

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
TRABAJO FIN DE GRADO

***DISEÑO DE UN MOLDE DE INYECCIÓN
PARA EL MANGO PLÁSTICO DE UNA
CEPILLADORA ELÉCTRICA***

DOCUMENTO 3- ANEXO

Alumno: Goitia Bollar, Gorka

Director: Lobato González, Roberto

Curso: 2018-2019

Fecha: Bilbao, 11 de marzo de 2019

ÍNDICE

3	DOCUMENTO: ANEXO	4
3.1	CÁLCULOS	4
3.1.1	DATOS INICIALES	4
3.1.2	NÚMERO DE CAVIDADES	5
3.1.3	ANÁLISIS DE TIPOS DE COLADO	6
3.1.4	FUERZA DE CIERRE	10
3.1.5	CONDICIONES DEL CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN	11
3.1.6	DIMENSIONADO DEL CANAL	11
3.1.7	DIMENSIONADO DE LA CÁMARA CALIENTE	13
3.1.8	CÁLCULO DEL CAUDAL	16
3.1.9	ANÁLISIS DE LOS EXPULSORES A PANDÉO	17
3.2	SIMULACIONES	21
3.2.1	PARÁMETROS DE SIMULACIÓN	21
3.2.2	ESPELOR	21
3.2.3	ÁNGULO DE DESMOLDEO	22
3.2.4	PUNTO DE INYECCIÓN ÓPTIMO	23
3.2.5	TIEMPO DE LLENADO	24
3.2.6	CONFIANZA DE LLENADO	27
3.2.7	PREDICCIÓN DE CALIDAD	28
3.2.8	PRESIÓN DE INYECCIÓN	30
3.2.9	PERDIDA DE PRESIÓN	30
3.2.10	TEMPERATURA EN EL FRENTE DE FLUJO	31
3.2.11	ORIENTACIÓN EN SUPERFICIE	34
3.2.12	TEMPERATURA MEDIA	35
3.2.13	TIEMPO PARA ALCANZAR LA TEMPERATURA DE EXPULSIÓN	37
3.2.14	FRACCIÓN DE CAPA SOLIDIFICADA AL FINAL DEL LLENADO	38
3.2.15	ATRAPAMIENTOS DE AIRE	41
3.2.16	LÍNEAS DE SOLDADURA	42
3.2.17	PRESIÓN DEL CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN	43
3.2.18	TEMPERATURA DEL REFRIGERANTE DEL CIRCUITO	45
3.2.19	CAUDAL DEL CIRCUITO	46
3.2.20	NÚMERO DE REYNOLDS DEL CIRCUITO	47
3.2.21	CALIDAD DE REFRIGERACIÓN	48
3.2.22	VARIANZA DE TIEMPO DE REFRIGERACIÓN	50
3.2.23	TEMPERATURA, PIEZA	52
3.2.24	VARIANZA DE TEMPERATURA	54
3.2.25	TIEMPO PARA ALCANZAR LA TEMPERATURA DE EXPULSIÓN, PIEZA	55
3.2.26	CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA EN LA EXPULSIÓN	58
3.2.27	RECHUPES	59
3.2.28	DEFORMACIÓN	62
3.2.29	RESUMEN DE LAS SIMULACIONES	65

LISTA DE ILUSTRACIONES

1.	Figura. CAD de la pieza. Vista exterior (izquierda) y vista interior (derecha).	4
2.	Figura. Representación de zonas vistas (amarillo), zonas no vistas (azul) y zonas de recubrimiento (verde).	5
3.	Figura. Dimensionado del circuito de refrigeración.	11
4.	Figura. Recomendación de posicionamiento de boquilla.	14
5.	Figura. Selección de tipo de boquilla.	14
6.	Figura. Dimensionado de las boquillas.	15
7.	Figura. Dimensionado del bebedero.	15
8.	Figura. Dimensionado de la cámara caliente.	16
9.	Figura. Distribución del espesor.	21
10.	Figura. Análisis de ángulos de desmoldeo.	22
11.	Figura. Indicador de resistencia de flujo para una sola entrada.	23
12.	Figura. Idoneidad de la entrada.	23
13.	Figura. Fase 1 del llenado pasados 0,2 segundos.	24
14.	Figura. Fase 2 del llenado pasados 0,55 segundos.	25
15.	Figura. Fase 3 del llenado pasados 0,8 segundos.	25
16.	Figura. Fase final del llenado pasados 1.019 segundos.	26
17.	Figura. Código de colores de la confianza de llenado.	27
18.	Figura. Confianza de llenado.	28
19.	Figura. Código de colores de la predicción de calidad.	28
20.	Figura. Predicción de la calidad, vista superior.	29
21.	Figura. Predicción de la calidad, vista inferior.	29
22.	Figura. Presión de inyección.	30
23.	Figura. Pérdida de presión.	31
24.	Figura. Temperatura en el frente de flujo, vista superior.	32
25.	Figura. Temperatura en el frente de flujo, vista inferior.	32
26.	Figura. Temperatura en el frente de flujo, escalado entre 270,9°C y 260°C.	33
27.	Figura. Muestras obtenidas en temperatura en el frente de flujo con temperatura del material fundido de 290°C y temperatura del molde de 120°C.	34
28.	Figura. Orientación en superficie.	35
29.	Figura. Temperatura media, vista superior.	36
30.	Temperatura media, vista inferior.	36
31.	Figura. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, vista superior.	37
32.	Figura. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, vista inferior.	38
33.	Figura. Fracción de capa solidificada al final del llenado, vista superior.	39
34.	Figura. Fracción de capa solidificada al final del llenado, vista inferior.	39
35.	Figura. Muestras de fracción de capa solidificada al final del llenado tomadas en tránsitos de flujo.	40
36.	Figura. Atrapamientos de aire.	41
37.	Figura. Líneas de soldadura.	42
38.	Figura. Presión del circuito.	43
39.	Figura. Presión del circuito sin tubos de tránsito de calor.	44
40.	Figura. Temperatura del refrigerante del circuito.	45
41.	Figura. Caudal del circuito.	46
42.	Figura. Número de Reynolds del circuito.	47
43.	Figura. Calidad de refrigeración.	48
44.	Calidad de refrigeración, detalle.	49
45.	Figura. Varianza de tiempo de refrigeración, vista superior.	50

46.	Figura. Varianza de tiempo de refrigeración, vista inferior.	51
47.	Figura. Temperatura, pieza.	52
48.	Figura. Temperatura, pieza. Mediciones cara interna.	53
49.	Figura. Temperatura, pieza. Mediciones cara externa.	53
50.	Figura. Varianza de temperatura.	54
51.	Figura. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, pieza, vista superior.	55
52.	Figura. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, pieza, vista inferior.	56
53.	Figura. Temperatura para alcanzar la temperatura de expulsión, pieza, vista superior.	
	Escalado 4,77-9,35 s.	57
54.	Figura. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, pieza, vista inferior. Escalado 4,77-9,35s.	57
55.	Figura. Contracción volumétrica en la expulsión, vista superior.	58
56.	Figura. Contracción volumétrica en la expulsión, vista inferior.	59
57.	Figura. Estimación de rechupes, vista superior.	60
58.	Estimación de rechupes, vista superior. Escalado 0,15-0,1958 mm.	60
59.	Figura. Estimación de rechupes, vista inferior. Escalado 0,15-0,1958 mm.	61
60.	Figura. Deflexión, todos los efectos.	62
61.	Figura. Deformación de la pieza con factor de escala 10, vista superior.	63
62.	Figura. Deformación de la pieza con factor de escala 10, vista inferior.	63
63.	Figura. Deflexión, refrigeración diferencial.	64
64.	Figura. Deflexión, contracción diferencial.	64
65.	Figura. Deflexión, efectos de orientación.	65

LISTA DE TABLAS

1.	Tabla. Datos utilizados para realizar los diagramas.	7
2.	Tabla. Datos del material y pieza.	13
3.	Tabla. Datos del llenado.	27
4.	Tabla. Datos de la simulación de refrigeración.	49

LISTA DE DIAGRAMAS

1.	Diagrama. Coste total vs volumen de producción.	6
2.	Diagrama. Coste vs volumen de producción para dos cavidades.	7
3.	Diagrama. Coste vs volumen de producción para cuatro cavidades.	8
4.	Diagrama. Coste vs volumen de producción para ocho cavidades.	8
5.	Diagrama. Número de cavidades vs volumen de producción.	9
6.	Diagrama. Número de horas de producción vs número de cavidades.	9
7.	Diagrama. Diámetro de referencia para diferentes materiales.	12
8.	Diagrama. Longitud del canal vs coeficiente de longitud.	12
9.	Diagrama. Tensión vs esbeltez.	18
10.	Diagrama. Tiempo de ciclo.	27

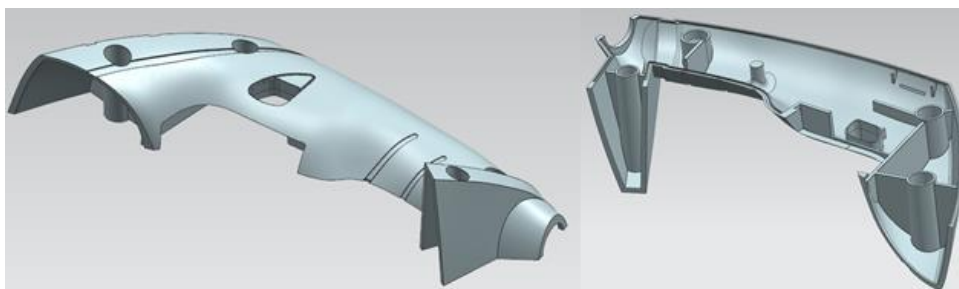
3 DOCUMENTO: ANEXO

3.1 CÁLCULOS

En este apartado se realizarán los cálculos necesarios para el diseño del molde.

3.1.1 DATOS INICIALES

Se desea diseñar un molde de inyección para la posterior fabricación de un mango plástico de un cepillo eléctrico.



1. Figura. CAD de la pieza. Vista exterior (izquierda) y vista interior (derecha).

Se ha obtenido el volumen de la pieza mediante el software Siemens PLM-NX10, logrando un valor de $31,36 \text{ cm}^3$.

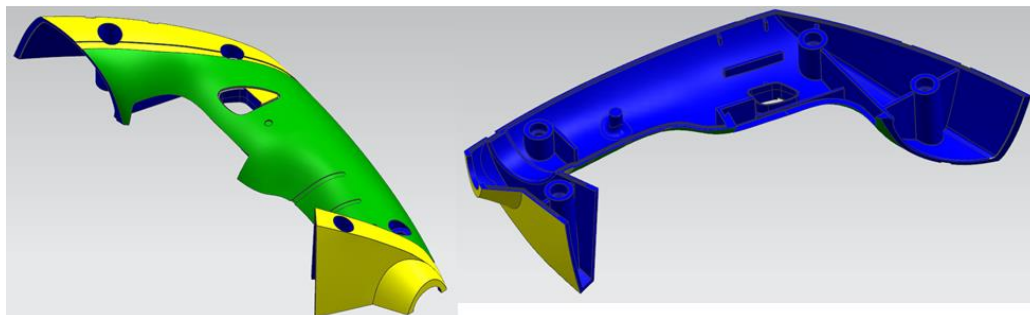
Mediante Autodesk Moldflow Adviser 2017 se ha obtenido el área proyectada por cavidad, logrando un valor de $78,18 \text{ cm}^2$.

Partiendo del volumen de la pieza y la densidad del material, la masa por pieza será:

$$m = 1,36 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 31,36 \text{ cm}^3 = 42,65 \text{ g}$$

Se exige un molde para el volumen de producción de 80.000 piezas.

Por otro lado, la pieza estará compuesta por tres zonas: zonas vistas, zonas no vistas y zonas de recubrimiento. En las zonas vistas se exigirán buenos acabados estéticos, y en la zona de recubrimiento un acabado óptimo para la posterior aplicación de un recubrimiento.



2. *Figura. Representación de zonas vistas (amarillo), zonas no vistas (azul) y zonas de recubrimiento (verde).*

Propiedades del material a inyectar DURETHAN BKV 30 H:

- Material: Poliamida 6
- Carga: 30% fibra de vidrio
- Densidad: 1,36 g/cm³
- Contracción: 1,08%
- Temperatura del molde recomendada: 80-120°C
- Temperatura de masa fundida recomendada: 270-290°C
- Temperatura de expulsión: 173°C
- Presión de inyección recomendada: 70-200MPa

3.1.2 NÚMERO DE CAVIDADES

El número de cavidades depende en gran parte de la capacidad de inyección por ciclo de la máquina de inyección. La capacidad de inyección por ciclo corresponde al volumen máximo que se puede inyectar por ciclo. Es recomendable que el volumen total de las cavidades corresponda a un 70% de la capacidad de inyección, dejando así un margen para la colada.

Se decide un diseño de molde con cuatro cavidades, ya que ofrece una buena distribución logrando moldes de tamaño moderado.

Por tanto, la máquina de inyección a elegir debe rondar la siguiente capacidad de inyección:

$$4 \text{ cavidades} \cdot 31,36 \frac{\text{cm}^3}{\text{cavidad}} = \frac{70}{100} \cdot \text{CY}$$

Logrando una capacidad de inyección:

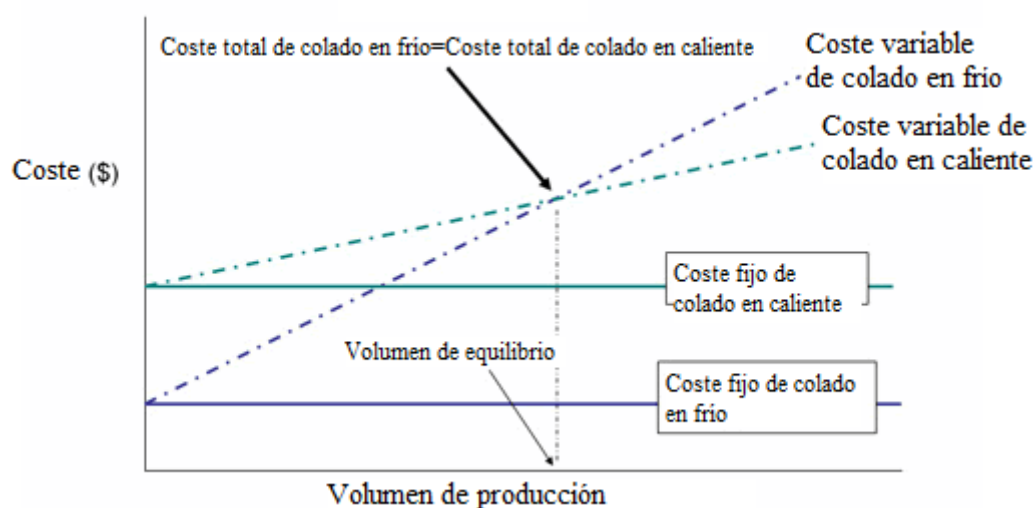
$$CY = 179,2 \frac{cm^3}{ciclo}$$

3.1.3 ANÁLISIS DE TIPOS DE COLADO

Como ya se ha comentado en la memoria, hay que tener en cuenta los siguientes factores: material de la pieza, costes por molido y reciclado, volumen de la producción, cavidades por ciclo y gastos de fabricación.

Se utilizará como material un termoplástico, por lo que los costes por desechos serán menores. El cliente quiere un volumen de producción de 80.000 piezas.

En el siguiente diagrama se puede observar las curvas de gasto total en cada caso. Dándose un punto de equilibrio en el cual el coste de colado en frío y colado en caliente se equipararán.



1. Diagrama. Coste total vs volumen de producción.

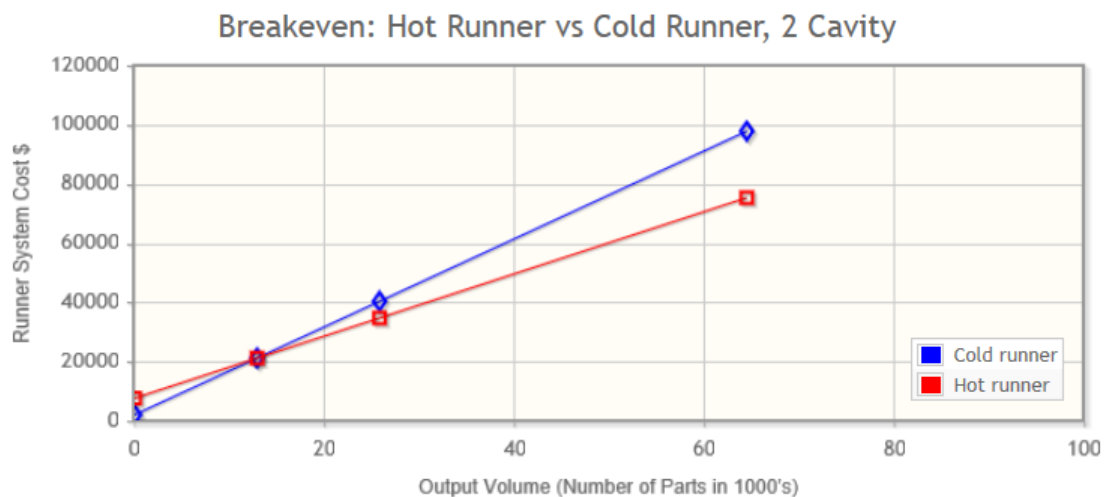
Mediante una herramienta de cálculo proporcionada por Milacron es posible crear diagramas orientativos coste-volumen de producción, para así poder decidir el tipo de colado que se usará.

Para crear dichos diagramas se rellena la siguiente tabla de datos, Milacron proporciona datos orientativos:

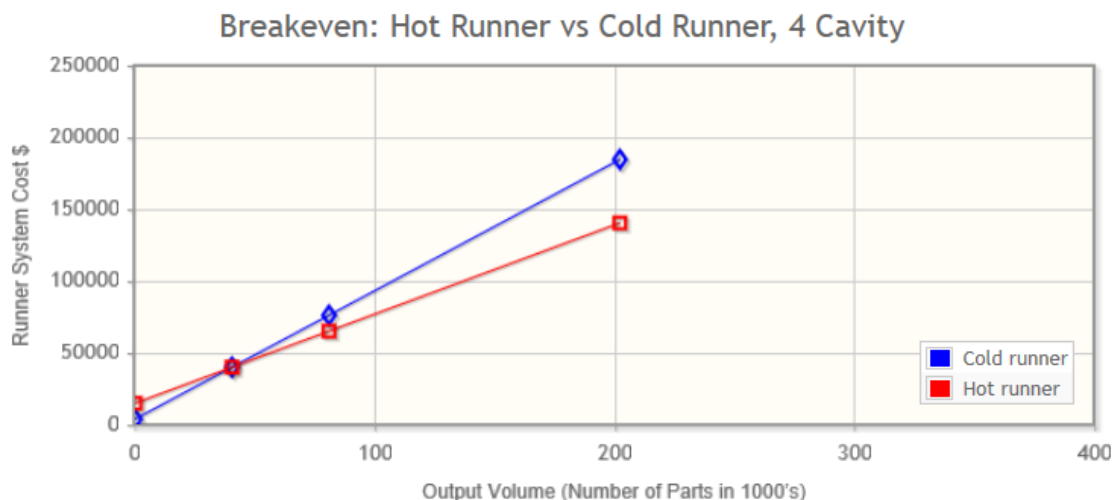
1. *Tabla. Datos utilizados para realizar los diagramas.*

Part Weight (kg)	0.045
Maximum Part Thickness (mm)	4
Resin	Nylon
Resin Cost (\$/kg)	4.07
Allowable Percentage of Regrind	0.15
Energy Cost (\$/kWhr)	0.08
Manpower Cost - Machine Operator (\$/hr)	30
Overhead Rate (Injection Molding Machine, Building, facilities) (\$/hr)	75

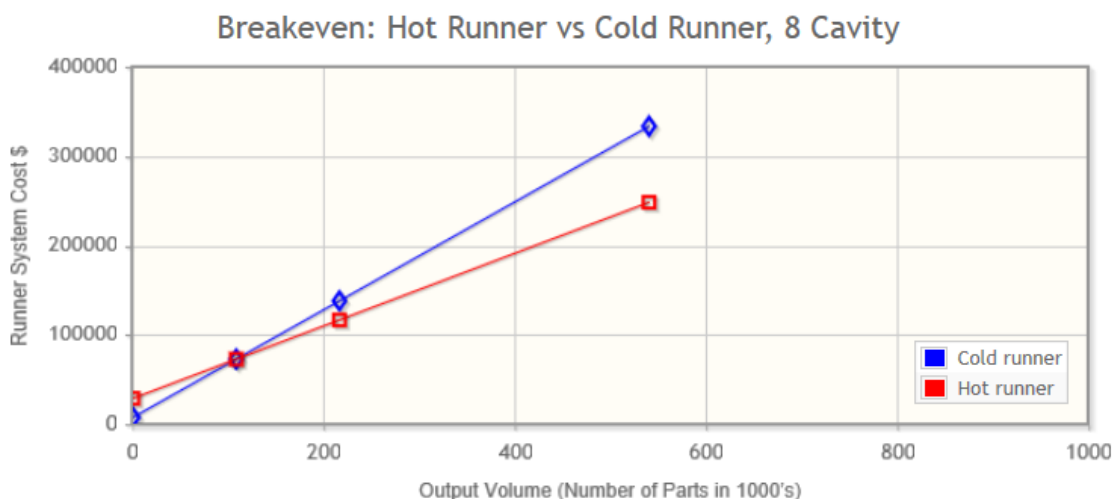
El material PA6-GF30 no está disponible en el tipo de resina por lo que se decide utilizar nylon, ya que es una poliamida. Los valores obtenidos serán orientativos, como ya se ha comentado anteriormente.



2. *Diagrama. Coste vs volumen de producción para dos cavidades.*



3. Diagrama. Coste vs volumen de producción para cuatro cavidades.

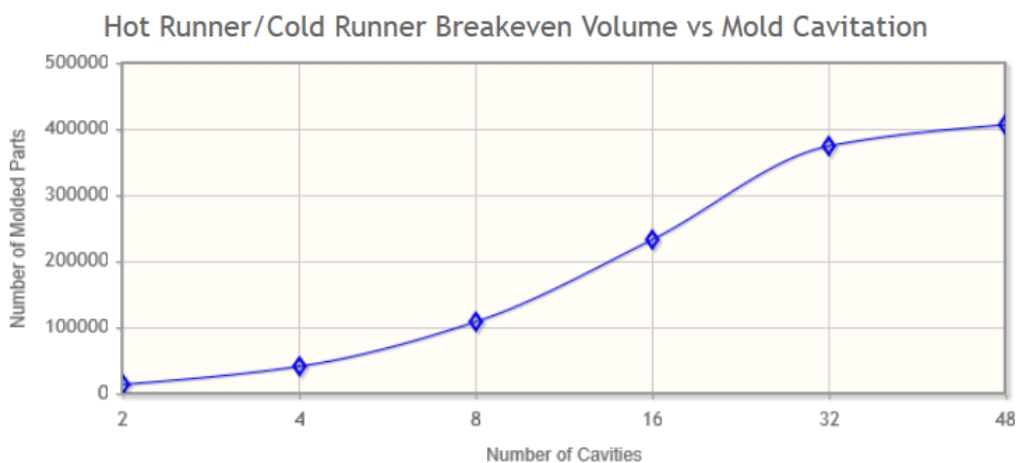


4. Diagrama. Coste vs volumen de producción para ocho cavidades.

Los diagramas anteriores muestran las curvas que relacionan coste y volumen de producción para diferentes números de cavidad.

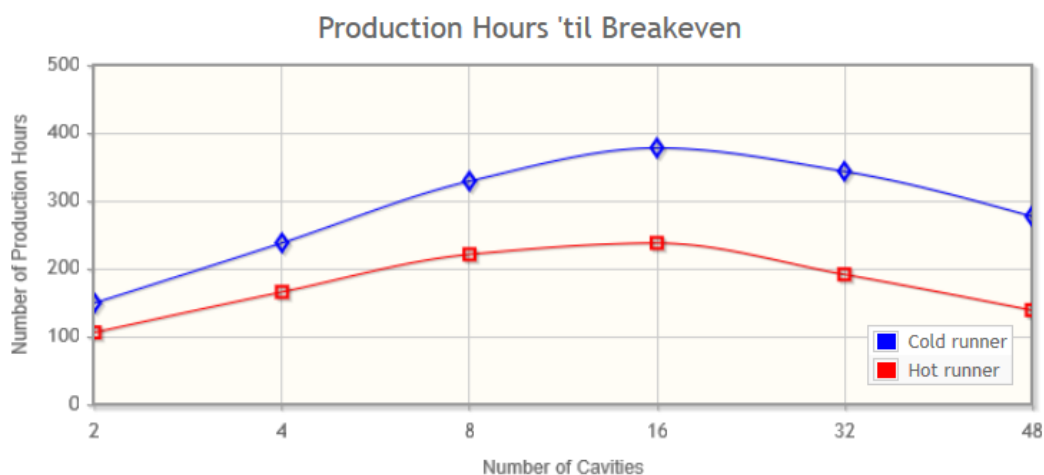
El proyecto se llevará a cabo con un numero de cuatro cavidades, por lo que se recomienda el colado en frío hasta volúmenes de producción que rondan las 40.000 piezas, y a partir de ahí, se recomendará el uso de colado en caliente.

A continuación, se muestra un diagrama el cual relaciona equilibrio de volumen y número de cavidades. El equilibrio de volumen significa que el coste de colado en frío y el coste de colado en caliente es el mismo.



5. Diagrama. Número de cavidades vs volumen de producción.

Por último, se muestra un diagrama que relaciona la cantidad de horas de producción necesarias y el número de cavidades. Lógicamente, el colado en frío supondrá una mayor cantidad de horas de producción. Esta diferencia de horas ya se han tenido en cuenta para realizar los diagramas de *coste-volumen de producción*.



6. Diagrama. Número de horas de producción vs número de cavidades.

Partiendo de los datos obtenidos, se recomendará el uso de cámara caliente para cuatro cavidades a partir de las 40.000 piezas. Además, la diferencia de horas de producción necesarias entre el colado en frío y en caliente será de unas 60 horas (las cuales ya se han tenido en cuenta en los costes) más en el caso de colado en frío.

Por tanto, se decide el uso de cámara caliente, ya que se desea una producción de 80.000 piezas.

3.1.4 FUERZA DE CIERRE

Es necesario calcular la fuerza de cierre necesaria ya que es uno de los parámetros principales utilizados para elegir máquina de inyección. Cuando se inyecta el material fundido a presión este tiende a abrir los platos del molde, por lo que es necesario aplicar una fuerza de cierre superior a la fuerza creada por la inyección, ya que si no se daría una apertura del molde creando graves daños.

La fuerza de cierre teórica se obtiene multiplicando el área proyectada de las cavidades y canales por la presión en el interior del molde (no confundir con la presión de inyección). Para ello, se hace uso de los datos obtenidos en la simulación de llenado, en la cual se ha obtenido una presión interior máxima de 65MPa y un área proyectada de 312,62 cm². Los resultados serán muy conservadores, ya que la presión interior disminuye considerablemente una vez ha transitado los canales y alcanza la pieza, donde mayor es el área.

$$F_c = P_{int} \cdot A_p$$

$$F_c = 65MPa \cdot 31262 \text{ mm}^2 = 2032030N$$

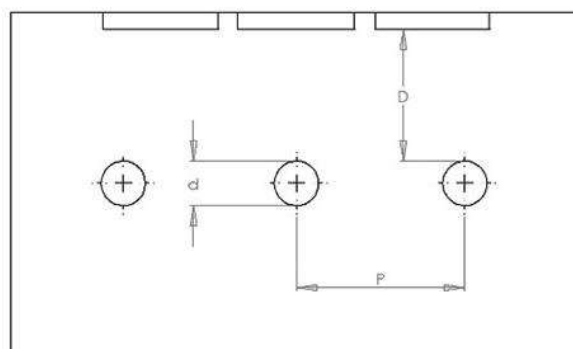
$$2032030N \cdot \frac{1Kg}{9,81 N} \cdot \frac{1 \text{ tonelada}}{1000 Kg} = 207,14 \text{ toneladas}$$

Además, también se ha logrado la fuerza de cierre mediante el software, el cual la calcula teniendo en cuenta la presión de cada zona.

Se ha obtenido una fuerza de cierre de 67,87 toneladas. En este caso, la fuerza de cierre se asemeja mucho más a la realidad, ya que para su cálculo se tiene en cuenta la distribución de presión sobre la pieza, por lo que será la fuerza de cierre a utilizar cuando se diseñe el molde.

3.1.5 CONDICIONES DEL CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN

Para el dimensionado del sistema de refrigeración se hará uso de las siguientes relaciones basadas en ensayos experimentales.



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

3. Figura. Dimensionado del circuito de refrigeración.

Partiendo de un espesor medio en la pieza de 2 mm se decide utilizar un diámetro en los canales de refrigeración de 6 y 8 mm. Por tanto, se obtienen las siguientes relaciones:

$$d_T = 6 - 8 \text{ mm}$$

$$6 - 8 \text{ mm} \leq D \leq 12 - 16 \text{ mm}$$

$$18 - 24 \text{ mm} \leq P \leq 30 - 40 \text{ mm}$$

A la hora de realizar la distribución del circuito de refrigeración habrá que tener en cuenta los límites logrados para cada uno de los diámetros.

3.1.6 DIMENSIONADO DEL CANAL

En este apartado se realizará un cálculo aproximado de las dimensiones de los canales, para después utilizarlo en el diseño de la cámara caliente.

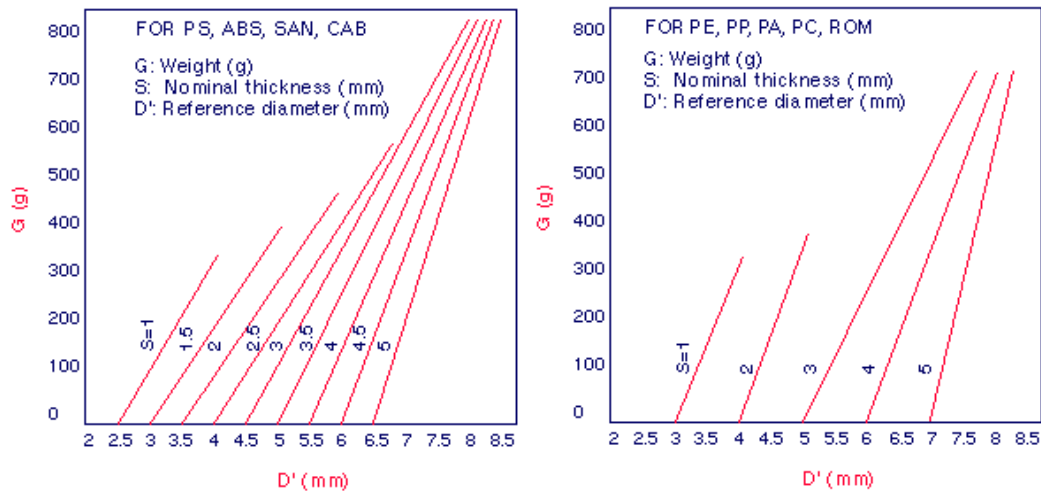
El diámetro y longitud de los canales tienen influencia en la resistencia a la que se verá sometida el flujo. Una resistencia elevada supone pérdidas de presión grandes, pero reducir la resistencia aumentando el diámetro del canal supone un mayor volumen de colado y mayor tiempo de refrigeración en caso del colado en frío.

Se puede calcular el diámetro mediante una ecuación empírica o mediante gráficas.

$$D = \frac{W^{1/2} \cdot L^{1/4}}{3,7}$$

Donde D representa el diámetro (mm), W la masa (g) y L la longitud (mm) total de los canales.

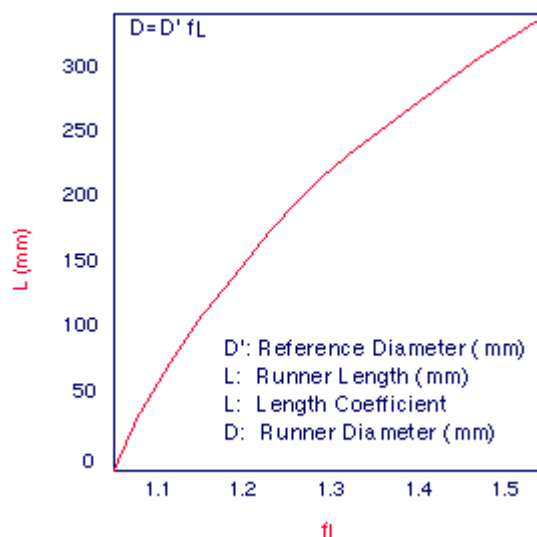
$$D = \frac{42^{1/2} \cdot 300^{1/4}}{3,7} = 7,28 \text{ mm}$$



7. Diagrama. Diámetro de referencia para diferentes materiales.

El material utilizado es una poliamida, por lo que se utilizará el diagrama de la derecha.

Partiendo de un peso de 42 g y un espesor nominal de 2 mm se obtiene un diámetro de referencia de ≈ 4,5 mm.



8. Diagrama. Longitud del canal vs coeficiente de longitud.

Por otro lado, suponiendo una longitud de 300 mm se obtiene un coeficiente de longitud de 1,45.

Multiplicando el coeficiente de longitud y el diámetro de referencia se obtiene el diámetro del canal.

$$D = D' \cdot f_L = 4,5 \cdot 1,25 = 6,52 \text{ mm}$$

El resultado obtenido mediante la fórmula empírica es de 7,28 mm. Por otro lado, el resultado obtenido mediante tablas es de 6,52 mm. Estos datos serán utilizados a la hora de elegir el diseño de la cámara caliente.

3.1.7 DIMENSIONADO DE LA CÁMARA CALIENTE

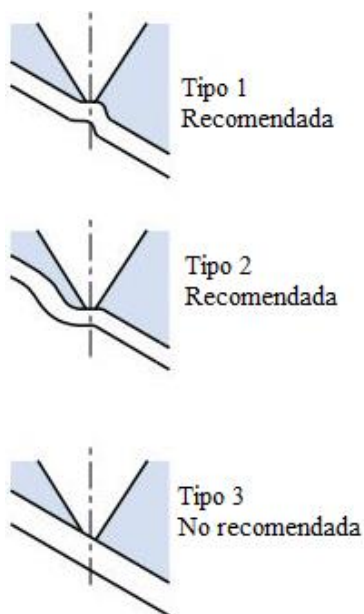
El diseño de la cámara caliente se realizará mediante una herramienta de cálculo llamada CADHOC, proporcionada por el fabricante Günther.

Se rellenará la siguiente tabla con los datos del proyecto.

2. Tabla. Datos del material y pieza.

Grupo de material:	PA		
Tipo de material:	PA 6, 30% GF, Novamid-1010G30		
	<input type="checkbox"/> Opción del tipo del material dependiendo del características del flujo <input type="checkbox"/> Haga clic aquí, si el material deseado falta		
Materiales de origen:	Fibra de		
Procesando la	min. 235 °C	265 °C	max. 300 °C
Temperatura de	min. 70 °C	90 °C	max. 110 °C
Viscosidad :	192.41 [Pa * s]		
Grosor de la pared:	2.0 mm		
Peso de inyección por boquilla:	42.0 g/boquilla		
Volumen por boquilla:	30.68 cm3		
Tiempo de inyección:	min. 0.8 s	0.9 s	max. 1.0 s
	valor de tipo no		valor de tipo no

Se añadirá una pequeña hendidura en la pieza para un correcto posicionamiento de la boquilla.



4. Figura. Recomendación de posicionamiento de boquilla.

A continuación, se elegirá el tipo de entrada boquilla en punta, siguiendo la recomendación de la herramienta de diseño.



5. Figura. Selección de tipo de boquilla.

A continuación, se eligen la longitud de las boquillas, diámetro de entrada, diámetro del tubo de la boquilla y tipo de boquilla, basándose en el criterio ofrecido por el software.

Largo de la boquilla:	<input type="text" value="60"/>	
Diámetro Diámetro de la entr:	<input type="text" value="1.8"/>	
Ø Tubo de la boquilla:	<input type="text" value="8.0"/>	mm
Tipo de boquillas:	<input type="text" value="SHT2"/>	Apropiado

6. *Figura. Dimensionado de las boquillas.*

En el apartado XX se ha obtenido un diámetro de canal de 6 y 7,28 mm, por otro lado, el software recomienda un diámetro de canal de 8 mm, por lo que se sigue el criterio ofrecido por Günther.

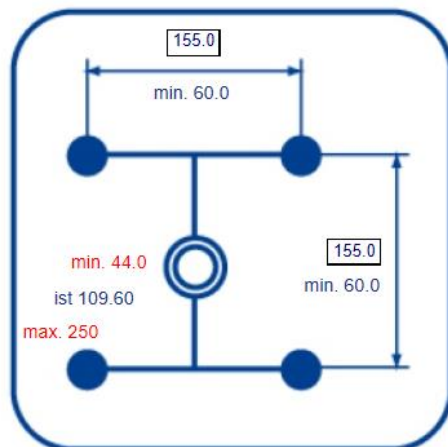
Una vez se ha elegido una distribución de boquillas en H se dimensionará el bebedero calefactado.

Radio de la boquilla de la Máquina:	<input type="text" value="R = 1/2"/>	<input type="text" value="13.0"/>	mm
Largo de la boquilla de conexión:	<input type="text" value="60"/>		mm
El alto la placa fijación:		66 mm	

7. *Figura. Dimensionado del bebedero.*

Se establece una longitud de bebedero de 60 mm bajo recomendación de Günther. Por otro lado, se establece un radio de boquilla de la máquina de 1/2".

Por último, se establecerá la longitud entre boquillas, partiendo de la distribución de cavidades que se utilizará.



8. Figura. Dimensionado de la cámara caliente.

Con este paso se dará por finalizado el diseño de la cámara caliente y el proveedor facilitará archivos CAD, planos y presupuesto.

3.1.8 CÁLCULO DEL CAUDAL

Se realizará el cálculo del caudal mínimo necesario para alcanzar un número de Reynolds de al menos 10.000, ya que un flujo completamente turbulento mejora la refrigeración del sistema.

Los canales de refrigeración tendrán un diámetro de 6 y 8 mm. El refrigerante utilizado será agua a 25°C, por lo que se logran los siguientes valores para la densidad y la viscosidad dinámica:

$$\rho = 997 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\mu = 0,000891 \frac{Kg}{m \cdot s}$$

Por lo tanto, conociendo la densidad, viscosidad dinámica, diámetro y número de Reynolds se obtendrá el caudal.

$$Re = \frac{\rho \cdot v_s \cdot D}{\mu}$$

Se relaciona el caudal, la velocidad y la sección:

$$Q = v_s \cdot A$$

Reemplazando la velocidad por el caudal y la sección, se obtiene:

$$Re = \frac{\rho \cdot \frac{Q}{A} \cdot D}{\mu}$$

Se reemplazan los valores, para así obtener el caudal mínimo:

$$10.000 = \frac{997 \frac{Kg}{m^3} \cdot \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \cdot (0,008 m)^2} \cdot 0,008 m}{0,000891 \frac{Kg}{m \cdot s}}$$

Se obtiene un caudal de:

$$Q = 5,6151635 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

$$Q = 5,6151635 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s} \cdot \frac{1.000 dm^3}{1 m^3} \cdot \frac{60 s}{1 min} = 3,369 L/min$$

Por otro lado, el circuito de 6 mm de diámetro necesitará un caudal teórico de:

$$10.000 = \frac{997 \frac{Kg}{m^3} \cdot \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \cdot (0,006 m)^2} \cdot 0,006 m}{0,000891 \frac{Kg}{m \cdot s}} = 4,211 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

$$4,211 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s} \cdot \frac{1.000 dm^3}{1 m^3} \cdot \frac{60 s}{1 min} \rightarrow Q = 2,52 L/min$$

Por tanto, para alcanzar un número de Reynolds de al menos 10.000 se tendrá que asegurar un caudal mínimo teórico de 3,369 L/min y 2,52 L/min para los canales de 8 y 6 mm respectivamente.

3.1.9 ANÁLISIS DE LOS EXPULSORES A PANDÉO

A continuación, se comprobará la resistencia a pandeo de los expulsos.

Por un lado, se calculará la resistencia de los expulsos macizos, haciendo uso del expulsor más crítico con una longitud máxima de 220 mm y un diámetro de 8 mm. Su radio de giro será:

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

$$i_{min} = \sqrt{\frac{\pi \cdot \frac{r^4}{4}}{\pi \cdot r^2}} = \sqrt{\frac{r^2}{4}}$$

$$i_{min} = \sqrt{\frac{4^2}{4}} = 2 \text{ mm}$$

Por otro lado, suponiendo una barra empotrada y articulada, se logra la longitud de pandeo:

$$L_p = 0,7 \cdot L$$

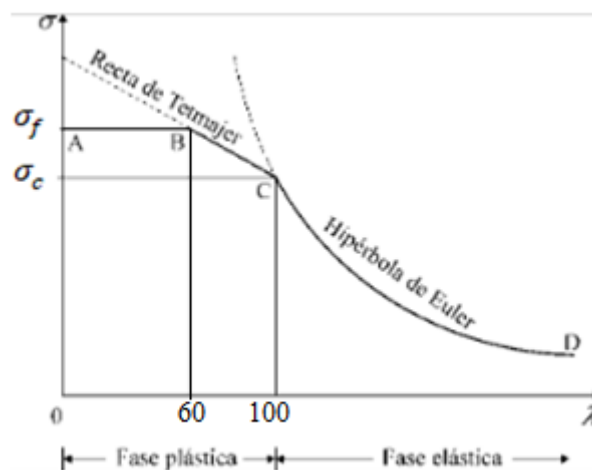
$$L_p = 0,7 \cdot 220 = 154 \text{ mm}$$

Por tanto, la esbeltez de los expulsores macizos será:

$$\lambda = \frac{L_p}{i_{min}}$$

$$\lambda = \frac{154}{2} = 77$$

Al obtener una esbeltez inferior a 100 se considera un pandeo plástico, por lo que, al estar en un rango de esbeltez entre 60 y 100, se hará uso de la recta Tetmajer.



9. Diagrama. Tensión vs esbeltez.

Para lograr la ecuación de la recta de Tetmajer se hará uso de los puntos B y C, los cuales ya son conocidos.

$$B = (60, \sigma_f)$$

$$C = \left(\lambda_c, \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda_c^2} \right)$$

El material de los expulsores fijos es 1.2510, con las siguientes propiedades:

$$E = 193 \text{ GPa}$$

$$\sigma_f = 770 \text{ MPa}$$

Por tanto, la ecuación será:

$$\frac{\lambda - 60}{100 - 60} = \frac{\sigma - 770}{\frac{\pi^2 \cdot 193000}{100^2} - 770}$$

Se utilizará la ecuación junto a la esbeltez del expulsor (77) para obtener la tensión crítica. Se obtiene el siguiente resultado:

$$\sigma_k = 523,7 \text{ MPa}$$

Para calcular la tensión crítica del casquillo expulsor se sigue el mismo procedimiento. Los casquillos no son tan críticos como los expulsores, ya que su momento de inercia es mayor y tienen menor longitud; de todas formas, se realizará el cálculo de estos también ya que son de diferente material. Los datos de los casquillos son los siguientes:

$$L = 165 \text{ mm}$$

$$\phi_{int} = 8 \text{ mm}$$

$$\phi_{ext} = 11 \text{ mm}$$

$$E = 210 \text{ GPa}$$

$$\sigma_f = 720 \text{ MPa}$$

Se comienza logrando el radio mínimo, para así lograr la esbeltez de los casquillos:

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

$$i_{min} = \sqrt{\frac{\frac{\pi}{64} \cdot (d_2^4 - d_1^4)}{\frac{\pi}{4} \cdot (d_2^2 - d_1^2)}}$$

$$i_{min} = \sqrt{\frac{\frac{\pi}{64} \cdot (11^4 - 8^4)}{\frac{\pi}{4} \cdot (11^2 - 8^2)}} = 13,6 \text{ mm}$$

Por otro lado, suponiendo una barra empotrada y articulada, se logra la longitud de pandeo:

$$L_p = 0,7 \cdot L$$

$$L_p = 0,7 \cdot 165 = 115,5 \text{ mm}$$

Por tanto, la esbeltez de los expulsores macizos será:

$$\lambda = \frac{L_p}{i_{min}}$$

$$\lambda = \frac{115,5}{13,6} = 8,49$$

En este caso, al obtener una esbeltez menor a 60, se hará uso de la parabólica de Johnston-Ostenfeld.

$$\sigma_k = \sigma_f - c \cdot \lambda$$

Donde c es una constante de valor $c = 0,03 \frac{kg}{cm^2}$

Por tanto, la presión crítica en el caso de los casquillos será:

$$\sigma_k = 720MPa - 0,03 \frac{Kg}{cm^2} \cdot \frac{9,81 N}{1 Kg} \cdot \frac{1 cm^2}{100mm^2} \cdot 8,49 = 719,97 MPa$$

Resumiendo, las tensiones críticas obtenidas para los expulsores y para los casquillos son las siguientes:

$$\sigma_k = 523,7 MPa$$

$$\sigma_k = 719,97 MPa$$

La presión máxima de inyección es de 64 MPa, dándose un máximo de 50MPa en las cavidades. Por lo que nunca se alcanzarán las presiones críticas. A pesar de usar expulsores y casquillos sobredimensionados se mantendrán sus dimensiones, ya que estos también funcionan como machos en la cavidad.

Los coeficientes de seguridad obtenidos son los siguientes:

$$CS_{exp} = \frac{523,7}{50} = 10.5$$

$$CS_{casq} = \frac{719,97}{50} = 14.4$$

3.2 SIMULACIONES

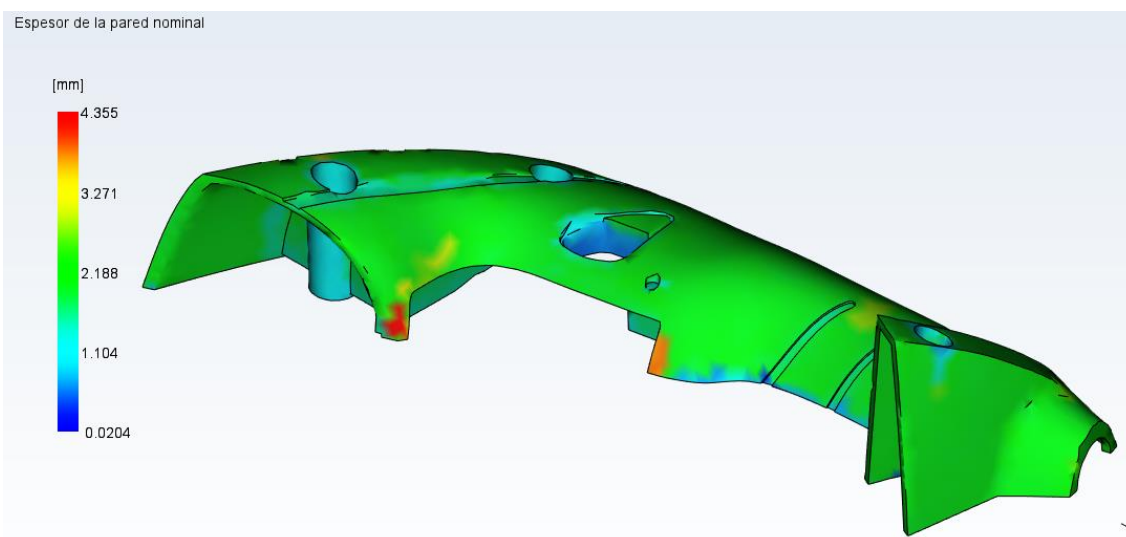
3.2.1 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Las simulaciones se han lanzado con los siguientes parámetros:

- Material: Lanxess Durethan BK 30 H2.0
- Temperatura de masa fundida: 270°C
- Temperatura del molde: 100°C
- Puntos de inyección: 4
- Presión máxima de inyección de la máquina: 180 MPa
- Refrigerante: Agua
- Temperatura del refrigerante: 25°C
- Caudal del refrigerante: 3,5 L/min

3.2.2 ESPESOR

Se realiza un análisis sobre el espesor de la pieza, ya que será necesario conocer el espesor nominal y máximo para ciertos cálculos.

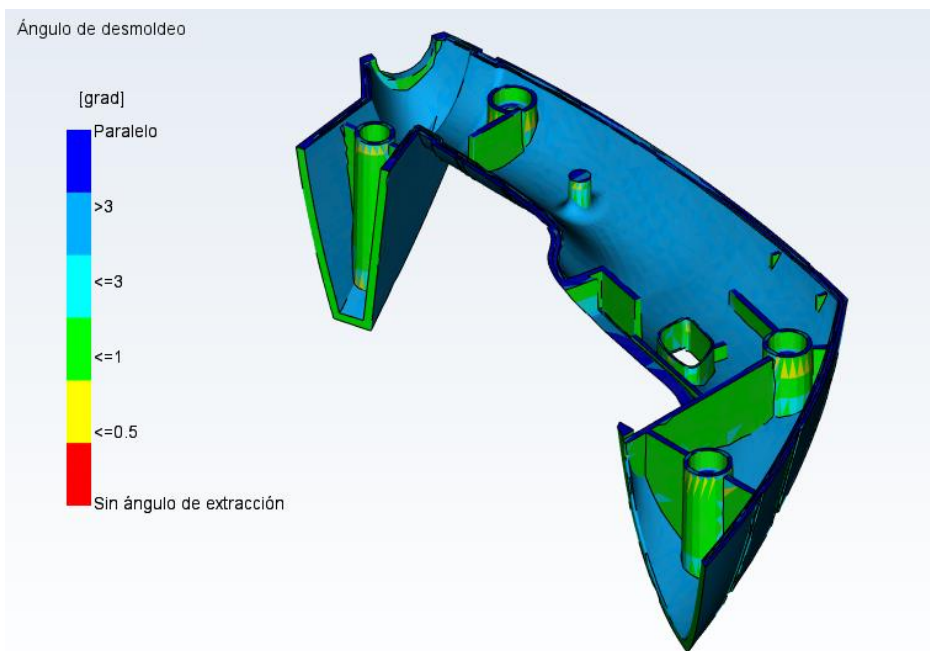


9. *Figura. Distribución del espesor.*

Como se puede observar la pieza tiene en gran parte de la geometría un espesor uniforme de un valor cercano a los de 2 mm y un espesor máximo de 4,3 mm en zonas muy concretas.

3.2.3 ÁNGULO DE DESMOLDEO

Se miden los ángulos de desmoldeo, por un lado, para verificar que no se den paredes paralelas al eje de desmoldeo, y, por otro lado, para conocer las zonas con mayor inclinación y así poder ubicar los expulsores cerca de estas.

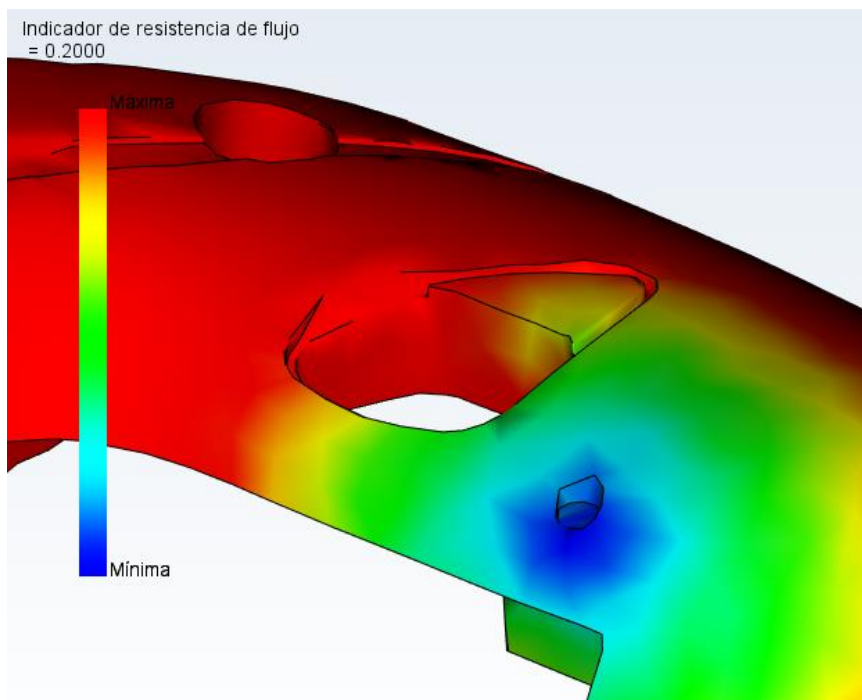


10. Figura. Análisis de ángulos de desmoldeo.

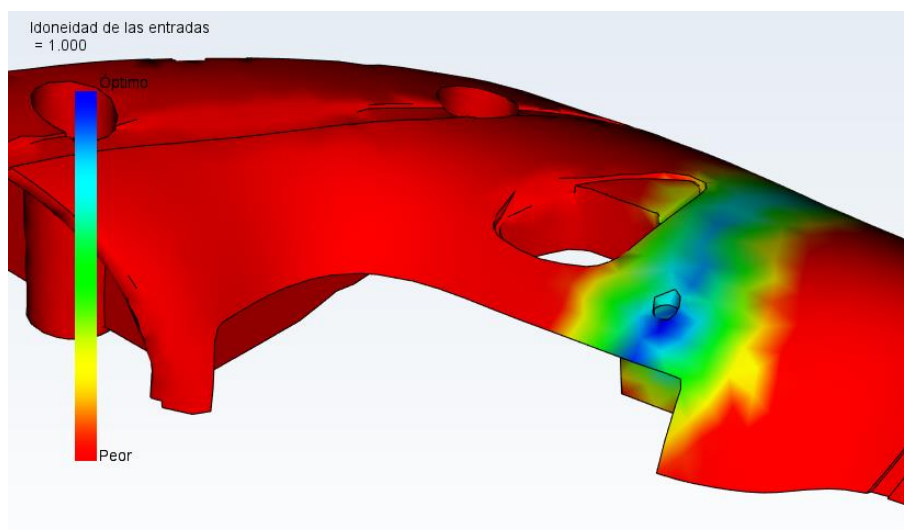
Se puede observar las zonas más críticas en el desmoldeo. Además, es una pieza con varias paredes inclinadas, por lo que la fuerza de expulsión será considerable.

3.2.4 PUNTO DE INYECCIÓN ÓPTIMO

Se realiza otro análisis para obtener el punto óptimo de inyección con un solo punto de inyección. Los resultados obtenidos se han acotado para así visualizar tan solo las mejores zonas.



11. Figura. Indicador de resistencia de flujo para una sola entrada.



12. Figura. Idoneidad de la entrada.

Se puede observar como la zona elegida para el punto de inyección es idónea.

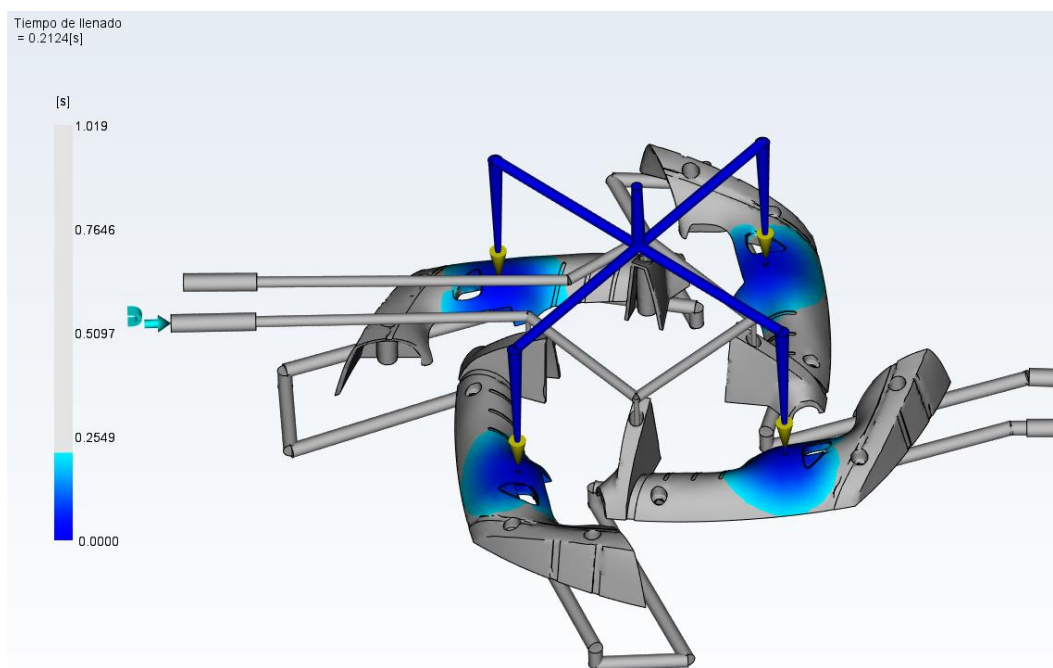
3.2.5 TIEMPO DE LLENADO

En este análisis se obtiene el tiempo de llenado. Mediante un sistema de colores se marcarán las regiones, indicando en azul las primeras en llenarse y en rojo las últimas.

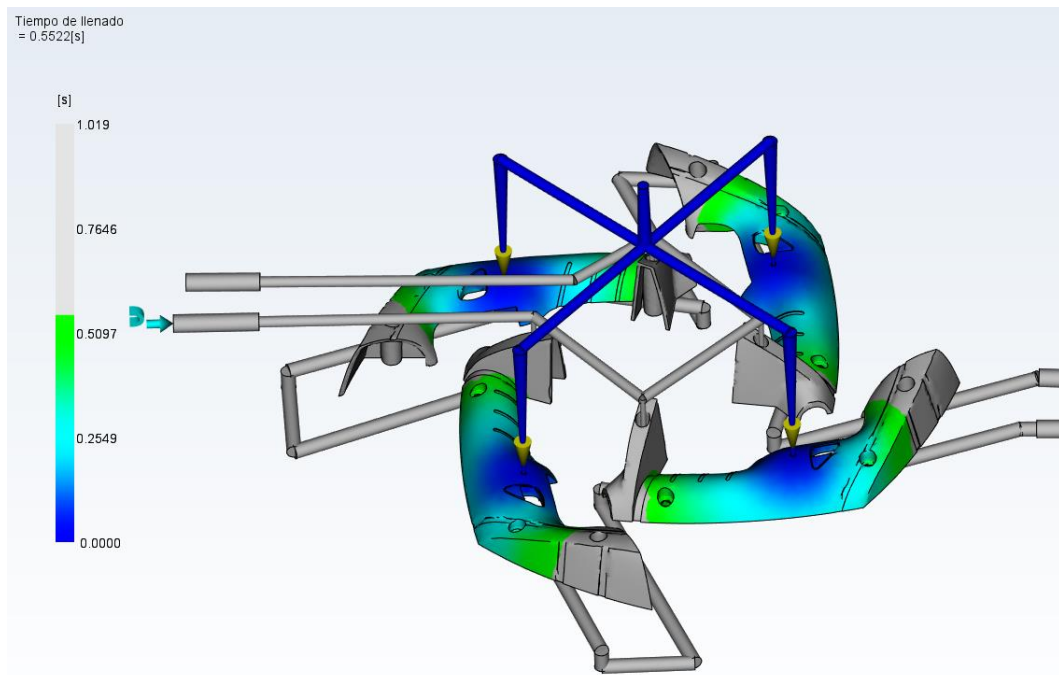
Al tratarse de una pieza asimétrica habrá que ubicar el punto de inyección en una zona buscando que todas las rutas de flujo terminen simultáneamente y un espaciado entre contornos equilibrado, evitando así llenados demasiado rápidos o demasiado lentos.

El punto de inyección se ha ubicado siguiendo los resultados del análisis 3.2.3. *Punto de inyección óptimo*.

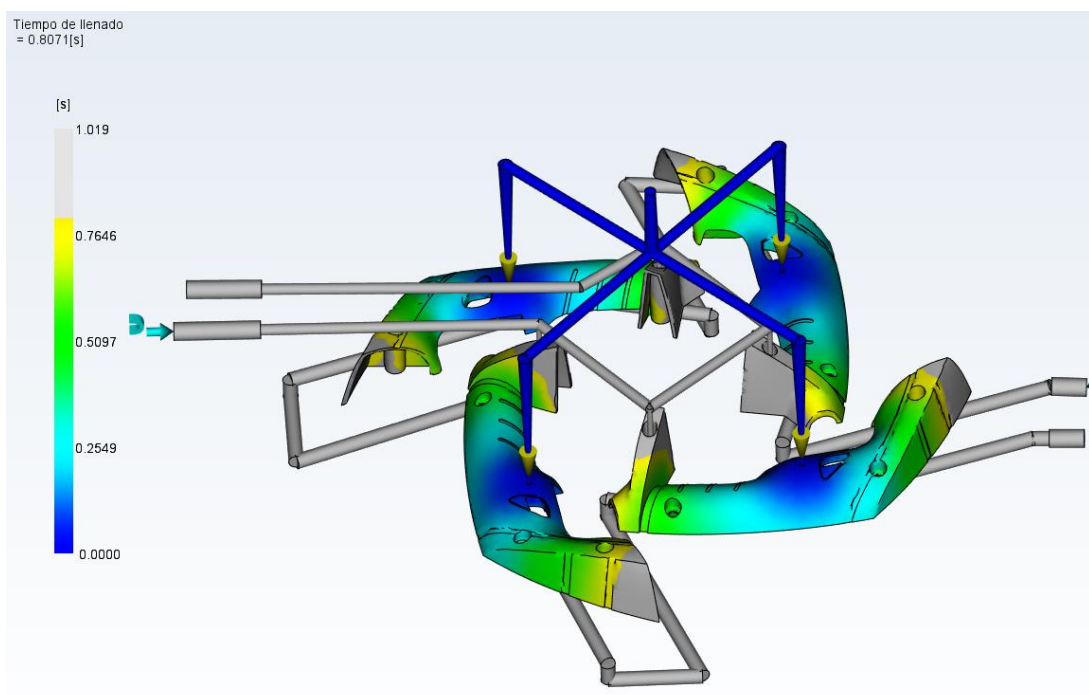
A continuación, se muestra la secuencia de llenado y el resultado final.



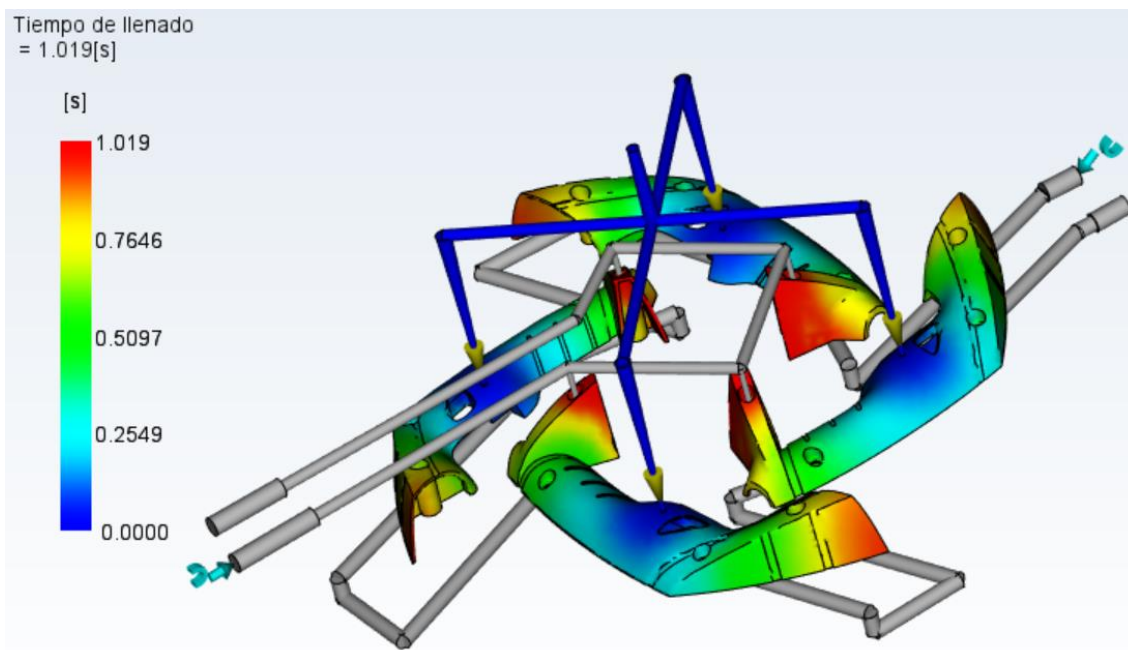
13. Figura. Fase 1 del llenado pasados 0,2 segundos.



14. Figura. Fase 2 del llenado pasados 0,55 segundos.



15. Figura. Fase 3 del llenado pasados 0,8 segundos.



16. Figura. Fase final del llenado pasados 1.019 segundos.

Como se puede observar en los resultados obtenidos el tiempo de llenado es de 1.019 segundos. Ambos extremos de la cavidad se llenan en tiempos similares, a pesar de que uno de ellos necesite algo más de tiempo.

Se comprueba que no se dan inyectadas cortas al no aparecer zonas translucidas, además, tampoco se dan contornos desequilibrados, por lo que se evitan las indecisiones en el flujo. Por otro lado, las líneas de flujo finalizan en tiempos parejos, por lo que se evita la sobrecompactación, y por tanto también se evita tener una densidad desigual a lo largo de la pieza.

Por último, se revisa las rutas de flujo comprobando que no se dé el efecto racetrack (se da cuando el plástico fluye hacia regiones gruesas con mayor facilidad que hacia regiones finas, llenando éstas últimas al final) el cual puede provocar atrapamientos de aire, líneas de soldadura y regiones con altas tensiones internas.

Por lo tanto, se puede asegurar que el llenado es equilibrado.

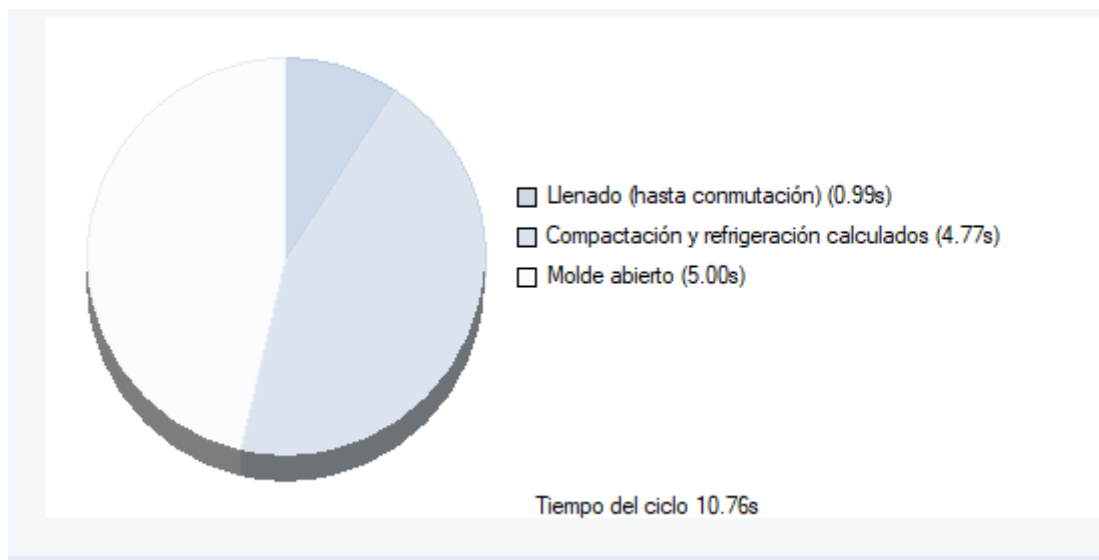
Los datos obtenidos en la simulación de llenado son los siguientes:

3. *Tabla. Datos del llenado.*

Tiempo real de llenado	1.02 (s)
Presión real de inyección	63.916 (MPa)
Área de fuerza de cierre	312.6260 (cm²)
Fuerza de cierre máx. durante el llenado	67.876 (tonelada)
Conmutación de velocidad/presión a % volumen	98.35 (%)
Conmutación de velocidad/presión en tiempo	0.99 (s)
Tiempo estimado del ciclo	10.76 (s)
Peso total de la pieza	149.038 (g)
Volumen de inyectada	130.6891 (cm³)
Volumen de la cavidad	130.6891 (cm³)
Volumen del sistema de canales	0.0000 (cm³)

Cálculo de fuerza de cierre durante la compactación mediante:	
20% de la presión de inyección	40.739 (tonelada)
80% de la presión de inyección	162.956 (tonelada)
120% de la presión de inyección	244.433 (tonelada)

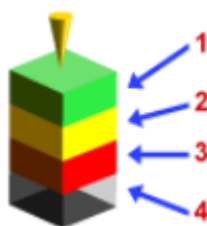
Por otro lado, también se muestra un diagrama con los tiempos de ciclo:



10. *Diagrama. Tiempo de ciclo.*

3.2.6 CONFIANZA DE LLENADO

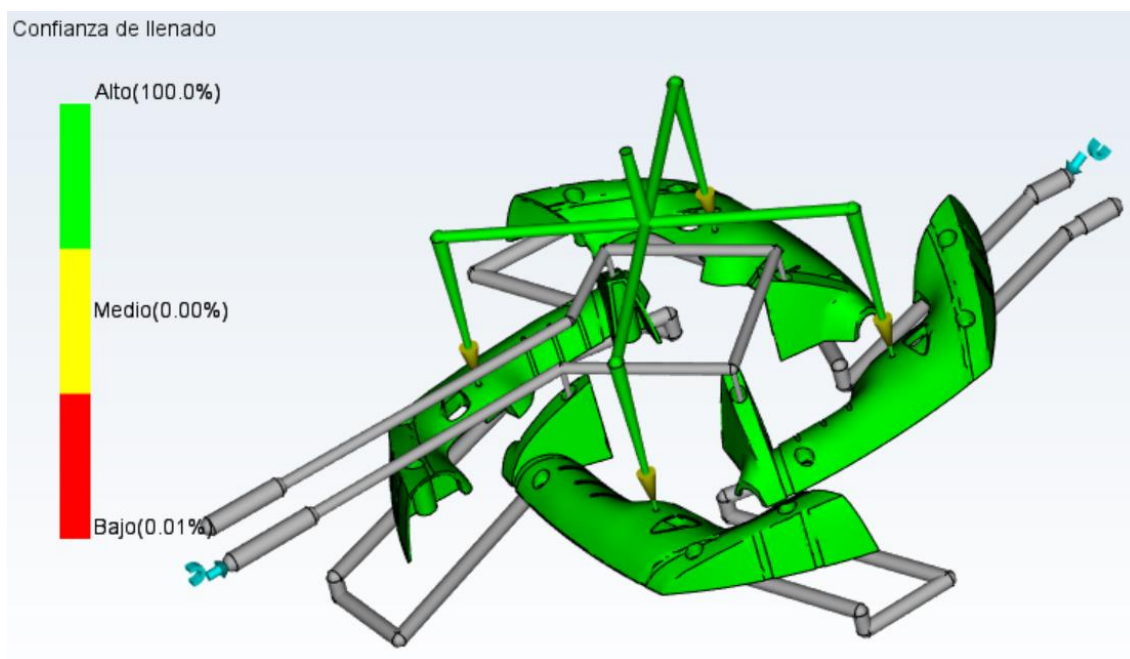
Otro de los resultados obtenidos al analizar el llenado será la confianza de llenado. Mediante este análisis se obtiene la probabilidad de llenar con plástico la región.



17. *Figura. Código de colores de la confianza de llenado.*

Los colores mostrados indican lo siguiente:

- 1- La región se llenará.
- 2- Puede haber dificultades para llenar la región o tener problemas de calidad.
- 3- Habrá problemas de llenado o baja calidad.
- 4- La región no se llenará.

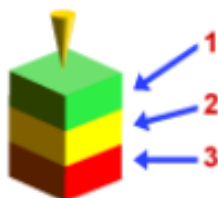


18. Figura. Confianza de llenado.

Se comprueba que la confianza de llenado obtenida es total por lo que la probabilidad de llenado es elevada y, por tanto, no habrá que realizar modificaciones en el proceso.

3.2.7 PREDICCIÓN DE CALIDAD

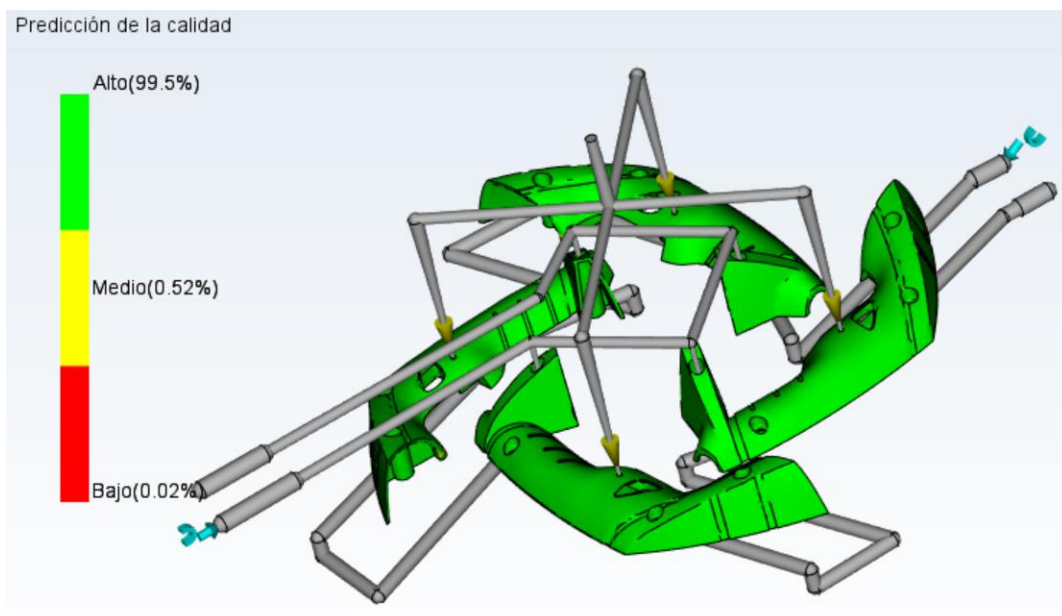
Mediante el análisis de la predicción de calidad se calcula la calidad de las propiedades mecánicas y estéticas de las regiones. Estos resultados se obtienen partiendo de la presión, temperatura y otros resultados.



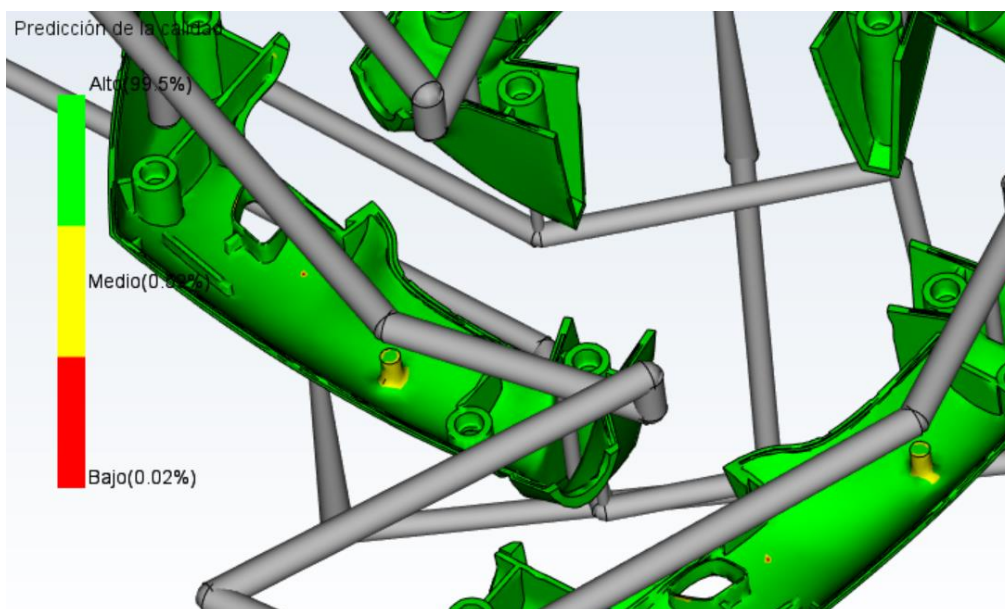
19. Figura. Código de colores de la predicción de calidad.

En este caso, la escala de colores utilizada representará lo siguiente:

1. Alta calidad
2. Pueden aparecer problemas de calidad
3. Aparecen problemas de calidad



20. Figura. Predicción de la calidad, vista superior.

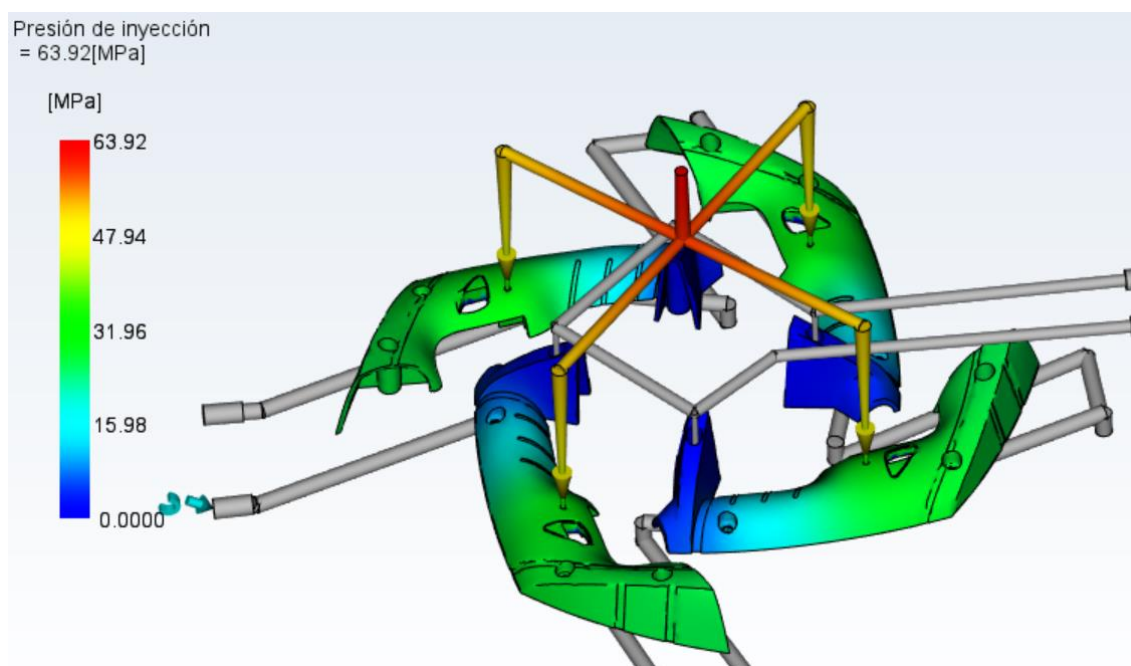


21. Figura. Predicción de la calidad, vista inferior.

Se obtiene un nivel de calidad muy alto (99.5%), exceptuando ciertas zonas concretas en la que la calidad no será idónea (0,61%). Al ser zonas muy reducidas y no visibles se da por bueno el resultado.

3.2.8 PRESIÓN DE INYECCIÓN

Mediante el análisis de presión de inyección se muestra la presión de inyección máxima obtenida antes de comenzar el llenado. Cuando comienza el llenado, la presión en la cavidad es atmosférica, por lo que el flujo tenderá a desplazarse del punto de inyección (punto con presión de inyección máxima) hacia las regiones a presión atmosférica. La presión de las regiones a presión atmosférica aumentará cuando el frente de flujo llegue a estas.



22. Figura. Presión de inyección.

Partiendo de los resultados obtenidos se puede observar que los contornos no tienen un espaciado pequeño, por lo que se deduce que no se dan grandes variaciones en la distribución de la presión.

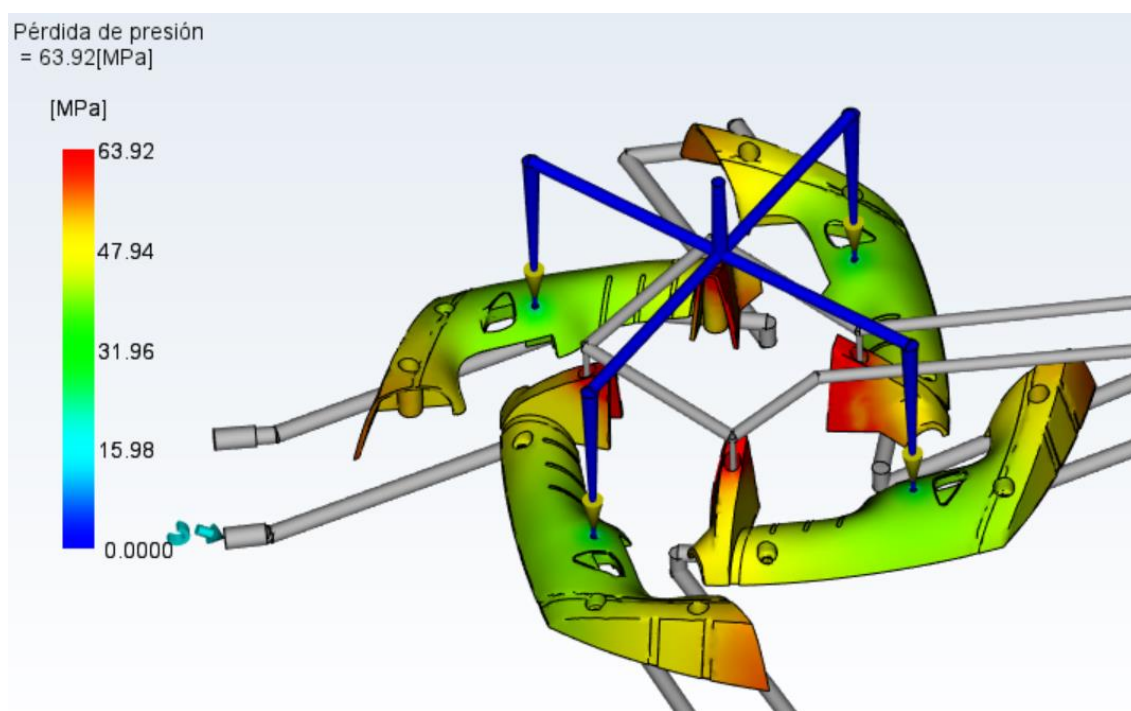
Por otro lado, se observa como uno de los extremos soporta cierta presión mientras que el otro no lo hace. Esto se debe a que un extremo se llena antes que el otro, aunque ya se ha visto en el tiempo de llenado que la variación de tiempo entre extremos es mínima. Tener una geometría asimétrica dificulta lograr dos rutas de flujo que terminen simultáneamente.

3.2.9 PERDIDA DE PRESIÓN

El análisis de pérdida de presión indica la presión necesaria para llenar las regiones. Partiendo de este análisis se logra el análisis de la confianza de llenado. Si la pérdida de presión en una región supera el 80% de la máxima presión de inyección establecida (en este caso se ha establecido una máxima presión de inyección de

180MPa) estas regiones estarán indicadas mediante color amarillo, que representa posibles problemas de llenado o calidad en la región. Por otro lado, las regiones que superen la máxima presión de inyección establecida se marcarán en rojo y representarán zonas con problemas de llenado o calidad.

Las pérdidas de presión son generadas por la resistencia ejercida sobre el avance del flujo. Estas resistencias se generan debido a la viscosidad del fluido, fricción con las paredes de la cavidad etc.



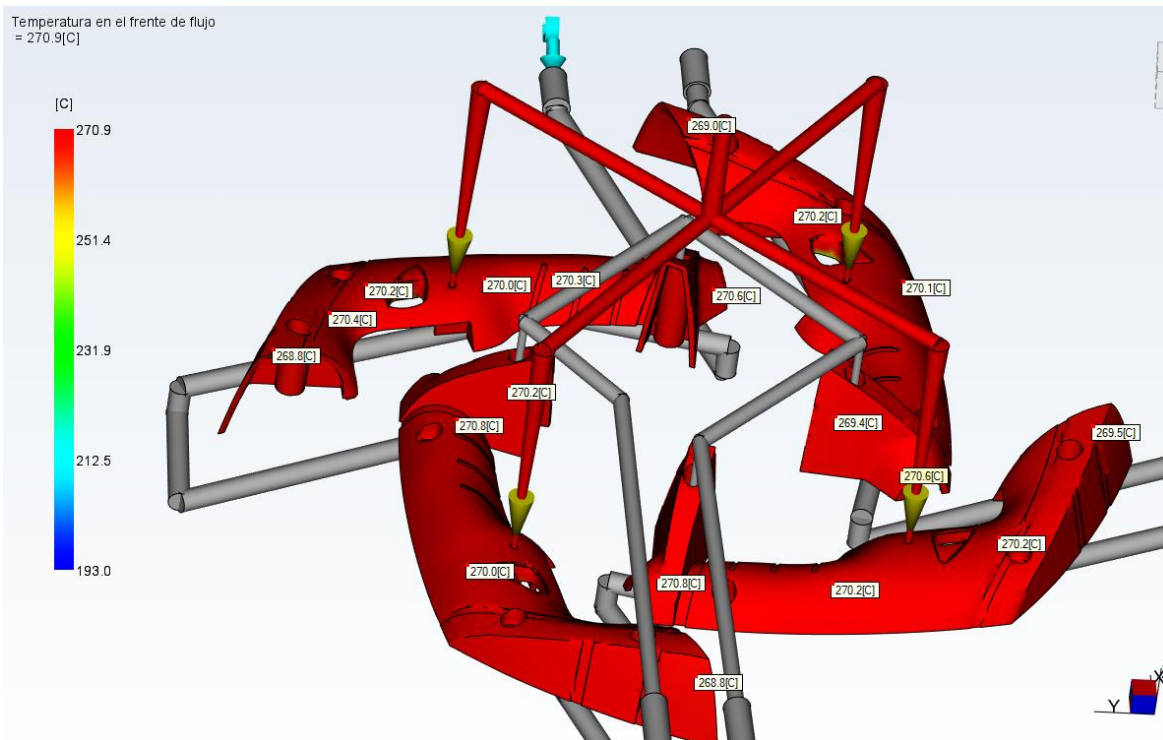
23. Figura. Pérdida de presión.

En este caso, se aprecia como la pérdida de presión en un extremo es mayor que en el otro. Además, el espaciado entre contornos es correcto, por lo que la distribución de la pérdida de presión es correcta.

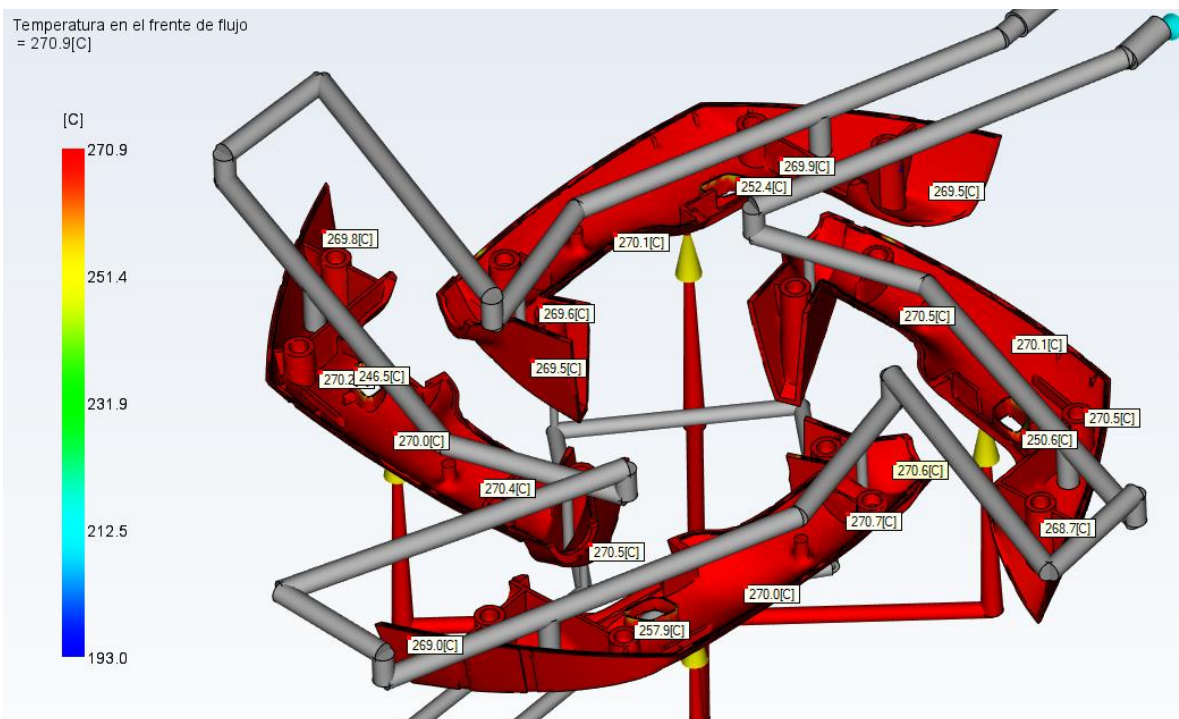
3.2.10 TEMPERATURA EN EL FRENTE DE FLUJO

La temperatura en el frente de flujo representa la temperatura a la que llega el flujo al centro de dicha región. Se recomienda que la diferencia entre la temperatura mínima y máxima que se da en la cavidad no sobrepase los 5°C. Diferencias mayores a los 5°C representan un llenado demasiado lento o zonas de indecisión para los flujos, las cuales pueden generar inyecciones cortas. Por otro lado, en zonas donde la temperatura aumenta algunos grados hay probabilidad de degradación del material y/o defectos superficiales.

Se toman medidas en diferentes puntos de cada pieza obteniendo el siguiente resultado.



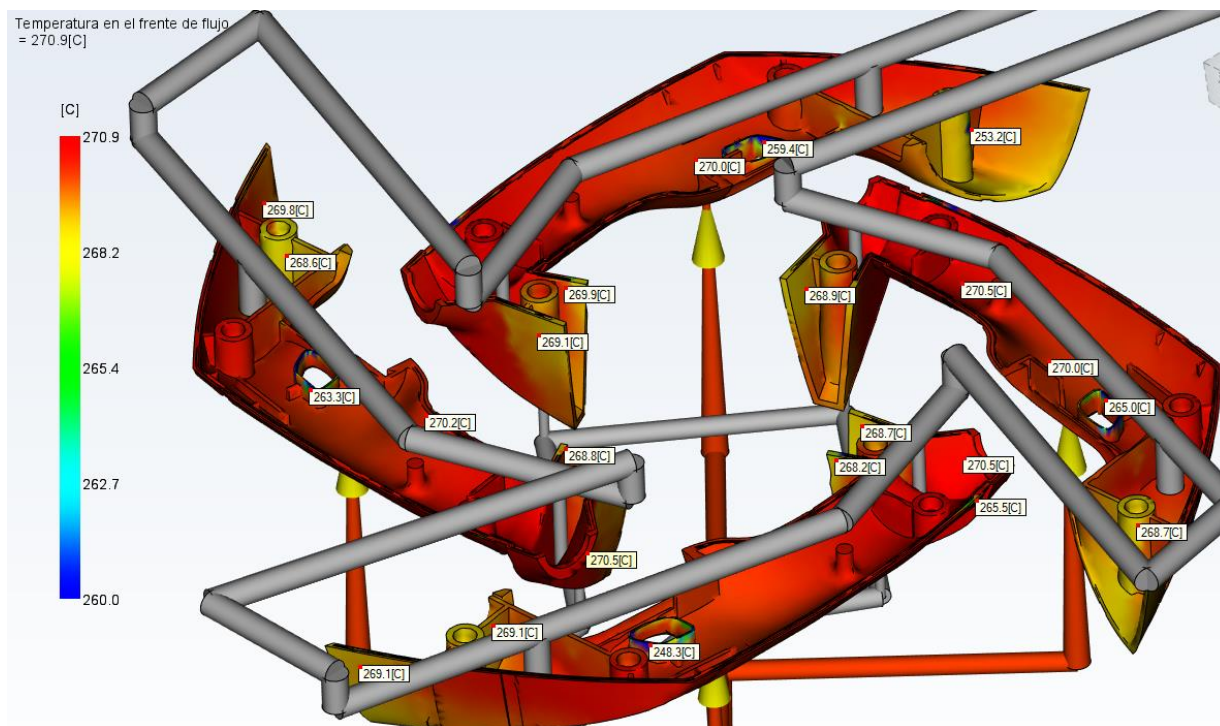
24. Figura. Temperatura en el frente de flujo, vista superior.



25. Figura. Temperatura en el frente de flujo, vista inferior.

Como se puede observar la temperatura se mantiene cercana a los 270°C en toda la pieza aumentando o disminuyendo unas décimas. A excepción de una zona concreta, en la cual se obtienen valores en un rango de 250°C y 260°C.

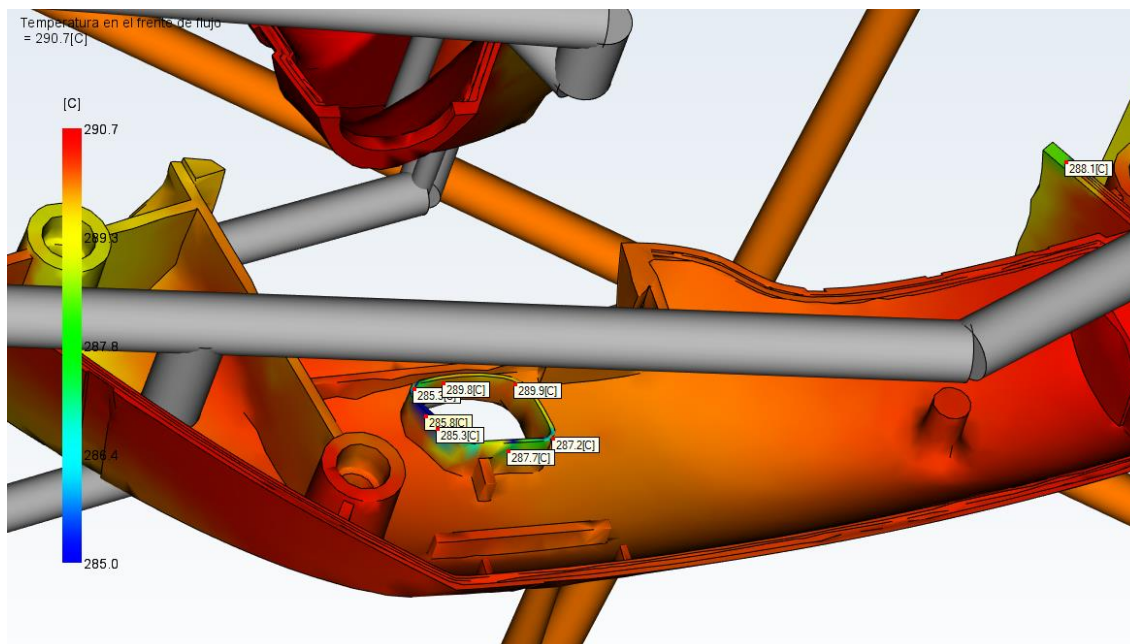
Acotando la escala se obtienen los siguientes resultados.



26. Figura. Temperatura en el frente de flujo, escalado entre 270,9°C y 260°C.

Como ya se ha comentado anteriormente, se puede observar una zona concreta marcada en azul en la cual la temperatura en el frente de flujo desciende hasta los 250°C. Por lo que la diferencia de temperatura aumenta a los 10-20°C si se tiene en cuenta esta zona.

Obtener valores inferiores a la temperatura media con una diferencia de 10-20°C puede suponer un llenado demasiado lento/rápido o indecisión en la zona. Por tanto, se comprueba la zona mencionada en los análisis de llenado, verificando que la confianza de llenado es correcta, y que el tiempo de llenado es acorde también.



27. Figura. Muestras obtenidas en temperatura en el frente de flujo con temperatura del material fundido de 290°C y temperatura del molde de 120°C.

Como se puede observar en los nuevos resultados, la temperatura se mantiene en un rango de 285-290°C, por lo que aumentando la temperatura del material fundido y/o la del molde, se obtienen resultados óptimos, necesitando un mayor tiempo de ciclo. A pesar de ello, se mantendrán las temperaturas de 270°C y 100°C ya que parece no haber problemas de llenado y/o indecisión. Mediante este último análisis se asegura una opción de llenado correcta en caso de tener problemas en la zona durante la producción.

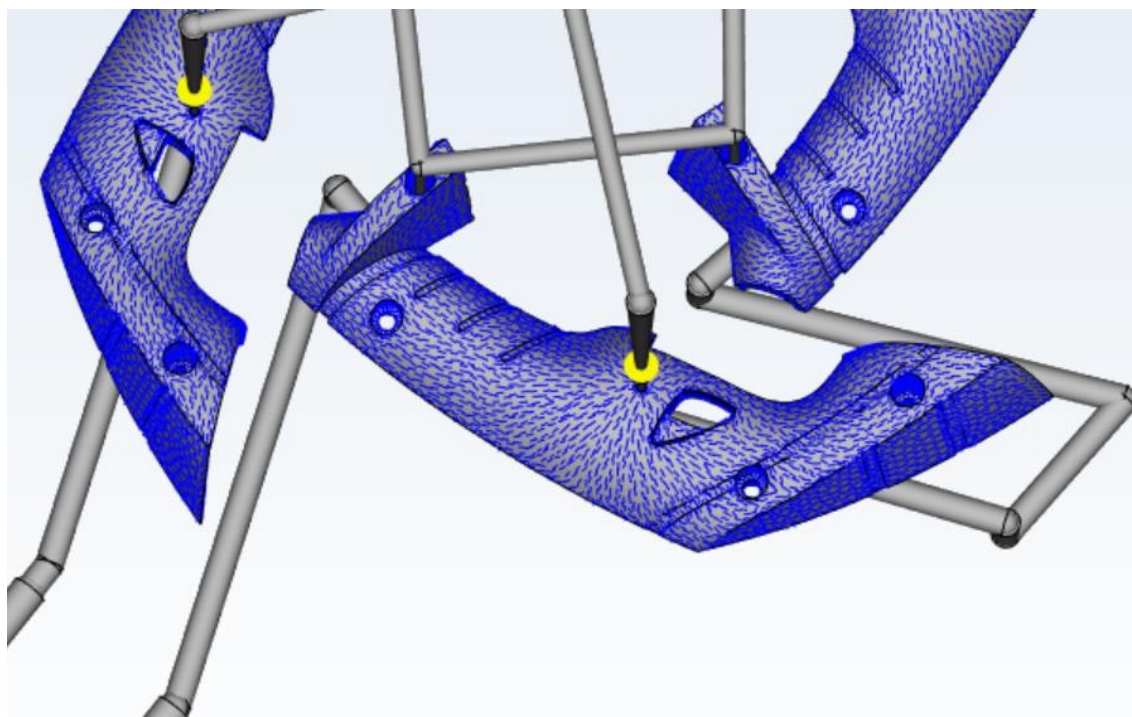
3.2.11 ORIENTACIÓN EN SUPERFICIE

La orientación de la superficie representa la orientación de las moléculas en la superficie de la pieza. El fluido tiende a solidificar rápidamente una capa, la cual está en contacto con la superficie. Por lo tanto, el vector de velocidad del fluido será probablemente la orientación de las moléculas.

La resistencia a impacto y tracción será mucho mayor en la dirección de orientación molecular, por lo que, una buena distribución supondrá buenas propiedades mecánicas. En este caso, se usa un material con fibras de vidrio, por lo que mediante la orientación molecular se obtiene la dirección de trabajo ideal de las fibras.

Además, la contracción lineal de una pieza será mayor en la dirección de orientación molecular. Por otro lado, en el caso de los materiales con fibras, las contracciones en

la dirección de la orientación molecular serán bajas debido al bajo coeficiente de contracción y a la rigidez de las fibras.



28. Figura. Orientación en superficie.

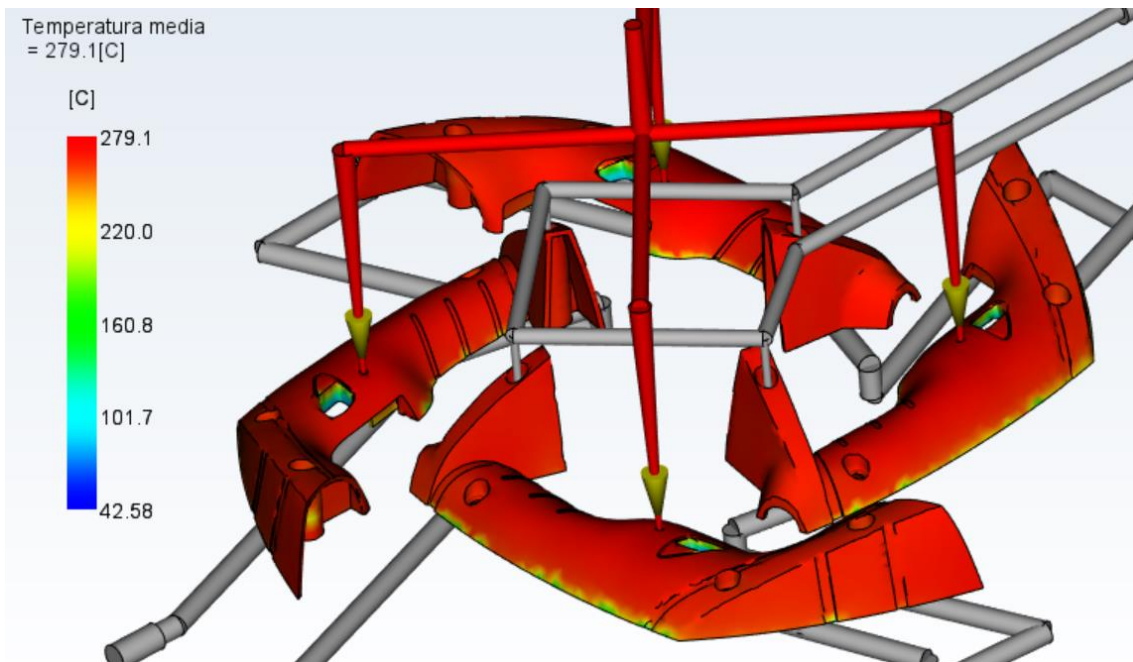
Lo ideal sería que todos los vectores apunten en dirección longitudinal, pero al realizar la inyección en un punto central de la pieza no se logra una distribución óptima. Si se quisiera lograr una distribución longitudinal, se debería de inyectar en uno de los extremos de la pieza. En este caso se prioriza un llenado equilibrado, por lo que se mantiene el punto de inyección en el centro, logrando unas propiedades mecánicas no tan buenas, aunque correctas para el uso de la pieza.

3.2.12 TEMPERATURA MEDIA

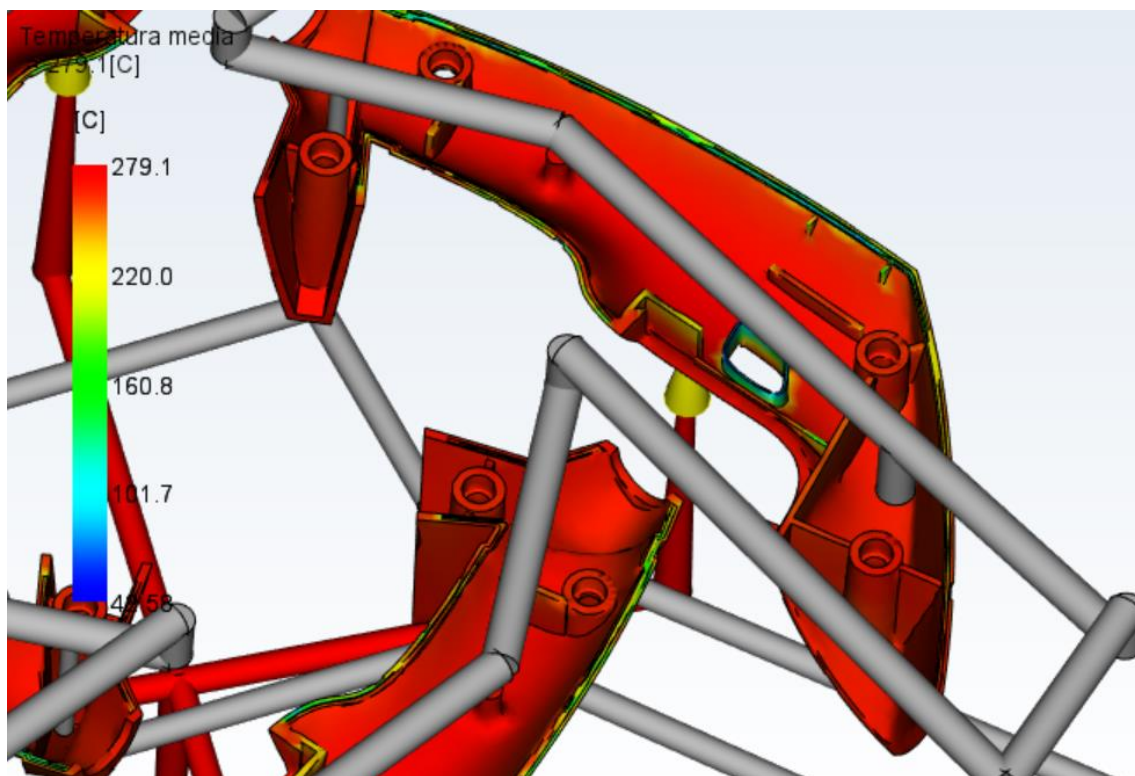
Mediante este análisis se muestra la temperatura media de la masa a lo largo de la sección al final del llenado. La temperatura media dependerá del tiempo, ubicación y espesor de la zona. Las áreas por las que transita el flujo hasta finalizar el llenado tienden a tener una temperatura media mayor.

Tener bajas temperaturas en zonas de bajo espesor supone una probabilidad de indecisiones o inyectadas cortas. Además, si las líneas de soldadura están ubicadas en zonas de baja temperatura media, estas líneas podrían empeorar. Por otro lado, temperaturas medias altas suponen la posibilidad de defectos superficiales y degradación del material. También hay que tener en cuenta el espaciado de

contornos, tener contornos de bajo espaciado supone riesgo de contracciones y deformaciones.



29. Figura. Temperatura media, vista superior.



30. Temperatura media, vista inferior.

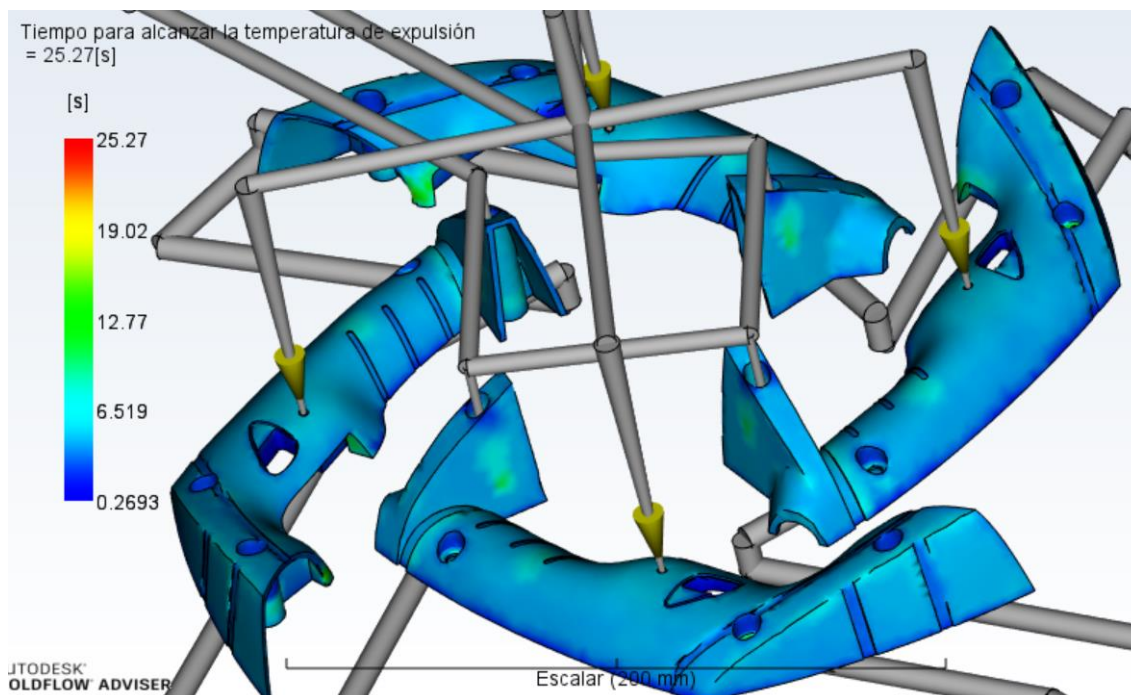
En este caso se observa que gran parte de la pieza tiene una temperatura media de 279°C, temperatura soportada por el material inyectado (290°C max), por lo que, respecto a temperaturas máximas los resultados son correctos.

También se pueden observar las zonas por las que el flujo no tiende a fluir. Estas tienden a tener bajar temperaturas. Se ha comprobado que no estén ubicadas en zonas de bajo espesor y que no tengan líneas de soldadura graves que puedan empeorar las propiedades de la pieza o la estética.

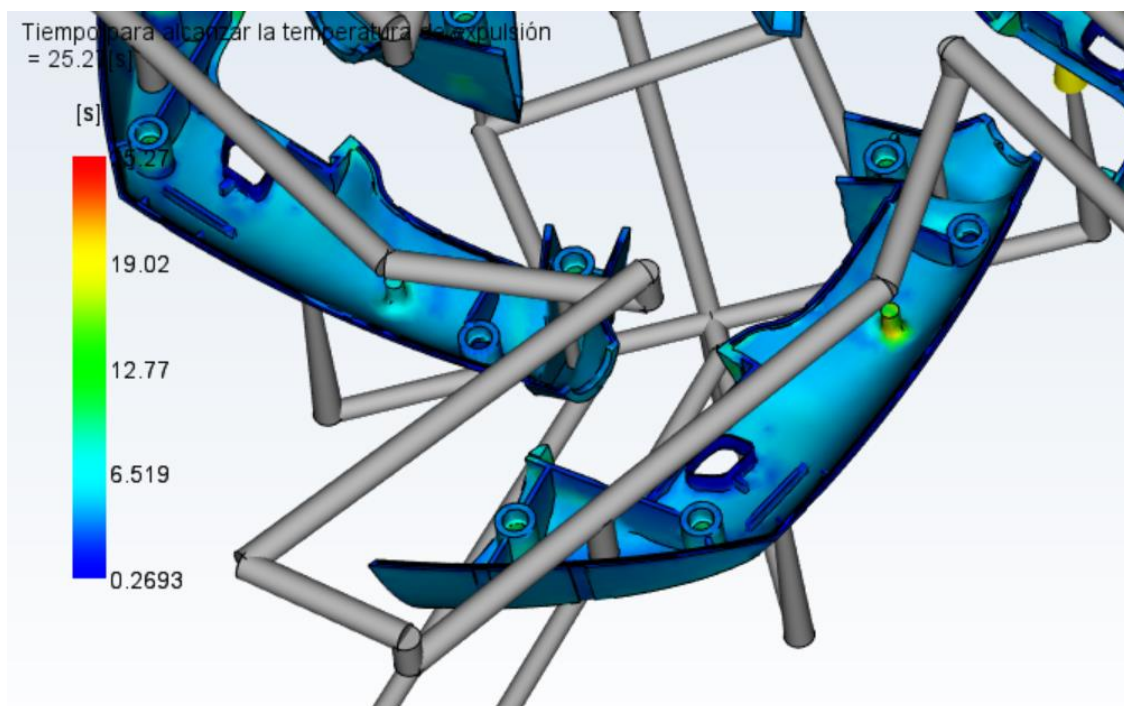
3.2.13 TIEMPO PARA ALCANZAR LA TEMPERATURA DE EXPULSIÓN

El tiempo necesario para alcanzar la temperatura de expulsión se toma desde el inicio del llenado.

Idealmente la pieza debe solidificar uniformemente. En caso de tiempos demasiado largos se recomienda rediseñar el sistema de refrigeración o rediseñar la pieza, ya que estos tiempos son debido a grandes espesores en comparación con el espesor medio.



31. Figura. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, vista superior.

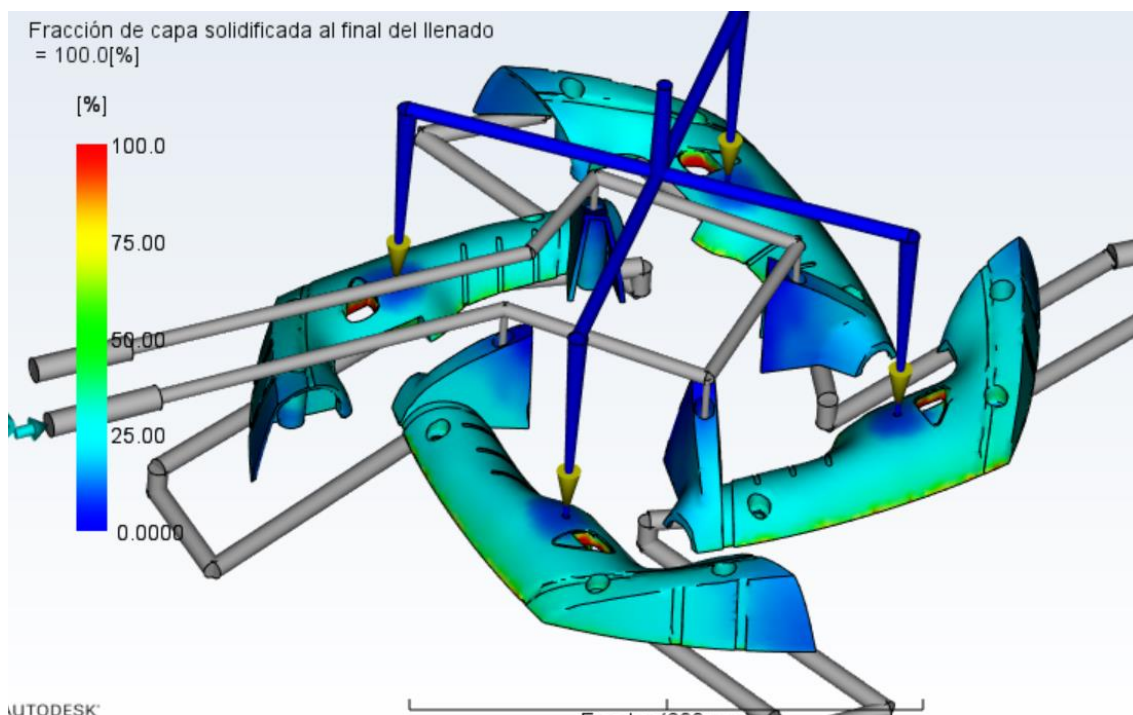


32. Figura. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, vista inferior.

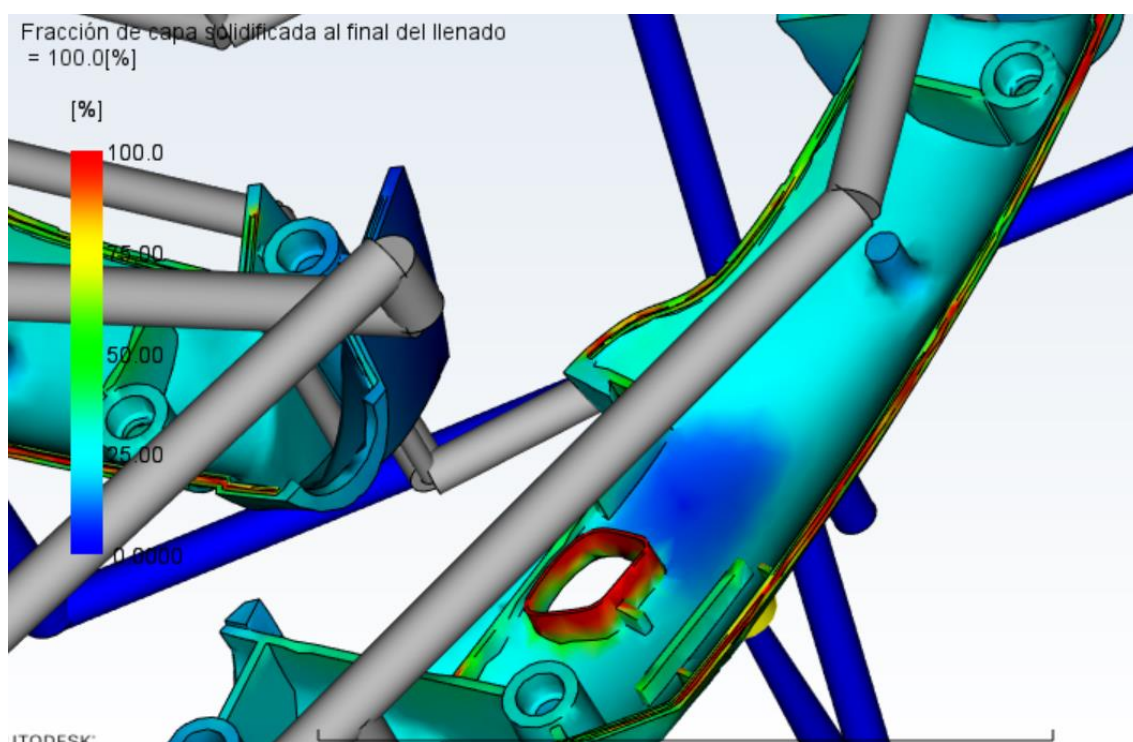
En este caso, se obtiene una temperatura correcta, a pesar de que algunas zonas de mayor espesor requieran más tiempo. Estas se podrían expulsar sin haber solidificado completamente.

3.2.14 FRACCIÓN DE CAPA SOLIDIFICADA AL FINAL DEL LLENADO

Este estudio representa el porcentaje de espesor que solidifica al final del llenado, suponiendo que un polímero solidifica al alcanzar su temperatura de transición. La resistencia del flujo es dependiente de la fracción de capa solidificada, ya que una mayor fracción de espesor solidificado supone una mayor viscosidad, aumentando así la resistencia del flujo. Las regiones con tránsito de flujo durante la inyección no deben superar una fracción de 0.25. Por otro lado, las regiones por las que el flujo no transite tendrán mayores valores de fracción de capa solidificada.



33. Figura. Fracción de capa solidificada al final del llenado, vista superior.

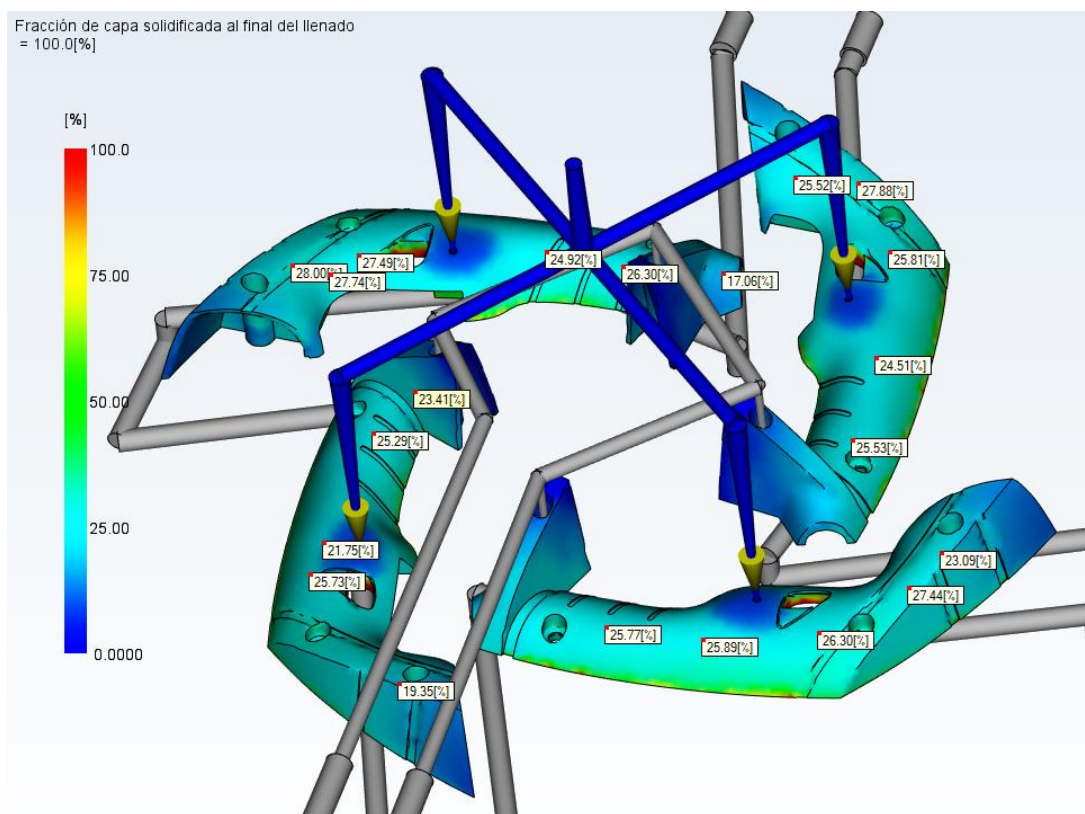


34. Figura. Fracción de capa solidificada al final del llenado, vista inferior.

Como se puede observar en el análisis, la región del punto de inyección y las regiones de los extremos, que son las últimas en llenarse, tienen un valor de 0. El valor

obtenido es lógico, ya que estas tres regiones serán las últimas en solidificar y, por tanto, la fracción de capa solidificada es nula.

Por último, se verifica que las zonas de tránsito de flujo no superen el 25%, ya que de lo contrario supondría una gran resistencia al flujo causando indecisiones o inyectadas cortas.

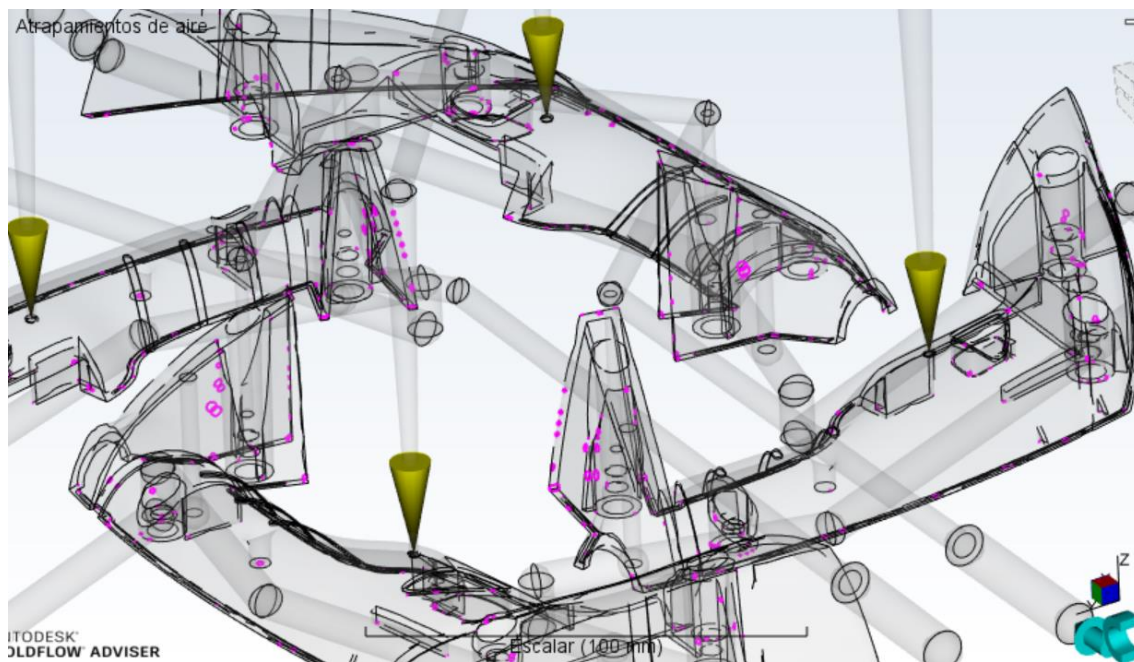


35. Figura. Muestras de fracción de capa solidificada al final del llenado tomadas en tránsitos de flujo.

Se puede observar como los valores obtenidos rondan el 25% y en algunos puntos se llega a superarlo mínimamente. Se toma por correcto el resultado, ya que no se superan ese 25% en gran parte de la pieza, y en las zonas donde lo hace no serán zonas de tránsito o superarán la fracción de 25% mínimamente y tendrán gran área de tránsito, por lo que el aumento de viscosidad del material es mínimo y, por tanto, podrá fluir sin problema.

3.2.15 ATRAPAMIENTOS DE AIRE

Los atrapamientos de aire tienden a darse cuando el flujo atrapa y comprime burbujas de aire. Estos atrapamientos generan pequeños agujeros o desperfectos superficiales, aunque en casos extremos la compresión eleva el material degradando o quemando el material. Los atrapamientos de aire pueden ser aceptables en superficies que no requieran un acabado estético.



36. Figura. Atrapamientos de aire.

En este caso, se puede observar como gran parte de los atrapamientos se dan en la línea de partición y casquillos expulsores. Al no haber posibilidad de definir una línea de partición en 3D o casquillos/machos en Autodesk Moldflow Adviser 2017 el software tiende a mostrar atrapamientos que en realidad tenderán a escapar por las mencionadas líneas.

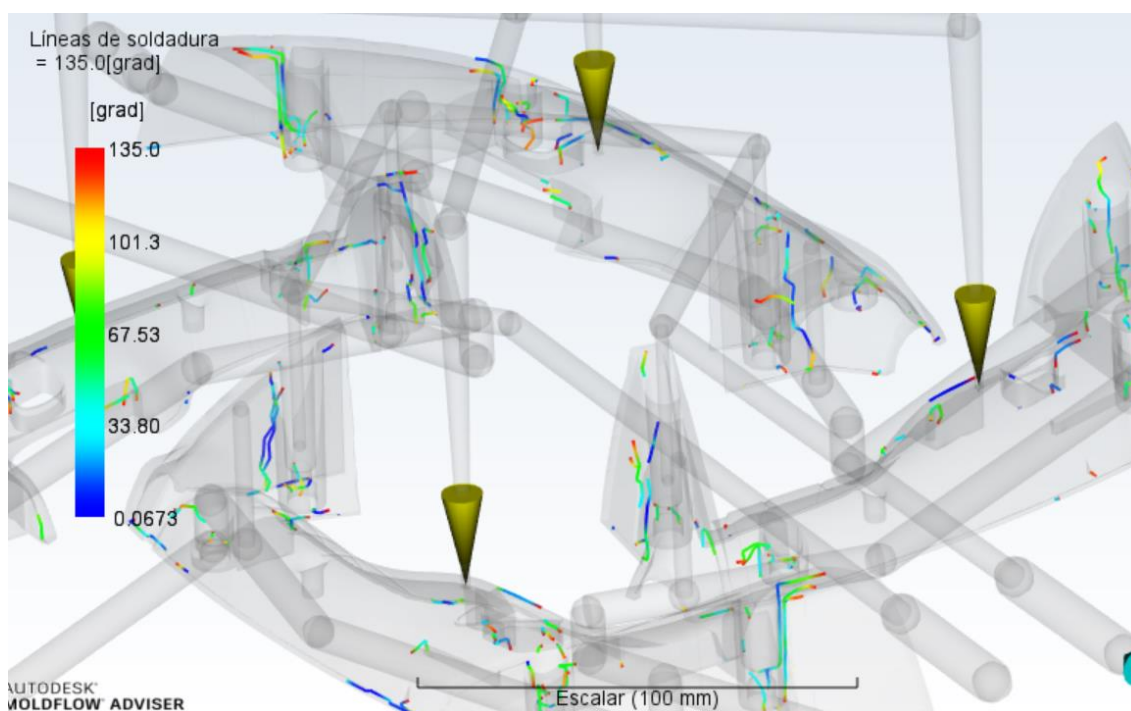
Una vez revisada la simulación, se observa que todos los atrapamientos de aire se dan en líneas de partición a excepción de alguno que se da en la cara interna, por lo que se da por correcto el resultado, a pesar de posibles burbujas en caras internas.

3.2.16 LÍNEAS DE SOLDADURA

Las líneas de soldadura representan el ángulo de convergencia de dos flujos que se encuentran. Estas líneas suponen defectos visuales y fragilidad estructural. Se diferencian las líneas de soldadura y las líneas de flujo.

Por un lado, las líneas de soldadura se crearán cuando los flujos converjan en ángulos menores a 135° y, por otro lado, las líneas de flujo se crearán cuando los flujos converjan en ángulos superiores a 135° . Las líneas de soldadura ofrecen peores propiedades mecánicas.

La resistencia de una línea de soldadura depende de la temperatura a la que se forma y de la presión que se ejerce sobre ella cuando la pieza solidifica. Para obtener una línea de soldadura de calidad, estas se deben formar a temperaturas cercanas a la temperatura de inyección, pudiendo descender hasta un máximo de 20°C respecto a la temperatura de inyección.



37. Figura. Líneas de soldadura.

Al tratarse de una pieza con agujeros y diferentes figuras es inevitable que aparezcan líneas de soldadura. De todas formas, estas se podrán desplazar ubicando el punto de inyección en otro lugar o cambiando la geometría de la pieza.

Los resultados obtenidos muestran como casi todas las líneas se encuentran en la cara interior, que es donde se encuentran gran parte de las figuras que parten los flujos. Por otro lado, las líneas que se dan en la cara exterior también son inevitables,

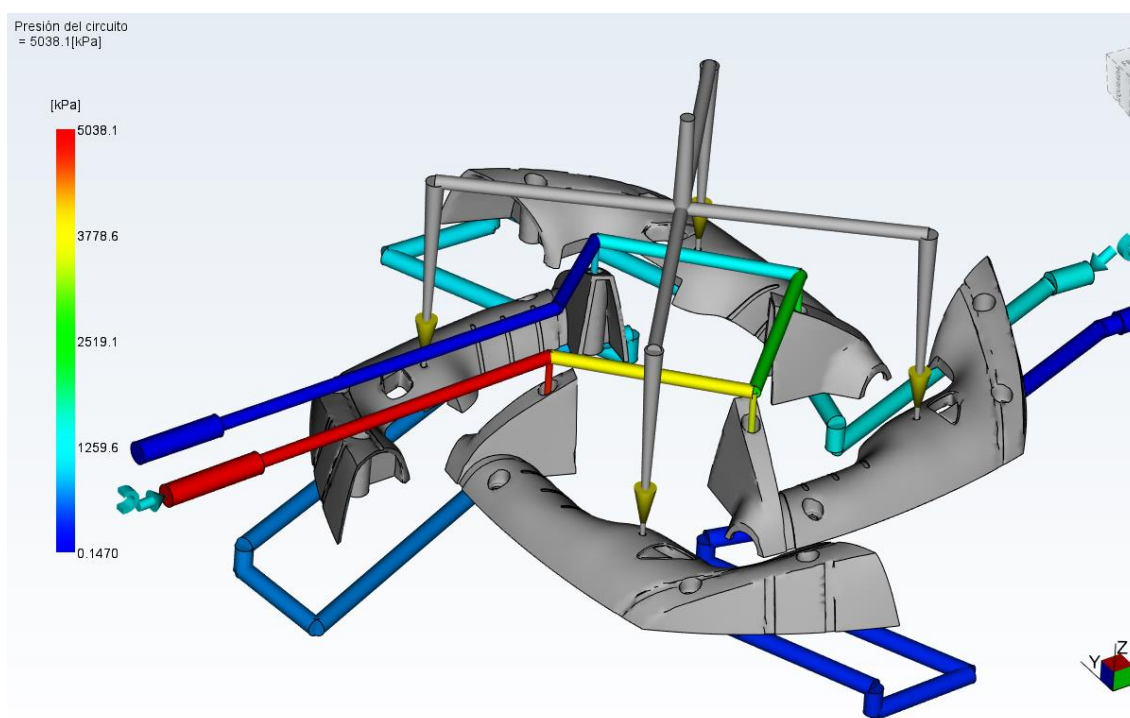
ya que se dan debido a agujeros. Además, todas las líneas obtenidas serán líneas de soldadura.

Se ha comprobado que todas las líneas de soldadura se formen a temperaturas óptimas, para evitar así la obtención de piezas frágiles. Para ello, se ha hecho uso de las temperaturas en el frente de flujo anteriormente analizadas, las cuales se mueven en un rango de 250-270°C. El material se está inyectando a 270°C, por lo que no se supera la diferencia de 20°C, logrando así líneas de soldadura de calidad.

3.2.17 PRESIÓN DEL CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN

Mediante el análisis de presión del circuito de refrigeración se obtiene la distribución de presión a lo largo del circuito, promediada en el ciclo.

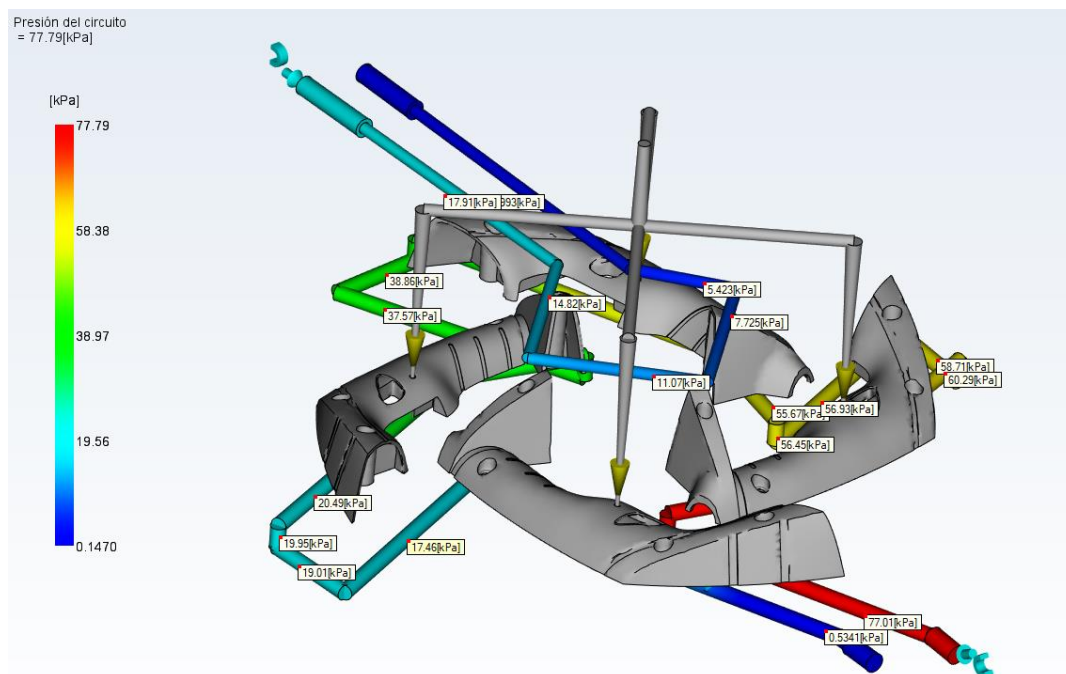
Las pérdidas de presión se darán por fricción con las paredes, cambios de dirección, deflectores, fuentes etc.



38. Figura. Presión del circuito.

Los resultados obtenidos muestran grandes pérdidas de presión en los tubos de tránsito. Estos resultados no son reales, ya que para simular el funcionamiento del tubo de tránsito de calor en Autodesk Moldflow Adviser se han utilizado deflectores de bajo diámetro, cuando en realidad el refrigerante no fluye a través del tubo transitor, sino que simplemente intercambia calor con este. Por tanto, para obtener unos resultados que se asemejen a la realidad, se ha simulado otro sistema eliminando estos tubos ya que apenas generan pérdidas de presión.

Por otro lado, se puede observar como el deflector utilizado en el núcleo genera una pérdida de presión, aunque no tan elevada como las que aparecen en los tubos de tránsito.

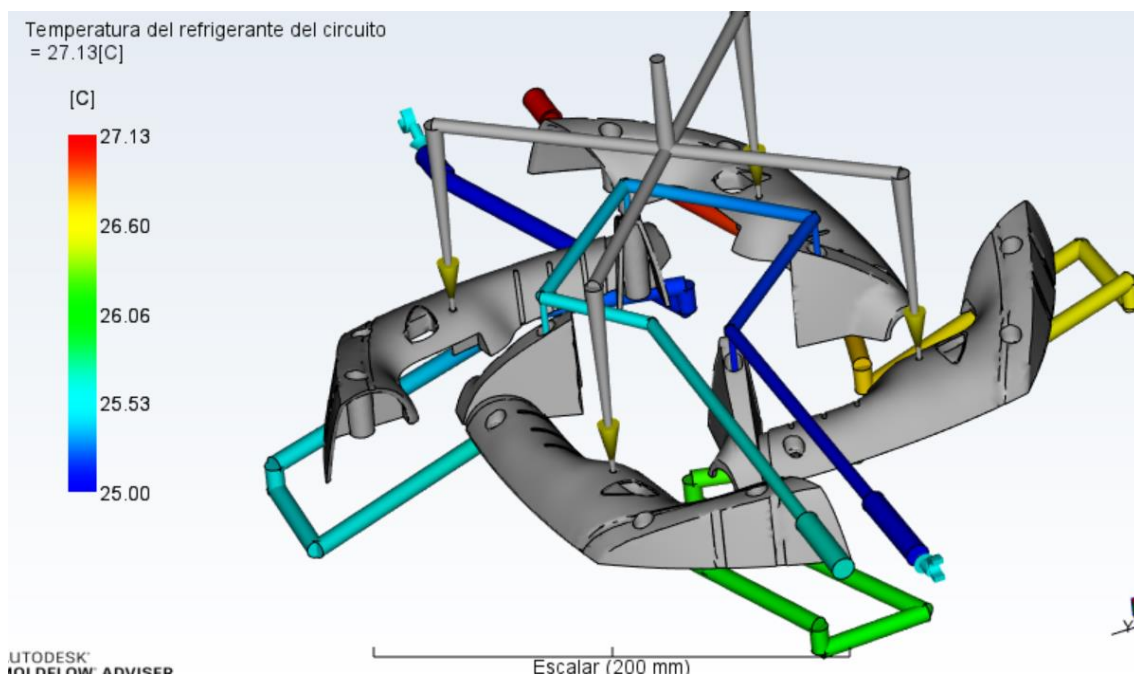


39. Figura. Presión del circuito sin tubos de tránsito de calor.

En este último análisis se obtienen unos resultados más cercanos a la realidad. Se han eliminado los tubos de tránsito de calor ya que no generan caídas de presión y se han mantenido los deflectores.

3.2.18 TEMPERATURA DEL REFRIGERANTE DEL CIRCUITO

Mediante este análisis se muestra la temperatura que alcanza el refrigerante en cada región. Diferencias superiores a los 2-3°C entre la entrada y la salida muestran una refrigeración deficiente.



40. Figura. Temperatura del refrigerante del circuito.

Como se puede observar en los datos obtenidos, el circuito superior varía entre los 25 y 25,5°C, por lo que la diferencia es inferior a los 3°C, logrando un valor correcto en la temperatura del refrigerante.

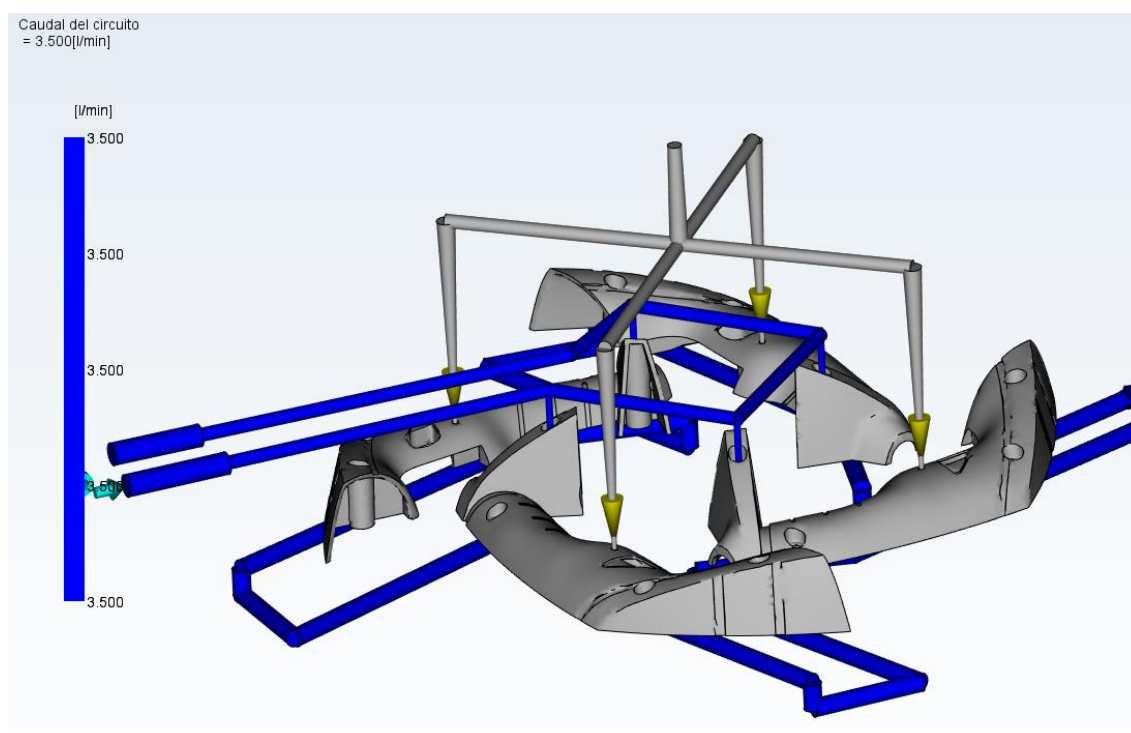
Por otro lado, en el circuito inferior, la temperatura varía entre los 25 y 27,13°C. Del mismo modo, la diferencia es inferior a los 3°C, por lo que la temperatura es correcta para una buena refrigeración.

3.2.19 CAUDAL DEL CIRCUITO

Mediante este análisis se muestra el caudal de ambos circuitos. Al tratarse de circuitos en serie se mantendrá constante.

El caudal debe ser el mínimo para obtener el número de Reynolds requerido. En este caso, se desea un número Reynolds de al menos 10.000, para asegurar un flujo completamente turbulento, ya que ofrece una mejor refrigeración. El caudal teórico para un número Reynolds de al menos 10.000 será 3,36 L/min y 2,52L/min para los canales de 8 y 6 mm respectivamente (calculado en el apartado 3.1.9. *Caudal del circuito*).

Se establece un caudal de 3,5 L/min en cada circuito ya que no se requieren grandes fuerzas de bombeo y así se facilita el sistema de bombeo al impulsar un único caudal.

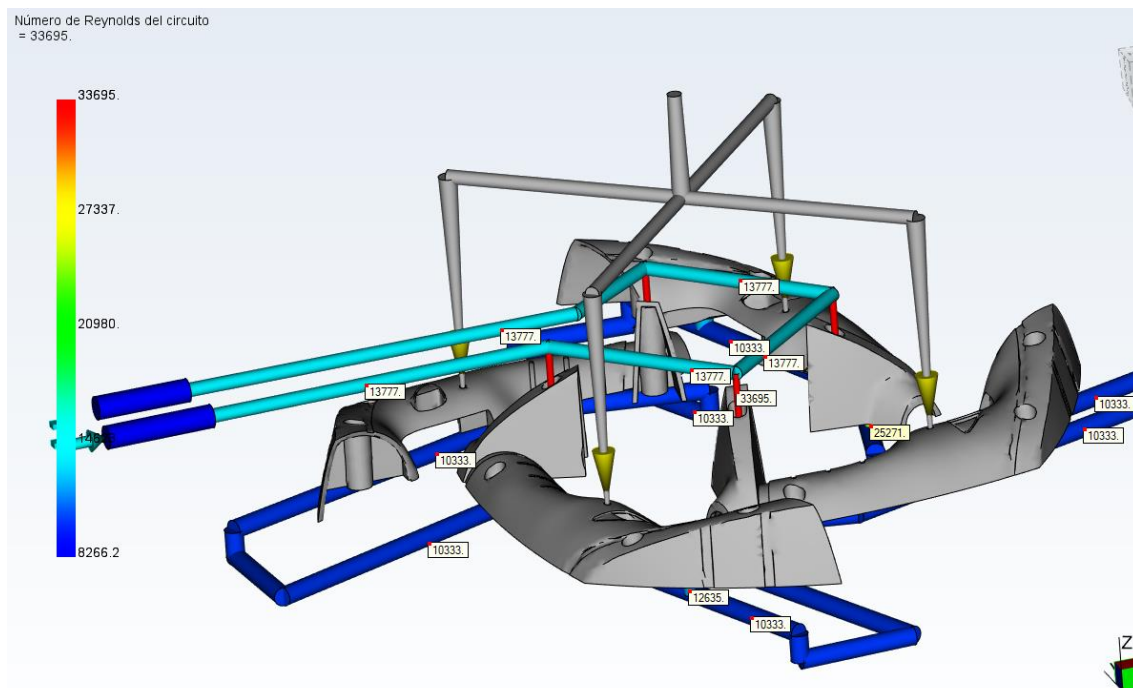


41. Figura. Caudal del circuito.

3.2.20 NÚMERO DE REYNOLDS DEL CIRCUITO

En este caso se muestra el número de Reynolds a lo largo de cada circuito. Como ya se ha mencionado antes, se desea un número de Reynolds superior a los 10.000.

El número de Reynolds tenderá a aumentar cuando la sección del canal disminuya, ya que el refrigerante tenderá a acelerarse.



42. Figura. Número de Reynolds del circuito.

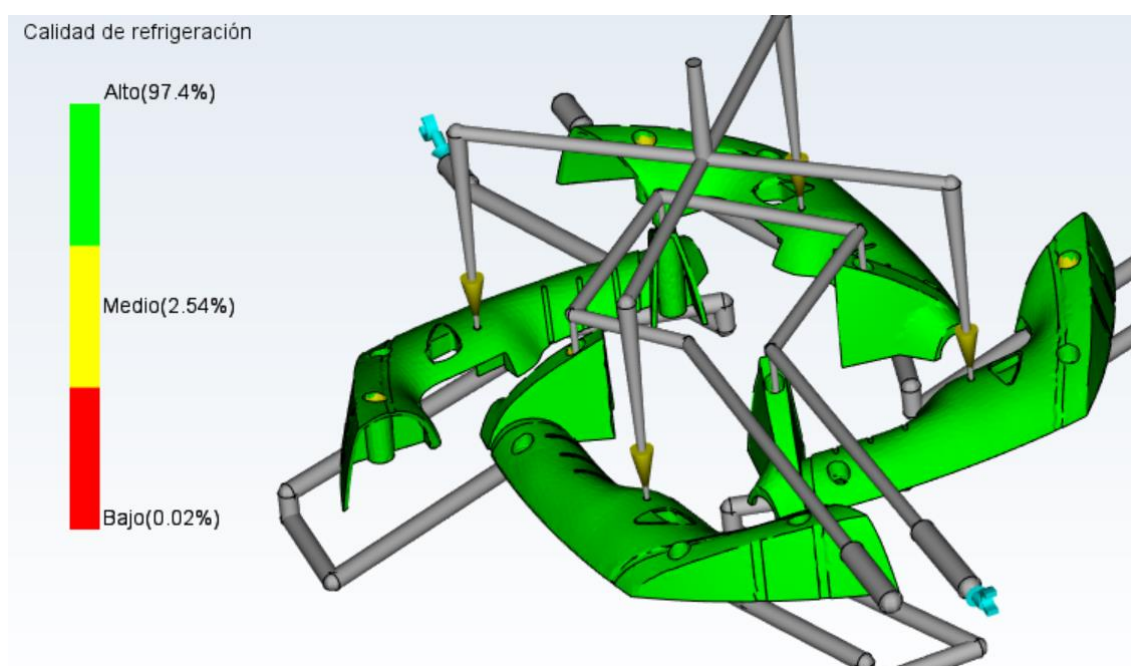
Como se puede observar, el valor mínimo obtenido en el circuito es de 10.333, superior a los 10.000, y se puede observar como en el deflector aumenta a 12.635. Por otro lado, los valores obtenidos en los tubos de tránsito de calor no son reales, ya que en realidad el agua no circula por ellos.

3.2.21 CALIDAD DE REFRIGERACIÓN

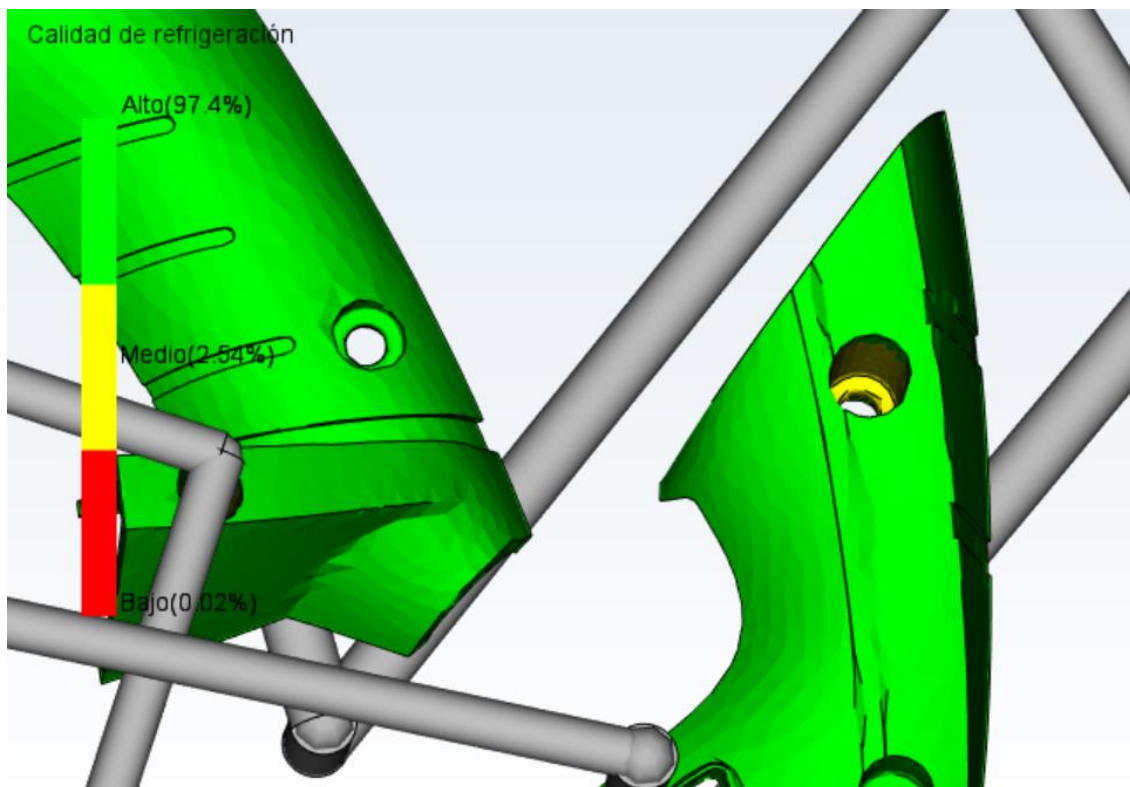
La calidad de refrigeración muestra donde tiende a permanecer el calor debido a espesores, geometría de la pieza, sistema de refrigeración etc.

Mediante un sistema de colores se indicarán calidades buenas, medias y bajas respectivamente. Las calidades medias y bajas pueden estar causadas por una varianza de temperatura demasiado baja o alta y varianzas de tiempo de refrigeración más cortas o largas que el tiempo de solidificación medio.

Calidades medias y bajas pueden causar indecisión, inyectadas cortas, defectos visuales y deformaciones.



43. Figura. Calidad de refrigeración.



44. Calidad de refrigeración, detalle.

Los resultados obtenidos muestran una refrigeración excelente. A pesar de ello, habrá una superficie mínima con una calidad media y/o baja. Estas zonas serán zonas no vistas, por lo que al ser superficies mínimas se toma el resultado como bueno.

Además, se han obtenido los siguientes datos de la simulación de refrigeración.

4. Tabla. Datos de la simulación de refrigeración.

Varianza máxima de la temperatura	18.0 (C)
Varianza mínima de la temperatura	-19.9 (C)
Varianza máxima del tiempo de refrigeración	5.02 (s)
Varianza mínima del tiempo de refrigeración	-2.59 (s)

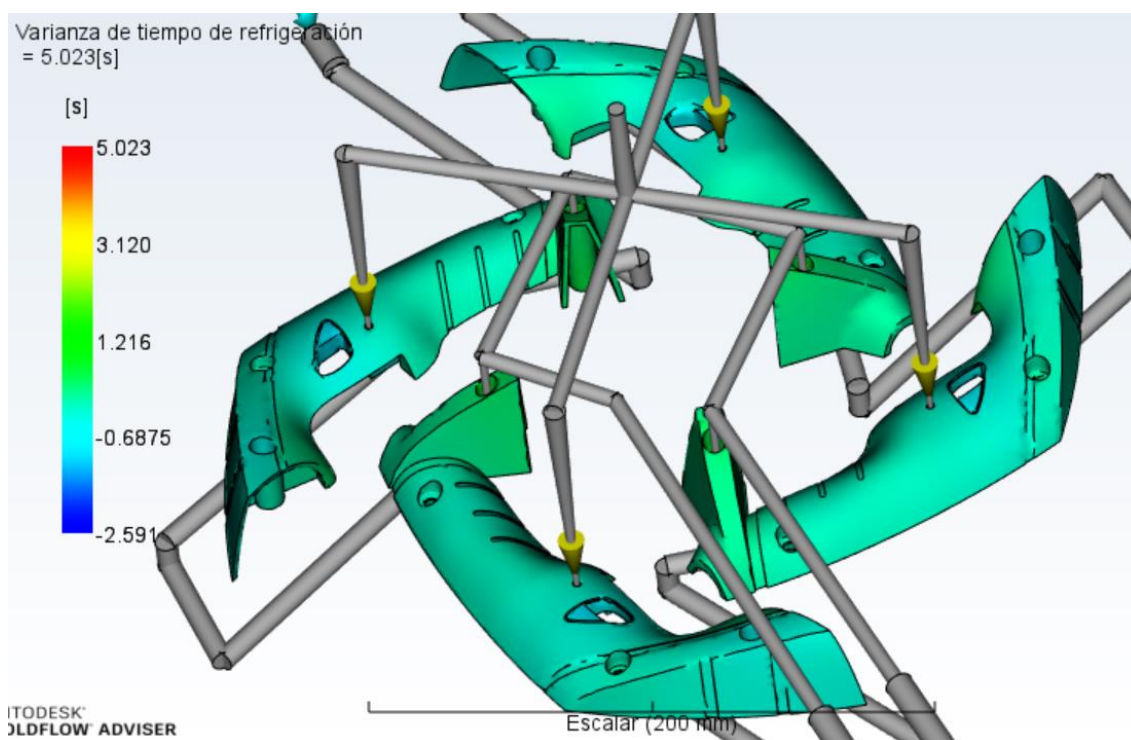
Temperatura máxima, pieza	78.3 (C)
Temperatura mínima, pieza	32.2 (C)
Temperatura media, pieza	52.1 (C)
Temperatura exterior del molde	29.6 (C)

3.2.22 VARIANZA DE TIEMPO DE REFRIGERACIÓN

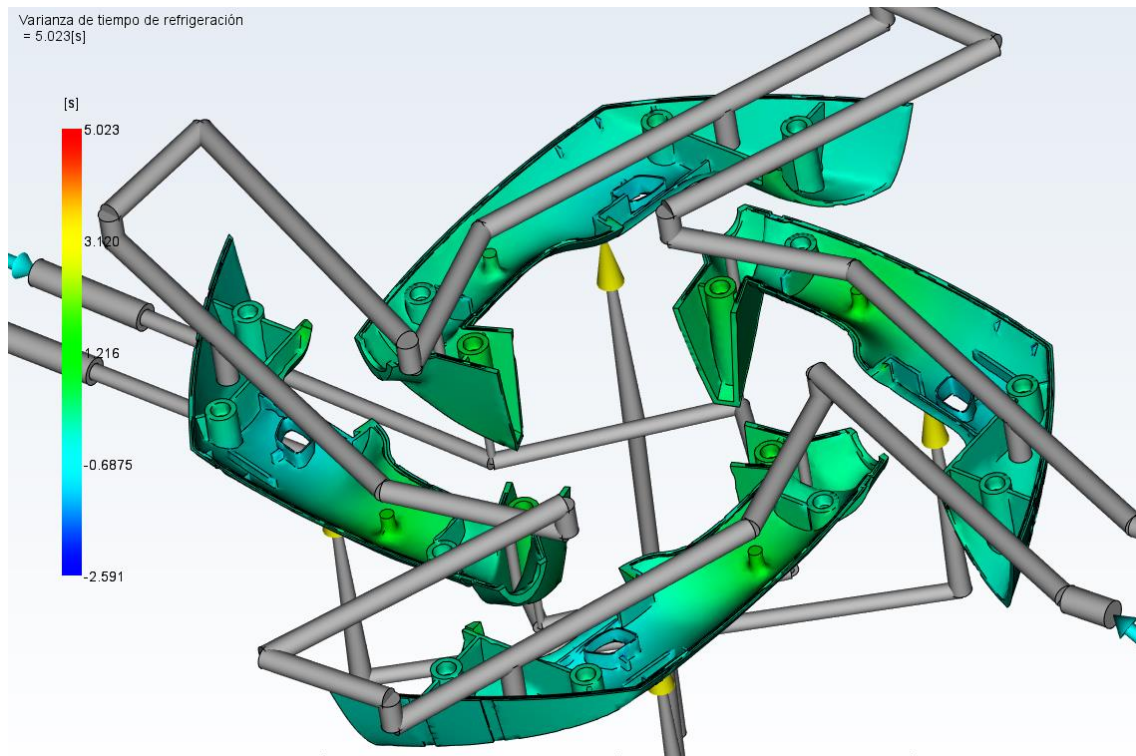
Este análisis muestra el tiempo necesario en cada región para que se de la solidificación del material. Se debe usar junto al análisis de varianza de temperatura para decidir un rediseño del sistema de refrigeración en caso de ser necesario.

Se indicará cada región mediante un código de colores que variará de rojo a azul, siendo las regiones en rojo zonas a refrigerar mejor y las zonas azules zonas demasiado refrigeradas.

Un resultado equilibrado muestra una óptima refrigeración.



45. Figura. Varianza de tiempo de refrigeración, vista superior.



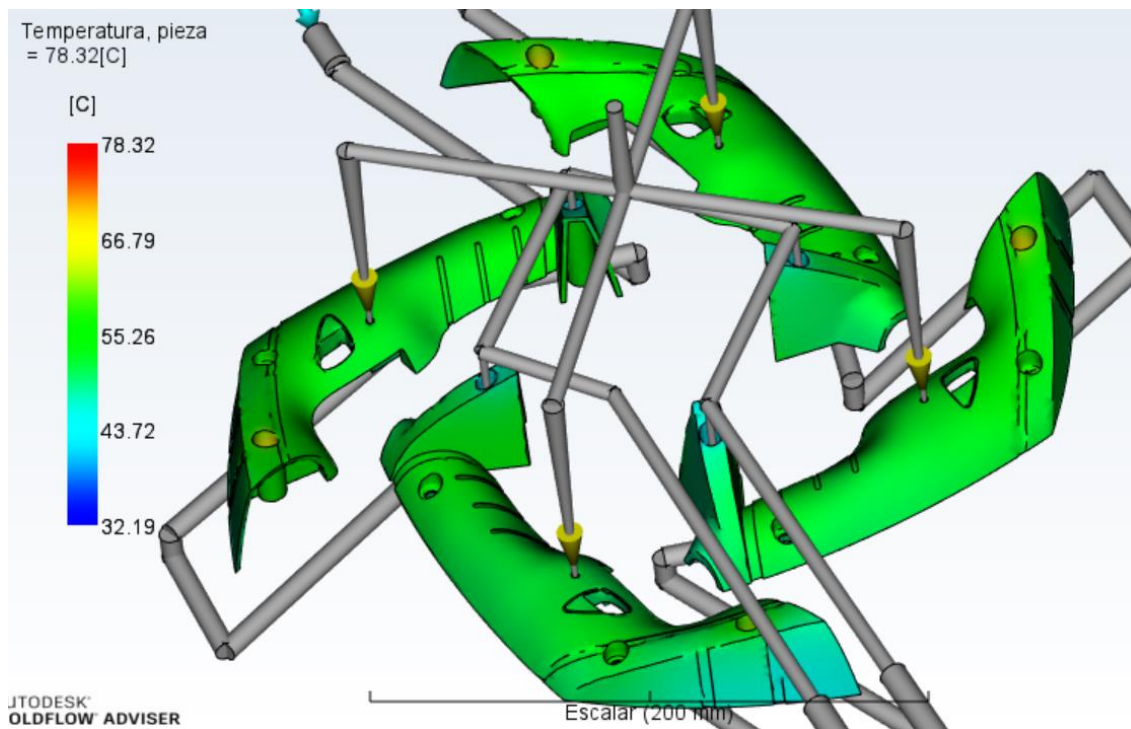
46. Figura. Varianza de tiempo de refrigeración, vista inferior.

Otra vez mas, se obtiene un resultado excelente, ya que se puede observar como la pieza se mantiene en un rango de tiempo similar y equilibrado, evitando refrigeraciones demasiado rápidas o lentas.

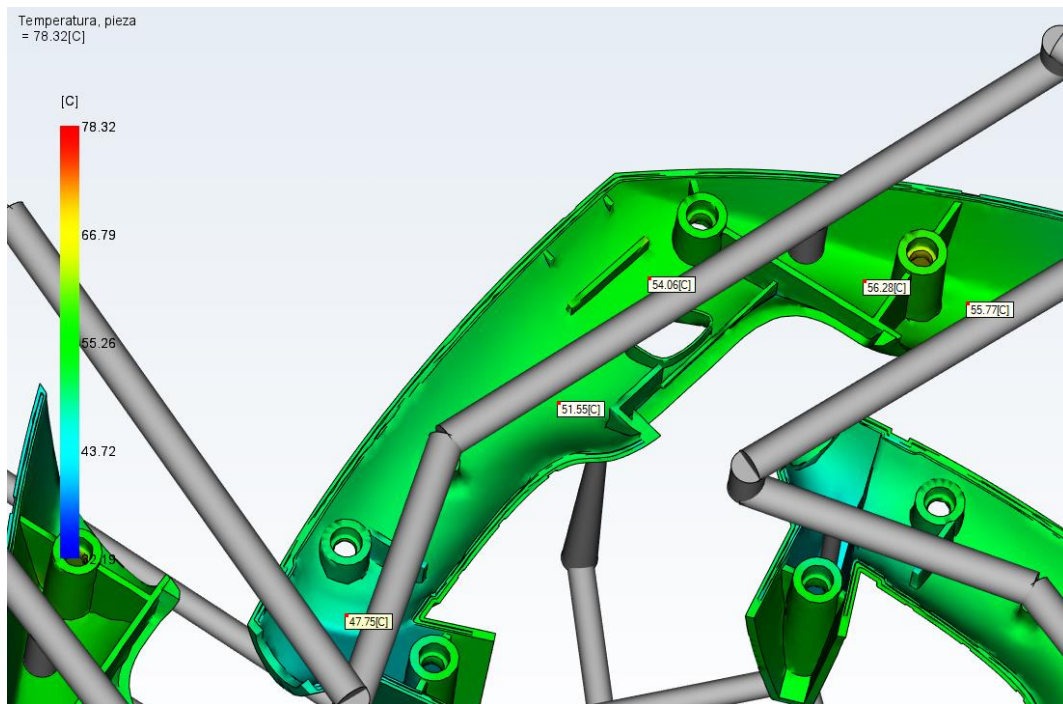
3.2.23 TEMPERATURA, PIEZA

La temperatura de la pieza mostrará la temperatura media en el contorno de la pieza. Este análisis servirá para localizar zonas frías y calientes, las cuales necesitarán un rediseño del sistema de refrigeración.

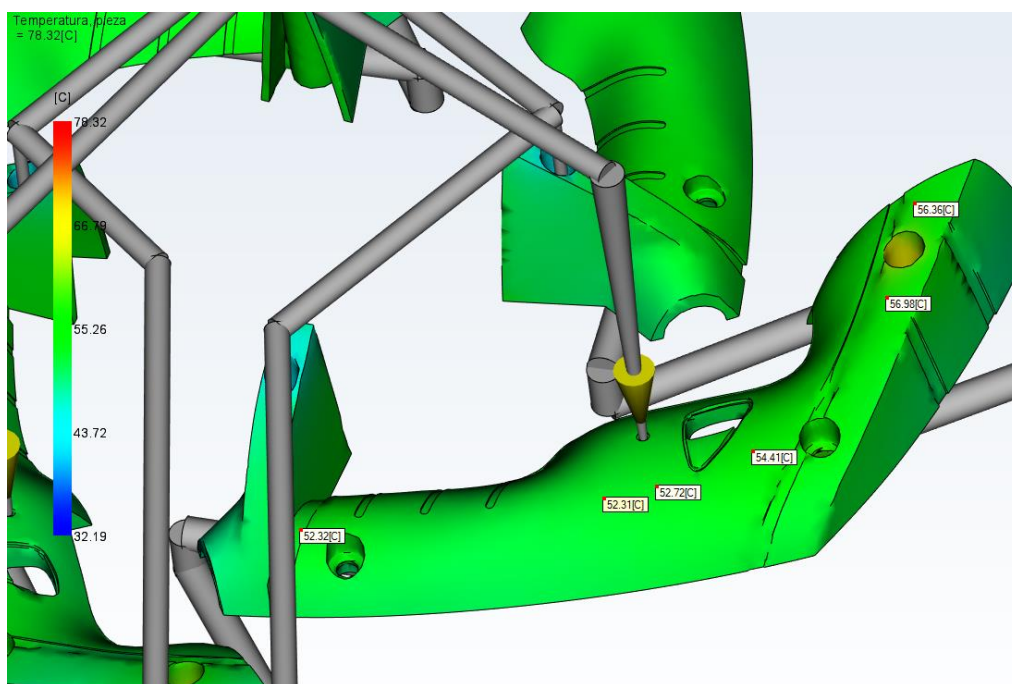
Se recomienda que la diferencia entre la cara positiva y la cara negativa de la pieza no supere una diferencia de $\pm 10^{\circ}\text{C}$.



47. Figura. Temperatura, pieza.



48. Figura. Temperatura, pieza. Mediciones cara interna.



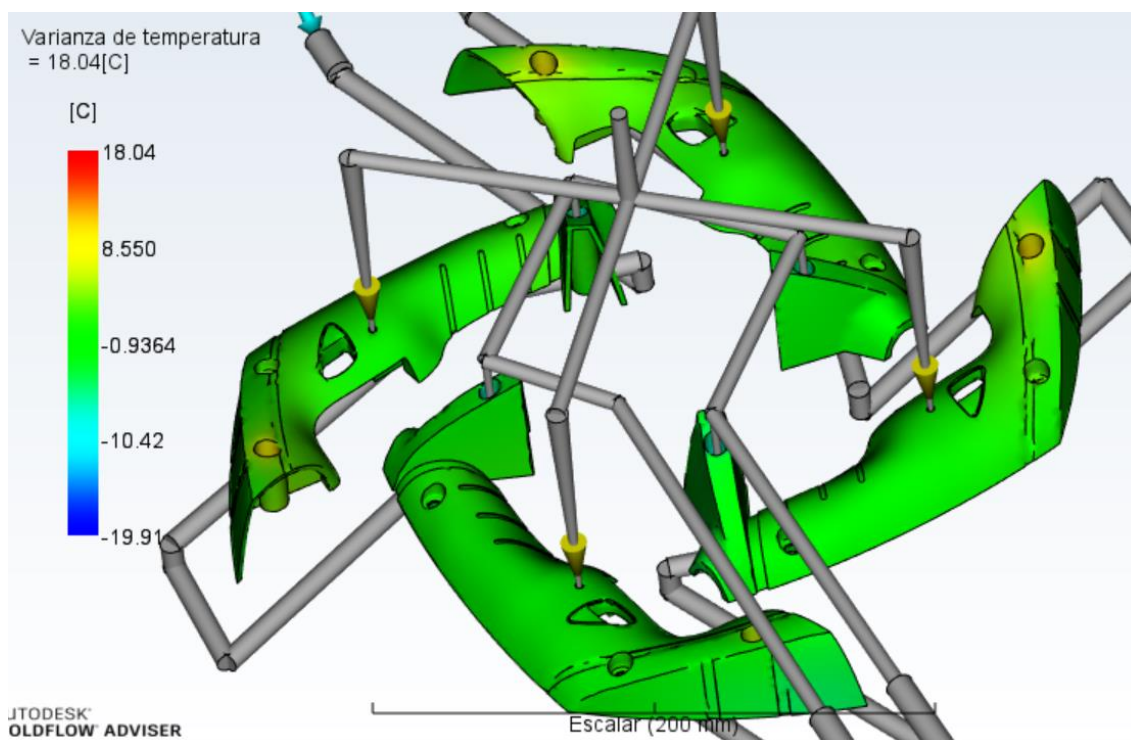
49. Figura. Temperatura, pieza. Mediciones cara externa.

Como se puede observar no hay zonas frías y/o calientes. Además, la diferencia de temperatura entre caras no es superior a 10°C., Por lo que los resultados son óptimos.

3.2.24 VARIANZA DE TEMPERATURA

Mediante este análisis se resaltarán las zonas en las que la temperatura superficial sea diferente a la temperatura media, al final del ciclo. Las zonas de mayor grosor tenderán a tener una mayor temperatura en el núcleo de la sección y, por tanto, la diferencia respecto a la temperatura superficial será mayor.

Estos resultados se deberán de analizar junto a la varianza de tiempo de refrigeración.

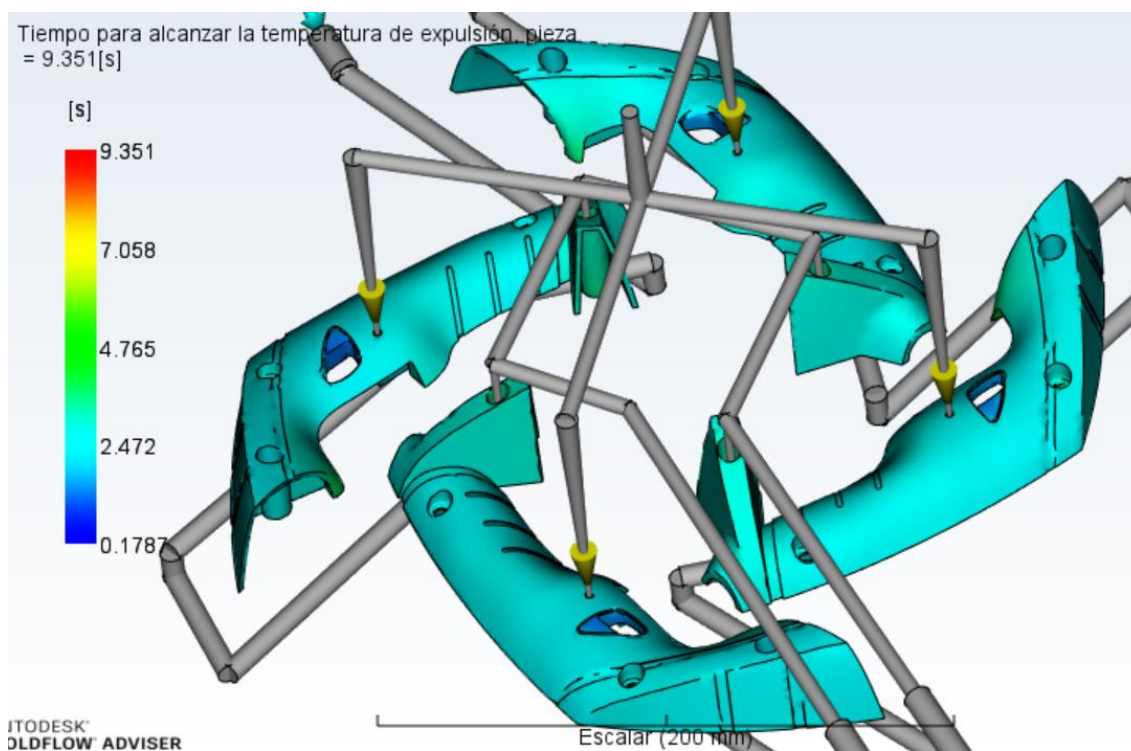


50. Figura. Varianza de temperatura.

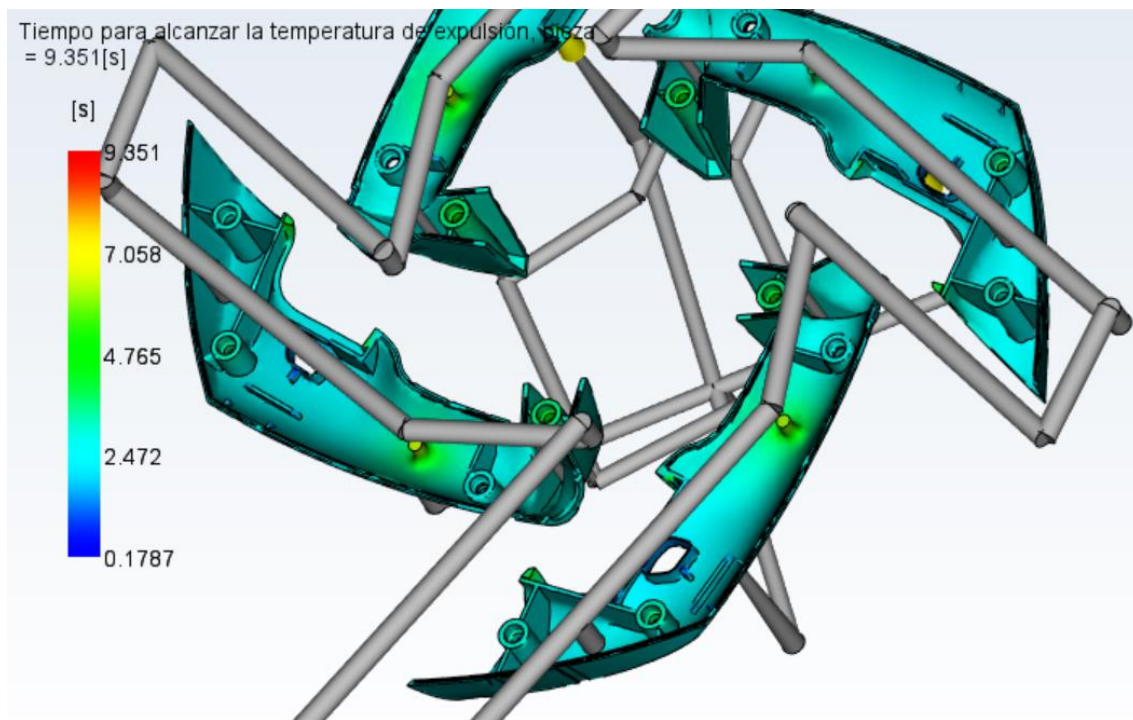
3.2.25 TIEMPO PARA ALCANZAR LA TEMPERATURA DE EXPULSIÓN, PIEZA

Mediante este análisis se mostrará el tiempo necesario para alcanzar la temperatura de expulsión. Idealmente todas las regiones alcanzarán la temperatura de expulsión a la vez.

Por otro lado, regiones marcadas en rojo representarán zonas calientes o de mayor espesor y, por otro lado, zonas marcadas en azul, representarán zonas frías o de bajo espesor.



51. Figura. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, pieza, vista superior.

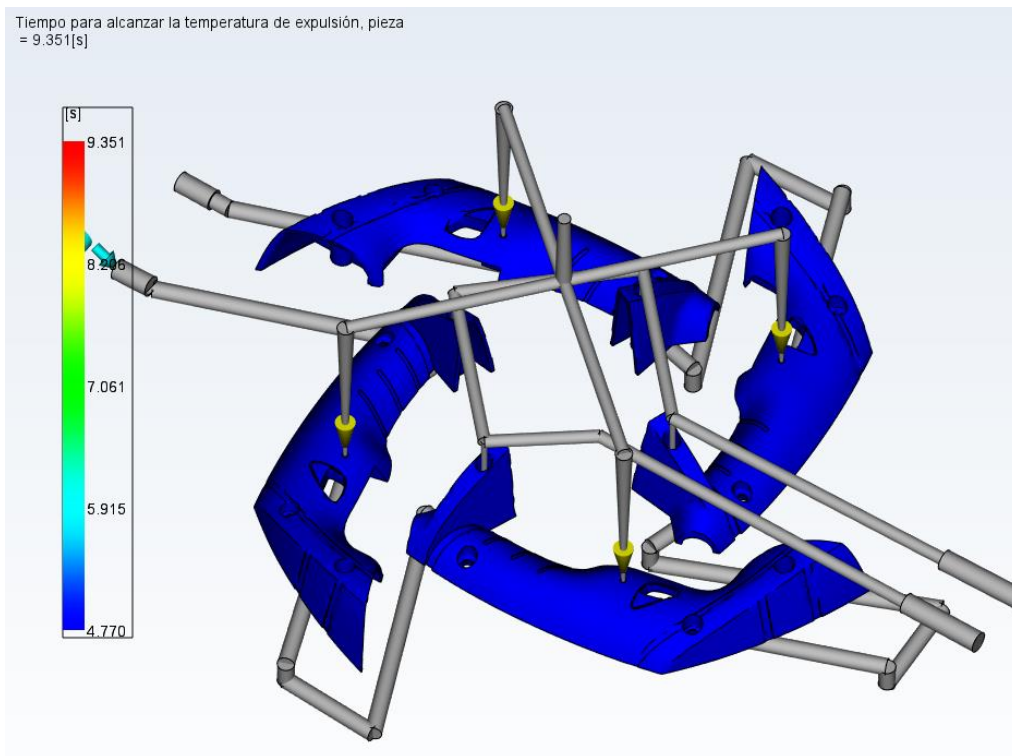


52. Figura. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, pieza, vista inferior.

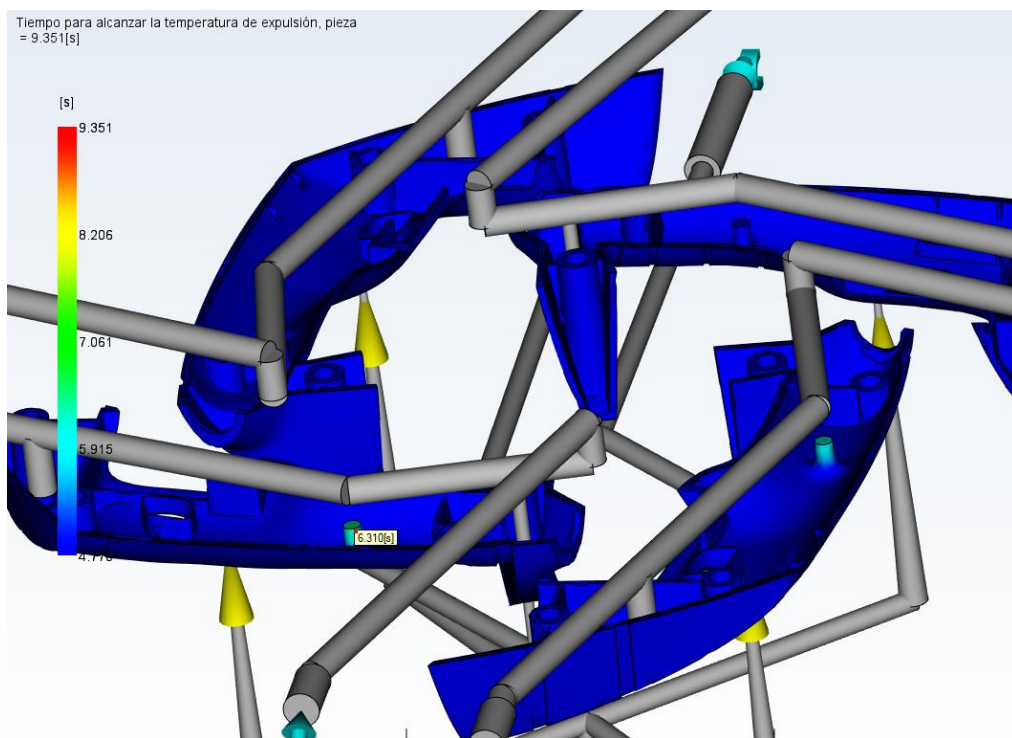
Como se puede observar, se obtiene un resultado equilibrado, exceptuando ciertas zonas calientes o con mayor grosor que requerirán un mayor tiempo.

Por otro lado, al obtener el diagrama de tiempos de ciclo, se menciona un tiempo de refrigeración de 4,77 segundos. Por lo que se decide acotar la escala de 4,77 a 9,351 segundos, verificando que toda la pieza tiende a alcanzar la temperatura de expulsión antes de los 4,77 segundos a excepción de una zona, que lo hace a los 6,31 segundos.

Esta excepción se da en la cara interna, por lo que es posible expulsar la pieza a los 4,77 segundos, ya que solo faltará por refrigerar el núcleo de dicha zona, la cual no entrará en contacto con nada al ser expulsada.



53. Figura. Temperatura para alcanzar la temperatura de expulsión, pieza, vista superior. Escalado 4,77-9,35 s.

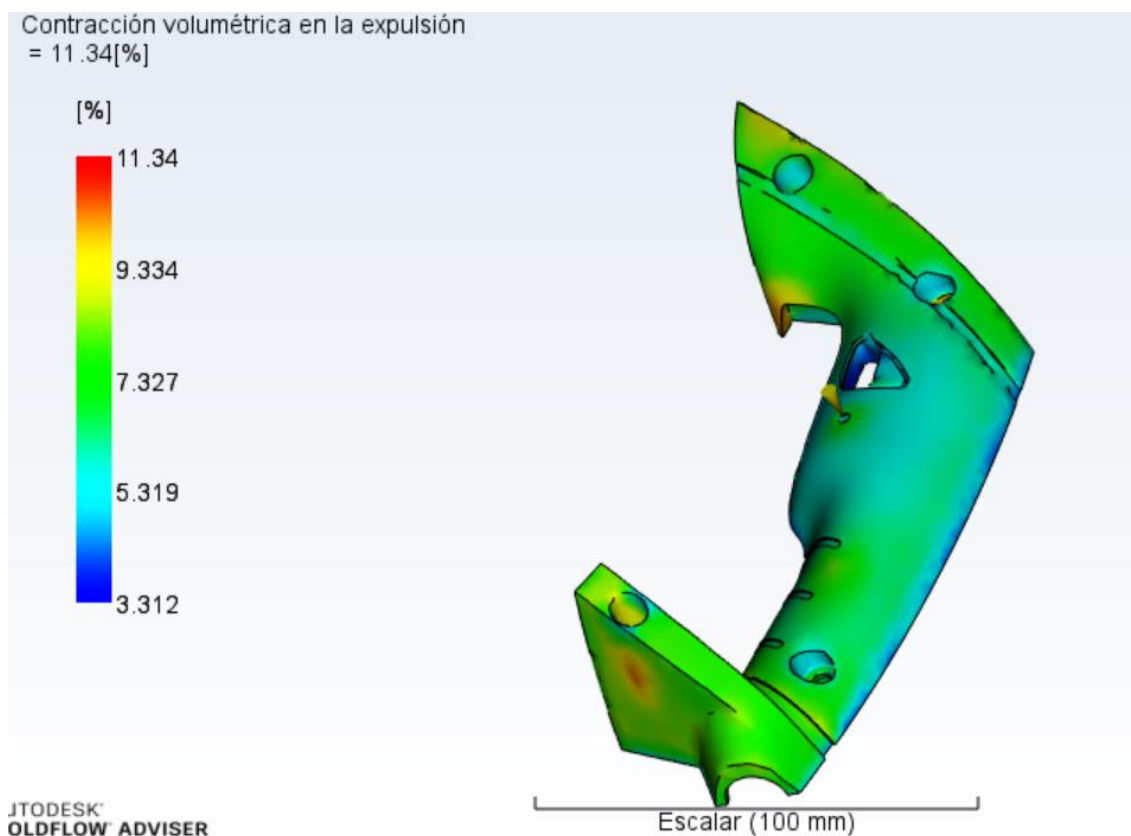


54. Figura. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, pieza, vista inferior. Escalado 4,77-9,351s.

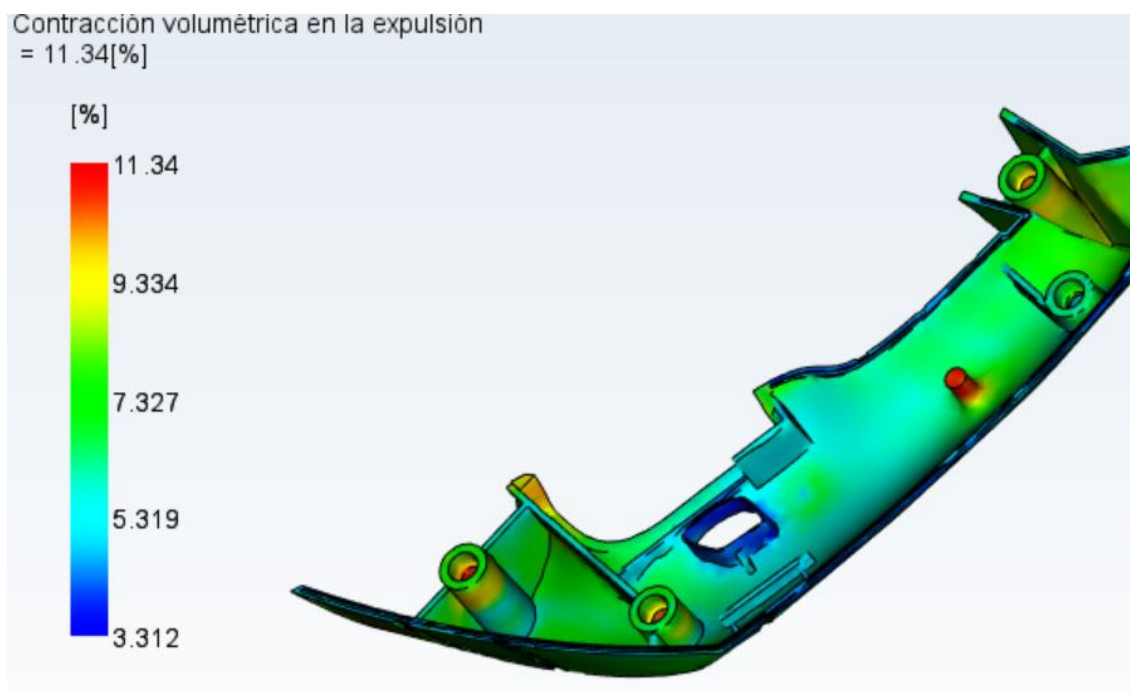
3.2.26 CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA EN LA EXPULSIÓN

Mediante este análisis se muestra cada región con un porcentaje, el cual representa la disminución de volumen de la zona desde el final de la refrigeración hasta alcanzar la temperatura ambiente.

Se recomiendan tener valores uniformes a lo largo de la pieza para una correcta compactación. Valores elevados representarán riesgo de deformaciones, vacío o rechupes. Por otro lado, valores negativos representan la expansión de la zona.



55. Figura. Contracción volumétrica en la expulsión, vista superior.



56. Figura. Contracción volumétrica en la expulsión, vista inferior.

Como se puede observar, las zonas de mayor grosor tienden a tener un valor superior de contracción volumétrica. Por lo que habrá que revisar estas zonas en el análisis de rechupes.

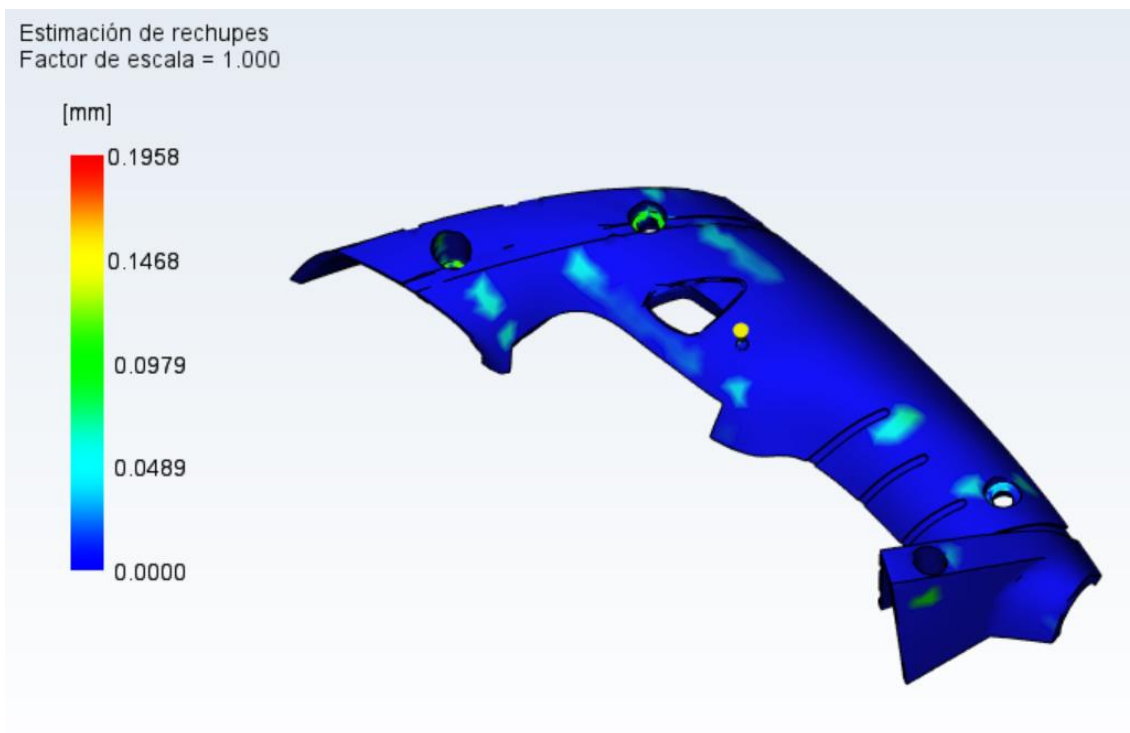
Los resultados obtenidos tienen una baja contracción volumétrica (11,34% max) y gran parte de la pieza mantiene resultados parejos, por lo que el proceso de compactación será correcto.

3.2.27 RECHUPES

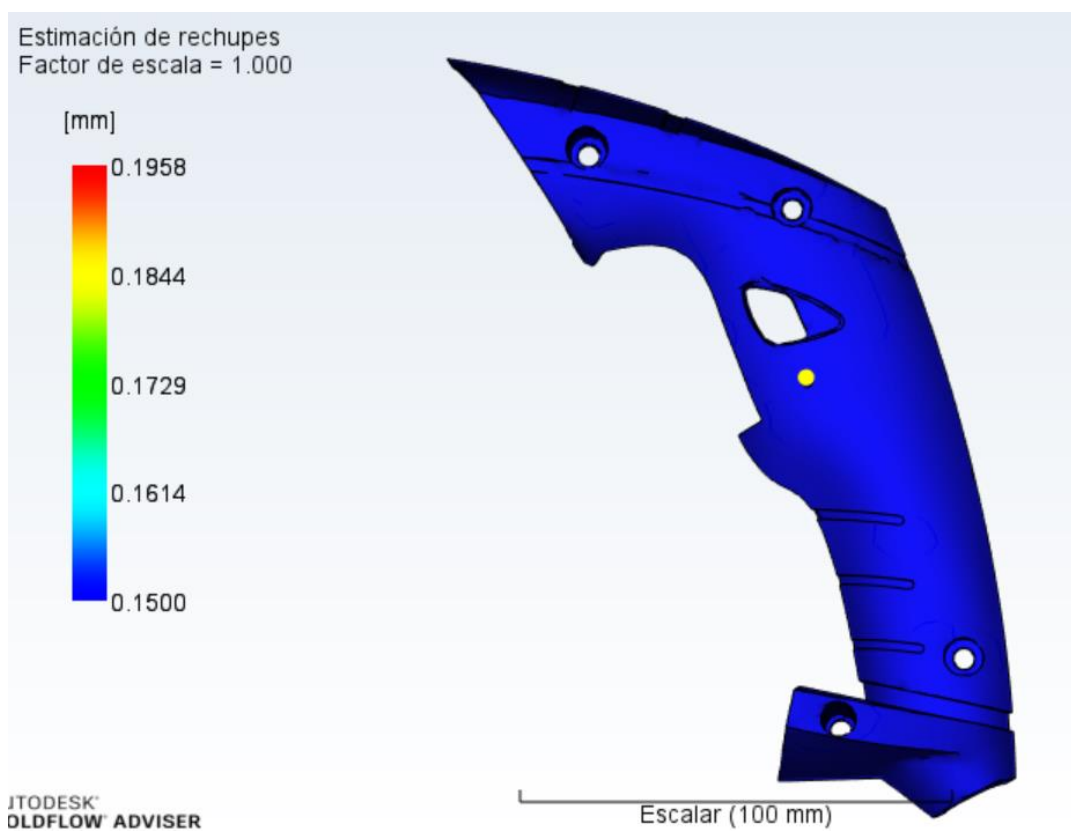
Se mostrarán posibles rechupes y su profundidad. Este tipo de defecto será meramente visual, por lo que habrá que evaluar su gravedad dependiendo de la zona y profundidad.

Los rechupes con una profundidad inferior a los 0,15mm serán despreciables al ojo humano.

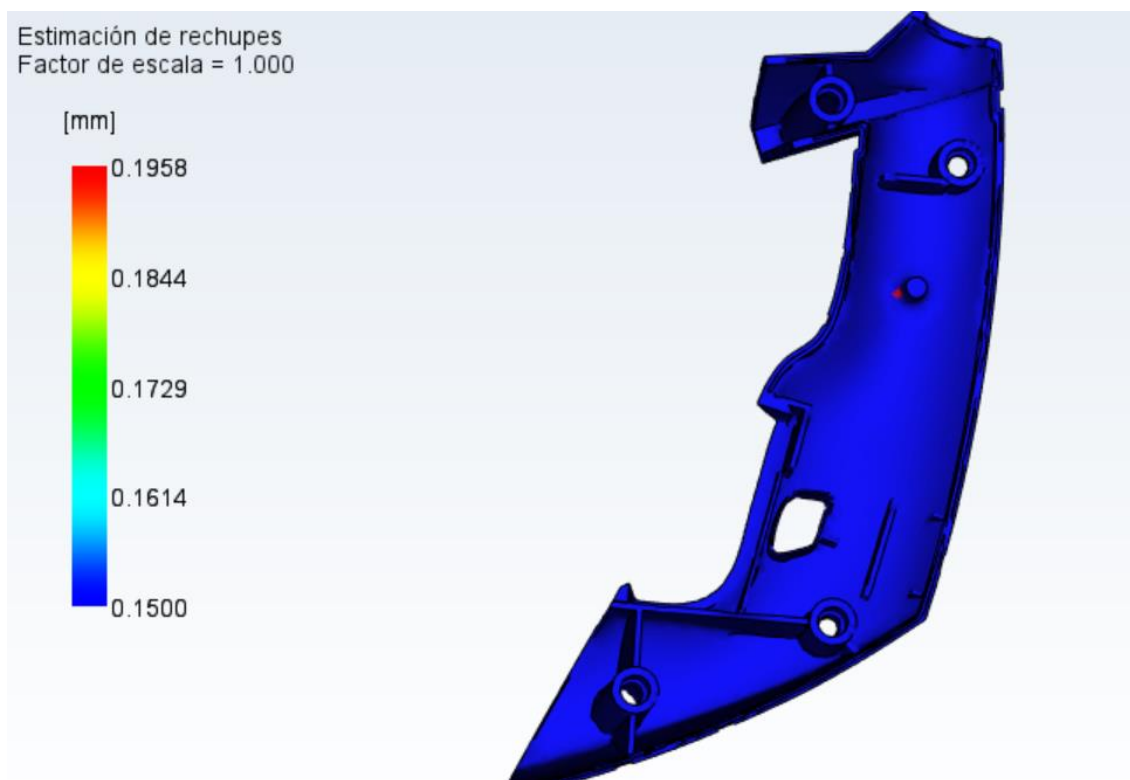
El ensayo se lleva a cabo en una única cavidad, ya que no es necesario el sistema completo para realizar este análisis.



57. Figura. Estimación de rechupes, vista superior.



58. Estimación de rechupes, vista superior. Escalado 0,15-0,1958 mm.



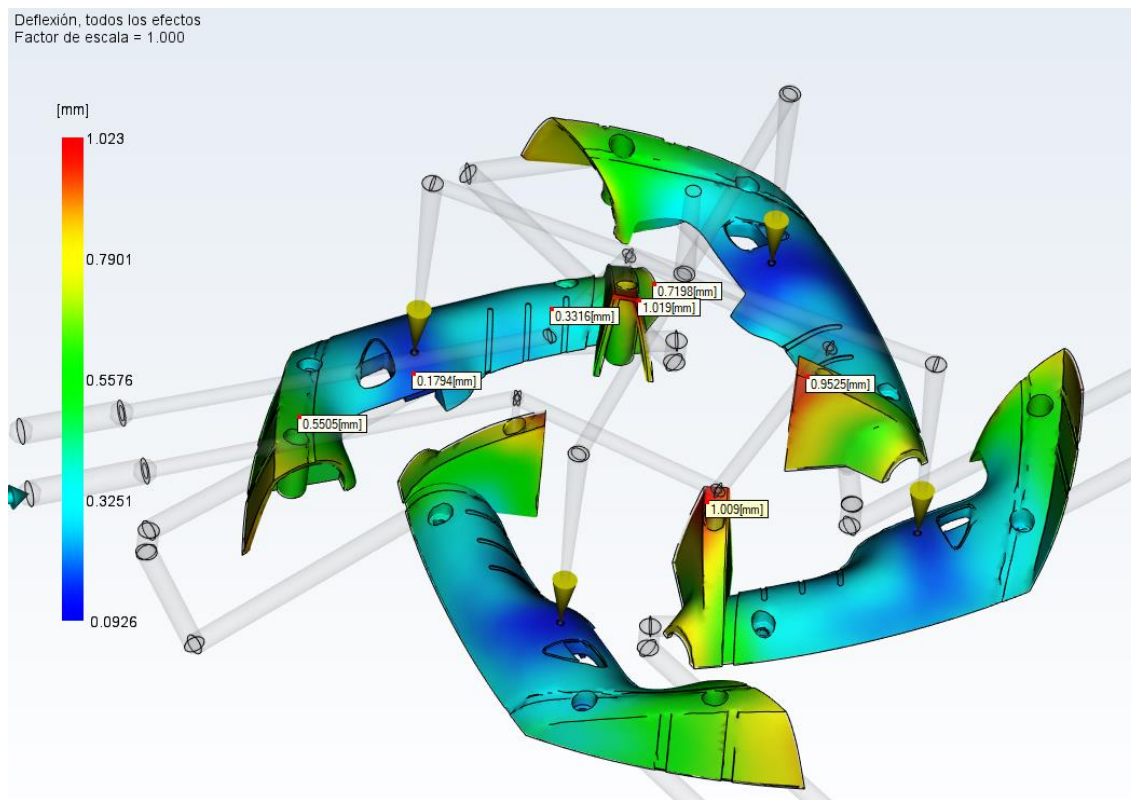
59. Figura. Estimación de rechupes, vista inferior. Escalado 0,15-0,1958 mm.

Como se puede observar, hay riesgo de rechupes en varias zonas de la superficie positiva. A pesar de ello, estas no superan los 0,15 mm, por lo que el resultado será correcto. Además, gran parte de la zona vista recibirá un recubrimiento a posteriori, por lo que la mayoría de estos quedarán tapados.

Por último, se localiza un rechupe con mayor profundidad a los 0,15 mm debido al gran espesor que tiene la pieza en esa zona. Este se dará en la cara interna de la pieza, por lo que será un defecto visual pasable.

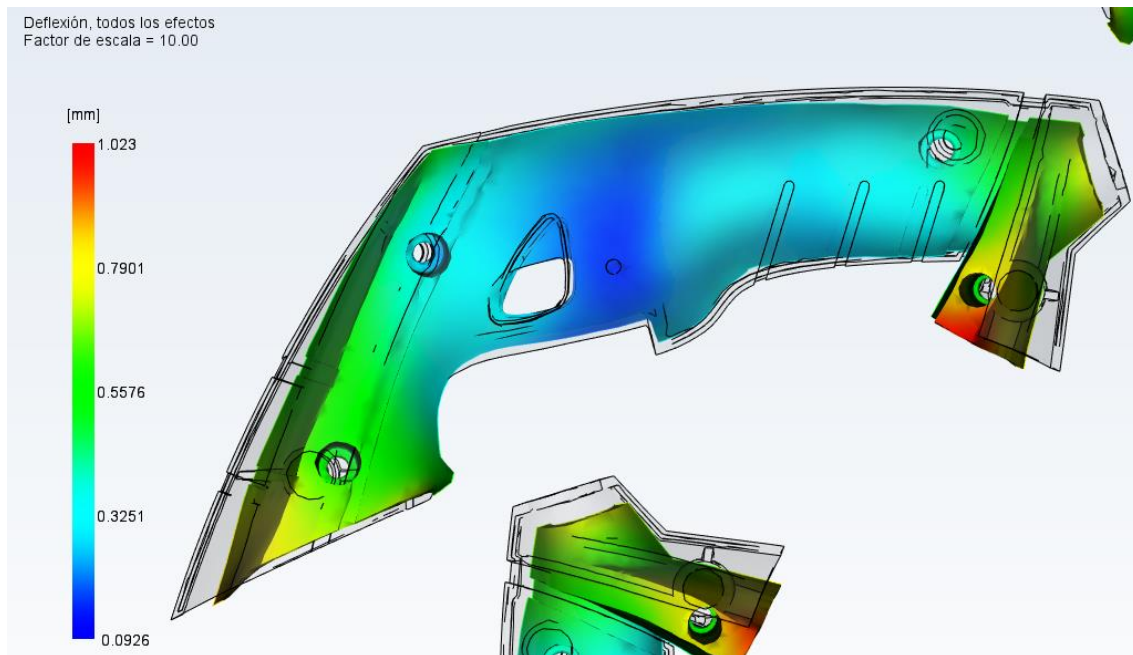
3.2.28 DEFORMACIÓN

Se realiza una simulación de deformaciones. Mediante este análisis se obtiene la deflexión aproximada que se dará en la pieza debido a deformaciones.

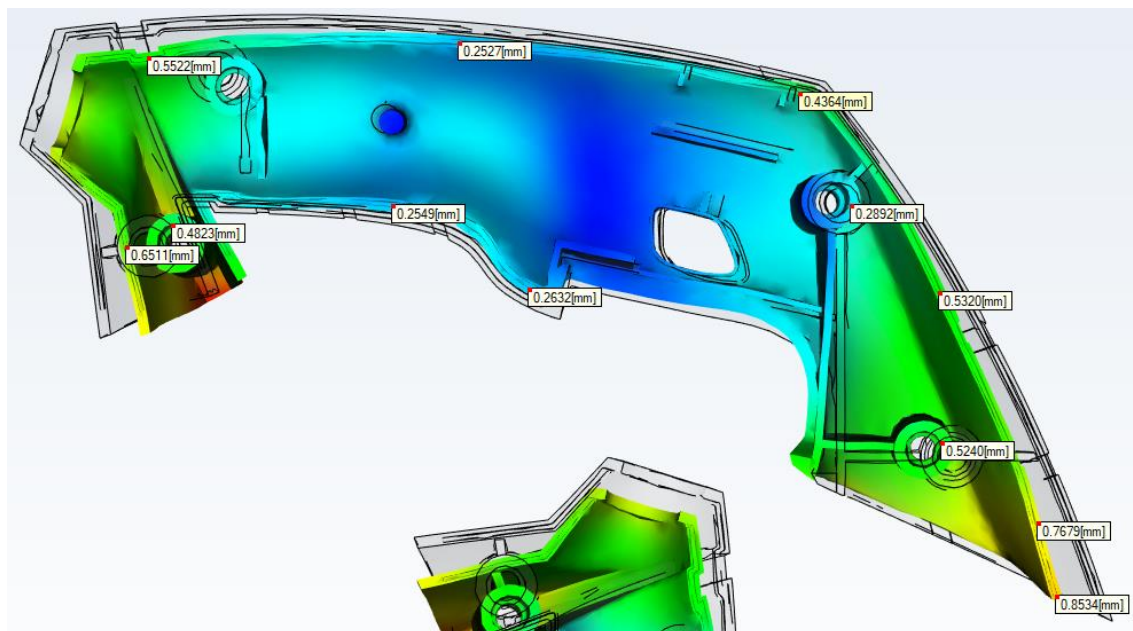


60. Figura. Deflexión, todos los efectos.

Se puede observar que la pieza tiende a deformarse por dos de los extremos, dándose una deformación máxima de un milímetro en uno de ellos.



61. Figura. Deformación de la pieza con factor de escala 10, vista superior.

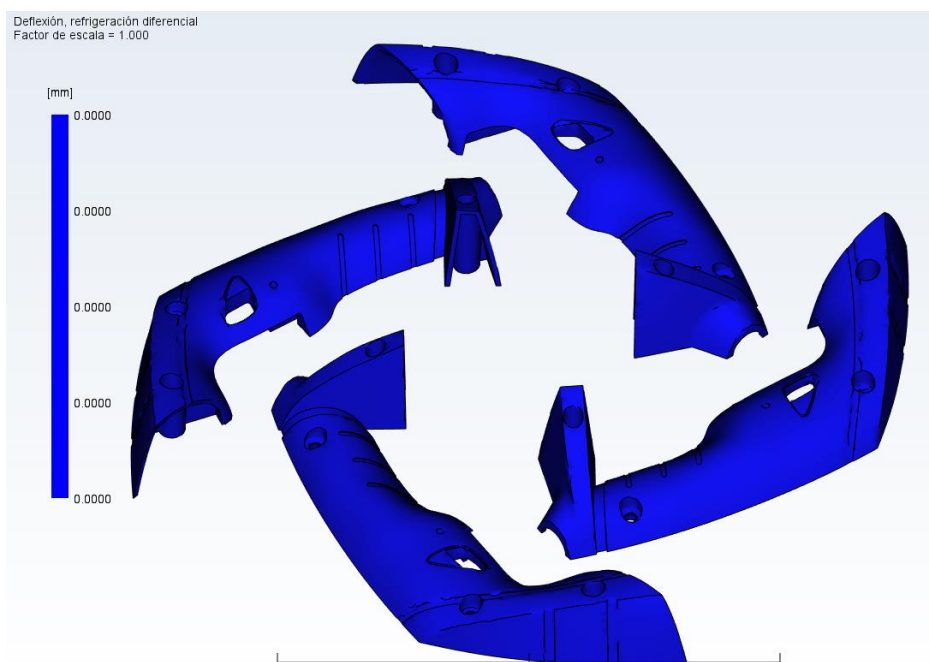


62. Figura. Deformación de la pieza con factor de escala 10, vista inferior.

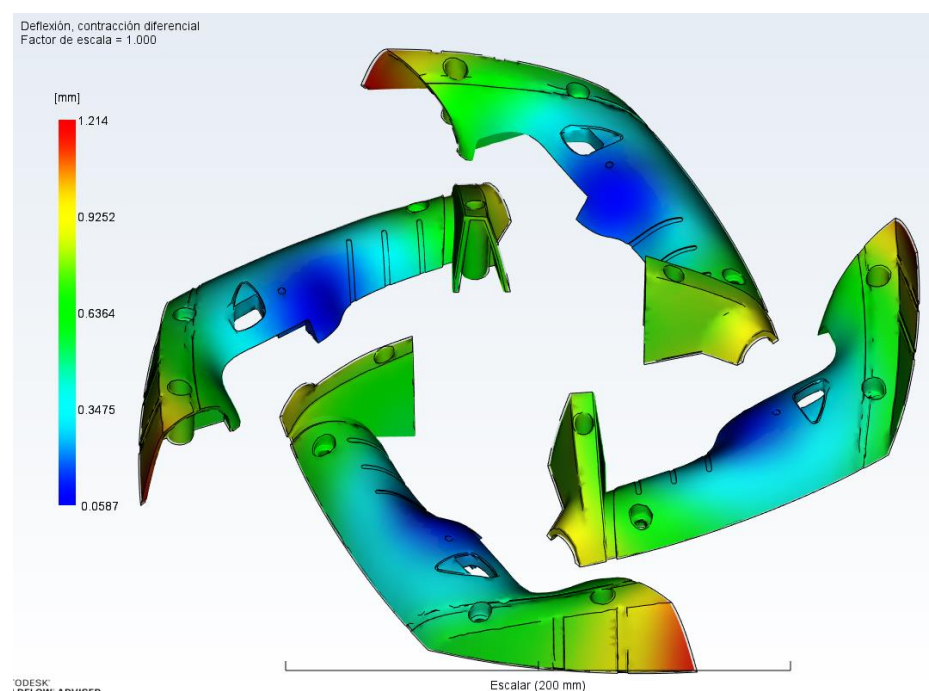
En las figuras anteriores se muestra la tendencia de la pieza a deformarse mediante un aumento de escala de la deflexión. Se puede observar como la pieza tiende a contraerse. La pieza tiende a deformarse entre 0,3 y 0,6 mm, aumentando en los extremos ligeramente, y despuntado en uno de ellos. Por otro lado, los puntos de unión mediante tornillos tienden a deformarse entre 0,3 y 0,5 mm y el contorno de la pieza, el cual encaja en el entorno y asegura el cierre tiende a deformarse entre

0,2 y 0,6 mm en gran parte, pero en uno de los extremos tiende a aumentar hasta los 0,85 mm.

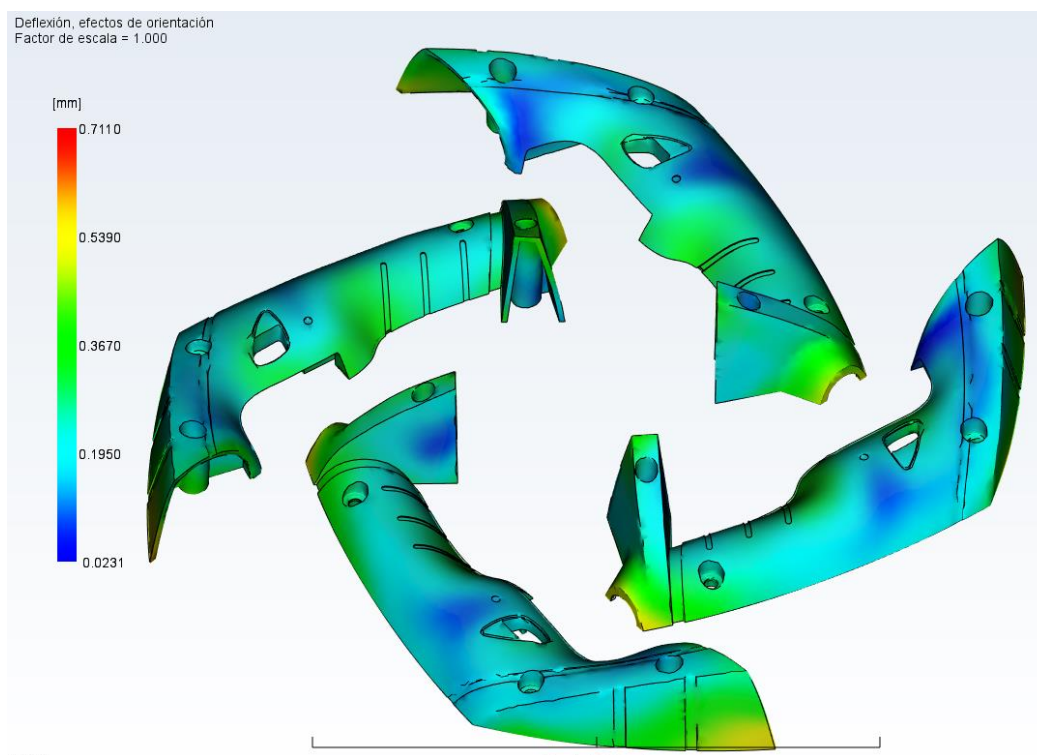
Estas deflexiones se darán por el diferencial de refrigeración, diferencial de contracción y diferencial de orientación. A continuación, se muestra el efecto de cada una.



63. Figura. Deflexión, refrigeración diferencial.



64. Figura. Deflexión, contracción diferencial.



65. Figura. Deflexión, efectos de orientación.

Como se puede observar, la deflexión se dará debido a la orientación de las fibras y principalmente por las contracciones en la pieza. Por otro lado, la refrigeración no causará un efecto diferencial en la pieza.

3.2.29 RESUMEN DE LAS SIMULACIONES

Los datos obtenidos muestran una refrigeración de alta calidad. El tiempo de llenado será de 1,019 segundos, logrando una confianza de llenado del 100%, una predicción de calidad del 99,5% y una calidad de refrigeración del 97,4%. Por otro lado, la orientación de la superficie no será la ideal.

Respecto a defectos visuales, gran parte de los atrapamientos de aire se darán en líneas de partición, por lo que podrán escapar por ellas. El resto de atrapamientos se darán en caras internas de la pieza, por lo que el acabado estético exterior será correcto. Por otro lado, las líneas de soldadura se darán en ambas caras, y estas serán inevitables debido a agujeros y figuras que separan el flujo en dos. Por último, los posibles rechupes no superarán la profundidad de 0,15mm por lo que no se considerarán de gravedad. Exceptuando uno de ellos, que alcanzará una profundidad de 0,19 mm, pero el cual se dará en la cara interna de la pieza.