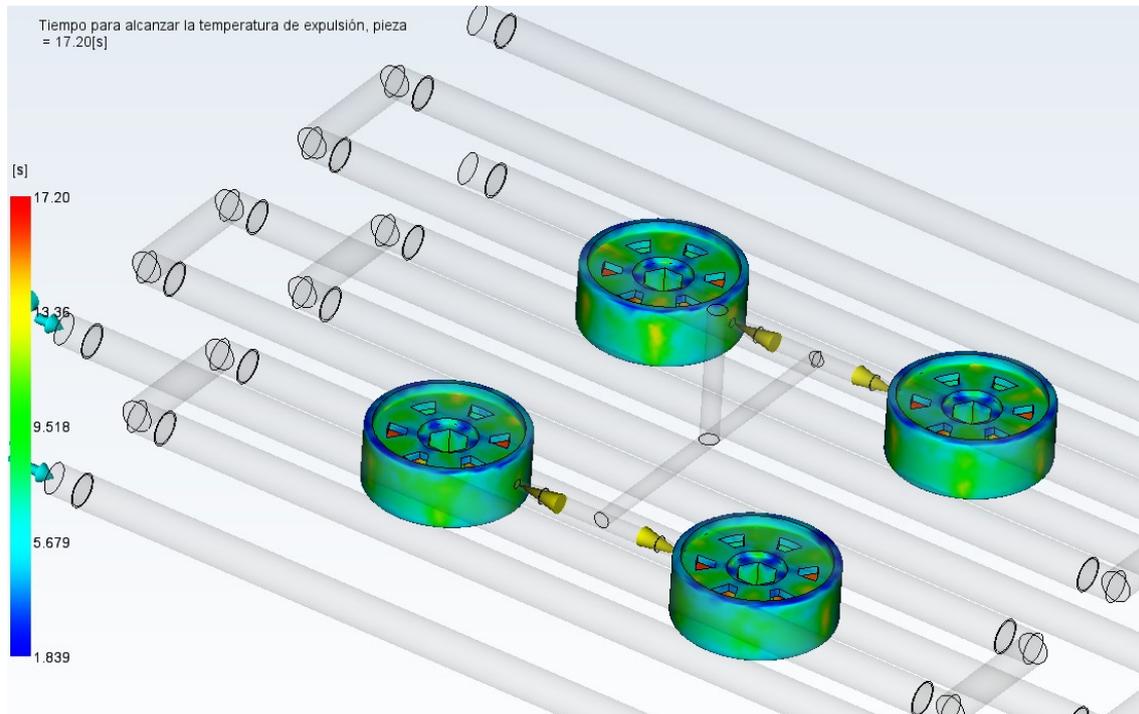
Tabla 3: Datos de  $T^{\text{a}}$ , pieza

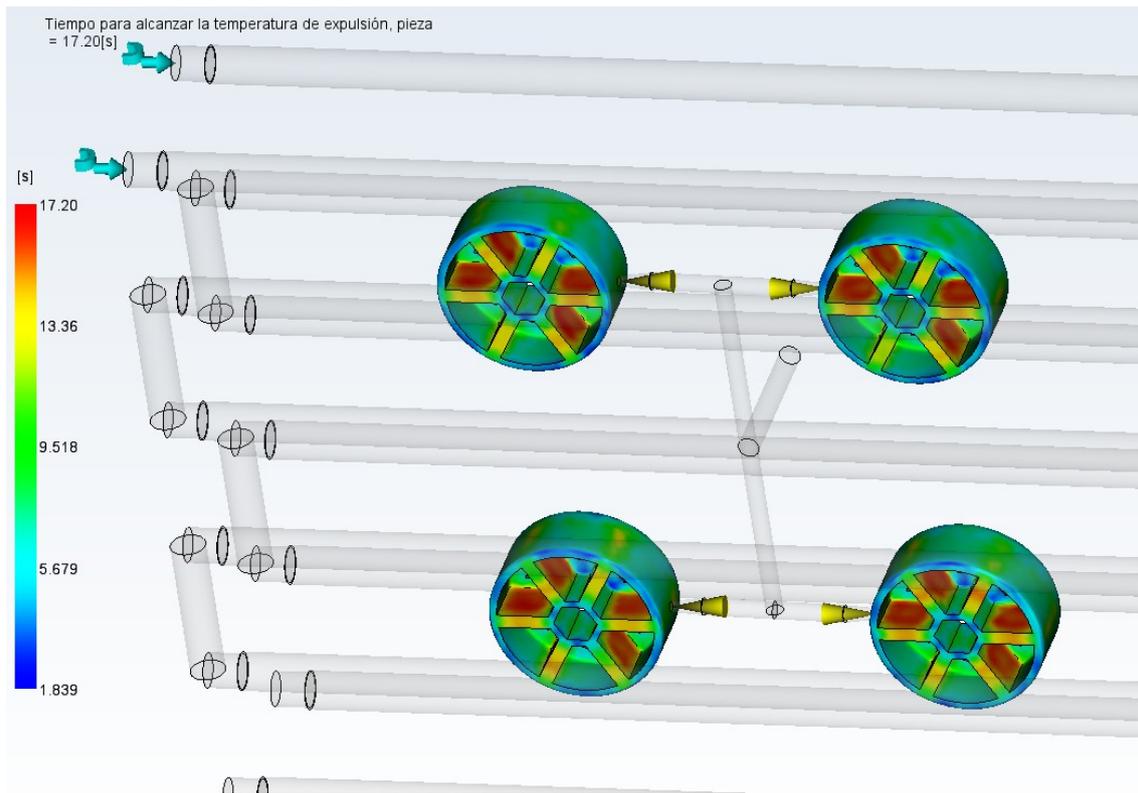
Temperatura máxima, pieza	77.1 (C)
Temperatura mínima, pieza	33.7 (C)
Temperatura media, pieza	45.5 (C)
Temperatura exterior del molde	25.6 (C)
Tiempo del ciclo	20.00 (s)
Porcentaje solidificado (al final del ciclo)	91.12 (%)

Se puede observar que esa diferencia de más menos 10 grados se cumple a lo largo de la pieza, exceptuando algunos puntos. Por otra parte, la temperatura de la entrada es de 47 °C y la temperatura máxima es de 77 °C, superándose por 10 grados la diferencia de 10-20 °C. No obstante, al darse esta temperatura en un punto muy concreto de la pieza (en la esquina del interior de la rueda), no supondrá problema alguno.

### 3.3.3.8 Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, pieza

Las regiones en rojo indicarán zonas calientes o de mayor espesor y las zonas azules representarán las zonas frías o de bajo espesor.





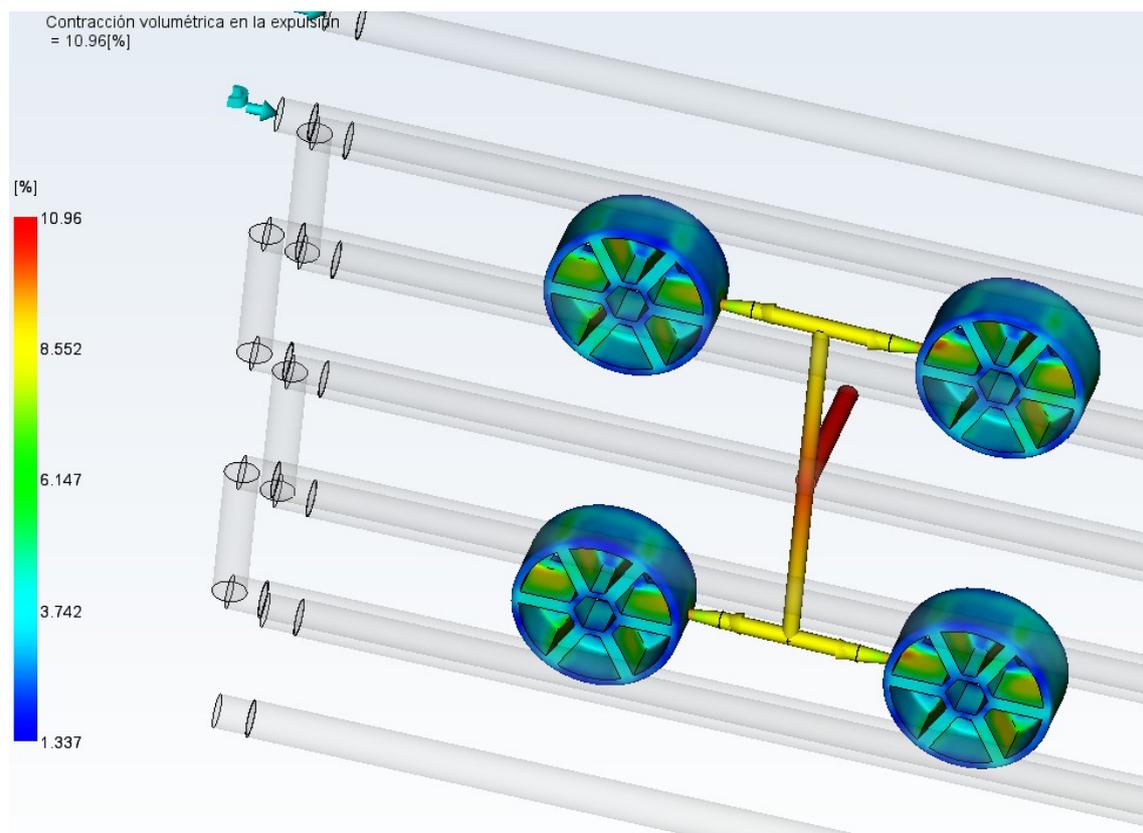
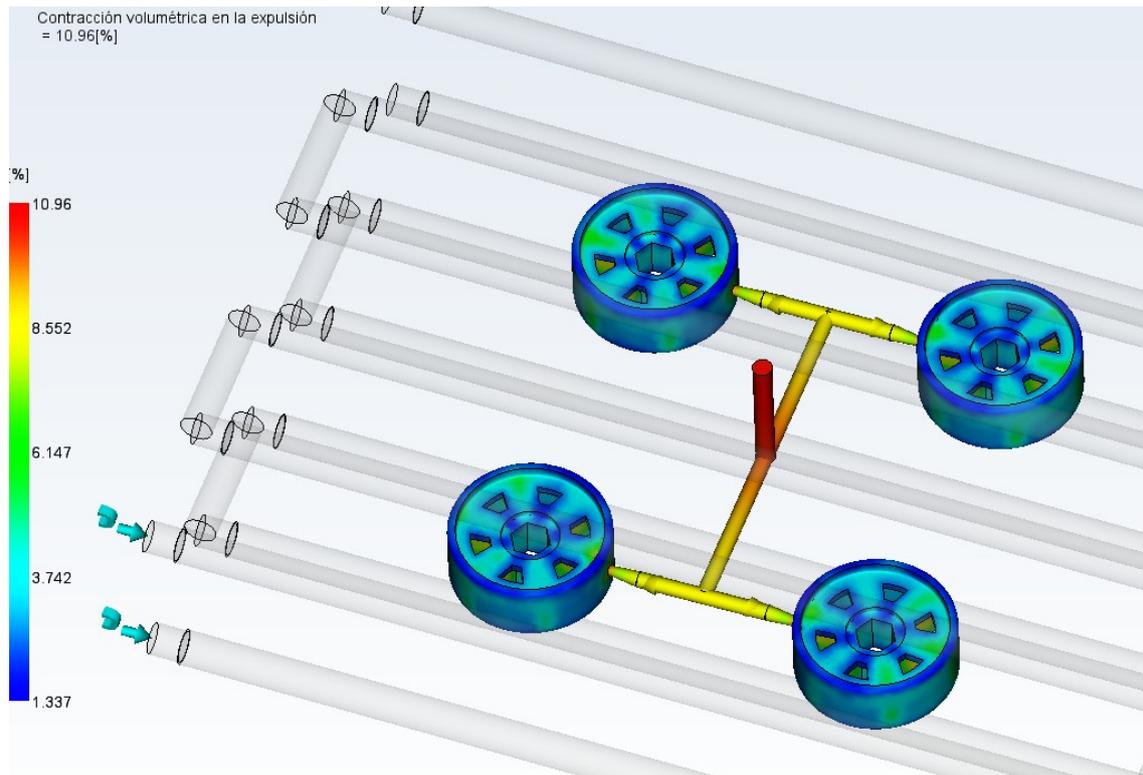
Figuras 33 y 34: Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, pieza

El resultado es equilibrado, exceptuando aquellas zonas que ya se han mencionado anteriormente (Imagen 34).

### 3.3.3.9 Contracción volumétrica en la expulsión

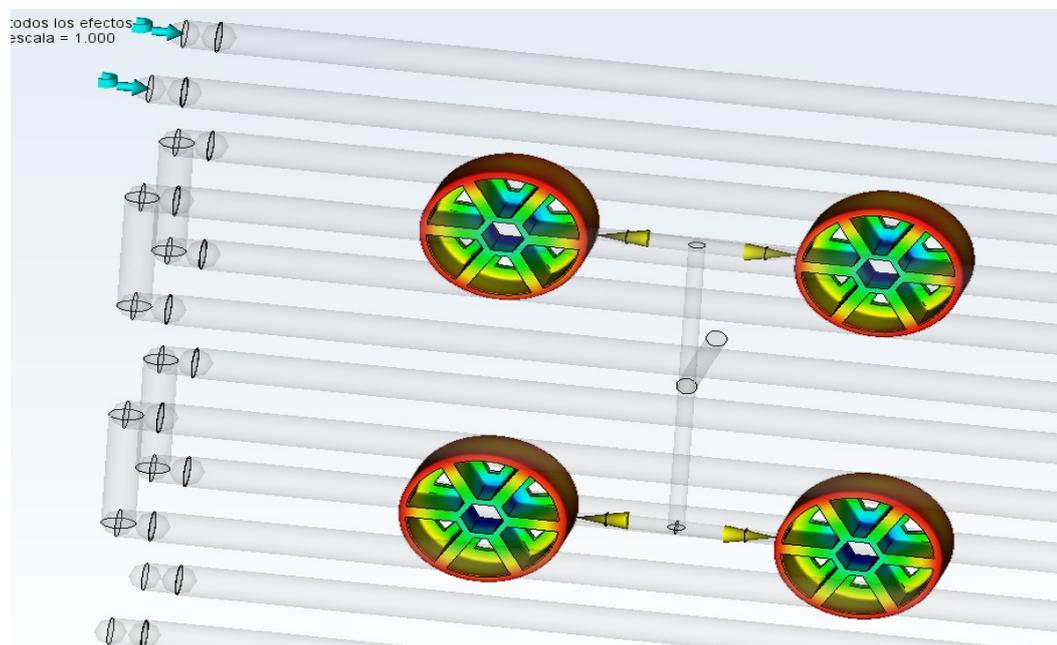
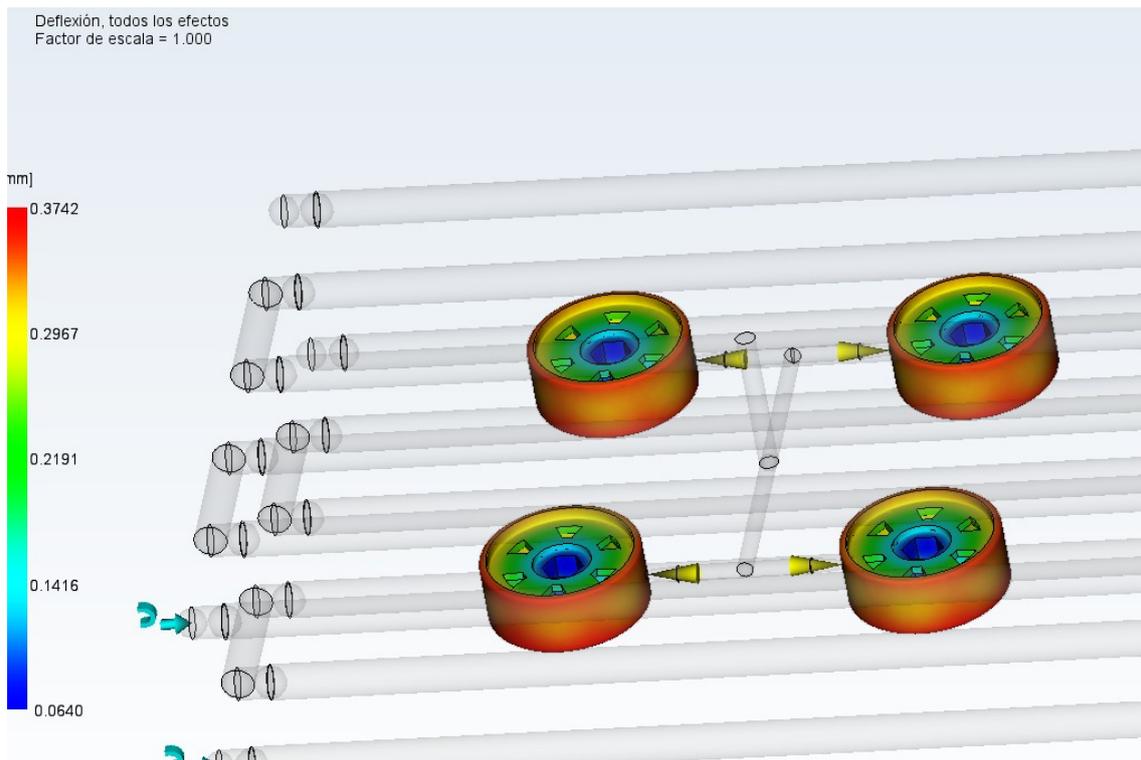
Consiste en la disminución de volumen desde el final de la refrigeración hasta alcanzar la temperatura ambiente. Lo más recomendable es obtener valores uniformes a lo largo de la pieza para una correcta compactación. Valores elevados producirían deformaciones, vacío o rechupes. Las zonas de mayor espesor tenderán a tener una mayor contracción, por lo que se deberá observar estas zonas en el análisis de rechupe.

Las zonas de mayor grosor son las que obtienen una mayor contracción y se tendrá que revisar el análisis de rechupes en estas zonas. Por otra parte, como la contracción máxima en la pieza es de 9% y gran parte de la pieza tiene una contracción parecida, se da por bueno el resultado de la compactación.



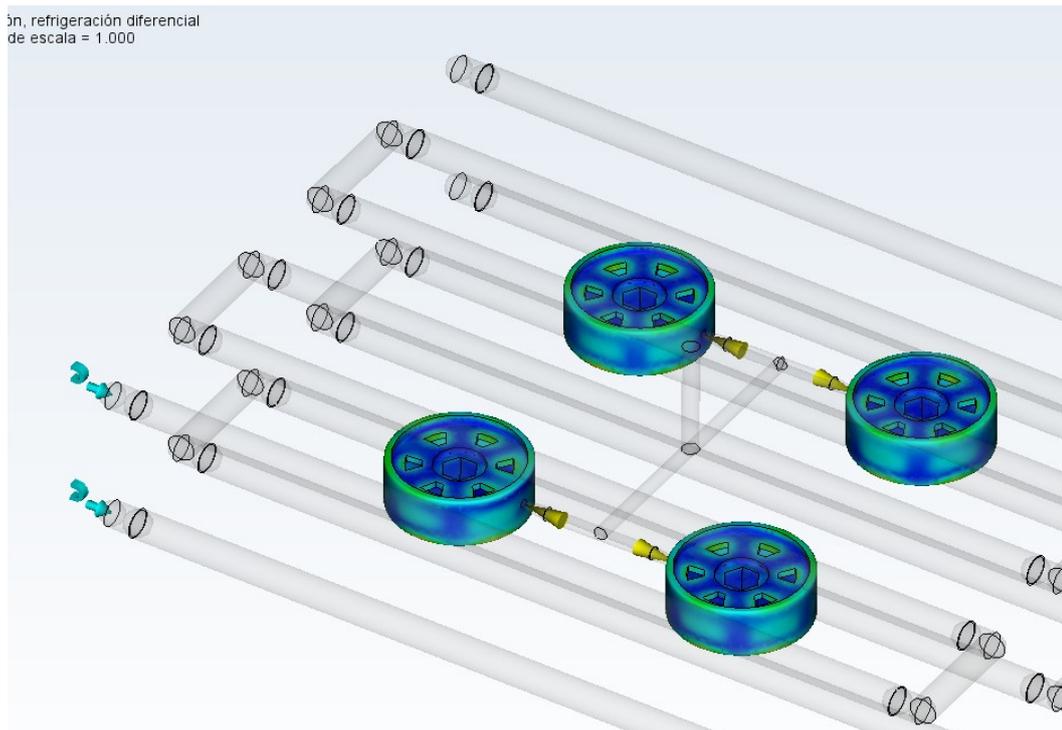
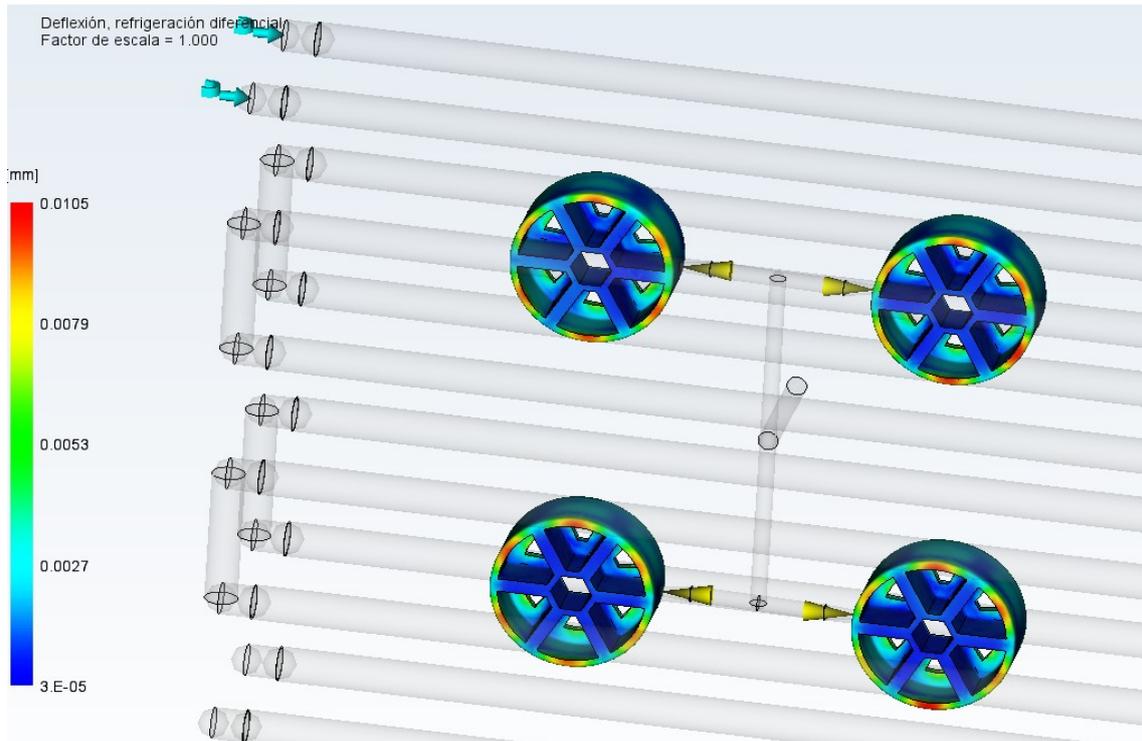
Figuras 35 y 36: Contracción

### 3.3.3.10 Deformaciones

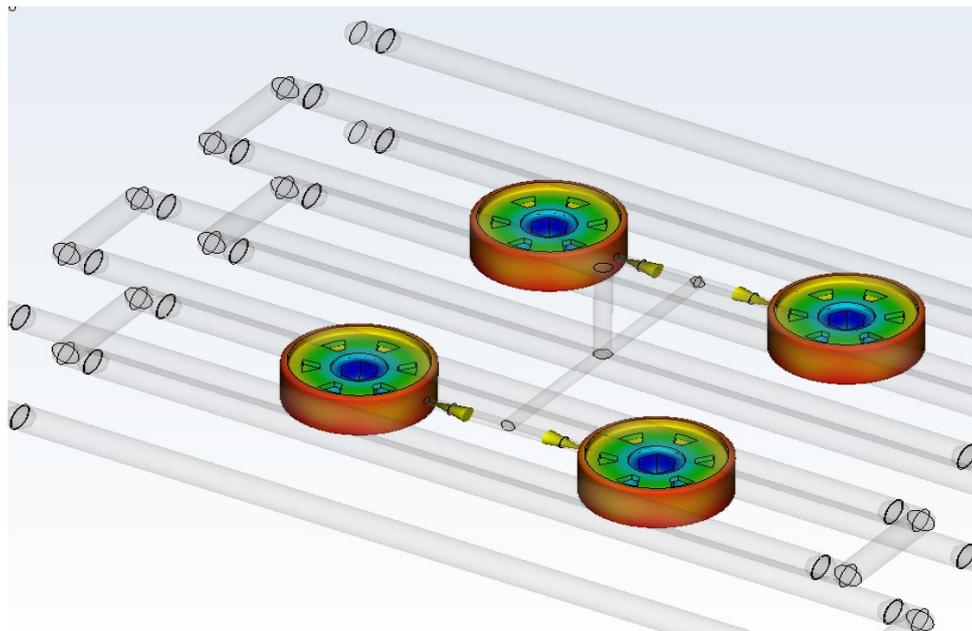
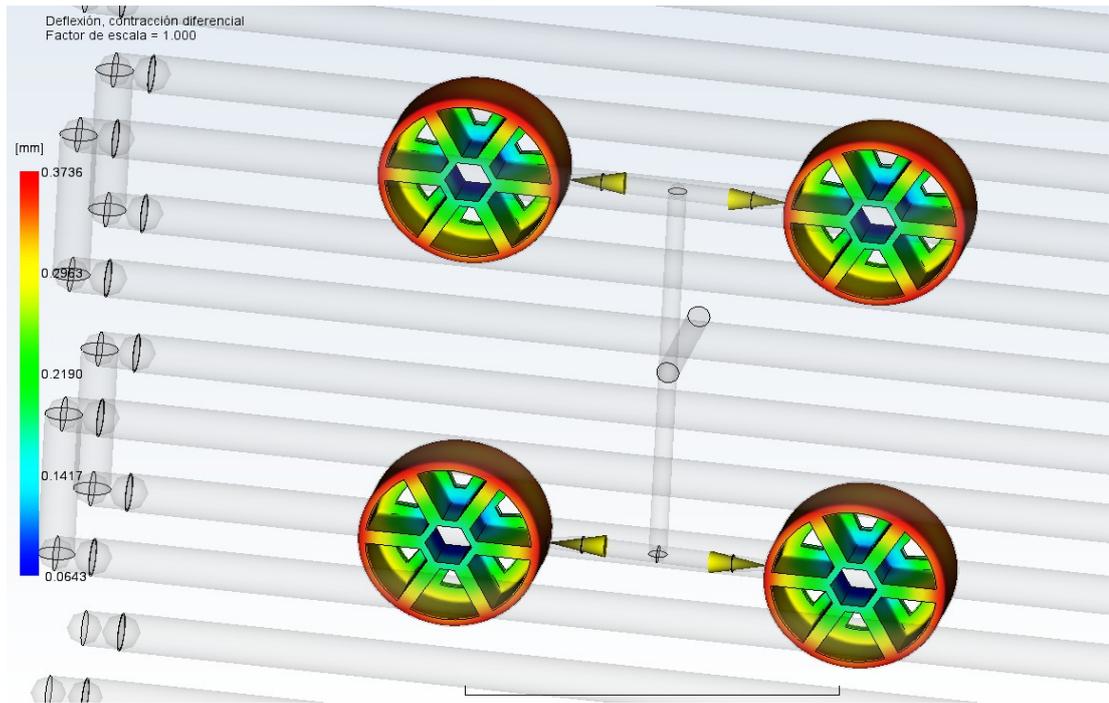


Figuras 37 y 38: Deflexión, todos los efectos

En estas imágenes se muestra como la pieza tiende a contraerse. Según nos vamos alejando del centro de la pieza, tiende a contraerse más, desde un valor de 0.06 mm hasta 0.37 mm en la banda de rodadura.



Figuras 39 y 40: Deflexión, refrigeración diferencial



Figuras 41 y 42: Deflexión, contracción diferencial

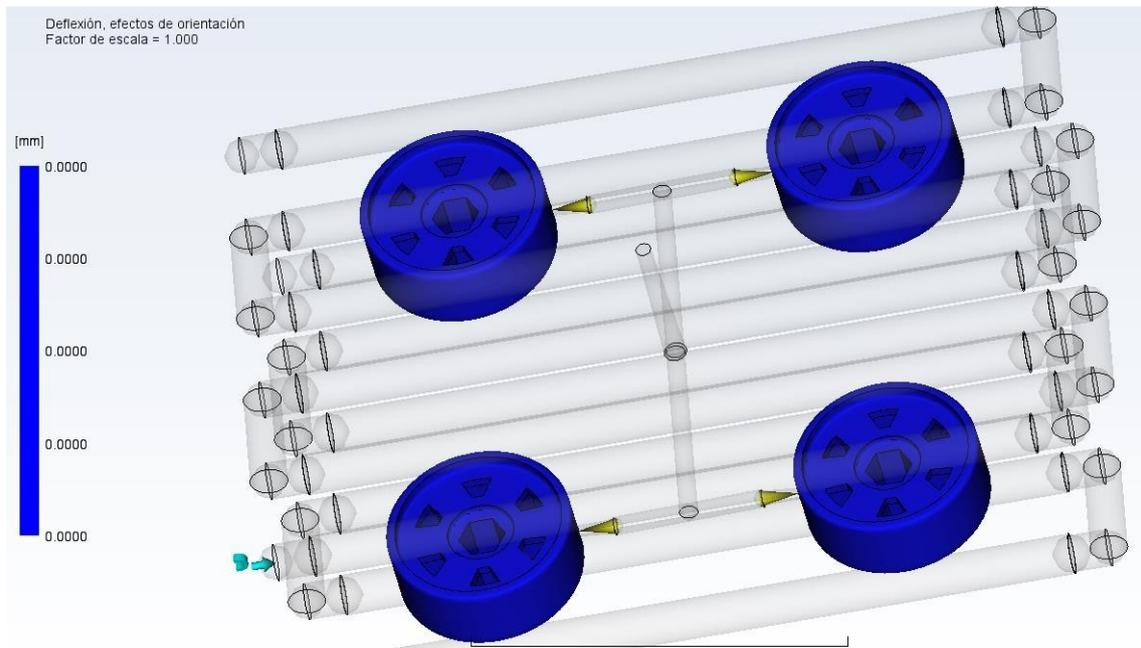


Figura 43: Deflexión, efectos de orientación

Las deflexiones se darán principalmente por la contracción en la pieza y en una muy pequeña medida por la refrigeración. Por otro lado, los efectos de orientación no supondrán problema alguno.

### 3.3.4 Análisis de compactación

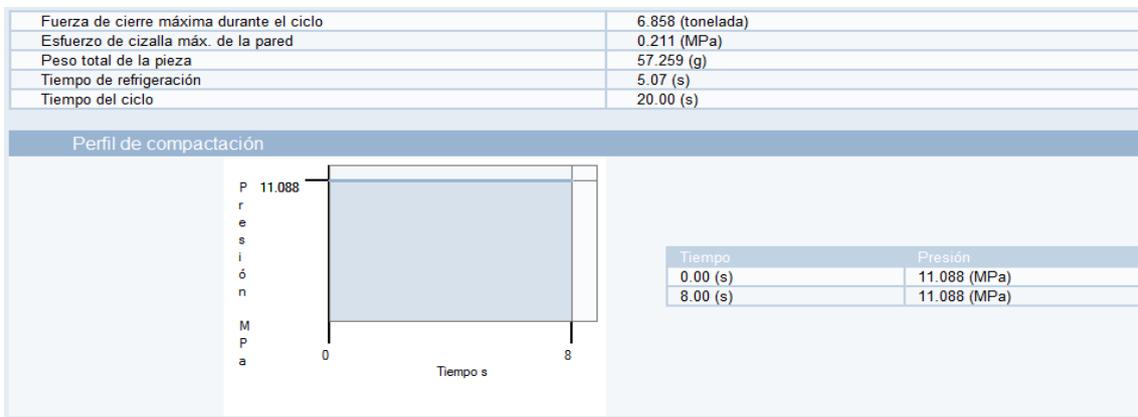


Figura 44: Datos compactación

Aquí se obtienen datos importantes como el tiempo de refrigeración, tiempo de ciclo, fuerza de cierre máxima y presión de compactación. Además se observa que el esfuerzo de cizalla obtenido es de 0,21 Mpa que es inferior a 0,25 Mpa que permitía el material.



Figura 45: Tiempo de ciclo

## 3.4 Características del molde

### 3.4.1 Línea de partición y tamaño portacavidades y portanúcleos

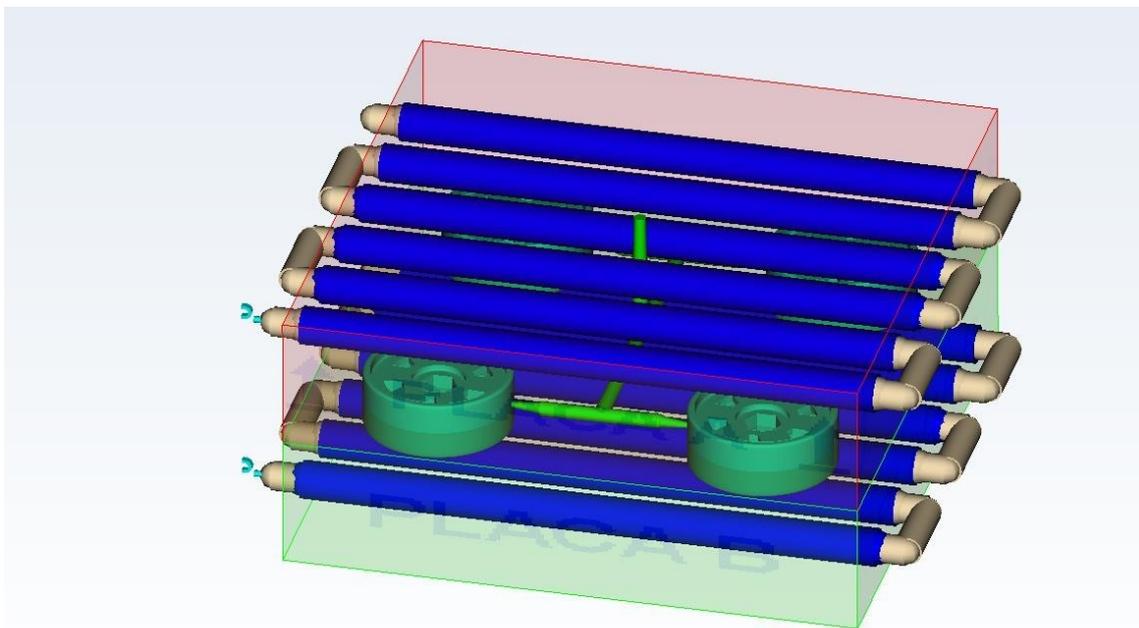


Figura 46: Tamaño portacavidad y portanúcleos

X=296 mm // Y=296 mm // Z=92 mm (altura total molde 202 mm)

Fabricante: Generic // Nombre: Tool Steel P-3

Diámetro bebedero circular= 6 mm // Longitud bebedero= 65 mm

Diámetro canal circular= 5 mm

Diámetro entrada inicio = 5 mm // Longitud entrada= 6.25 mm

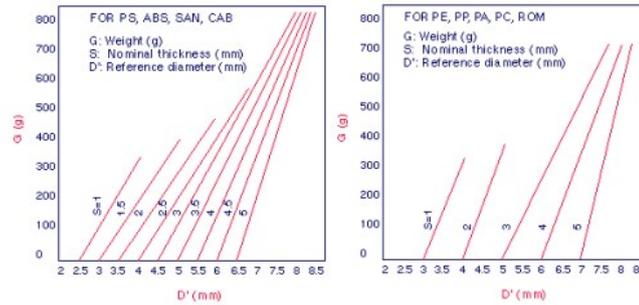
### 3.4.2 Sistema de canales de inyección

Para el dimensionado de los canales puede emplearse dos métodos

- 1) Tanto diámetro como longitud tienen influencia en la resistencia del flujo: una resistencia elevada supone pérdidas de presión grandes, pero reducir la resistencia aumentando el diámetro supone mayor volumen de colado y mayor tiempo de refrigeración en caso de colado frío. La fórmula tiene en cuenta el diámetro, la masa y la longitud del canal.

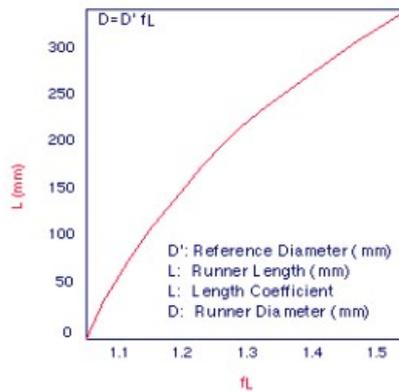
$$D = W^{0,5} * L^{0,25} / 3,7$$

- 2) Tablas



Tablas 4: Diámetro de referencia

Teniendo en cuenta que el material utilizado es PP, de la tabla 3 se utilizará la parte de la derecha. Teniendo en cuenta el peso y el espesor nominal, se obtiene que D'.

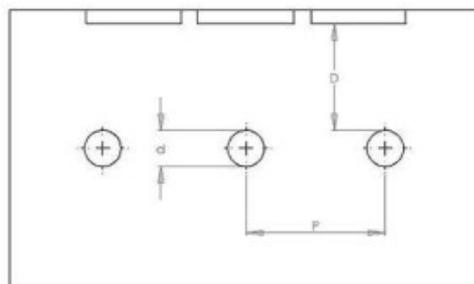


Tablas 5: Longitud vs coeficiente de longitud

Suponiendo una longitud de canal se obtiene el coeficiente y finalmente, multiplicando D por este coeficiente se obtiene el diámetro.

### 3.4.3 Sistema de canales de refrigeración

#### 3.4.3.1 Dimensionado de canales de refrigeración y cálculo del caudal



d = Diameter of Cooling Channel = 5mm to 19 mm  
 D = Depth of Cooling Channel = d to 2d  
 P = Pitch between Cooling Channel = 3d to 5d

Figura 47: Recomendaciones para diseño de la refrigeración

Teniendo en cuenta estas recomendaciones, se ha obtenido por coger un diámetro de 11 mm (d), con 6 canales y a una distancia a la pieza de 11 mm (D). La distancia entre canales (P) será de 32 mm

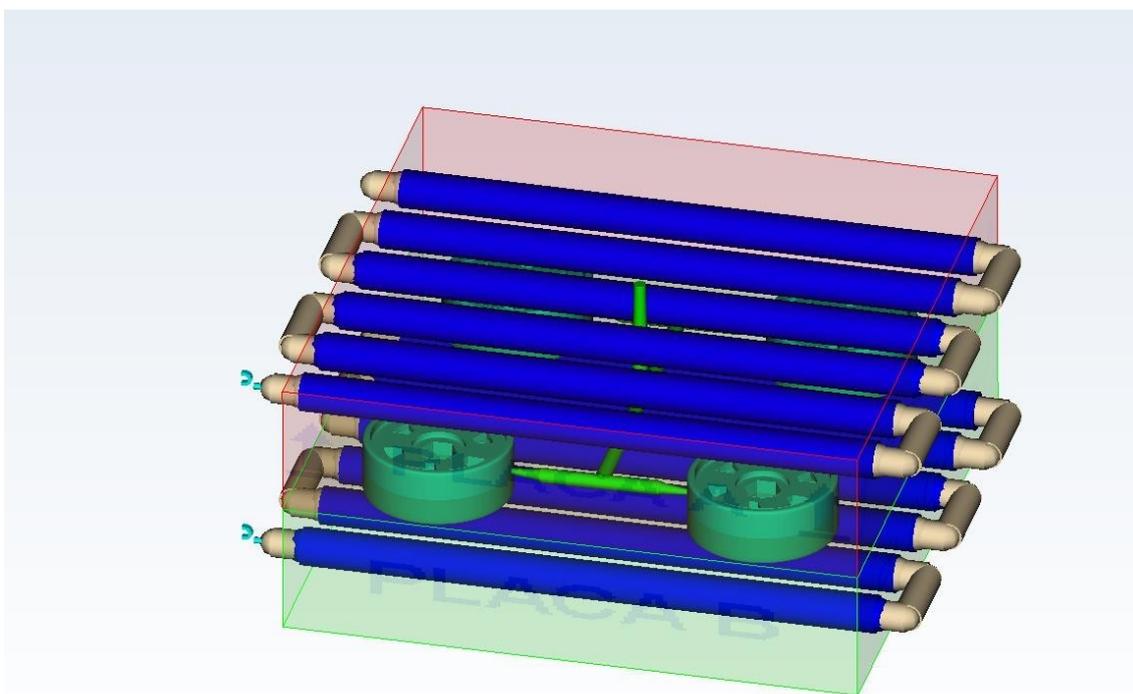


Figura 48: Diseño de los sistemas

Por otra parte, para el cálculo del caudal se supone que se debe alcanzar un n.º de Reynolds de 15000 para obtener un flujo turbulento. El refrigerante utilizado es agua a 25 °C, por lo que tendrá los siguientes valores de densidad y viscosidad dinámica:

$$\rho = 997 \text{ Kg/m}^3$$

$$\mu = 0,000891 \text{ Kg/m}^*\text{s}$$

Teniendo en cuenta la fórmula de Reynolds y la del caudal, ambas se relacionan y se obtiene la siguiente expresión matemática:

$$R_e = (\rho * (Q/A) * D) / \mu$$

Donde  $A = (\pi * D^2) / 4$ , donde  $D$  se introduce en metros

Reemplazando los valores se obtiene el caudal mínimo para ese n.º de Reynolds:

$$Q = 6 \text{ L/min}$$

## 3.5 Variables y Cálculos mecánicos

### 3.5.1 Área proyectada y volumen de pieza

El área proyectada en un molde será aquella que es llenada con el plástico fundido en la línea de partición. Para nuestro caso:

Área real de las cara seleccionada: 900,08 mm<sup>2</sup>

Volumen real del cuerpo seleccionado: 25200 mm<sup>3</sup>

### 3.5.2 Fuerza de cierre

Consiste en la fuerza que debe ejercer la máquina para mantener el molde cerrado durante la fase de inyección y mantenimiento.

Durante estas fases, se genera una presión dentro de la cavidad del molde debido a la fuerza de la inyección que empuja el polímero fundido hacia dentro de la cavidad. Como consecuencia, la fuerza de cierre es directamente proporcional a la presión dentro del molde, y que sigue la siguiente fórmula:

$$P_i = F_c / A_p$$

Donde:

$P_i$ : Presión de inyección (kg/cm<sup>2</sup>)

$F_c$ : Fuerza de cierre de la máquina (T)

$A_p$ : Área proyectada (cm<sup>2</sup>)

Presión obtenida: 13,86 Mpa \* 10<sup>6</sup> Pa/1MPa \* 1kg/9,8 N \* 1T/10<sup>3</sup> kg

Área proyectada (4 cavidades): 900,08\*4 mm<sup>2</sup> \* 1m<sup>2</sup> / 10<sup>6</sup> mm<sup>2</sup>

$$F_c = 5,09 \text{ T}$$

### 3.5.3 Tiempo de inyección

Para el cálculo del tiempo de inyección se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$t_i = V_p / Q_m$$

Cabe la posibilidad de calcular el tiempo de inyección en función de la velocidad de inyección. Se puede encontrar este valor en hojas técnicas y catálogos de las máquinas de inyección en función del PS. Para ello se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$t_i = W_p / S_i ; S_i = S_{ps} * \rho_n / \rho_{ps}$$

Donde:

$S_i$ : Velocidad de inyección material (g/s)

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

$\rho_n$ : Densidad del material (g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_{PS}$ : Densidad del PS(g/cm<sup>3</sup>)

Wp: Peso de la pieza (g)

Por último, se citará la última fórmula que permite calcular el tiempo de inyección:

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

Donde:

$e_{min}$ : espesor mínimo de la pieza (cm)

$D_{max}$ : Recorrido máximo del material fundido hasta la entrada del molde (cm)

$R_{fe}$ : Relación recorrido flujo y espesor de pared (-)

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

$T_{mold}$ : Temperatura del molde (°C)

$T_{mat}$ : Temperatura 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.

Para nuestro caso el dato de tiempo de inyección se obtiene del programa moldflow.

$$Si = \text{Peso pieza total} / ti$$

### 3.5.4 Tiempo de 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, se debe asegurar que el material ha solidificado (al menos un buen porcentaje).

$$t_{enf} = \left( -e_{max}^2 / 2 * \Pi * \alpha_n \right) * \ln \left[ \Pi * (T_{exp} - T_{mold}) / 4 * (T_{mat} - T_{mold}) \right]$$

Donde

$e_{max}$ : espesor máximo de la pieza (cm)

$\alpha_n$ : difusividad térmica material (cm<sup>2</sup> /°C)

La difusividad se puede obtener bien con las hojas de datos técnicos o bien con la siguiente fórmula:

$$\alpha_n = \lambda_n / \rho_n * C_p$$

Donde

$\lambda_n$ : conductividad térmica (J/s\*cm\*°C)

$C_p$ : calor específico (J/g\*°C)

$$\alpha_n = \lambda_n / \rho_n * C_p$$

$$t_{enf} = \left( -e_{max}^2 / 2 * \Pi * \alpha_n \right) * \ln \left[ \Pi * (T_{exp} - T_{mold}) / 4 * (T_{mat} - T_{mold}) \right]$$

### 3.5.5 Tiempo total de inyección

Este valor se obtendrá con exactitud hasta que la producción se realice de forma masiva. Aún así, para el diseño del molde se puede realizar un cálculo aproximado con la siguiente fórmula:

$$t_{\text{ciclo}} = t_{\text{llen}} + t_{\text{comp}} + t_{\text{enf}} + t_{(\text{ap+exp})}$$

Donde

Tllen: tiempo llenado (s)

Tcomp: tiempo compactación (cierre+inyección) (s)

Tenf: tiempo enfriamiento (s)

Tap+exp: tiempo de apertura y expulsión de la pieza (s)

$$t_c = t_{\text{llen}} + t_{\text{comp}} + t_{\text{enf}} + t_{(\text{ap+exp})} = 20 \text{ segundos}$$

### 3.5.6 Geometría colada

La sección más óptima para la colada es la circular ya que permite un flujo del fundido adecuado y enfriamiento uniforme.

$$\phi_c = \sqrt{w_p * \sqrt[4]{L_c}} / 3.7$$

Donde

Φc: diámetro colada (cm)

Lc: longitud colada (cm)

$$\phi_c = \sqrt{w_p * \sqrt[4]{L_c}} / 3.7$$

### 3.5.7 Cálculo contracción

$$R_c = d_m - d_p / d_m$$

Donde

Rc: rango contracción (-)

dm: dimensión requerida en el molde (cm)

dc: dimensión requerida en la pieza (cm)

### 3.5.8 Capacidad de cierre

La fuerza de cierre de la máquina deber ser mayor que la fuerza de apertura que se genera durante el proceso de inyección (Fcierre > Fapertura).

La presión transmitida la molde es menor que la de la salida del cilindro, reduciéndose en función de ciertas propiedades del material. Dicho material entra en la cavidad del molde y se va enfirando continuamente, desde el exterior hasta el interior, creándose un diferencial de temperatura a lo largo de la línea de cierre. Por lo tanto, la presión media adquiere el valor de la presión de inyección.

$$F_{\text{apertura}} = P_{\text{media}} * A_{\text{proyectadapieza}}$$

El valor de la presión media se obtiene con el programa y el valor del área proyectada se obtendrá del programa NX.

Presión media obtenida:  $6,93 \text{ Mpa} * 10^6 \text{ Pa}/1\text{MPa} * 1\text{kg}/9,8 \text{ N} * 1\text{T}/10^3 \text{ kg}$

Área proyectada (4 cavidades):  $900,08 * 4 \text{ mm}^2 * 1\text{m}^2 / 10^6 \text{ mm}^2$

$$F_{\text{apertura}} = 2,545 \text{ T}$$

$$CS = F_{\text{cierre}} / F_{\text{apertura}} = 2$$

### 3.5.9 Resistencia expulsores a pandeo

Para este cálculo será necesario obtener la presión en las zonas donde se han colocado los expulsores. Se ha obtenido que la presión es de 8 MPa, con una sección de los expulsores de 3 mm de diámetro y 86,6 mm de longitud.

$$A = \Pi * r^2 = 7,068 \text{ mm}^2$$

$$P = 8 \text{ MPa} ; L_{\text{expulsor}} = 86,6 \text{ mm} ; E = 210 \text{ GPa}$$

Para el cálculo del pandeo se empleará la fórmula crítica de Euler. La base del expulsor va anclada entre las placas expulsoras, que evitan el giro y translación del mismo en todas las direcciones. Como consecuencia se supondrá como empotrado en la base y articulado en la punta:

$$L_{\text{pandeo}} = L_{\text{expulsor}} * \beta = X * 0,7 = 60,62 \text{ mm}$$

$$i = \sqrt{I/A} = \sqrt{(\pi * r^4 / 4) / \pi * r^2} = 0,75 \text{ mm}$$

$$\lambda = L_{\text{pandeo}} / i = 80,8$$

$$\sigma_c = \pi^2 * E / \lambda^2 = 317 \text{ MPa} > P$$

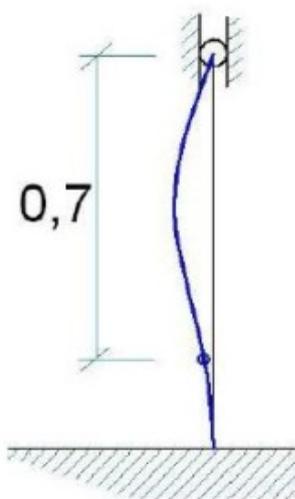


Imagen 49: Factor  $\beta$

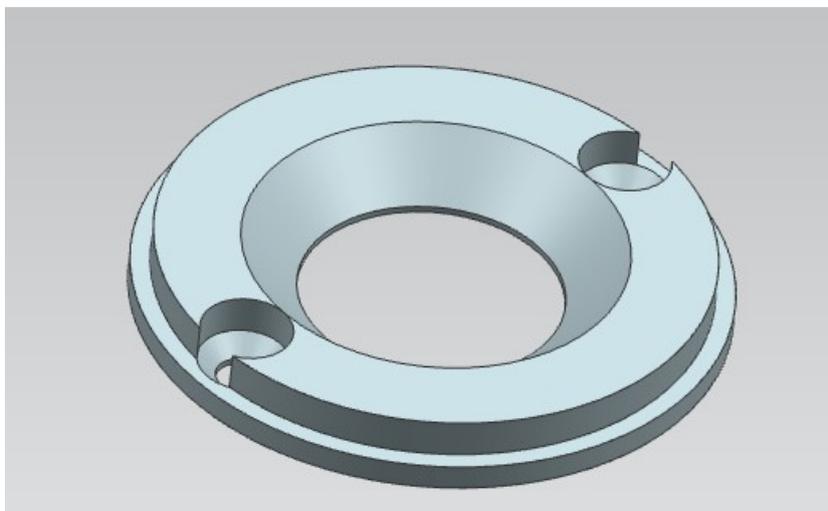
## 3.6 Resultados finales y dimensionamiento molde

### 3.6.1 Parte fija

Es la parte que no se mueve del molde que sujeta al plato fijo de la máquina cuando se inyecta el material, y es donde se apoya el propio cilindro de inyección. Está conformada por varios elementos.

#### 3.6.1.1 Anillo centrador

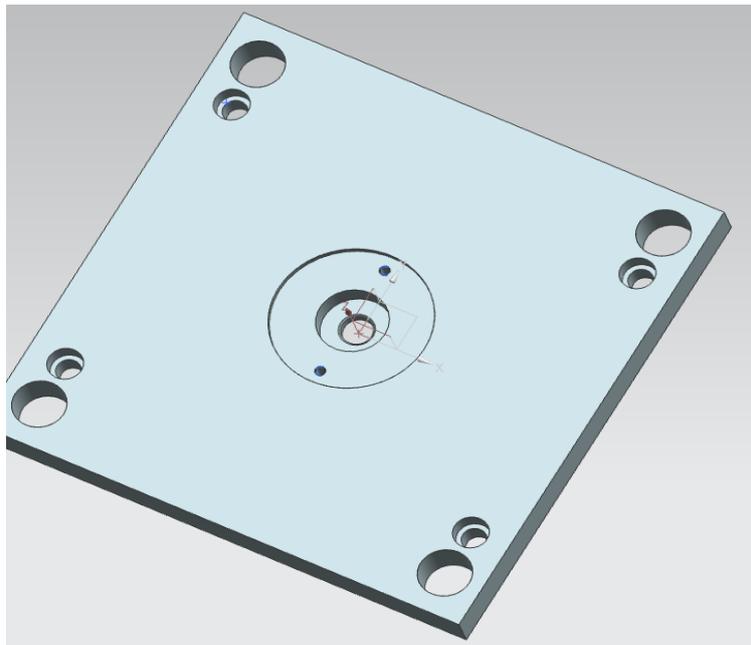
Su función es centrar el molde y asegurar que el bebedero esté correctamente colocado y que no se mueva en ningún momento. Lo que sobresale de este elemento entra ajustadamente en el plato fijo de la máquina, coincidiendo así con el orificio donde entra el plástico fundido en el molde.



*Imagen 50 : Anillo centrador*

#### 3.6.1.2 Placa superior

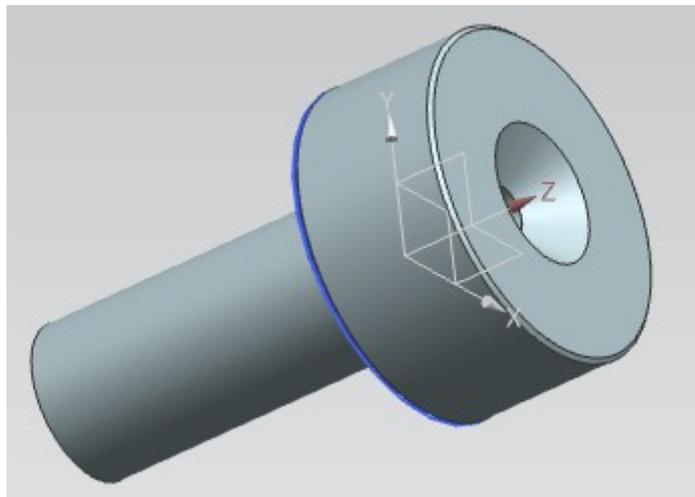
Placa de metal donde se encuentran tanto el anillo centrador como el bebedero. Sus dimensiones se adecuarán para que la pieza a inyectar permita espacios libres por donde sujetar mediante bridas al plato fijo. Además, contará con el suficiente grosor como para no sufrir deformaciones y dependerá del peso total del molde.



*Imagen 51 : Placa superior*

### 3.6.1.3 Bebedero

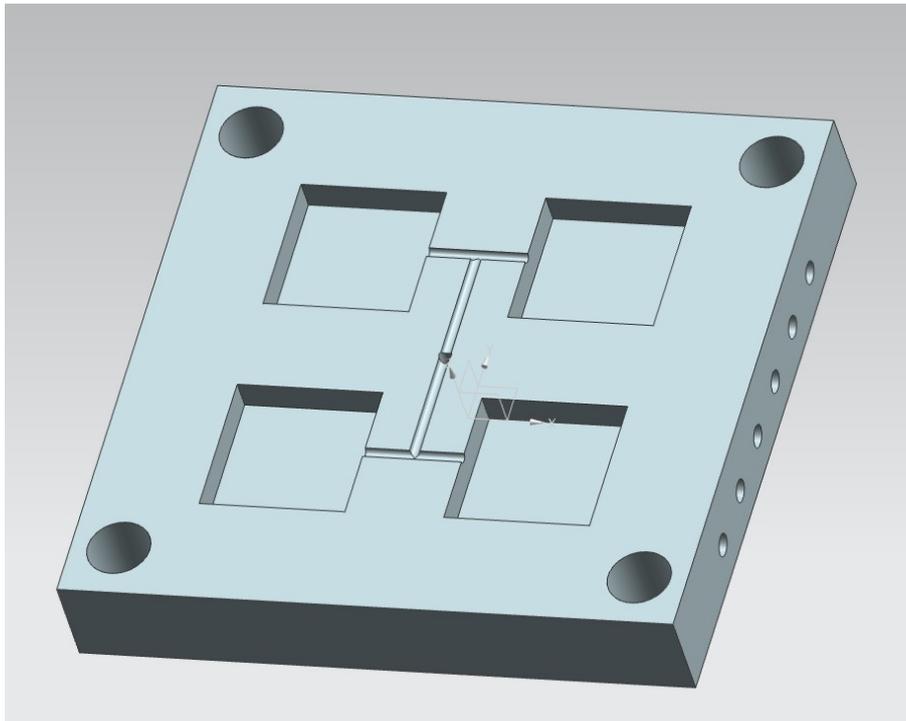
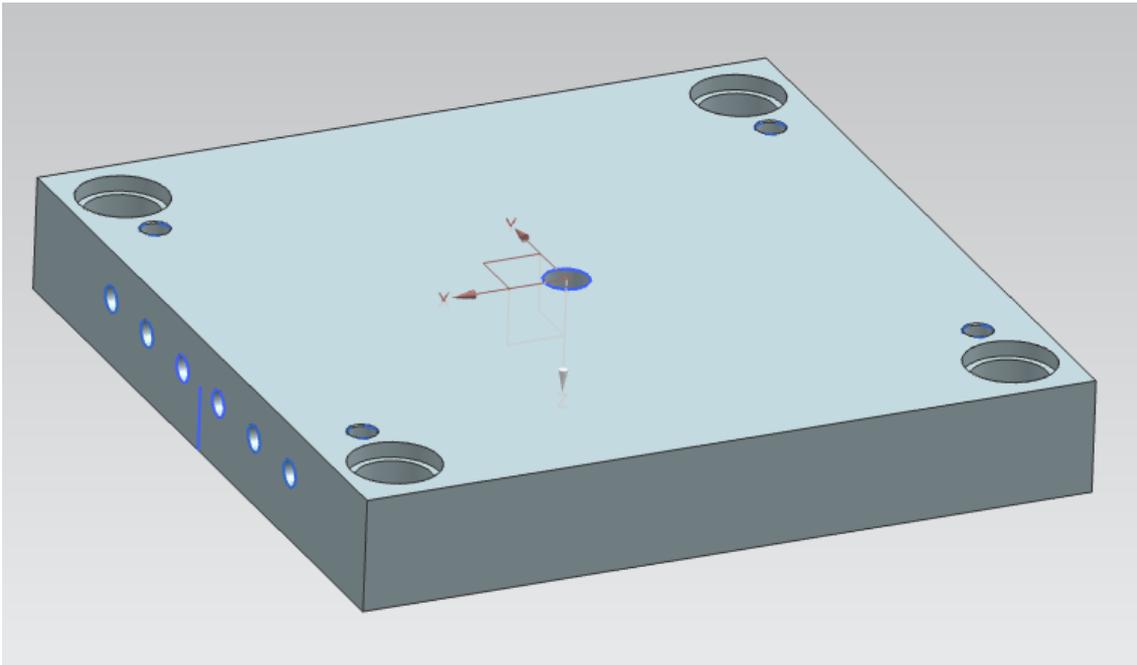
Es la parte que permitirá la introducción del material fundido dentro del molde. Sus dimensiones son las siguientes: 38 mm de diámetro de cabeza, 12 mm de diámetro de vástago, 6 mm de diámetro interior y 65 mm de longitud de vástago.



*Imagen 52 : Bebedero*

### 3.6.1.4 Placa portacavidades

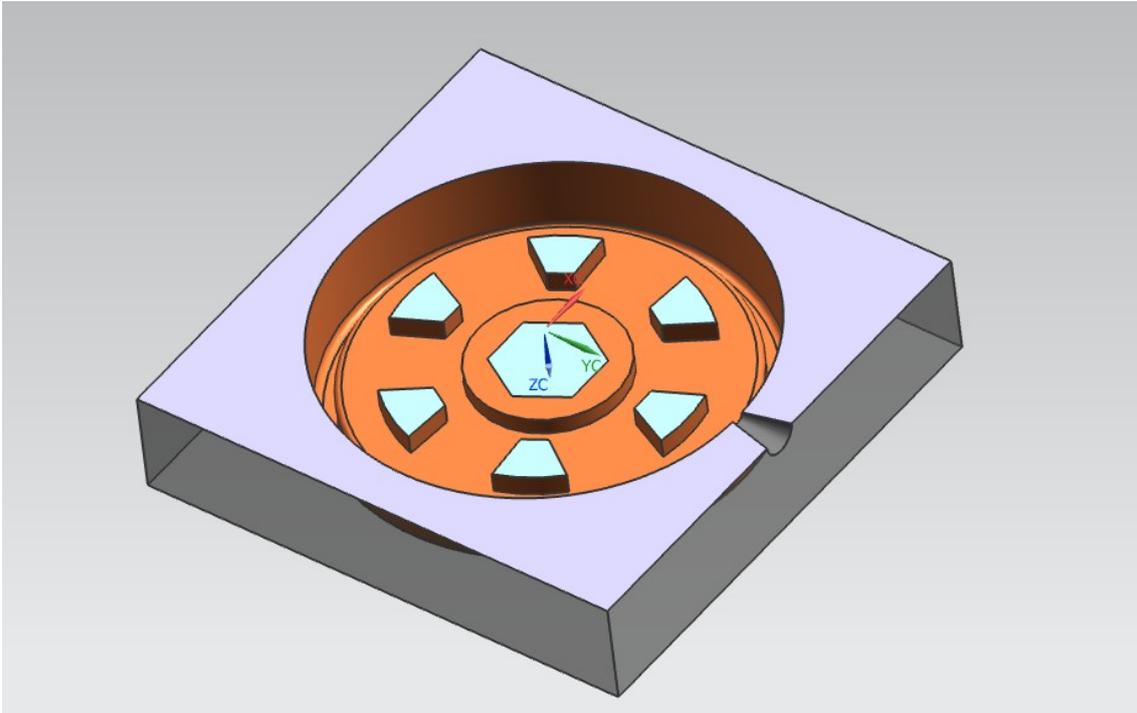
Aquí es donde se realizarán las piezas, bien como postizos ajustados o bien directamente labradas sobre ella. La cavidad suele realizarse en la parte fija del molde, mientras que el núcleo se realiza en la parte móvil. Además, dispondrá tanto la placa portacavidades y portanúcleos con un sistema de refrigeración de diámetro 11 mm.



*Imágenes 53 y 54 : Placa portacavidades*

### 3.6.1.5 Cavidades

La geometría de la cavidad se realiza en función de la geometría 3D de la pieza, y consta de 4 cavidades.



*Imagen 55 : Cavidades*

### 3.6.1.6 Columnas guía

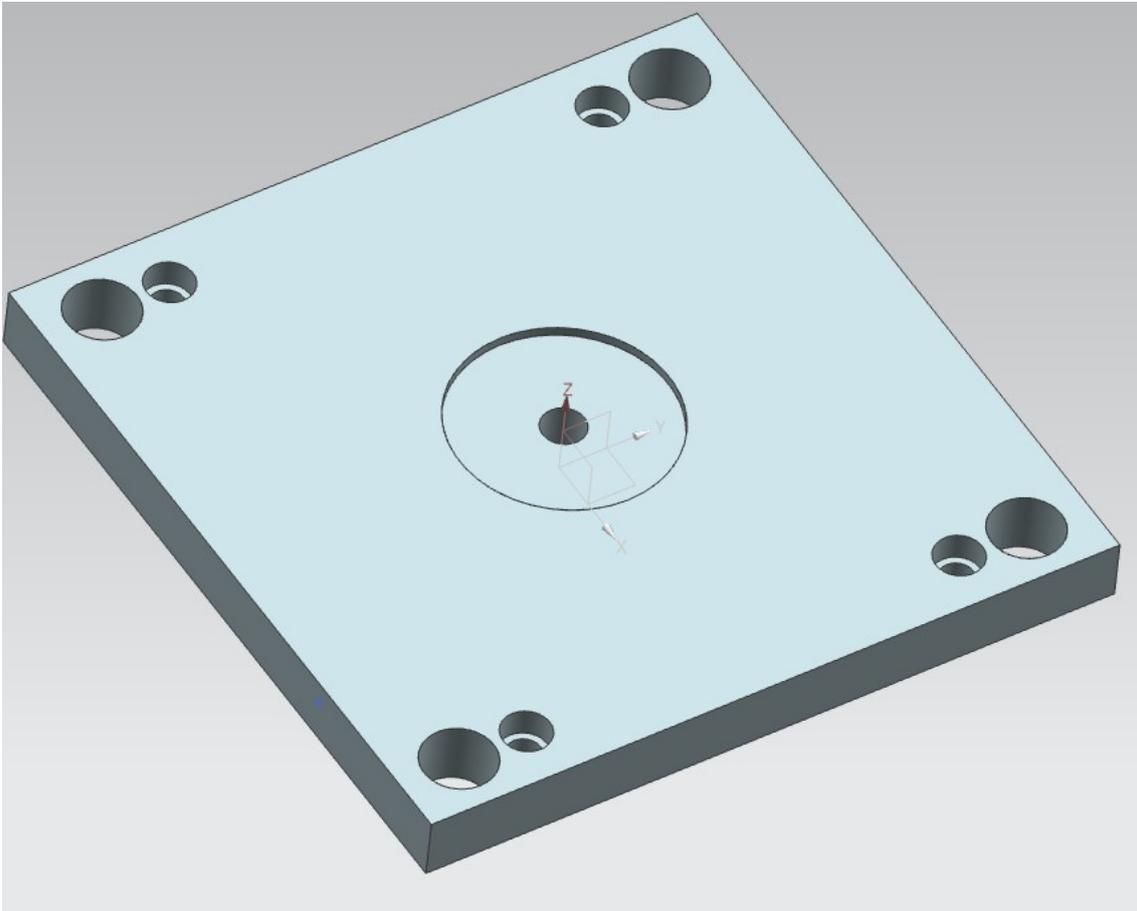
Tanto la parte fija como la móvil contienen unos agujeros donde se introducirán estos elementos que permitirán un correcto movimiento y un correcto acoplamiento entre partes.

### 3.6.2 Parte móvil

Parte que está sujeta al plato móvil de la máquina y se mueve solidariamente a esta. Cuenta también con el sistema de expulsión.

#### 3.6.2.1 Placa base/inferior

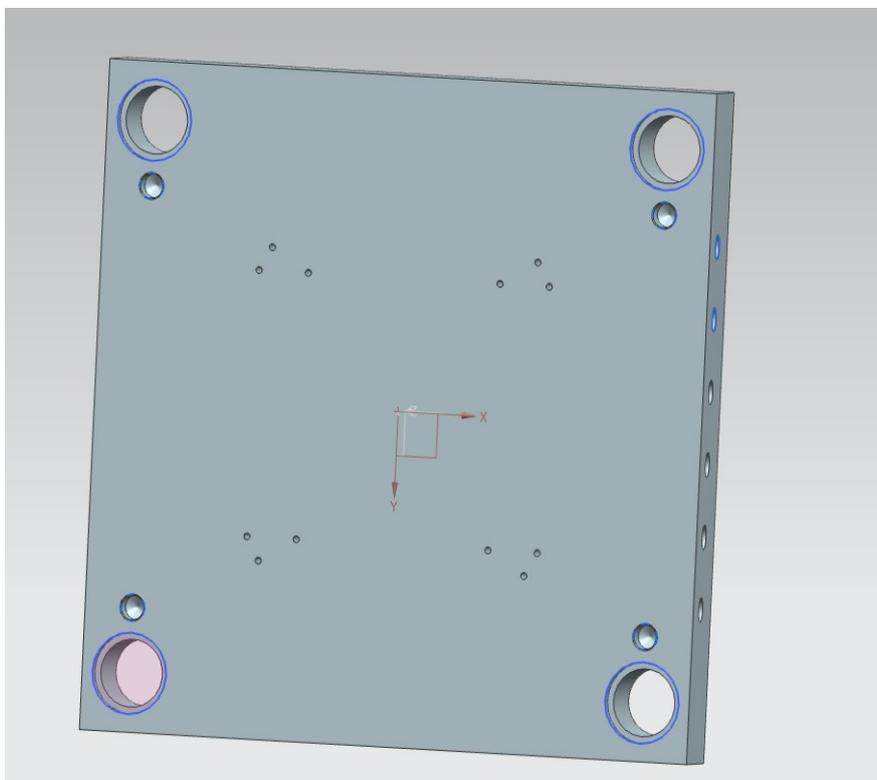
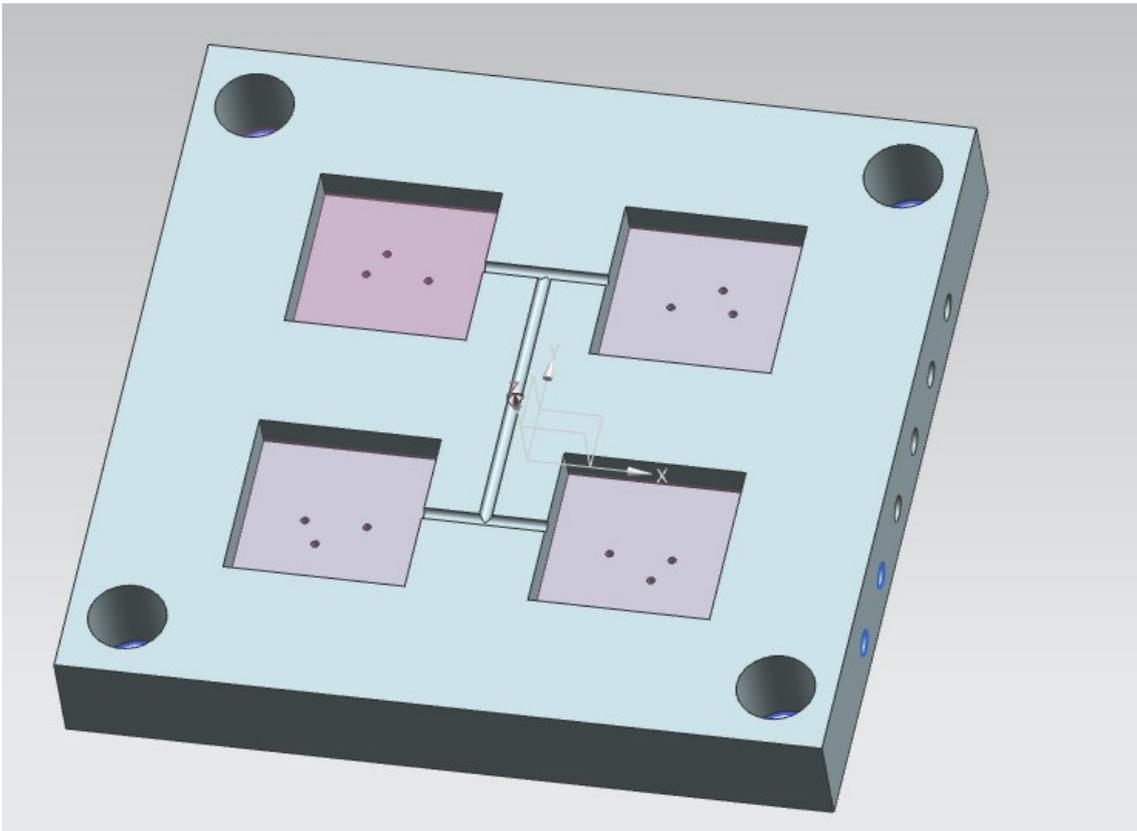
Esta placa tiene contacto con la prensa encargada de realizar los movimientos. No cuenta con anillo centrador a diferencia de la placa superior, pero cuenta con un agujero en su centro que permite la entrada del vástago expulsor hasta la placa expulsora del molde.



*Imagen 56: Placa inferior*

### 3.6.2.2 Placa portanúcleos

Placa que permitirá la realización de la pieza y que transportará el núcleo de la misma.



*Imágenes 57 y 58 : Placa portanúcleos*

### 3.6.2.3 Placa expulsora

Placa encargada de transmitir el movimiento a la placa portaexpulsores y esta a su vez a los expulsores.

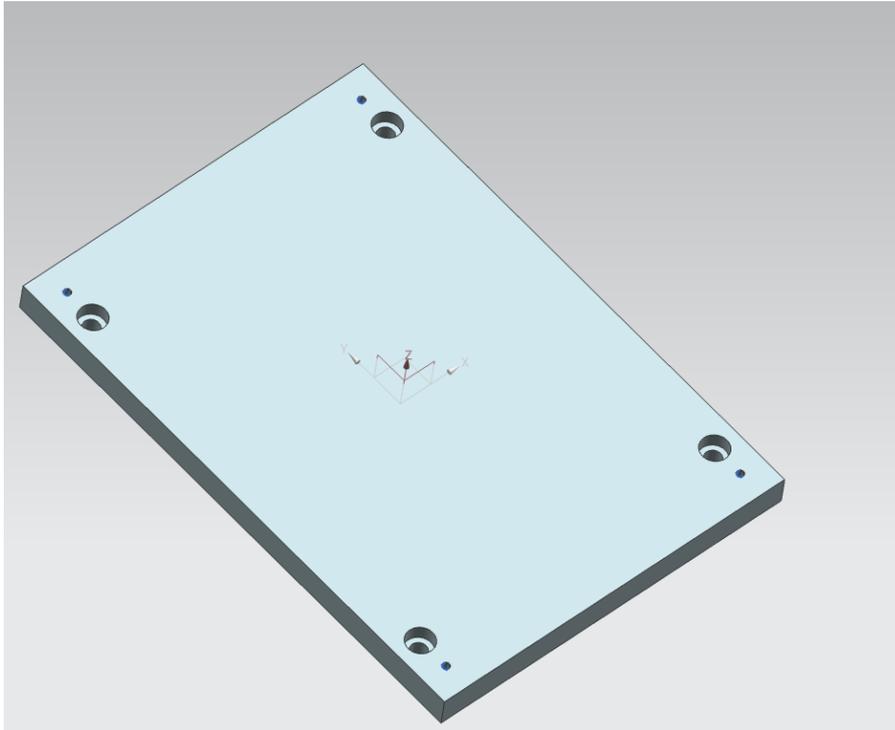


Imagen 59: Placa expulsora

### 3.6.2.4 Placa portaexpulsores

Una placa flotante que contiene los expulsores y recuperadores, cuya función es extraer las piezas mediante los expulsores, y mediante los recuperadores lleva la placa expulsora a la posición inicial en el momento del cierre del molde.

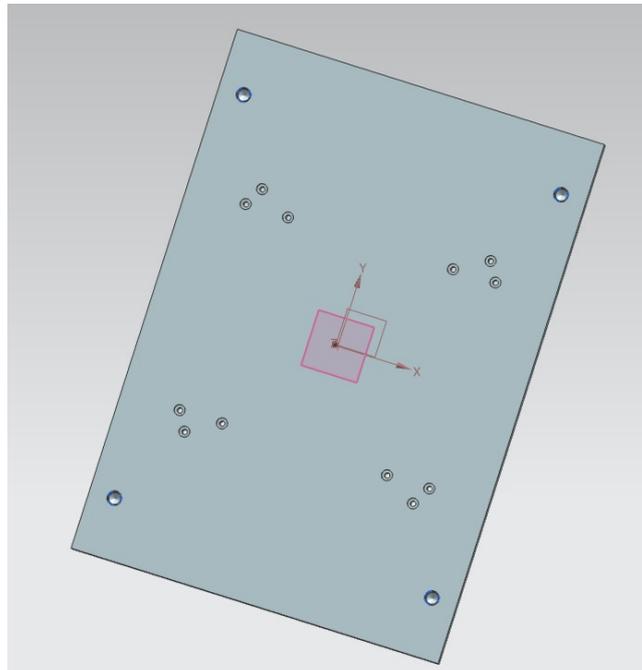
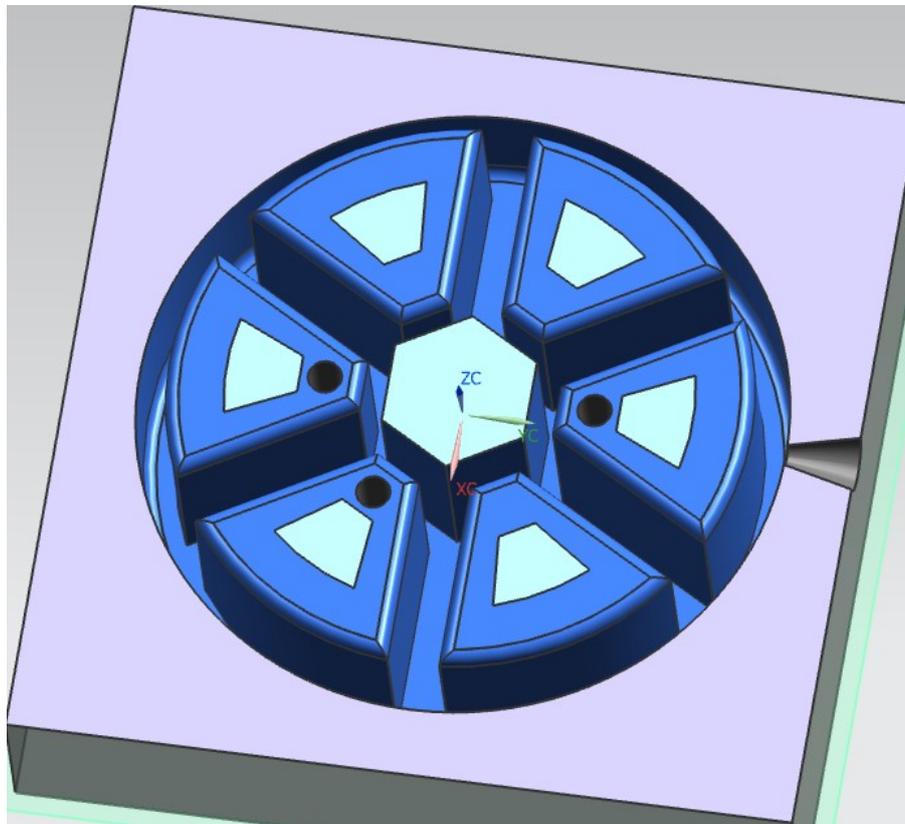
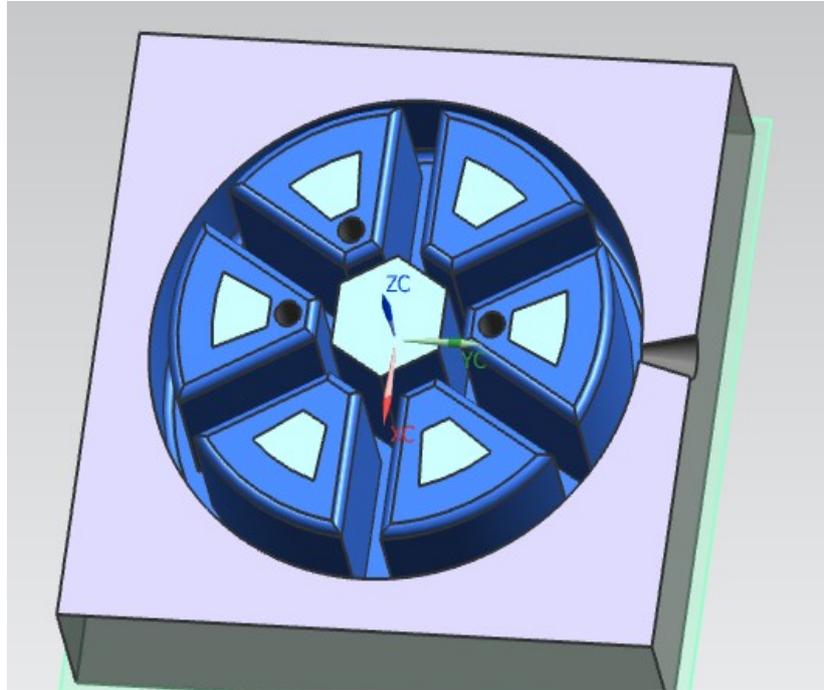


Imagen 60: Placa portaexpulsores

### 3.6.2.5 Núcleos

La geometría del núcleo se realiza en función de la geometría 3D de la pieza, y consta de 4 núcleos. Cabe destacar que se tendrá un mismo núcleo para todas las cavidades, pero la disposición de los agujeros de los expulsores será diferente: es decir, se tendrá 2 tipos de núcleo como la imagen 61 y otros dos como la imagen 62.



Imágenes 61 y 62 : Núcleo 1 y 2

### 3.6.2.6 Expulsores

Elementos encargados de empujar a la pieza para la extracción de la misma. Se han diseñado 12 expulsos con las siguientes medidas: 3 mm de diámetro de vástago y longitud de 86.6 mm. Estos elementos se pueden encontrar en varios catálogos comerciales.

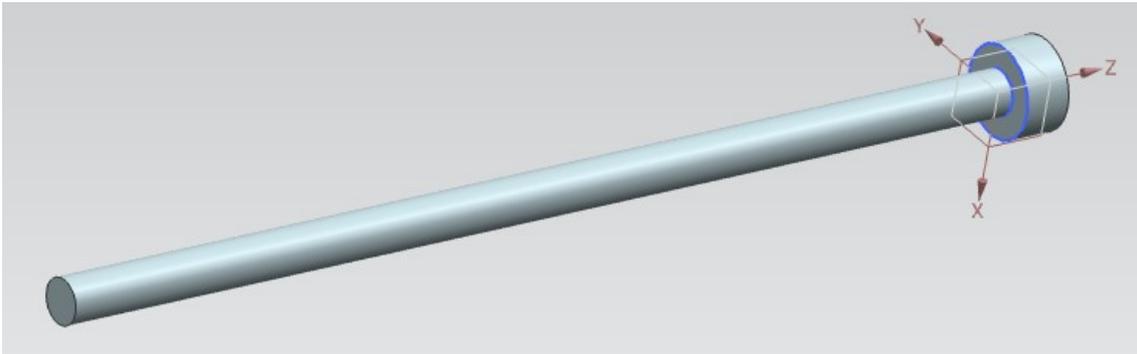


Imagen 63 : Expulsor

### 3.6.2.7 Placas laterales

Son placas de hierro situadas en ambos extremos del molde unidas tanto a la placa inferior como a la placa portanúcleos mediante tornillos M12, con un espaciado entre placas para la colocación de la placa expulsora y placa portaexpulsores.

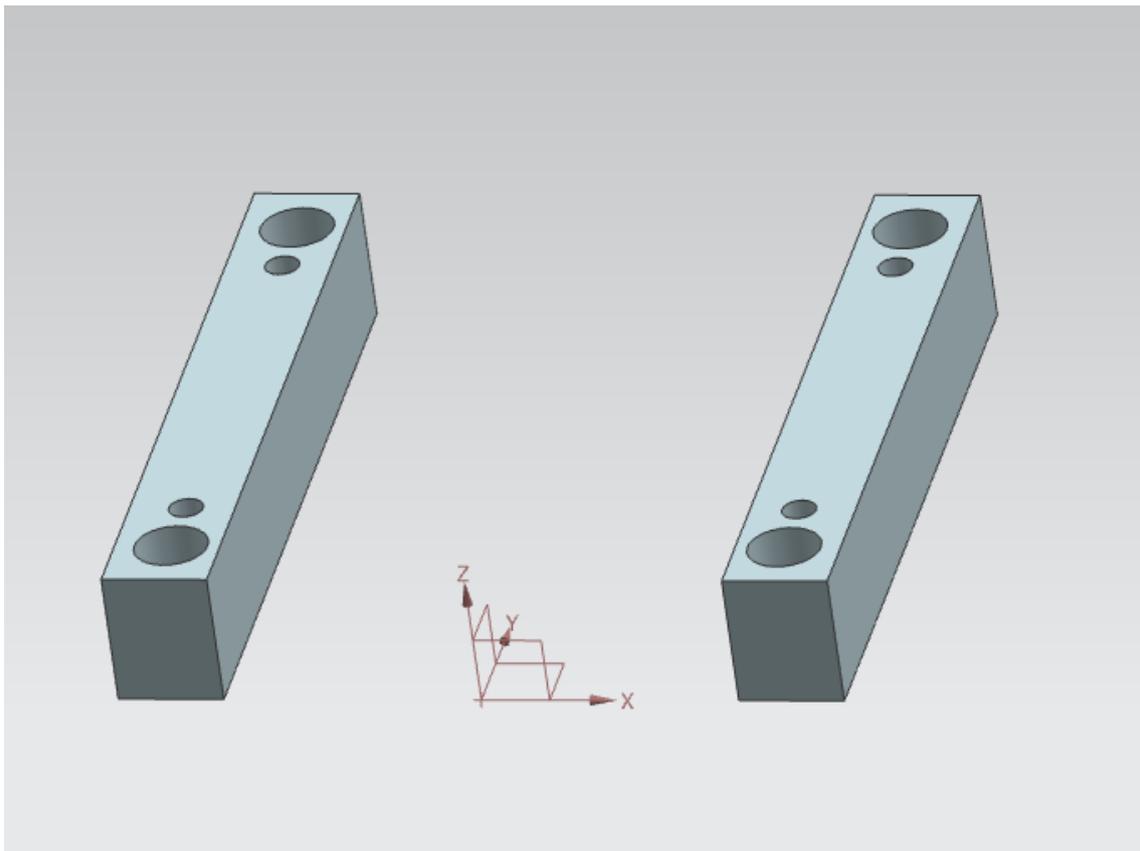


Imagen 64 : Placas laterales