

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
TRABAJO FIN DE GRADO

***DISEÑO DE UN MOLDE DE INYECCIÓN
PARA LA CUVIERTA DEL RETROVISOR
DE UN COCHE***

DOCUMENTO 3- ANEXO

Alumno: Zabala Agirre, Egoitz

Director: Lobato González, Roberto

Curso: 2019-2020

Fecha: Bilbao, 12 de febrero de 2020

ÍNDICE

3	DOCUMENTO: ANEXO	5
3.1	GLOSARIO	5
3.2	CÁLCULOS	6
3.2.1	DATOS INICIALES	6
3.2.2	ANÁLISIS DE COLADO	7
3.2.3	DISEÑO DE LA MÁQUINA DE INYECCIÓN	9
3.2.3.1	NÚMERO DE CAVIDADES	9
3.2.3.2	FUERZA DE CIERRE	9
3.2.4	SISTEMA DE ATEMPERAMIENTO	10
3.2.4.1	DIMENSIONAMIENTO DEL CANAL	10
3.2.4.2	CÁLCULO DEL CAUDAL	11
3.2.5	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	12
3.2.5.1	CANAL DE ATAQUE	12
3.2.5.2	CANAL SECUNDARIO	13
3.2.5.3	CANAL PRINCIPAL	14
3.2.5.4	BEBEDERO	14
3.2.6	ANÁLISIS DE LOS EXPULSORES A PANDÉO	16
3.3	SIMULACIONES	18
3.3.1	PARÁMETROS DE SIMULACIÓN	18
3.3.2	VERIFICACIÓN DE LA PIEZA	18
3.3.2.1	ESPESOR DE LA PARED NOMINAL	18
3.3.2.2	ÁNGULO DE DESMOLDEO	19
3.3.2.3	ANÁLISIS DE POSICIÓN DE LA ENTRADA	20
3.3.3	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	21
3.3.3.1	CONFIANZA DE LLENADO	21
3.3.3.2	PREDICCIÓN DE CALIDAD	22
3.3.3.3	PRESIÓN DE INYECCIÓN	24
3.3.3.4	PERDIDA DE PRESIÓN	25
3.3.3.5	TIEMPO DE LLENADO	26
3.3.3.6	TEMPERATURA EN EL FRENTE DE FLUJO	28
3.3.3.7	TEMPERATURA MEDIA	30
3.3.3.8	TIEMPO PARA ALCANZAR LA TEMPERATURA DE EXPULSIÓN	32
3.3.3.9	ORIENTACIÓN EN SUPERFICIE	33
3.3.3.10	FRACCIÓN DE CAPA SOLIDIFICADA AL FINAL DEL LLENADO	34
3.3.3.11	ATRAPAMIENTOS DE AIRE	36
3.3.3.12	LÍNEAS DE SOLDADURA	37
3.3.4	SISTEMA DE ATEMPERAMIENTO	38
3.3.4.1	CALIDAD DE REFRIGERACIÓN	38
3.3.4.2	PRESIÓN DEL CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN	40
3.3.4.3	CAUDAL DEL CIRCUITO	42
3.3.4.4	NÚMERO DE REYNOLDS DEL CIRCUITO	43
3.3.4.5	TEMPERATURA DEL REFRIGERANTE DEL CIRCUITO	45
3.3.4.6	VARIANZA DE TIEMPO DE REFRIGERACIÓN	46
3.3.4.7	VARIANZA DE TEMPERATURA	48

3.3.4.8	TEMPERATURA, PIEZA _____	50
3.3.4.9	TIEMPO PARA ALCANZAR LA TEMPERATURA DE EXPULSIÓN, PIEZA _____	53
3.3.5	SISTEMA DE EXPULSIÓN _____	55
3.3.5.1	CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA EN LA EXPULSIÓN _____	55
3.3.5.2	DEFLEXIÓN, TODOS LOS EFECTOS _____	57
3.3.5.3	ESTIMACIÓN DE RECHUPES _____	61
3.3.6	RESUMEN DE LAS SIMULACIONES _____	62

LISTA DE ILUSTRACIONES

1.	Figura. Pieza a fabricar.	6
2.	Figura. Dimensionado del circuito de refrigeración.	10
3.	Figura. Esquema de la entrada submarina.	12
4.	Figura. Dimensionamiento de los canales de alimentación.	13
5.	Figura. Espesor de la pared nominal.	18
6.	Figura. Análisis de ángulos de desmoldeo.	19
7.	Figura. Idoneidad de las entradas	20
8.	Figura. Resistencia del flujo.	20
9.	Figura. Confianza de llenado.	21
10.	Figura. Detalle confianza de llenado.	21
11.	Figura. Predicción de la calidad, vista inferior.	22
12.	Figura. Predicción de la calidad, detalle vista inferior	22
13.	Figura. Predicción de la calidad, vista superior.	23
14.	Figura. Presión de inyección.	24
15.	Figura. Pérdida de presión.	25
16.	Figura. Tiempo de llenado.	26
17.	Figura. Temperatura en el frente de flujo, vista superior.	28
18.	Figura. Temperatura en el frente de flujo, vista inferior.	29
19.	Figura. Temperatura al frente de flujo, detalle vista inferior.	29
20.	Figura. Temperatura media, vista superior.	30
21.	Temperatura media, vista inferior.	31
22.	Figura. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, vista superior.	32
23.	Figura. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, vista inferior.	32
24.	Figura. Orientación en superficie.	33
25.	Figura. Fracción de capa solidificada al final del llenado, vista superior.	34
26.	Figura. Fracción de capa solidificada al final del llenado, vista inferior.	35
27.	Figura. Atrapamientos de aire.	36
28.	Figura. Líneas de soldadura.	37
29.	Figura. Calidad de refrigeración, vista superior.	38
30.	Figura. Calidad de refrigerante, vista inferior	39
31.	Figura. Predicción de la calidad, detalle vista inferior.	39
32.	Figura. Presión del circuito, superior.	40
33.	Figura. Presión del circuito, inferior.	41
34.	Figura. Caudal del circuito.	42
35.	Figura. Número de Reynolds del circuito, superior.	43
36.	Figura. Número de Reynolds del circuito, inferior.	44
37.	Figura. Temperatura del refrigerante del circuito.	45
38.	Figura. Varianza de tiempo de refrigeración, vista superior.	46
39.	Figura. Varianza de tiempo de refrigeración, vista inferior.	47
40.	Figura. Varianza de temperatura, vista superior.	48
41.	Figura. Varianza de temperatura, vista inferior.	49
42.	Figura. Temperatura, pieza, vista superior.	50
43.	Figura. Temperatura, pieza. Mediciones cara interna.	51
44.	Figura. Temperatura, pieza, mejora de proceso.	52
45.	Figura. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, pieza, vista superior.	53
46.	Figura. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, pieza, vista inferior.	54
47.	Figura. Contracción volumétrica en la expulsión, vista superior.	55
48.	Figura. Contracción volumétrica en la expulsión, vista inferior.	56

49.	Figura. Deflexión, todos los efectos, vista superior.	57
50.	Figura. Deflexión, todos los efectos, vista superior.	58
51.	Figura. Deflexión, refrigeración diferencial.	59
52.	Figura. Deflexión, contracción diferencial.	59
53.	Figura. Deflexión, efectos de orientación, vista superior.	60
54.	Figura. Deflexión, efectos orientación, detalle vista inferior.	60
55.	Figura. Estimación de rechupes, vista superior.	61

LISTA DE TABLAS

1.	Tabla. Datos del material.	7
2.	Tabla. Dimensionamiento del ataque.	13
3.	Tabla. Datos del llenado.	27
4.	Tabla. Datos de la simulación de refrigeración.	39
5.	Tabla. Datos de la simulación estimación de rechupes	61

LISTA DE DIAGRAMAS

1.	Diagrama. Colada en frío vs colada en caliente.	7
2.	Diagrama. Coste vs volumen de producción para dos cavidades.	8
3.	Diagrama. Coste vs volumen de producción para cuatro cavidades.	8
4.	Diagrama. Número de horas de producción vs número de cavidades.	8
5.	Diagrama. Diámetro de referencia para diferentes materiales.	15
6.	Diagrama. Longitud del canal vs coeficiente de longitud.	15
7.	Diagrama. Tensión vs esbeltez.	16
8.	Diagrama. Tiempo de ciclo.	27

3 DOCUMENTO: ANEXO

3.1 GLOSARIO

En este apartado se realiza el listado de las abreviaciones de los parámetros utilizados en este apartado:

GLOSARIO

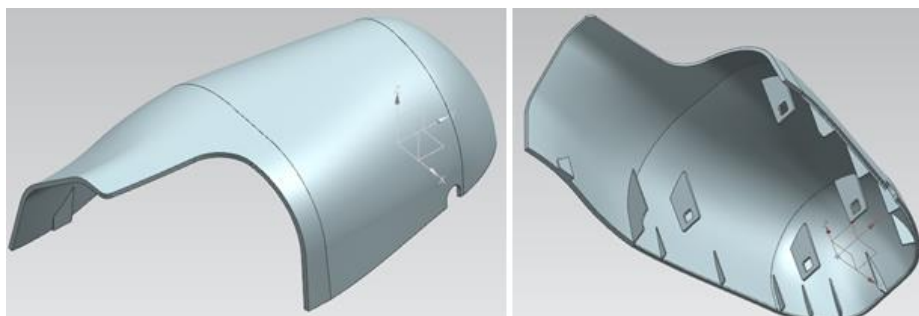
Densidad del material	ρ
Volumen de la pieza	v
Área proyectada cavidad	A_P
Número de cavidades	n
Capacidad de inyección	CY
Fuerza de cierre	F_c
Presión Interna	P_{int}
Área proyectada total	A_{PT}
Diámetro sistema de Atemperamiento	d_T
Profundidad del canal de enfriamiento	D
Distancia entre los canales de enfriamiento	P
Viscosidad dinámica	μ
Número de Reynolds	Re
Velocidad del caudal	v_s
Caudal	Q
Sección	A
Diámetro	\emptyset
Longitud	L
Diámetro del canal de Ataque	$\emptyset_{C.A}$
Diámetro del canal Secundario	$\emptyset_{C.S}$
Diámetro del canal Principal	$\emptyset_{C.P}$
Diámetro inferior Bebedero	\emptyset_f
Diámetro superior Bebedero	\emptyset_s
Diámetro nominal	\emptyset_n
Diámetro de referencia	D'
Coficiente de longitud	f_L
Radio de giro	i_{min}
Inercia mínima	I_{min}
Longitud de pandeo	L_p
Tensión de afluencia	σ_f
Módulo de Elasticidad	E
Esbeltez crítica	λ_c
Tensión crítica	σ_k
Diámetro interior	\emptyset_{int}
Diámetro exterior	\emptyset_{ext}
Coficiente de Seguridad	CS

3.2 CÁLCULOS

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

3.2.1 DATOS INICIALES

Antes de realizar ningún calculo, tenemos que tener en cuenta las características de la pieza a fabricar.



1. Figura. Pieza a fabricar.

Mediante el software Siemens PLM-NX10 se ha obtenido el volumen de la pieza y área proyectada obteniendo los resultados de $v=269,4 \text{ cm}^3$ y $A_p=1648,4 \text{ cm}^2$.

Una vez obtenida el volumen de la pieza y sabiendo la densidad de la pieza se obtiene la masa de material por pieza:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

$$m = 0,95 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 269,4 \text{ cm}^3 = 255,93 \text{ g} \cong 256 \text{ g}$$

Propiedades del material a inyectar DURETHAN BKV 30 H:

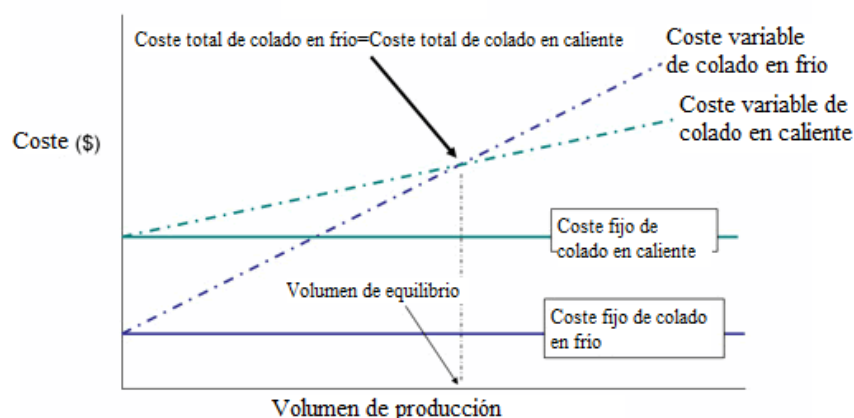
- Material: ABS
- Densidad: $0,95 \text{ g/cm}^3$
- Contracción: 1,006%
- Temperatura del molde recomendada: 25-80°C
- Temperatura de masa fundida recomendada: 200-280°C
- Temperatura de expulsión: 88°C
- Presión de inyección recomendada: 100-150MPa

3.2.2 ANÁLISIS DE COLADO

A la hora de seleccionar una colada en frío o colada en caliente habrá que tener en cuenta diversos factores, teniendo gran importancia los siguientes; material de la pieza, costes secundarios (cortar sistemas de alimentación, reciclado...), volumen de producción, gastos de fabricación y cantidad de material requerido.

El material utilizado será un termoplástico amorfo, ABS, por lo cual, el coste por desechos será menor.

En el siguiente diagrama podemos observar los gastos totales de una colada en frío y una colada en caliente.

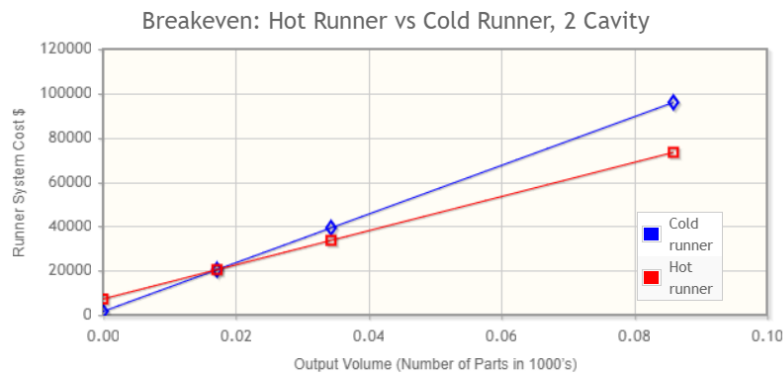


1. Diagrama. Colada en frío vs colada en caliente.

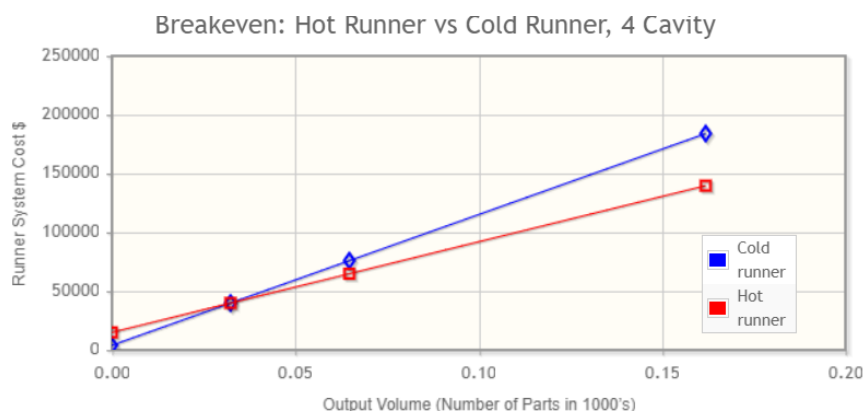
Mediante una herramienta de cálculo proporcionada por Milacron es posible crear diagramas orientativos coste-volumen de producción con la intención de obtener de forma visual las características necesarias para cada tipo de colada.

Part Weight (kg)	256
Maximum Part Thickness (mm)	4.2
Resin	ABS
Resin Cost (\$/kg)	2.86
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

1. Tabla. Datos del material.

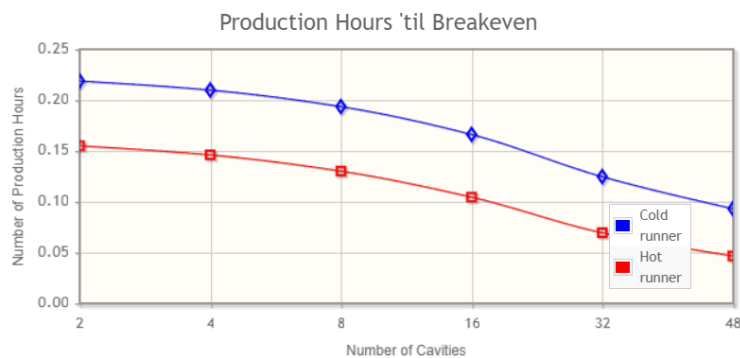


2. Diagrama. Coste vs volumen de producción para dos cavidades.



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

Se puede observar como aumentando el número de cavidades el coste de producción disminuye ya que la producción por colada aumenta. Además, cuanto mayor sea la producción del molde, mayor coste tendrá una colada en frío.



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

En este último diagrama podemos observar como la colada en frío tiene un mayor tiempo de ciclo, el cual, es lógico, ya que el material fundido necesita recorrer una distancia mayor para llenar las cavidades.

Al tratarse de una pieza de tamaño mediano se ha decidido el uso de dos cavidades, se decide el uso de la colada en frío.

3.2.3 DISEÑO DE LA MÁQUINA DE INYECCIÓN

3.2.3.1 NÚMERO DE CAVIDADES

El número de cavidades seleccionado dependerá de varias variables, por ejemplo; tamaño de la pieza, área de trabajo, capacidad de inyección, etc. A la hora de seleccionar la máquina inyectora está estará limitada por la capacidad de inyección por ciclo, esto es, el volumen máximo capaz de inyectar en un ciclo. Es recomendable que el volumen total de las cavidades corresponda a un 70% de la capacidad de inyección de la máquina.

Teniendo en cuenta con los resultados obtenidos en el apartado *3.2.2 Análisis de colada*, se decide un diseño de molde con dos cavidades, ya que ofrece una buena distribución.

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

$$n \cdot v = \frac{70}{100} \cdot CY \quad (2)$$

$$2 \text{ cavidades} \cdot 269,4 \frac{\text{cm}^3}{\text{cavidad}} = \frac{70}{100} \cdot CY \rightarrow CY = 769,714 \frac{\text{cm}^3}{\text{ciclo}}$$

3.2.3.2 FUERZA DE CIERRE

En el proceso de inyección, una vez que el molde se haya llenado completamente, el material fundido ejercerá una presión, el cual intentará separar por la línea de partición la cavidad y el núcleo. Por lo cual, la máquina de inyección deberá ejercer una fuerza de cierre, siendo otro parámetros para la correcta elección.

La fuerza de cierre teórica se obtiene multiplicando la presión interior por el área proyectada total, el cual constará de las cavidades y del sistema de alimentación.

$$F_c = P_{int} \cdot A_{PT} \quad (3)$$

$$F_c = 140,6 \text{MPa} \cdot 345128,3 \text{ mm}^2 = 48525037,44 \text{N}$$

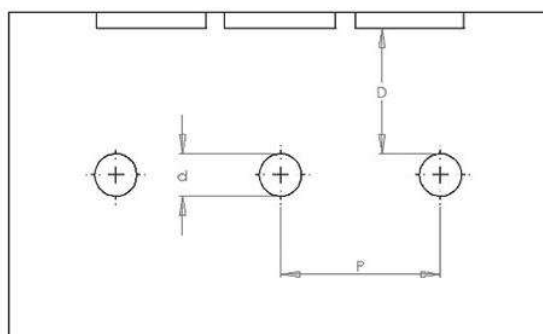
$$48525037,44 \text{N} \cdot \frac{1 \text{Kg}}{9,81 \text{ N}} \cdot \frac{1 \text{ tonelada}}{1000 \text{ Kg}} = 4946,5 \text{ toneladas}$$

Mediante la simulación de llenado realizado en el software *Autodesk Moldflow 2019* obtendremos estos datos. Hay que recordar que este valor estará sobredimensionado, ya que la presión máxima se dará en el sistema de alimentación, el cual tiene una sección menor que la cavidad. La fuerza de cierre necesaria para cada zona del molde, obteniendo un valor de $F_c=299,972$ toneladas. En conclusión, en este proyecto se decidirá utilizar este valor siendo el que más se acercará a la realidad.

3.2.4 SISTEMA DE ATEMPERAMIENTO

3.2.4.1 DIMENSIONAMIENTO DEL CANAL

Para el correcto dimensionamiento del circuito de refrigeración se basará en las relaciones obtenidas mediante 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 $5d$

2. *Figura. Dimensionado del circuito de refrigeración.*

Partiendo de un espesor medio en la pieza de 4 mm se decide utilizar un diámetro en los canales de refrigeración entre 8 y 10mm. Por tanto, se obtienen las siguientes relaciones:

$$d_T = 8 - 10 \text{ mm}$$

$$8 - 10 \text{ mm} \leq D \leq 16 - 20 \text{ mm}$$

$$24 - 30 \text{ mm} \leq P \leq 40 - 50 \text{ mm}$$

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.

3.2.4.2 CÁLCULO DEL CAUDAL

Para el sistema de refrigeración se recomienda un caudal totalmente turbulento, siendo este el que mejor características tenga para extraer el calor de la pieza. Por lo cual, se calculará un caudal para un número de Reynolds de 10.000.

Los canales de refrigeración tendrán un diámetro de 8 y 10mm. El refrigerante utilizado será agua a 25°C, por lo que se logran los siguientes valores para la densidad y la viscosidad dinámica:

$$\rho = 997 \frac{Kg}{m^3} \quad y \quad \mu = 0,000891 \frac{Kg}{m \cdot s}$$

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

$$Re = \frac{\rho \cdot v_s \cdot \emptyset}{\mu} \quad (4)$$

Se relaciona el caudal, la velocidad y la sección:

$$Q = v_s \cdot A \quad (5)$$

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

$$Re = \frac{\rho \cdot \frac{Q}{A} \cdot \emptyset}{\mu} \quad (6)$$

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

$$10.000 = \frac{997 \frac{Kg}{m^3} \cdot \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \cdot (0,008 m)^2} \cdot 0,008 m}{0,000891 \frac{Kg}{m \cdot s}} \rightarrow Q = 5,615 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

$$Q = 5,615 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s} \cdot \frac{1.000 dm^3}{1 m^3} \cdot \frac{60 s}{1 min} = 3,369 L/min$$

Por otro lado, el circuito de 10 mm de diámetro necesitará un caudal teórico de:

$$10.000 = \frac{997 \frac{Kg}{m^3} \cdot \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \cdot (0,010 m)^2} \cdot 0,010 m}{0,000891 \frac{Kg}{m \cdot s}} \rightarrow Q = 7,018 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

$$7,018 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s} \cdot \frac{1.000 dm^3}{1 m^3} \cdot \frac{60 s}{1 min} \rightarrow Q = 4,21 L/min$$

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 4,21 L/min para los canales de 8 y 10 mm respectivamente.

3.2.5 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

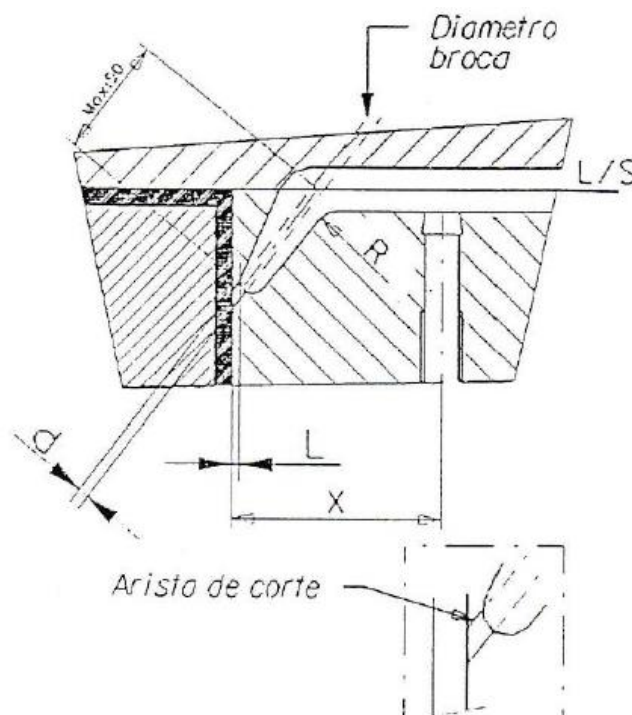
El sistema de alimentación estará constituido por los diferentes canales de alimentación. El dimensionamiento de dichos canales influirá de forma directa en el proceso de inyección, por ejemplo cuanto mayor sea el diámetro del canal menores serán las pérdidas de presión, en cambio, la presión de inyección para lograr un flujo completamente turbulento y las pérdidas por desechos serán mayores.

El cálculo de los canales se puede realizar mediante una ecuación empírica o usando gráficos basados en ensayos experimentales.

3.2.5.1 CANAL DE ATAQUE

El canal de ataque es el canal que une el sistema de alimentación a la pieza, siendo de gran importancia su correcto dimensionamiento para que la pieza se llene completamente.

Como se puede observar en el apartado 3.3.2.3 *Análisis de posición de entrada* El punto de inyección óptimo estaría en una zona visible de la pieza, por lo cual, se ha decidido inyectar por uno de los laterales utilizando una entrada submarina.



3. Figura. Esquema de la entrada submarina.

Para su correcto dimensionamiento se ha vasado en las tablas obtenidas vasados en los ensayos experimentales.

Medidas recomendadas

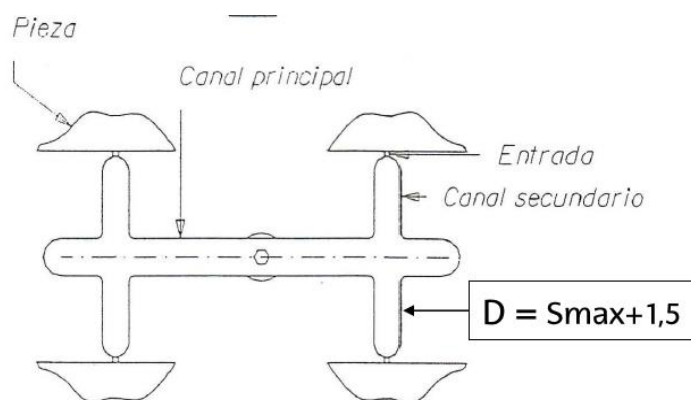
Tamaño del producto	Peso (gr)	d (mm)	Sección (mm ²)
Muy pequeños	0-5	0.50	0.19
Pequeños o muy pequeños	5-10	0.62	0.31
Pequeños	10-20	0.70	0.44
Pequeños y medianos	20-40	1.00	0.78
Medianos	40-100	1.25	1.23
Medianos y grandes	100-200	1.50	1.76
Grande	200+	2.00	3.14

2. *Tabla. Dimensionamiento del ataque.*

Por lo cual, partiendo que la pieza tiene una masa de 256g obtendremos un canal de entrada de $\varnothing 2\text{mm}$ y una sección de $3,14\text{mm}^2$.

3.2.5.2 CANAL SECUNDARIO

Los canales secundarios son los canales que transmiten el material fundido a los canales de ataque. El dimensionado de estos se realizará en base a los resultados experimentales.



4. *Figura. Dimensionamiento de los canales de alimentación.*

$$\varnothing = S_{\text{MAX}} + 1,5 \quad (7)$$

$$\varnothing_{C.S} = 4,1 + 1,5 = 5,6\text{mm}$$

3.2.5.3 CANAL PRINCIPAL

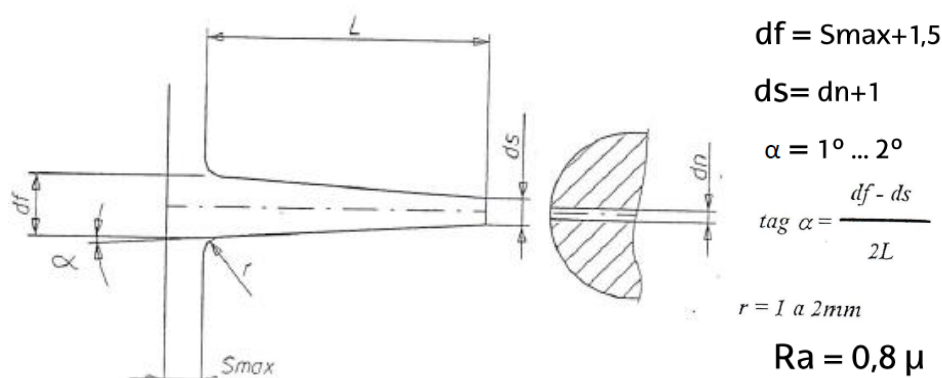
El canal principal será el encargado de conectar el canal secundario con el bebedero y su dimensionamiento se realizará también en base a resultados experimentales.

Partiendo de la ecuación (7) se obtiene el resultado:

$$\varnothing_{C.P} = 5,1 + 1,5 = 7,1 \text{ mm}$$

3.2.5.4 BEBEDERO

Por último, solamente quedaría dimensionar el bebedero, el cual trasladará el material inyectado desde la unidad de inyección.



Como se puede observar el cálculo del diámetro inferior o final será la misma que los canales principal y secundario, por lo cual partiendo de la ecuación (7) se obtiene el siguiente resultado:

$$\varnothing_f = 7,1 + 1,5 = 8,6 \text{ mm}$$

Partiendo que el bebedero tiene una longitud de $L=156 \text{ mm}$ y un diámetro de entrada de la máquina de inyección de $\varnothing_n=1,5 \text{ mm}$:

$$\varnothing_s = \varnothing_n + 1 \quad (8)$$

$$\varnothing_s = 1,5 + 1 = 2,5 \text{ mm}$$

Se calcula en ángulo del bebedero para verificar que está dentro de los valores previamente establecidos:

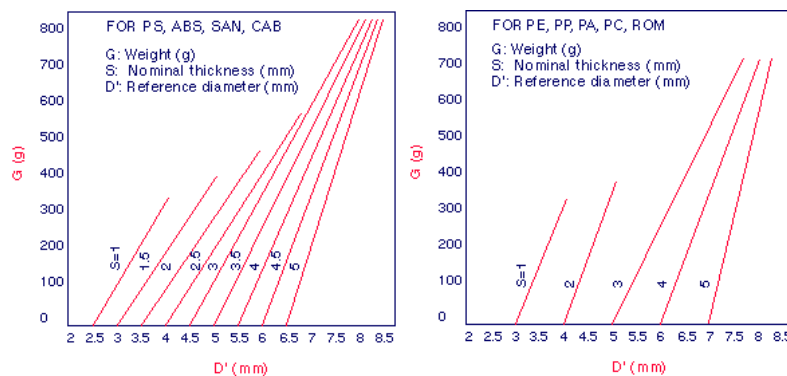
$$\text{tg}(\alpha) = \frac{\varnothing_f - \varnothing_s}{2L} \quad (9)$$

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{8,6 - 2,5}{2 \cdot 156} \rightarrow \alpha = 1,12^\circ \cong 1^\circ$$

Al tener un valor entre 1° y 2° se considerará correcta su dimensionamiento.

Finalmente se decide optar por un ángulo de 1° y diámetro superior $\varnothing_s=2,5\text{mm}$, ya que este elemento será comercial.

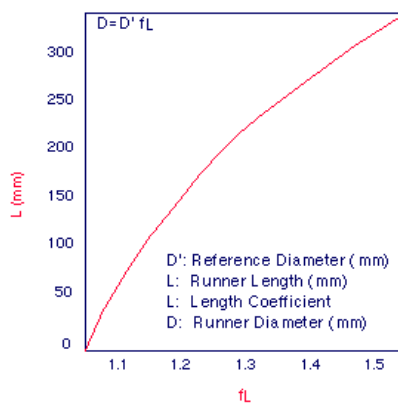
Como se ha mencionado anteriormente también es posible calcular el sistema de alimentación con el uso de diagramas.



5. Diagrama. Diámetro de referencia para diferentes materiales.

El material utilizado para el proceso de inyección es ABS, por lo cual se utilizará el gráfico derecho.

Partiendo de un peso de 256 g y un espesor nominal de 4 mm se obtiene un diámetro de referencia de $\approx 5,5$ mm.



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

Por otro lado, suponiendo una longitud de 325 mm se obtiene un coeficiente de longitud de 1,5.

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

$$D = D' \cdot f_L = 5,5 \cdot 1,5 \rightarrow D = 8,25 \text{ mm} \quad (10)$$

Como se puede observar, con este método solamente utilizaríamos un único diámetro en los canales de valor 8,25mm. Por lo cual, se decide utilizar los valores obtenido mediante resultados experimentales.

3.2.6 ANÁLISIS DE LOS EXPULSORES A PANDÉO

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

Se calculará la resistencia de los expulsores macizos, haciendo uso del expulsor más crítico con una longitud máxima de 290mm y un diámetro de 8,2mm. Su radio de giro será:

$$i_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}} \quad (11) \rightarrow i_{min} = \sqrt{\frac{\pi \cdot \frac{r^4}{4}}{\pi \cdot r^2}} = \sqrt{\frac{r^2}{4}}$$

$$i_{min} = \sqrt{\frac{4,1^2}{4}} = 2,05mm$$

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

$$L_p = 0,7 \cdot L \quad (12)$$

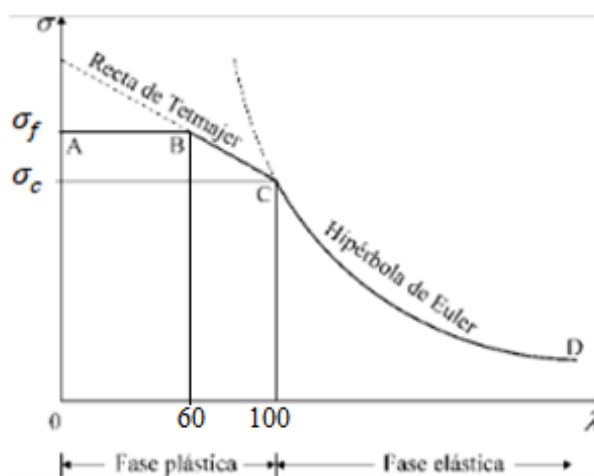
$$L_p = 0,7 \cdot 290 = 203mm$$

Por tanto, la esbeltez de los expulsores macizos será:

$$\lambda = \frac{L_p}{i_{min}} \quad (13)$$

$$\lambda = \frac{203}{2,05} = 99$$

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.



7. 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 último se calcula la tensión crítica del expulsor:

$$\frac{\lambda - 60}{100 - 60} = \frac{\sigma_k - \sigma_f}{\frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda_c^2} - \sigma_f} \quad (14)$$

$$\frac{\lambda - 60}{100 - 60} = \frac{\sigma_k - 770}{\frac{\pi^2 \cdot 193000}{100^2} - 770} \rightarrow \sigma_k = 204,97 \text{ MPa}$$

La presión máxima de inyección es de 140,6MPa, dándose un máximo de 43,5MPa 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.

$$CS = \frac{\sigma_k}{\sigma_{max.Int}} \quad (15)$$

$$CS_{exp} = \frac{204,97}{43,5} = 4,72$$

3.3 SIMULACIONES

3.3.1 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Las simulaciones se han realizado con los siguientes parámetros:

- Material: UMG ABS GSM
- Temperatura de masa fundida: 230°C
- Temperatura del molde: 50°C
- Puntos de inyección: 2
- Presión máxima de inyección de la máquina: 180MPa
- Refrigerante: Agua
- Temperatura del refrigerante: 25°C
- Caudal del refrigerante: 4,21L/min

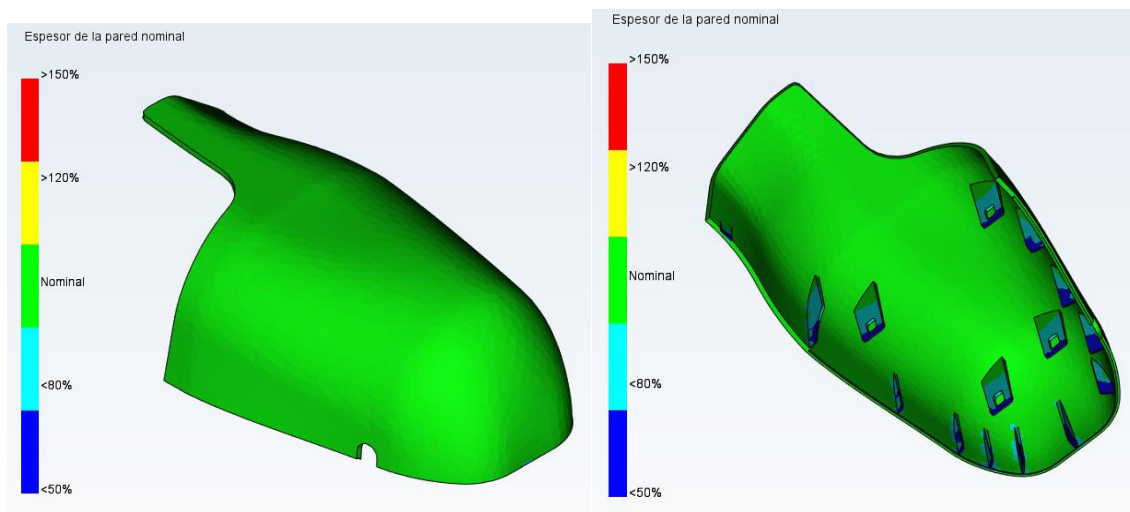
3.3.2 VERIFICACIÓN DE LA PIEZA

En este apartado se realizará los análisis para verificar que la pieza es moldeable.

3.3.2.1 ESPESOR DE LA PARED NOMINAL

El resultado *Espesor de la pared nominal* muestra variaciones de espesor respecto al espesor de la pared de la pieza.

El espesor influye en muchos cálculos de la pieza, incluida la presión, temperatura y tiempo de refrigeración.



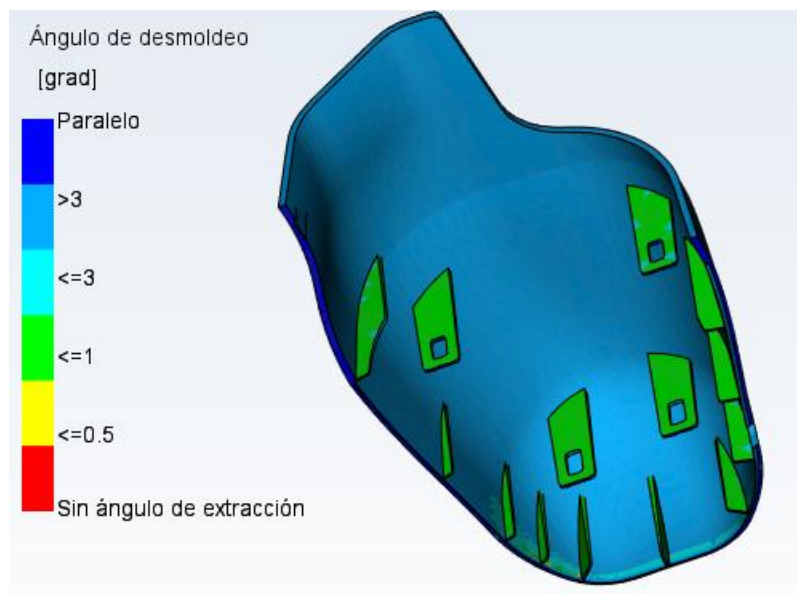
5. Figura. Espesor de la pared nominal.

Como se puede observar la pieza a fabricar tiene un espesor genérico de 3,5mm con un intervalo general del 20% teniendo una desviación máxima del 50% en caso de los nervios.

3.3.2.2 ÁNGULO DE DESMOLDEO

El resultado *ángulo de desmoldeo* muestra variaciones de la extracción de la pieza.

Otro de los parámetros importantes para verificar que la pieza es moldeable serán los ángulos de desmoldeo. En este apartado se verificará que la pieza no tenga caras paralelas a la dirección de apertura del molde. También se observará visualmente las zonas con mayor inclinación para ubicar los expulsores en ellas.

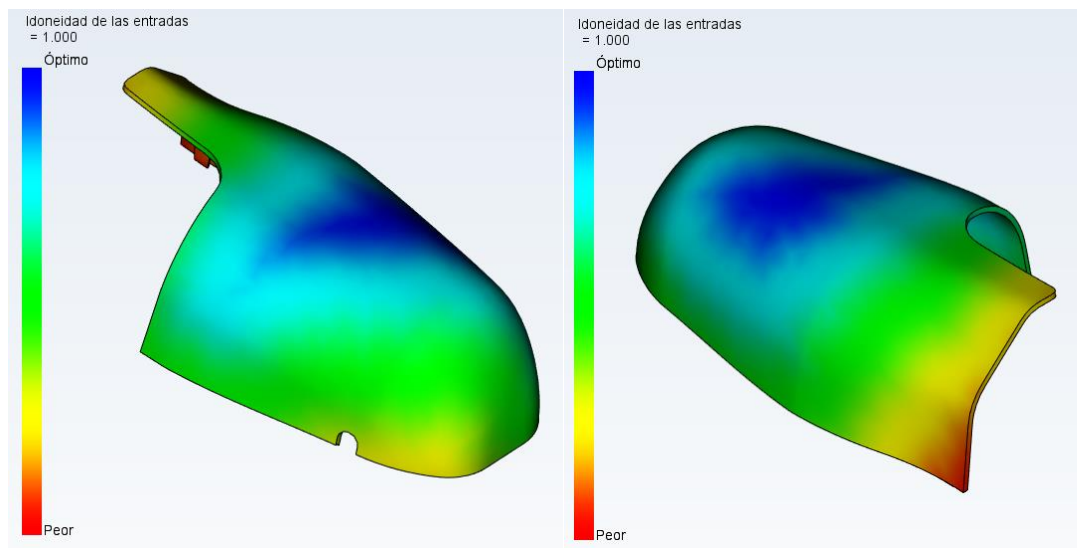


6. *Figura. Análisis de ángulos de desmoldeo.*

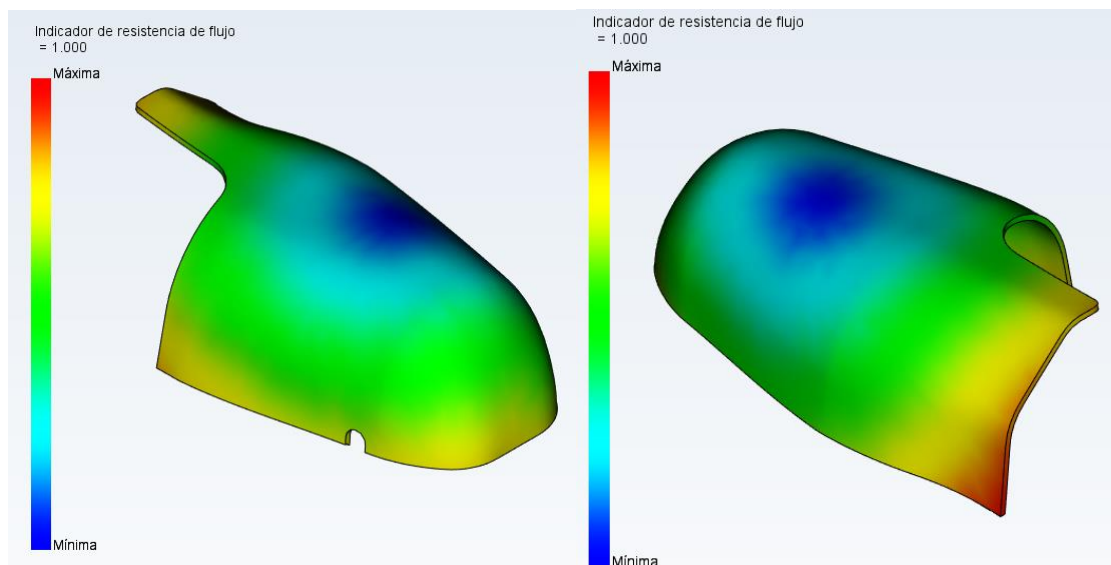
Se puede observar que la pieza en general tiene un buen ángulo de desmoldeo, siendo su valor menor en los nervios.

3.3.2.3 ANÁLISIS DE POSICIÓN DE LA ENTRADA

El resultado *análisis de posición de la entrada* califica la idoneidad de cada posición para ubicar el punto de inyección.



7. *Figura. Idoneidad de las entradas*



8. *Figura. Resistencia del flujo..*

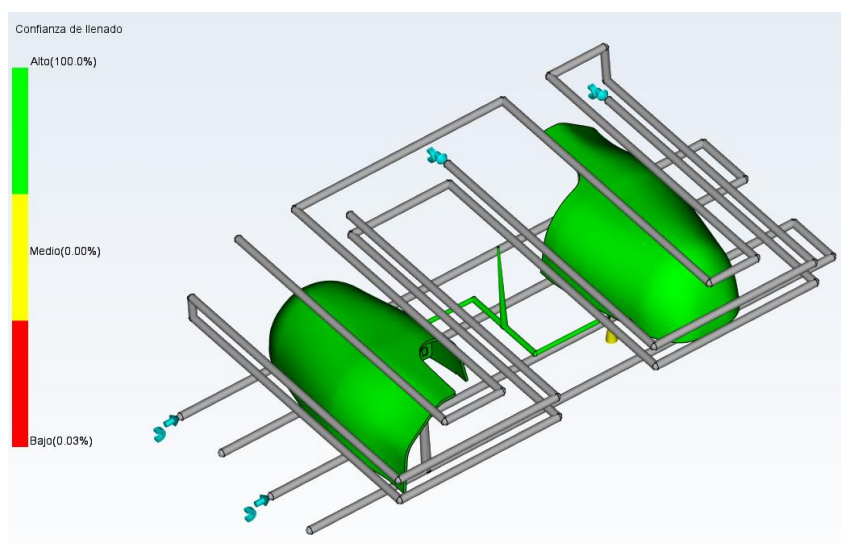
Se puede observar que el punto de inyección óptimo sería en una zona visible de la pieza. Esto no será posible, ya que la boquilla dejaría una marca visible en la pieza disminuyendo su calidad óptica. Es por ello que se decide realizar una entrada submarina en uno de los costados de la pieza. Basándonos en los resultados resistencia del flujo, se decide colocar la entrada en el lado que tiene menor resistencia, ya que favorecerá a la dispersión del material.

3.3.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

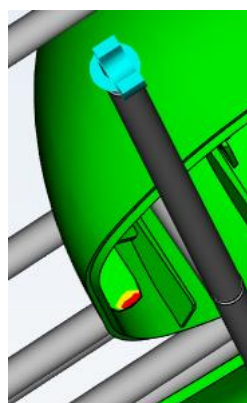
3.3.3.1 CONFIANZA DE LLENADO

El resultado *Confianza de llenado* muestra la probabilidad de llenar con plástico una región dentro de la cavidad. Por lo cual, en este apartado se verificará que la pieza se llenará de forma correcta en las condiciones indicadas. En caso de no obtener un resultado correcto se deberán modificar las características del proceso.

Los resultados obtenidos se representarán mediante un código de colores, desde el verde, el cual indicara que se dará el llenado sin problemas, hasta el rojo, el gris que serán regiones que no se llenarán.



9. Figura. Confianza de llenado.



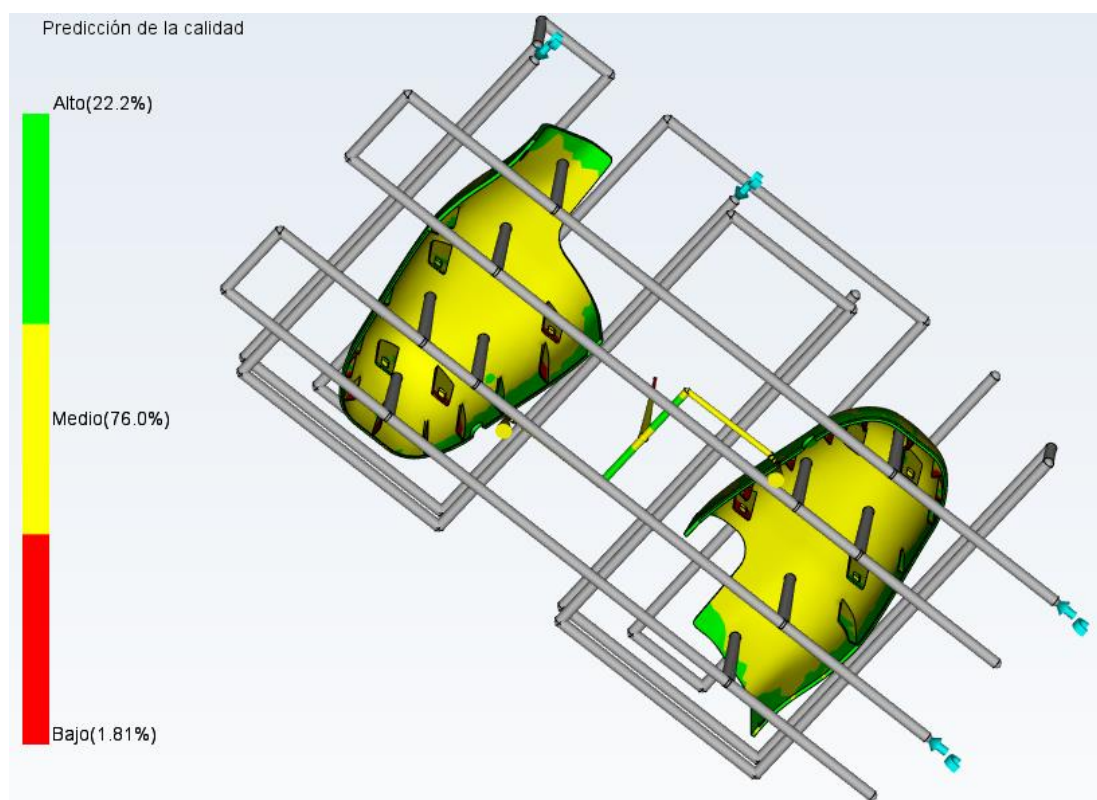
10. Figura. Detalle confianza de llenado.

Se comprueba que la pieza se llenara completamente y con una confianza óptima. Es verdad que en uno de los extremos de los nervios se da una confianza baja, pero al tener una superficie de un 0.03% se dará el resultado por bueno.

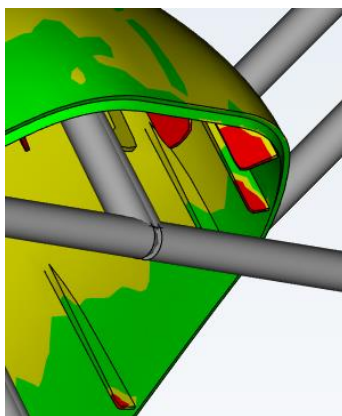
3.3.3.2 PREDICCIÓN DE CALIDAD

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

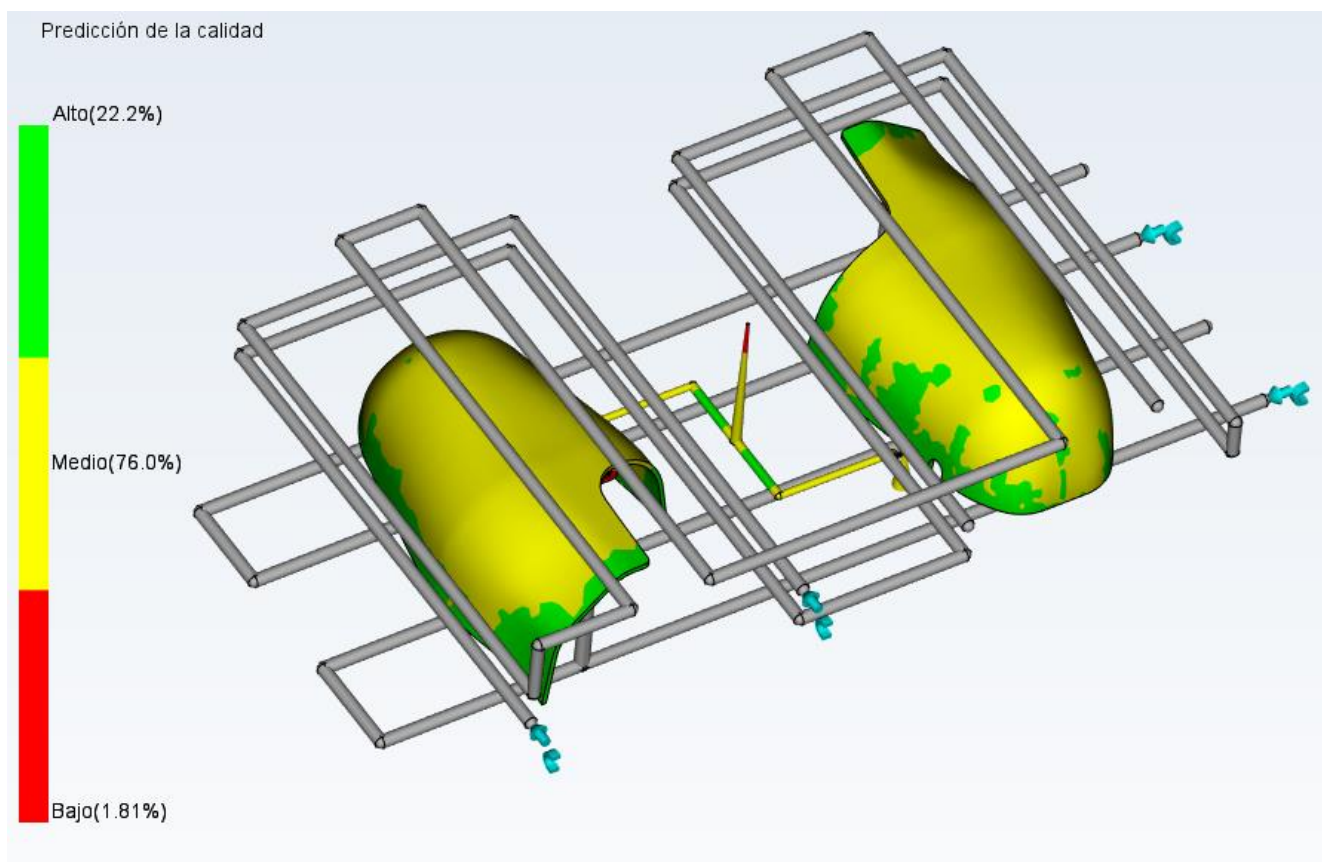
Los resultados obtenidos se representarán mediante un código de colores, desde el verde, el cual indicara una alta calidad, hasta el rojo, el cual indicará problemas de calidad.



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



12. Figura. Predicción de la calidad, detalle vista inferior



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

Se obtiene un nivel de calidad predominante medio (76%) en toda la pieza. Se considerará el resultado como bueno ya que la pieza no es propensa a recibir golpes, por lo cual, no se serán necesarias características mecánicas óptimas. Además, después se le aplicará una capa de pintura, por lo cual, con un acabado adecuado sería suficiente. Por último, se verifica que no haya apariciones de líneas de soldadura que empeoren las características mecánicas de la pieza, ni atrapamientos de aire que empeoran las características ópticas de la pieza.

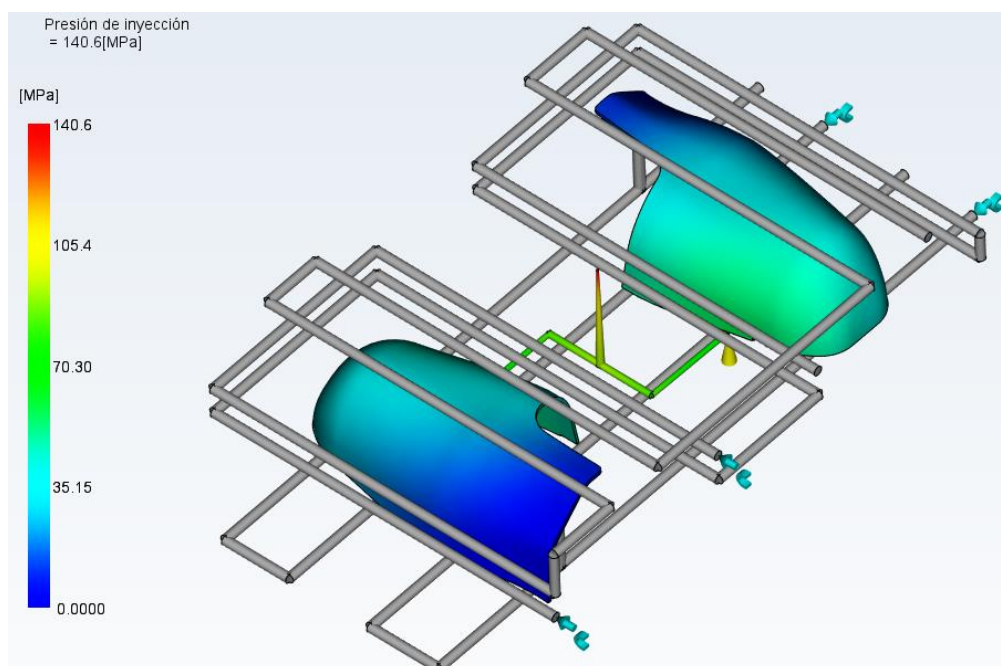
En los extremos de los nervios de las zonas no visibles en cambio, se dan calidades bajas, siendo estas una zona pequeña (1,81%), al no ser visibles y al no tener que necesitar más características mecánicas óptimas se dan los resultados como buenos.

3.3.3.3 PRESIÓN DE INYECCIÓN

El resultado *presión de inyección*, que se obtiene mediante un análisis de llenado, muestra el valor de la máxima presión de inyección obtenida antes de que se produzca la conmutación de velocidad/presión durante la fase de llenado.

Al principio de llenado la presión de las cavidades será la atmosférica, aumentando su presión con la llegada de masa fundida. Por lo cual, con esta simulación observaremos de forma visual en la dirección que se llenará la cavidad y verificar que se da un llenado uniforme. Además, seremos capaces de predecir como actuará la pieza en secciones de un menor espesor, ya que para el correcto llenado de dichas secciones las presiones ejercidas deberán ser mayores.

La magnitud de la presión o el gradiente de presión depende de la resistencia del polímero en el molde, teniendo que aplicar una presión de inyección más elevada en polímeros de mayor viscosidad.



14. Figura. Presión de inyección.

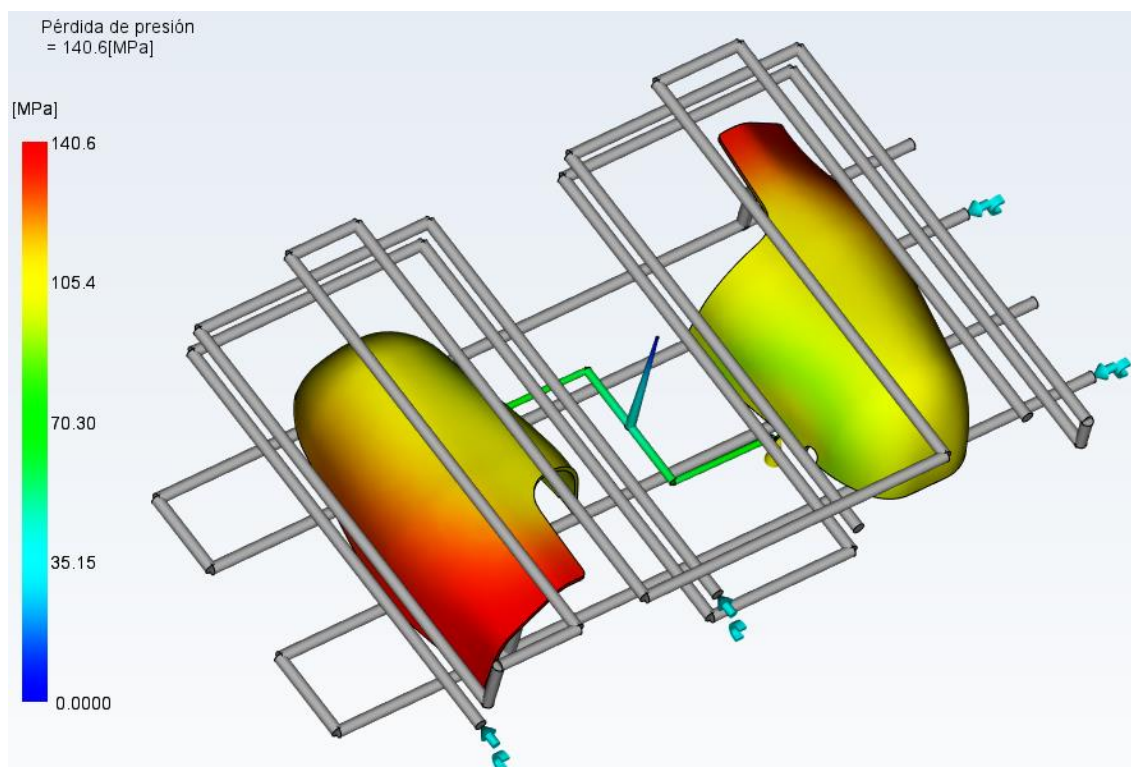
Observando los resultados se verifica que los contornos del llenado no son pequeños, por lo que se deduce que no se dan grandes variaciones en la distribución de la presión.

Además, se verifica un llenado uniforme.

3.3.3.4 PERDIDA DE PRESIÓN

El resultado *pérdida de presión* indica las caídas de presiones que se darán a lo largo de la pieza en el proceso de inyección. Este valor se identificará mediante un rango de colores, indicando el color azul ninguna pérdida de presión y con color rojo la mayor pérdida de presión.

En caso de que las pérdidas de presiones sean mayores que la presión máxima de la pieza, indicará que el material no es capaz de fluir correctamente por la zona teniendo que modificar las condiciones de entrada o geometría del cuerpo o el material utilizado.



15. Figura. Pérdida de presión.

Observando los resultados se aprecia como la pérdida de presión en un extremo es mayor que en el otro, esto es debido a la colocación del punto de inyección. En cambio, al apreciar los contornos de presión son de tamaño similares se considerará que no se den grandes variaciones en las pérdidas de presión.

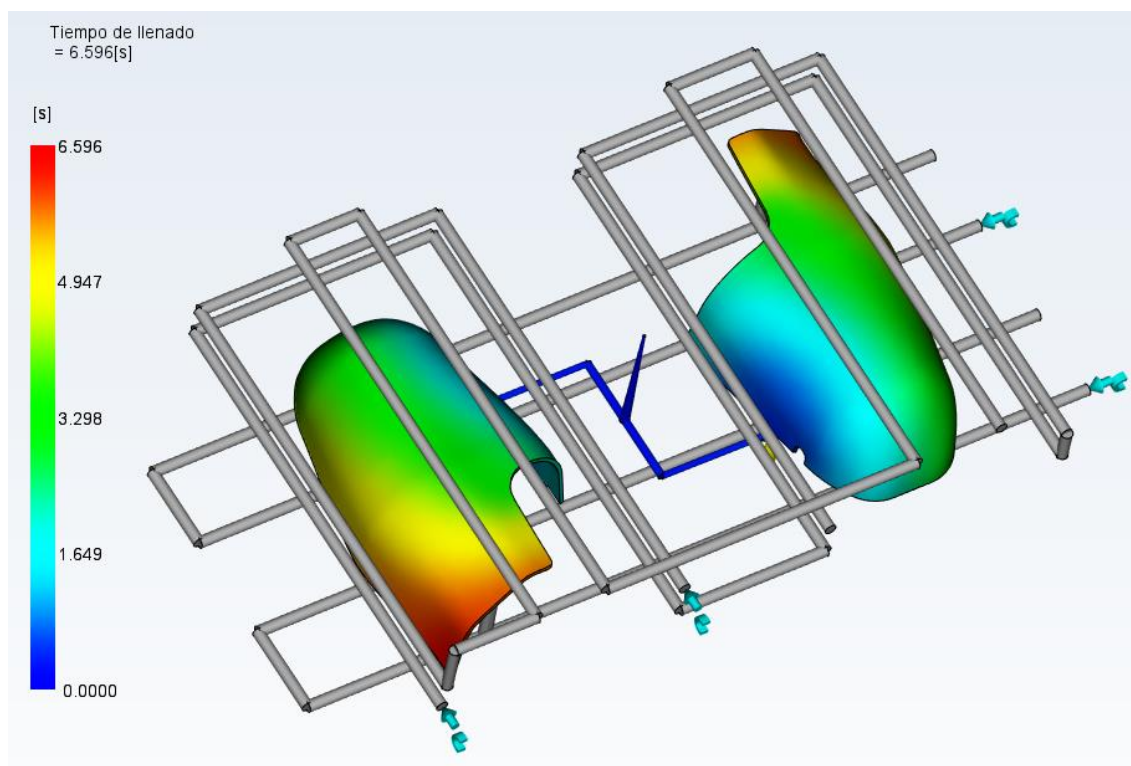
3.3.3.5 TIEMPO DE LLENADO

El resultado *tiempo de llenado* muestra la posición del frente de flujo a intervalos regulares mientras la cavidad se llena, el llenado se representará mediante un sistema de colores. Las regiones del mismo color se llenarán al mismo tiempo.

A pesar de que la pieza sea bastante simétrica respecto al plano vertical, al colocar el punto de inyección en uno de los laterales de la pieza, habrá que asegurarse que el llenado se de uniforme en toda la pieza.

Con este análisis se verificarán que no se den inyecciones cortas, indecisiones de llenado, sobrecompactación etc.

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



16. Figura. Tiempo de llenado.

Como se puede observar en los resultados obtenidos el tiempo de llenado es de 6,6 segundos y observando el tamaño de las zonas podemos considerar un llenado uniforme.

Las inyectadas cortas se mostrarán de forma traslucida. Se comprueba que no hay ninguna de ellas en la pieza, examinando con mayor atención los extremos de la pieza y las zonas de sección reducida.

En el caso de que los diferentes contornos estén demasiado próximos, es posible de que se haya producido indecisión. Se comprueba que no se den estos errores.

En el caso de observar que una ruta de flujo finaliza antes que las demás, es posible que se deba a la sobrecompactación. Se comprueba que no se den estos errores.

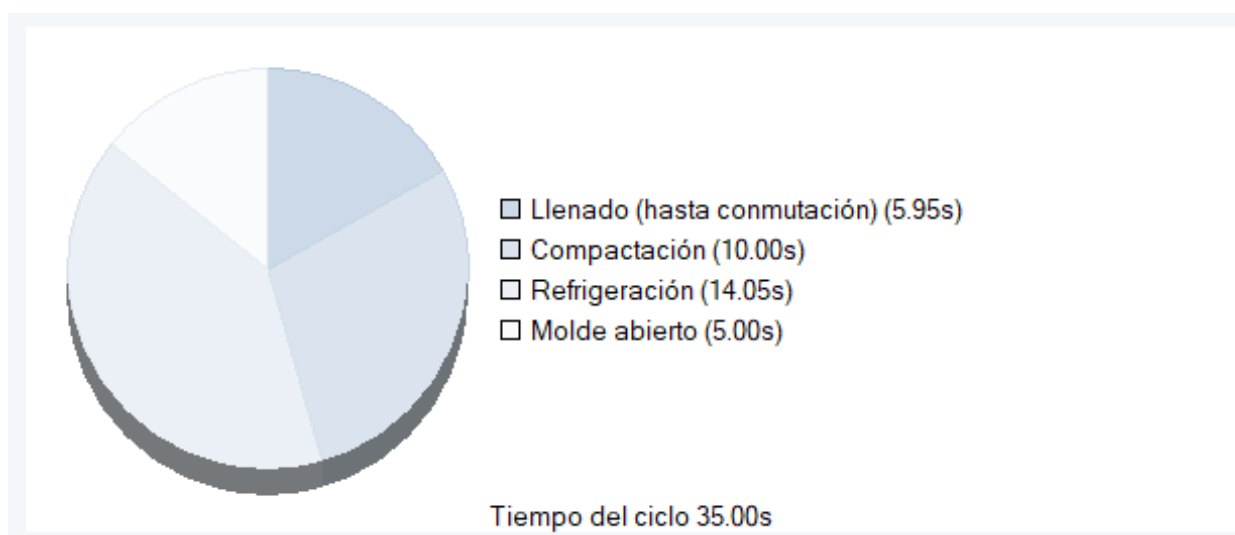
Por último, se comprobará que no se dé el efecto racetrack. Este efecto se da cuando el material fluye con mayor facilidad hacia las regiones gruesas que hacia las regiones delgadas, llenando estas en último lugar. Esto puede provocar atrapamientos de aire, líneas de soldaduras y regiones con altas tensiones internas.

Mediante la simulación de llenado se obtienen los siguientes resultados:

Tiempo real de llenado	6.60 (s)
Presión real de inyección	140.593 (MPa)
Área de fuerza de cierre	828.0560 (cm ²)
Fuerza de cierre máx. durante el llenado	299.948 (tonelada)
Conmutación de velocidad/presión a % volumen	97.08 (%)
Conmutación de velocidad/presión en tiempo	5.95 (s)
Peso total de la pieza al final del llenado	534.501 (g)
Volumen de inyectada	548.6934 (cm ³)
Volumen de la cavidad	535.7400 (cm ³)
Volumen del sistema de canales	12.9533 (cm ³)

Fuerza de cierre máxima durante el ciclo	382.925 (tonelada)
Esfuerzo de cizalla máx. de la pared	0.606 (MPa)
Peso total de la pieza	541.749 (g)
Tiempo de refrigeración	14.05 (s)
Tiempo del ciclo	35.00 (s)

3. Tabla. Datos del llenado.



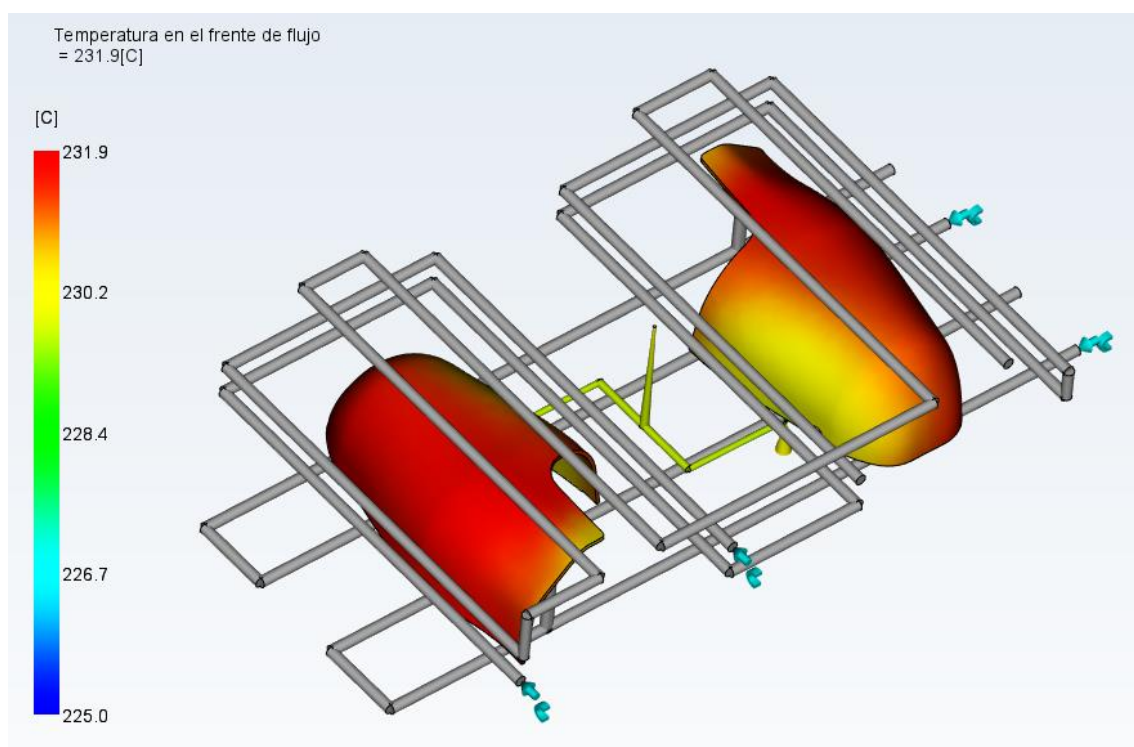
8. Diagrama. Tiempo de ciclo.

3.3.3.6 TEMPERATURA EN EL FRENTE DE FLUJO

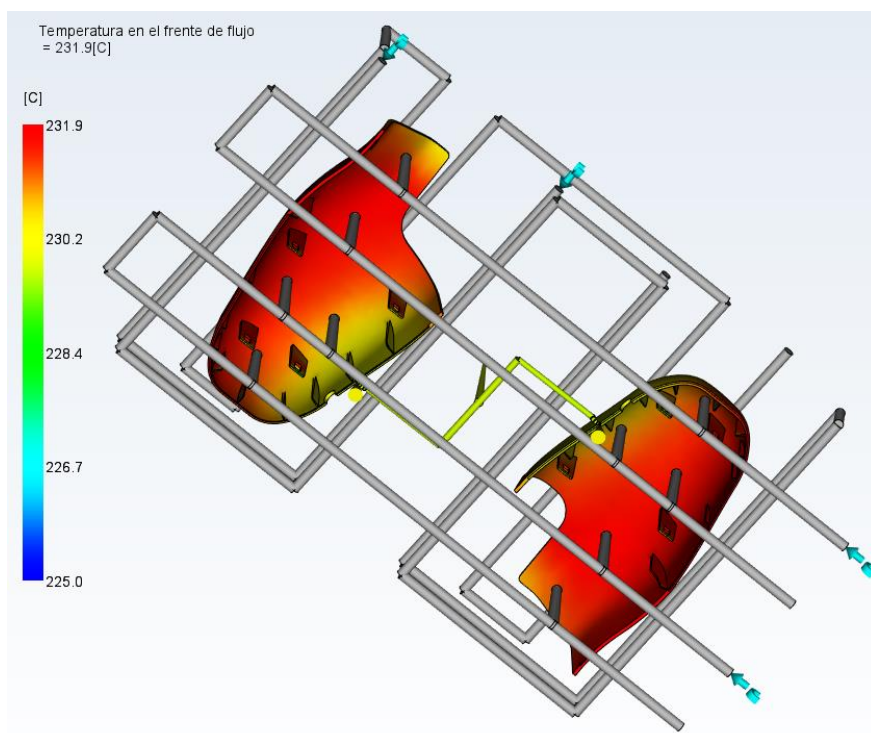
El resultado *temperatura en el frente de flujo* muestra la temperatura del polímero cuando el frente de flujo alcanza punto especificado, en el centro de la sección transversal del plástico.

Dichos resultados se representaran con un diagrama de colores, representando desde el color azul, el punto de menor temperatura, hasta el rojo, el punto de mayor temperatura.

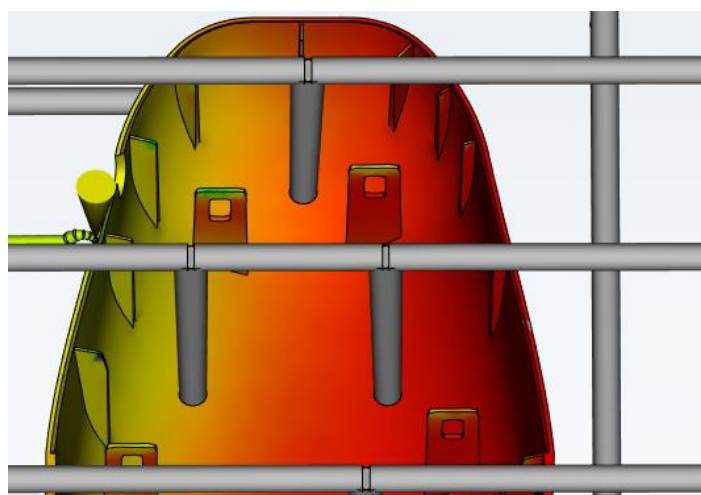
Se recomienda que la temperatura mínima y máxima no disminuya más de 2°C a 5°C durante la fase de llenado. Un cambio mayor suele indicar que el tiempo de inyección es demasiado corto o que hay áreas de indecisión. En cambio, si la temperatura del frente de flujo es demasiado baja en un área fina de la pieza, puede producirse indecisión en una inyectada corta. Además, en las áreas en las que la temperatura del frente de flujo aumenta en varios grados, puede producirse la degradación del material apareciendo defectos visuales.



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



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



19. Figura. Temperatura al frente de flujo, detalle vista inferior.

Observando los resultados la temperatura, en general, se mantiene alrededor de 231,9°C, aunque en los nervios de la vista inferior toma un valor alrededor de 228,4°C.

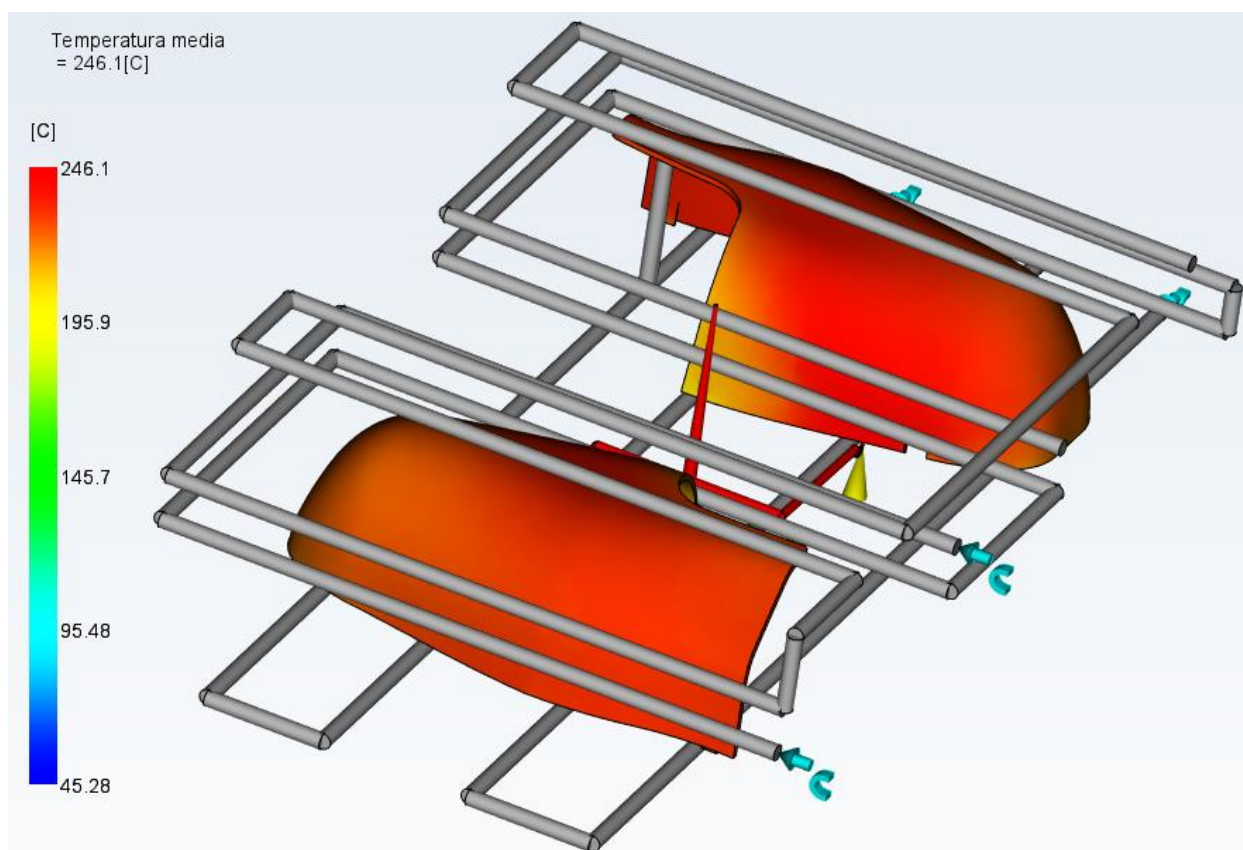
Obtener valores inferiores a la temperatura media de 4-10°C puede suponer un llenado demasiado rápido/lento o indecisión en la zona. Por lo cual, se comprueba en los análisis de llenado y tiempo de llenado que se dan con resultados óptimas.

3.3.3.7 TEMPERATURA MEDIA

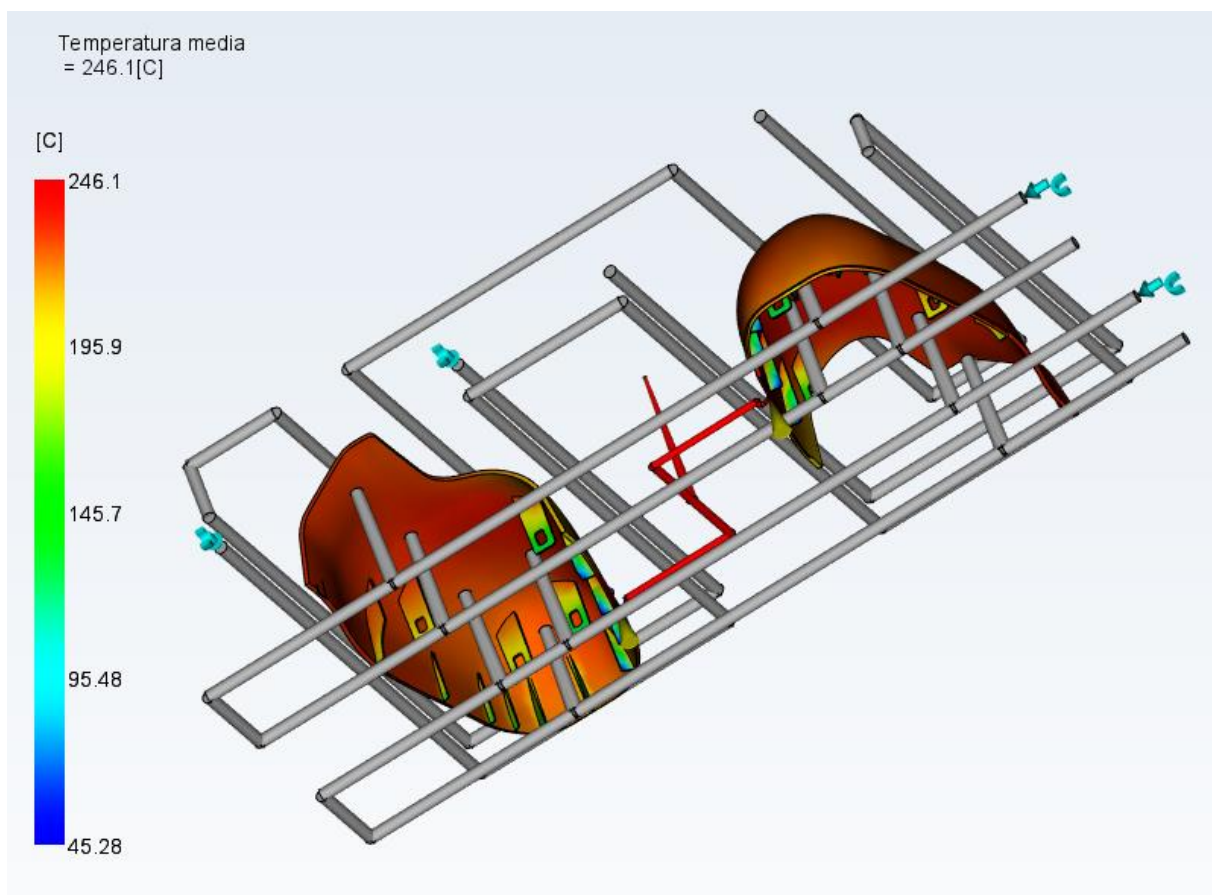
El resultado *temperatura media* muestra la temperatura media de la masa a lo largo del espesor de la pieza al final del llenado. La temperatura media representa la energía que se transporta a través de una ubicación determinada en un momento específico.

Si la temperatura media es demasiado baja en un área fina de la pieza, puede producirse indecisiones o inyectadas cortas, en cambio, en el caso de producirse en líneas de soldadura, pueden empeorar sus características.

En áreas en las que la temperatura media es demasiado alta, pueden producirse defectos superficiales y degradación del material.



20. Figura. Temperatura media, vista superior.



21. Temperatura media, vista inferior.

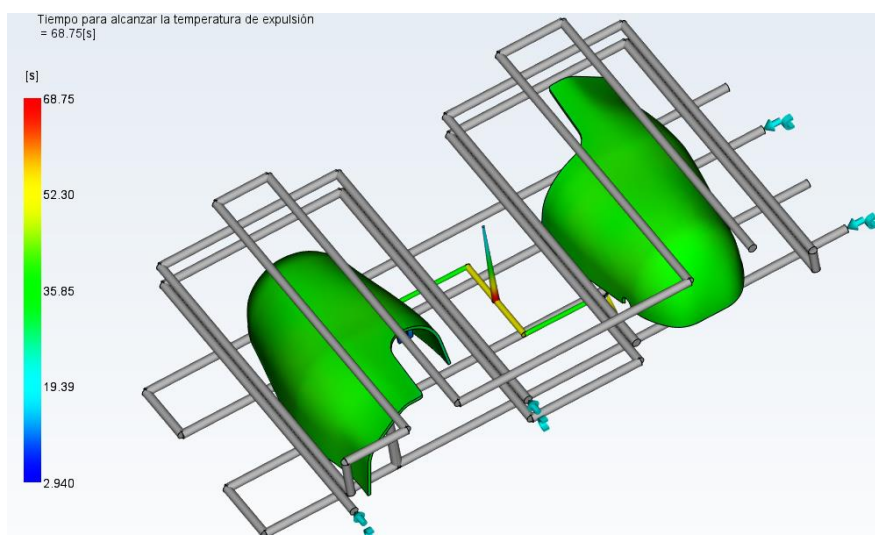
Podemos observar como la pieza tiene una temperatura media de $246,1^{\circ}\text{C}$, temperatura soportada por el material inyectado. Podemos afirmar que el resultado es correcto, ya que no supera la temperatura máxima soportada por el material (250°C máx.).

En este resultado también podemos observar que las zonas de menor espesor tendrán una temperatura media inferior, por lo cual significa que el flujo no tiende a fluir por ellas. Dada la posición de dichas zonas, es lógico que el flujo no tienda a fluir por ellas por lo cual se da el resultado por correcto.

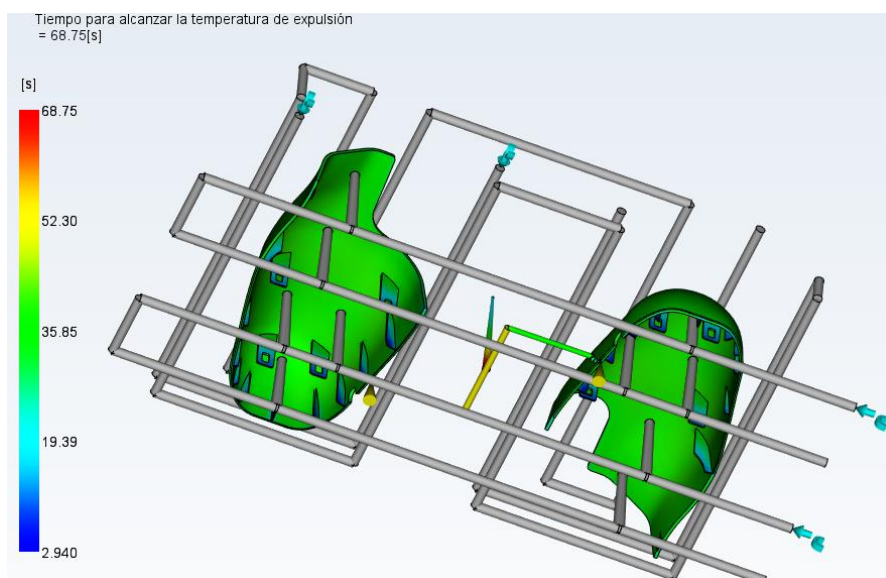
Por último, se comprueba que estas zonas no haya líneas de soldadura que empeoren sus características mecánicas.

3.3.3.8 TIEMPO PARA ALCANZAR LA TEMPERATURA DE EXPULSIÓN

El resultado *tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión* muestra el tiempo requerido para alcanzar la temperatura de expulsión, que se mide desde el inicio del llenado. Idealmente, la pieza debe de solidificarse uniformemente.



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



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

Podemos observar como el sistema de alimentación será el último en enfriarse. Como este sistema se recortará de forma automática al expulsar la pieza, no será necesario que esté completamente compactada reduciendo el tiempo de compactación de la pieza.

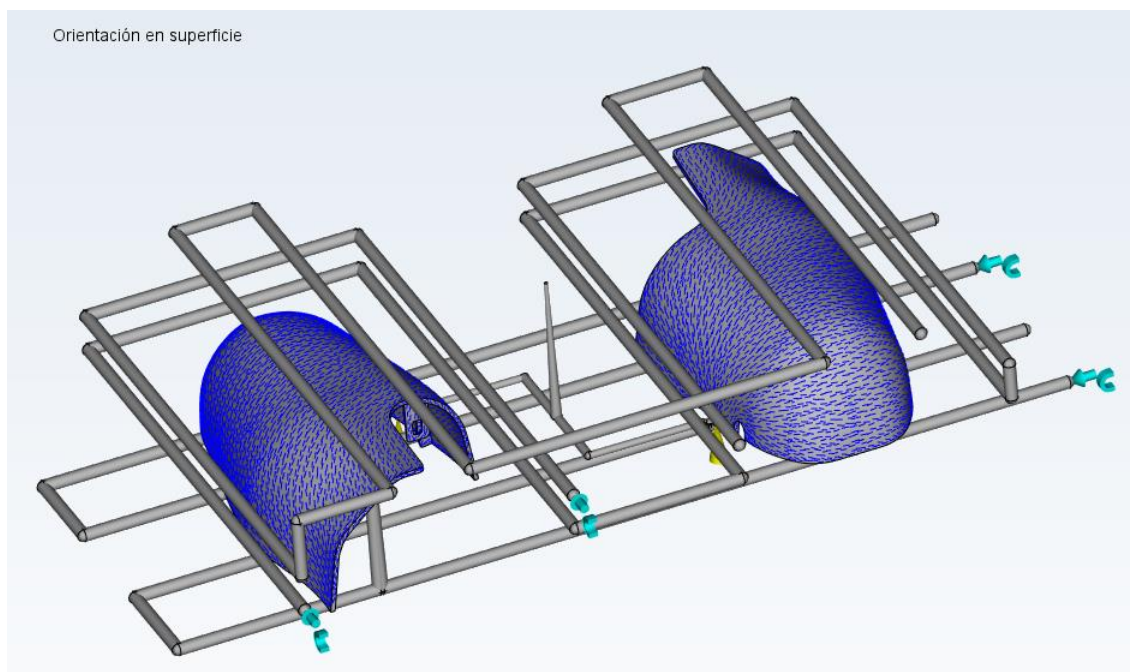
3.3.3.9 ORIENTACIÓN EN SUPERFICIE

El resultado *orientación en superficie* proporciona una buena indicación de cómo se orientan las moléculas en el exterior de la pieza, y muestra la dirección de alineación principal media para todas las superficies local al final del llenado.

Como la masa fundida se solidifica rápidamente cuando entra en contacto con el molde por primera vez, el vector de velocidad proporciona la orientación molecular más probable en la superficie.

Este análisis es útil para estimar las propiedades mecánicas de una pieza, ya que, la pieza tiende a tener mejores características mecánicas en la orientación de sus fibras.

Además, la contracción en la dirección de la orientación de la fibra es mayor que en la dirección básica o transversal.



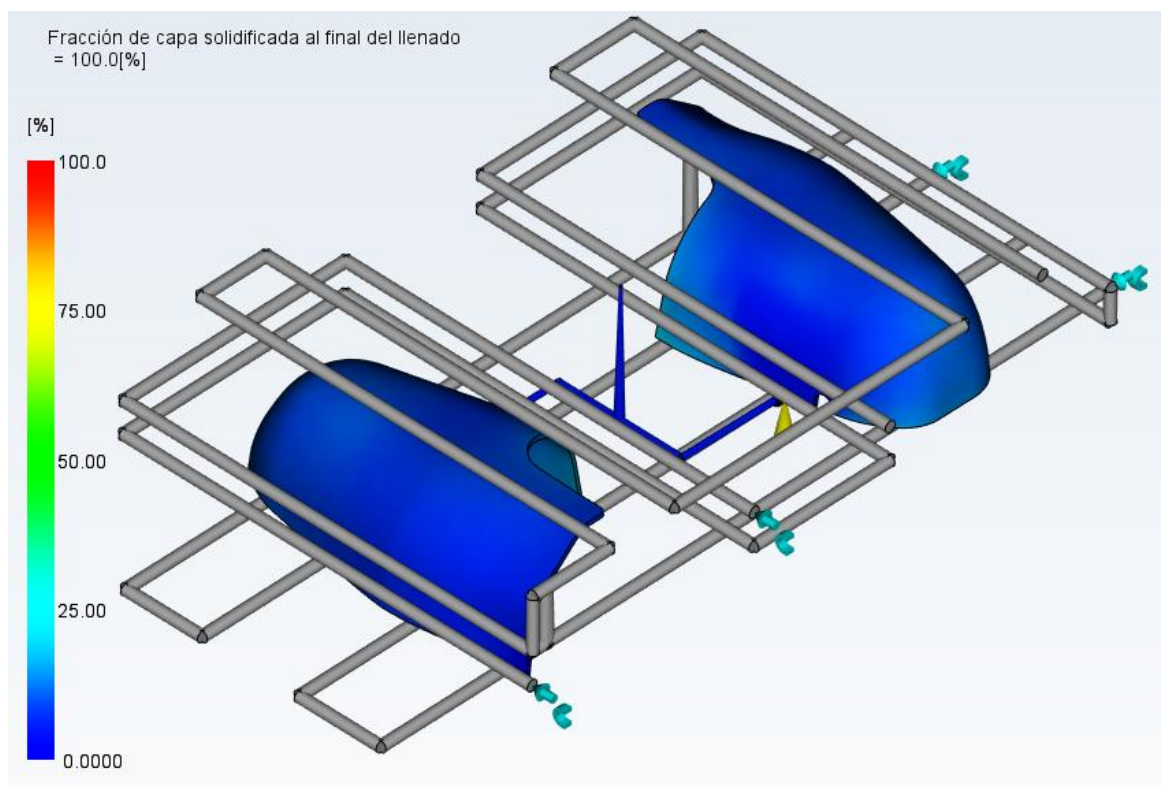
24. Figura. Orientación en superficie.

Se verifica que el resultado obtenido es bueno, ya que la superficie se orienta de forma uniforme y con una orientación adecuada.

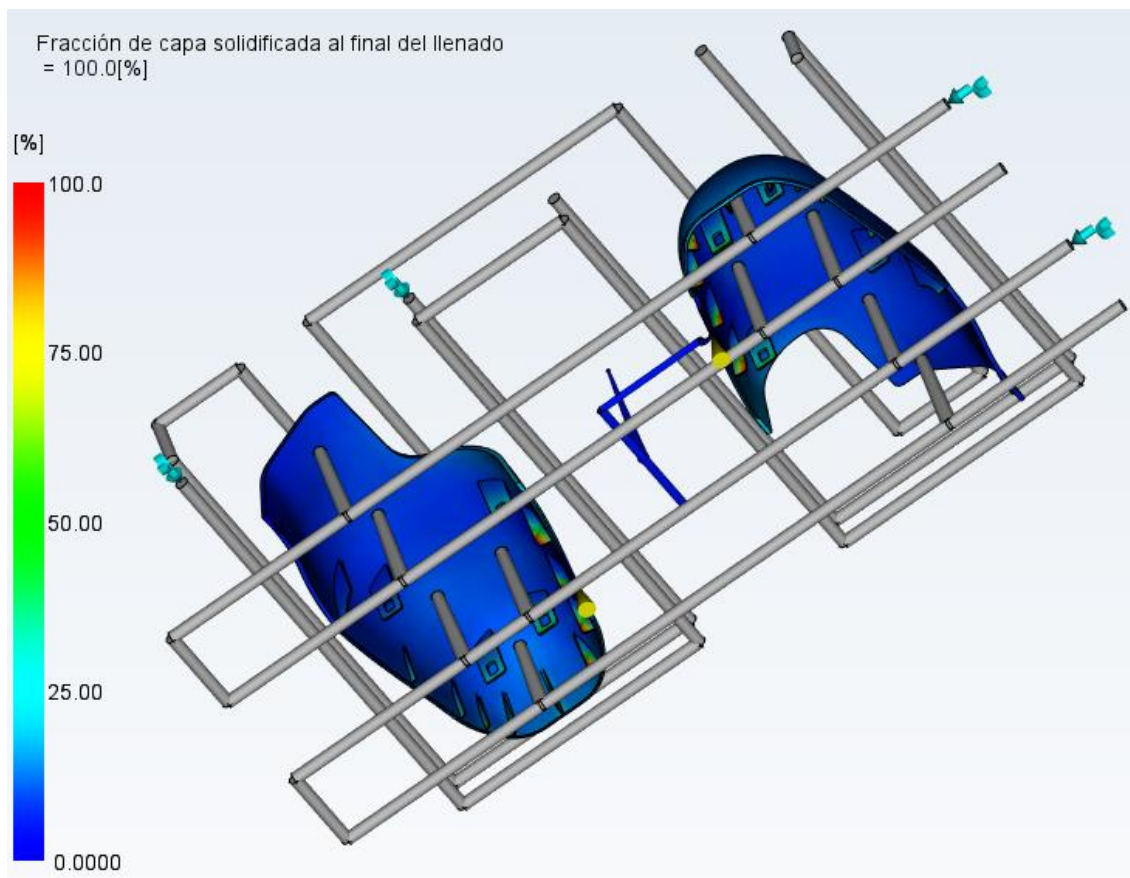
3.3.3.10 FRACCIÓN DE CAPA SOLIDIFICADA AL FINAL DEL LLENADO

El resultado *fracción de capa solidificada al final del llenado* representa la fracción del espesor de la capa solidificada al final del llenado. La fracción de capa solidificada tiene efectos muy significativos en la resistencia del flujo, ya que la viscosidad aumenta con la disminución de la temperatura.

Se recomienda que la fracción máxima de capa solidificada al final del llenado debe ser menos que 0.20-0.25. Los valores más altos harán que sea difícil de compactar la pieza.



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



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

Observando los resultados junto al tiempo de llenado se verifica que las regiones que se llenan últimas, los que tienen un valor cercano al 0, están colocados cerca del punto de inyección.

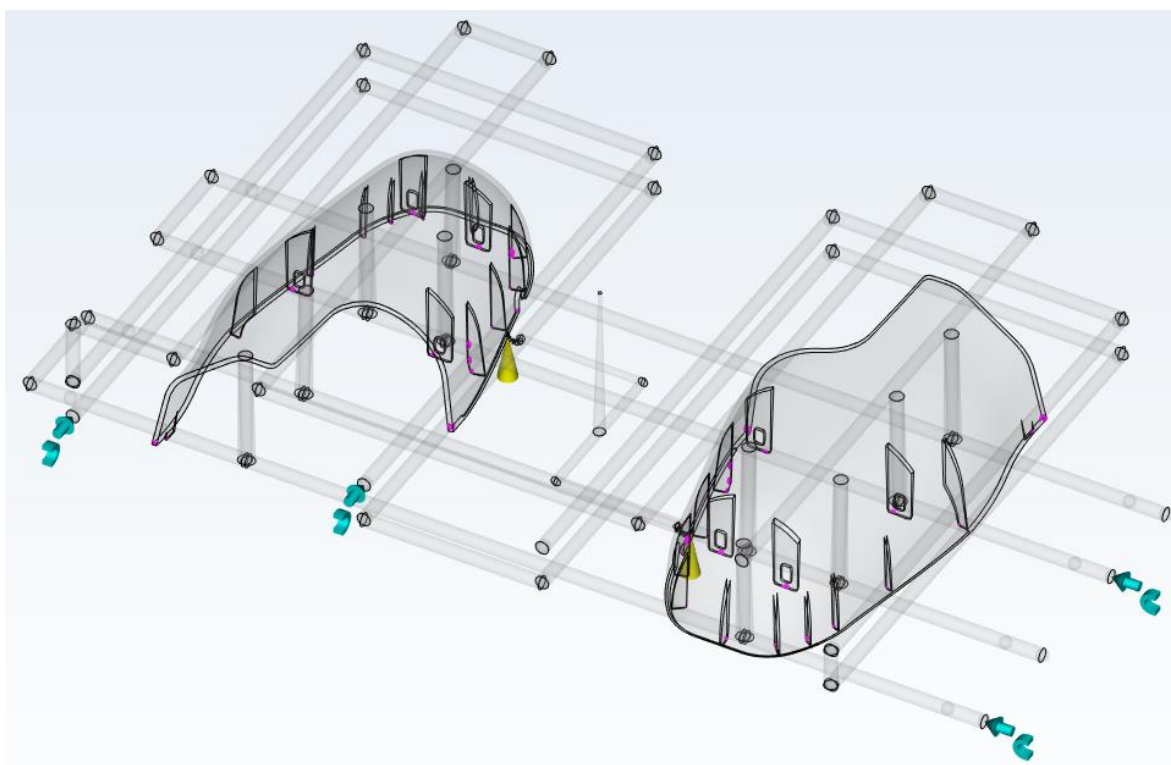
Además, las zonas de tránsito no superan el valor 25%, por lo cual, no dificultarán la compactación de la pieza.

3.3.3.11 ATRAPAMIENTOS DE AIRE

El resultado *atrapamientos de aire* indica la gravedad de los atrapamientos de aire y dónde es más probable que se produzcan en la pieza.

Se da un atrapamiento de aire cuando la masa fundida atrapa y comprime una burbuja de aire o gas entre dos o más frentes de flujo convergentes, o entre el frente de flujo y la pared de la cavidad. Normalmente, el resultado es un agujero pequeño o un defecto en la superficie, aunque en casos extremos, la compresión aumenta la temperatura hasta un nivel que hace que el plástico se degrade o se quemé.

Los atrapamientos de aire pueden ser aceptables si se producen en una superficie que no requiere un acabado estético bueno.



27. Figura. Atrapamientos de aire.

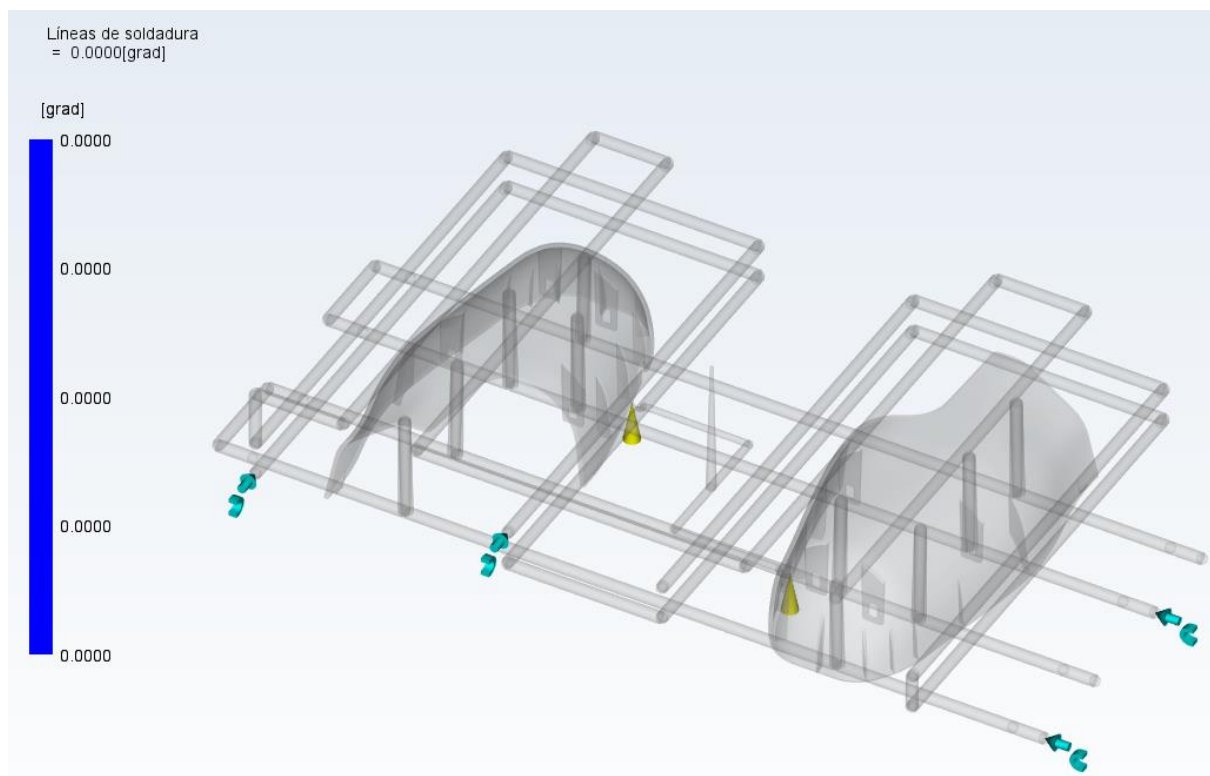
Se observa que los atrapamientos de aire se dan en la cara interna de la pieza. Además, algunos de estos atrapamientos se dan en zonas en las cuales se colocarán los desplazables, por lo cual, es posible que se disperse por ellas. Aun así, como se ha comentado anteriormente, al colocarse en la zona no vista de la pieza el resultado se dará como bueno.

3.3.3.12 LÍNEAS DE SOLDADURA

El resultado *líneas de soldadura* muestra el ángulo de convergencia cuando se encuentran dos frentes de flujo. La presencia de líneas de soldadura puede indicar fragilidad estructural o un defecto superficial,

El término “líneas de soldadura” se suele usar para hacer referencia tanto a líneas de soldadura como a líneas de flujo. La única diferencia entre ellas es el ángulo en la que se forman, en el caso de líneas de soldadura la unión se daría en un ángulo menor a 135° mientras que en las líneas de flujo sería mayor que este valor.

La resistencia de una línea de soldadura depende de la temperatura a la que se forma y de la presión ejercida en la soldadura hasta que la pieza se solidifica. Por lo general, para obtener una línea de soldadura aceptable, la temperatura de la masa fundida en la línea de soldadura debe ser cercana a la temperatura de inyección, pudiendo descender un máximo de 20°C .



28. Figura. Líneas de soldadura.

Se observa que la pieza no tiene ninguna línea de soldadura, por lo cual, no empeorarán las características mecánicas de la pieza.

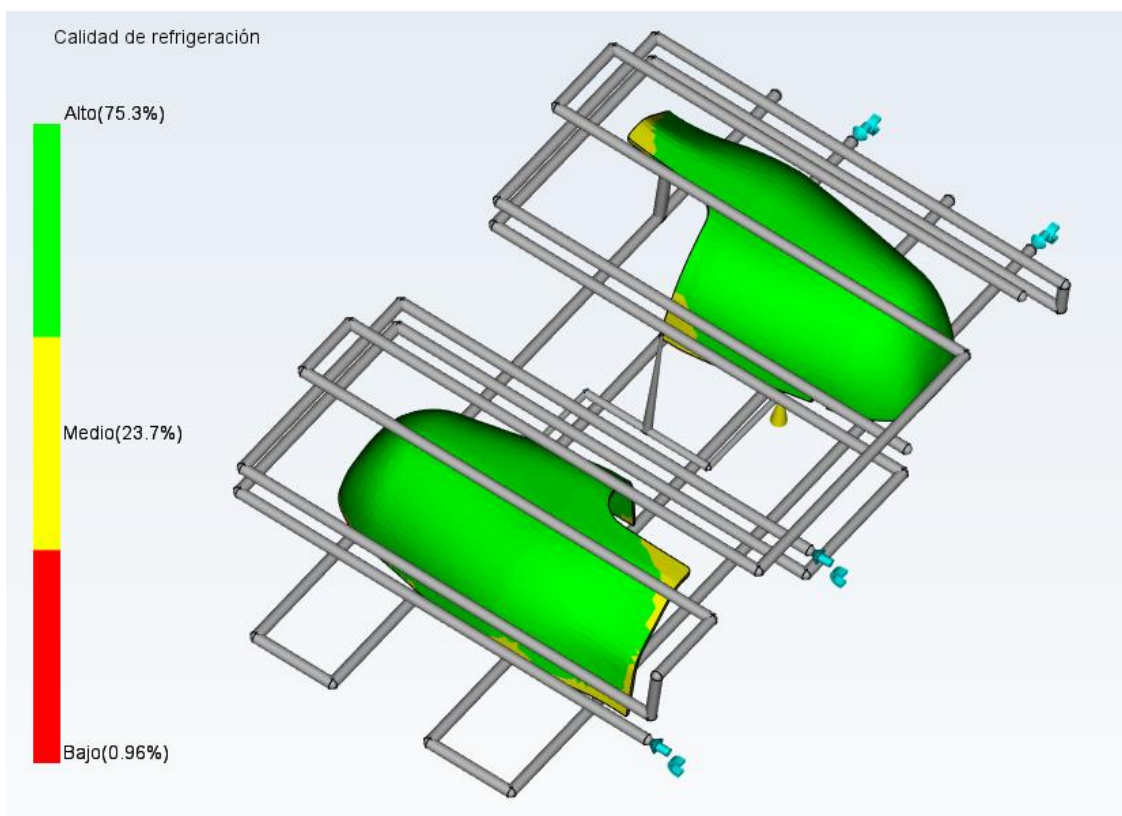
3.3.4 SISTEMA DE ATEMPERAMIENTO

3.3.4.1 CALIDAD DE REFRIGERACIÓN

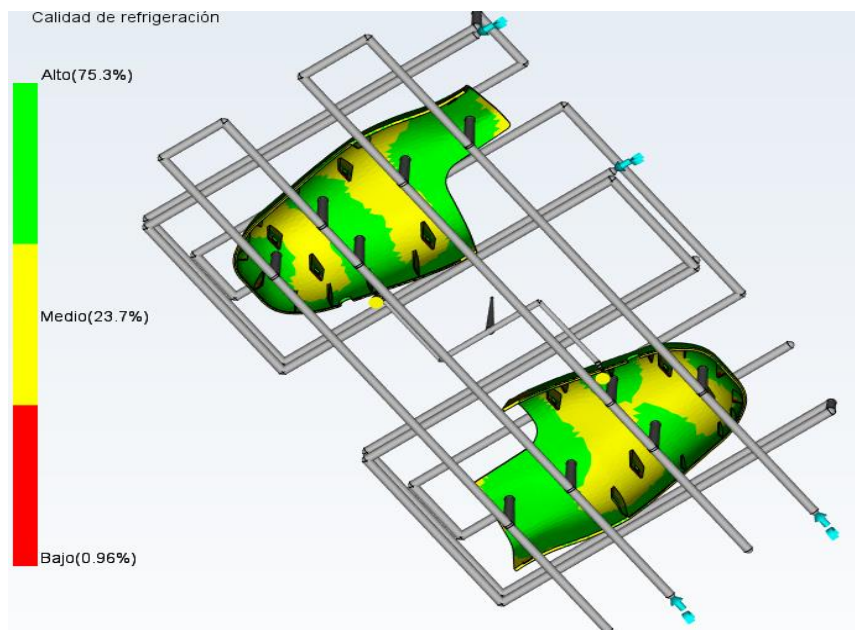
El resultado *calidad de refrigeración* muestra dónde tiene a permanecer el calor en una pieza a causa de su forma, espesor y los efectos de circuitos de refrigeración existentes.

La calidad de refrigeración se mostrará mediante un rango de colore, indicando desde el color verde un nivel alto de refrigeración hasta el color rojo un nivel bajo de refrigeración.

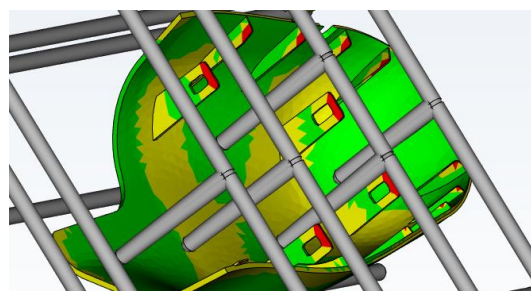
Si la calidad de la refrigeración es baja en un área fina de la pieza a causa de que el resultado varianza de la temperatura o varianza del tiempo de refrigeración es considerablemente más bajo que la media, puede producirse indecisión o una inyectada corta. En cambio, si estos valores son más altos de lo normal, pueden producirse defectos superficiales o deformaciones.



29. Figura. Calidad de refrigeración, vista superior.



30. Figura. Calidad de refrigerante, vista inferior



31. Figura. Predicción de la calidad, detalle vista inferior.

Se obtiene un nivel de calidad alto (75,3%) en la cara visible de la pieza.

En las zonas no visibles en cambio, se dan varias calidades, aunque predomina una alta calidad. En los extremos de los nervios se dan calidades bajas, siendo estas una zona pequeña (0,96%), al no ser visibles y al verificar que no se dan indecisiones o inyectadas cortas se dan los resultados como buenos.

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

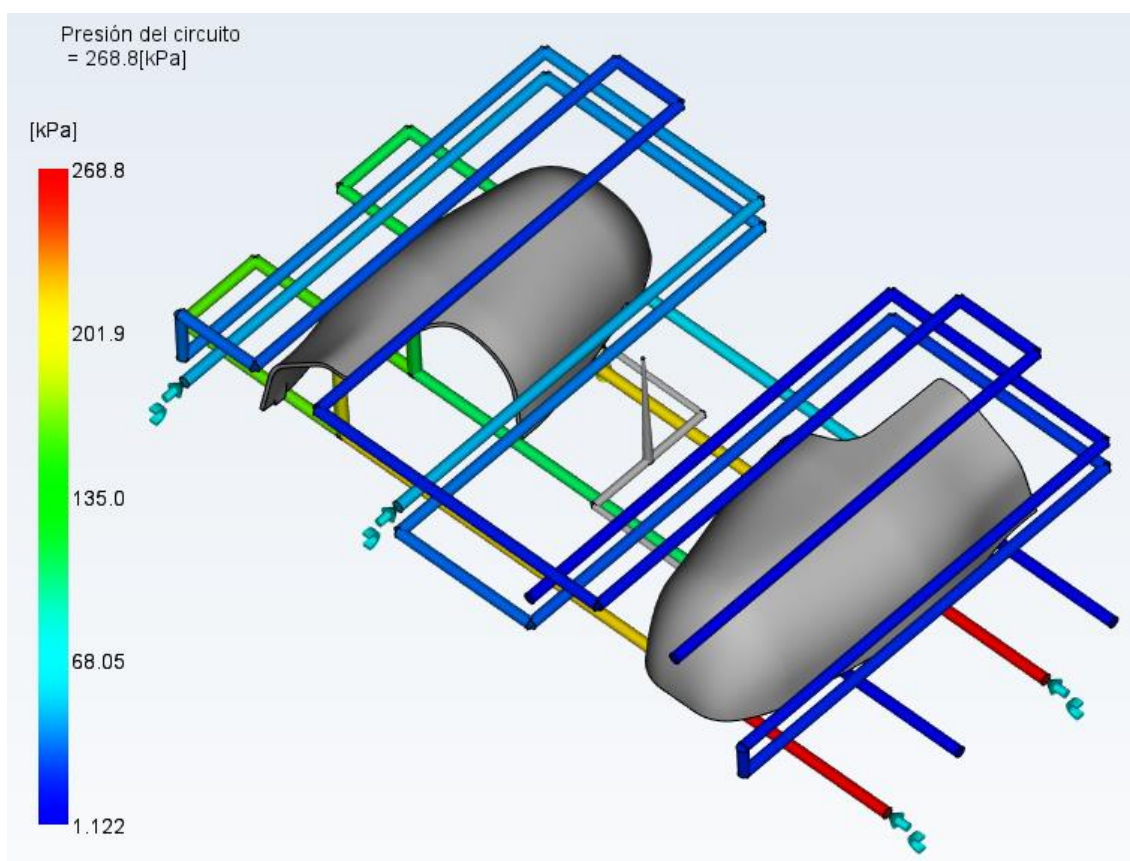
Varianza máxima de la temperatura	18.0 (C)
Varianza mínima de la temperatura	-17.5 (C)
Varianza máxima del tiempo de refrigeración	5.86 (s)
Varianza mínima del tiempo de refrigeración	-25.21 (s)
Temperatura máxima, pieza	79.4 (C)
Temperatura mínima, pieza	39.8 (C)
Temperatura media, pieza	60.1 (C)
Temperatura exterior del molde	27.2 (C)

4. Tabla. Datos de la simulación de refrigeración.

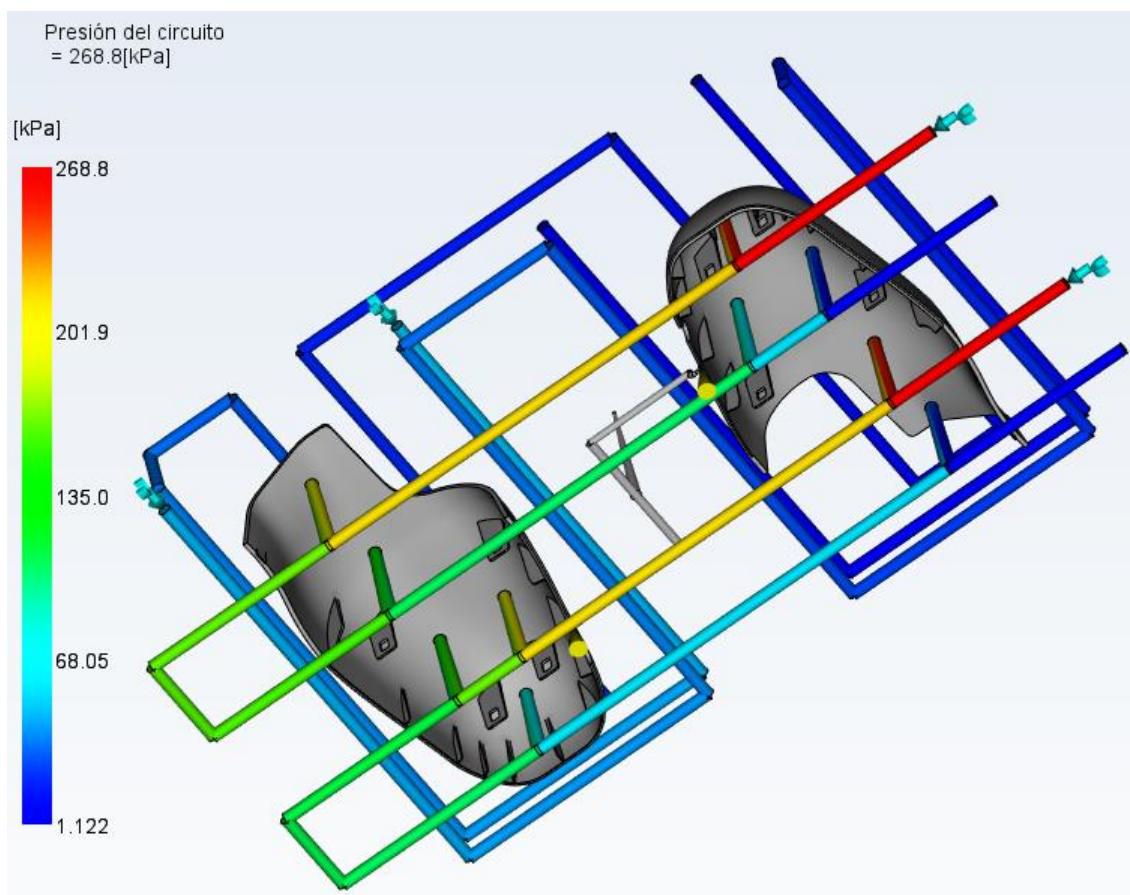
3.3.4.2 PRESIÓN DEL CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN

El resultado *presión del circuito de refrigeración* se genera a partir de un análisis de refrigeración para mostrar la distribución de presión a lo largo de un circuito de refrigeración, promediada en el circuito.

Las grandes pérdidas de presión en los circuitos de refrigeración se deben a problemas de refrigeración, tales como; cambios de dirección, deflectores, fuentes etc.



32. Figura. Presión del circuito, superior.



33. Figura. Presión del circuito, inferior.

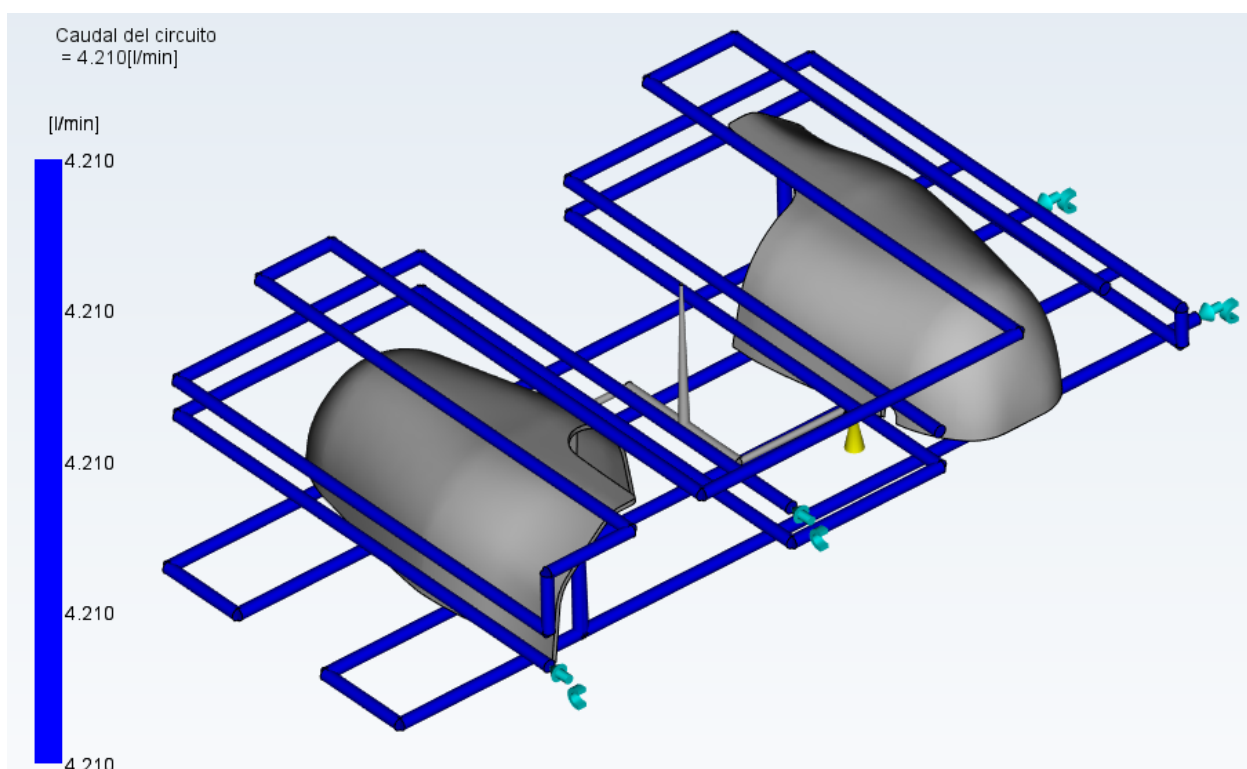
Observamos como no se generan grandes pérdidas de presión en el circuito de refrigeración superior, ya que las únicas pérdidas de presiones serán debido a los codos generados por el cambio de sentido del tubo.

Por otro lado en el circuito inferior, se pudo observar que los deflectores generan una gran pérdida de presión. Aunque la caída de presión sea elevada, se decide mantener la misma cantidad de deflectores, el cual, será el mínimo para la correcta refrigeración de la pieza.

3.3.4.3 CAUDAL DEL CIRCUITO

El resultado *caudal del circuito* muestra la velocidad de flujo del refrigerante dentro del circuito de refrigeración.

Este resultado se usa junto con el resultado Número de Reynolds del circuito para determinar si se puede alcanzar la velocidad de flujo requerida para lograr un flujo de refrigerante completamente turbulento, este es, un número de Reynolds de 10.000.



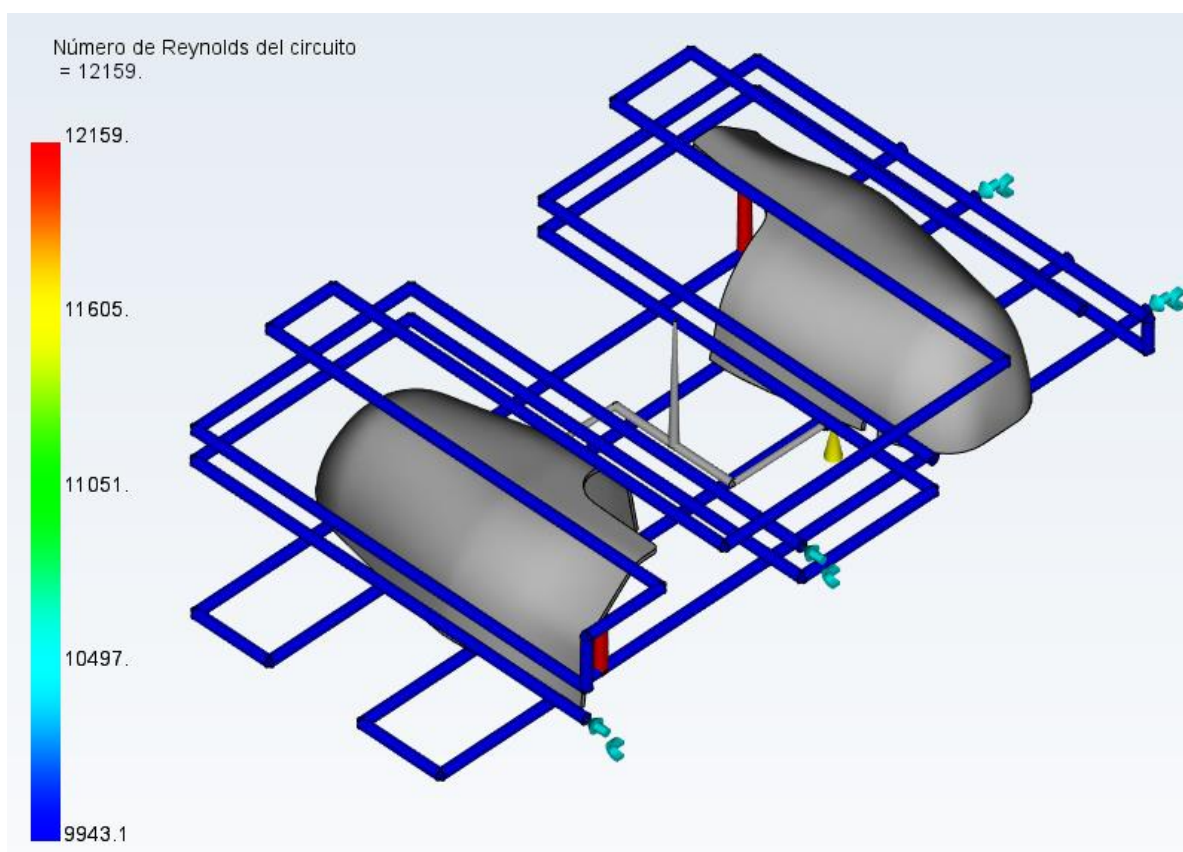
34. Figura. Caudal del circuito.

Se observa que en ambos circuitos se mantiene el caudal constante de 4,21l/min.

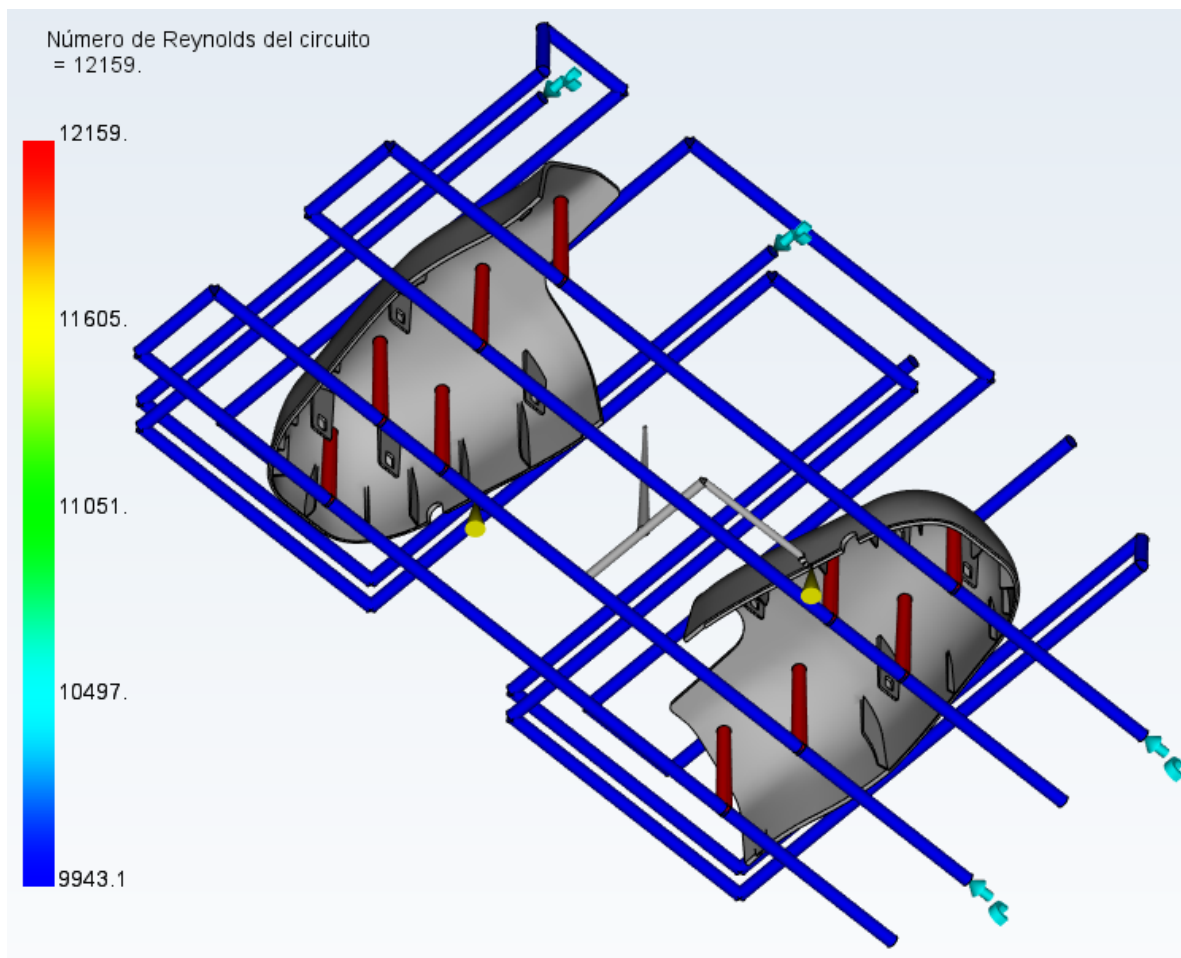
3.3.4.4 NÚMERO DE REYNOLDS DEL CIRCUITO

El resultado *número de Reynolds del circuito* muestra el número de Reynolds del refrigerante en el circuito de refrigeración.

Cuando se alcanza un flujo turbulento, un aumento de la velocidad de flujo no supone una diferencia significativa para la velocidad de extracción de calor; por tanto, la velocidad de flujo debe establecerse únicamente para alcanzar el número de Reynolds ideal con variaciones mínimas.



35. Figura. Número de Reynolds del circuito, superior.



36. Figura. Número de Reynolds del circuito, inferior.

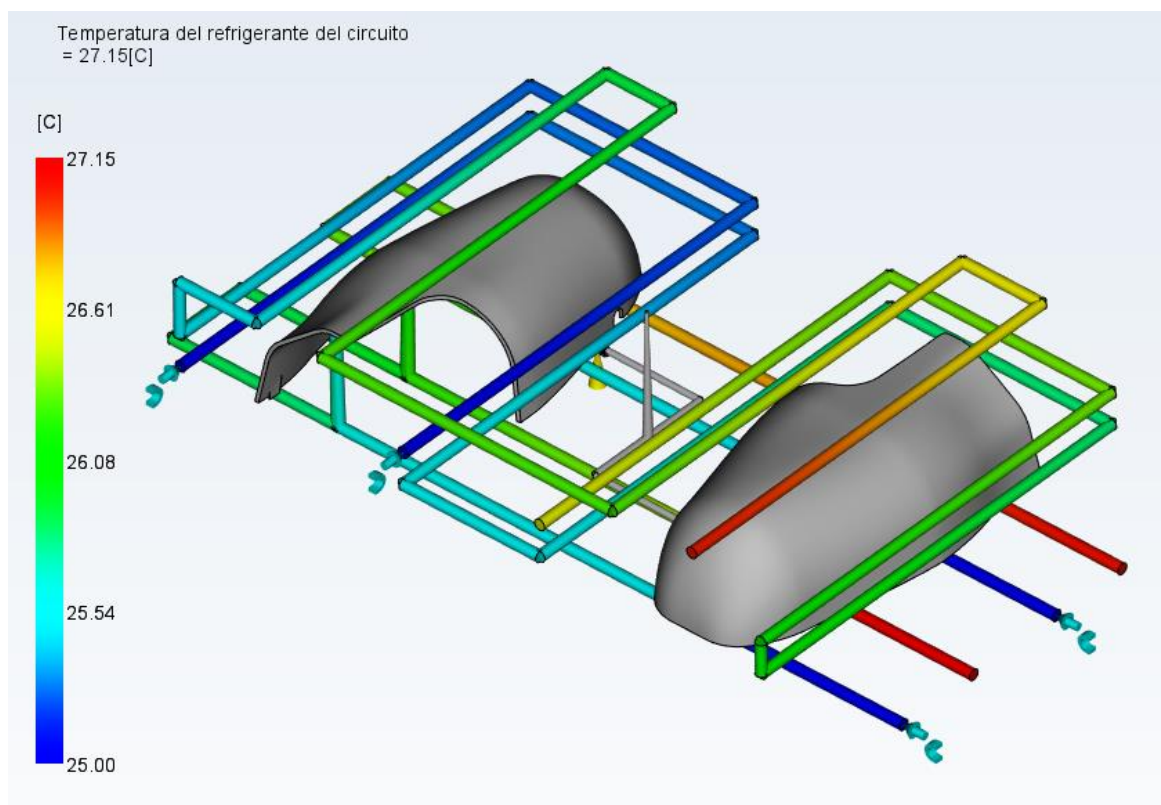
Como se puede observar, el valor mínimo obtenido en el circuito es de 9.943, cercano a los 10.000 y superior al valor mínimo de 4.500, por lo cual se verifica obtener un flujo totalmente turbulento.

Además, podemos apreciar como el los deflectores el número asciende hasta los 12.159, debido a que son elementos que generan grandes pérdidas de presión como se ha verificado en el apartado 3.3.4.2 *Presión del circuito de refrigeración*.

3.3.4.5 TEMPERATURA DEL REFRIGERANTE DEL CIRCUITO

El resultado *temperatura del refrigerante del circuito* muestra la temperatura del refrigerante dentro del circuito de refrigeración.

Obtener una diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del refrigerante superior a los 2-3°C se consideraría una refrigeración deficiente.



37. Figura. Temperatura del refrigerante del circuito.

Se puede observar como ambos circuitos de refrigeración, tanto el superior como el inferior, se han dividido en dos circuitos independientes. La razón de la división de estos circuitos es debido para lograr una refrigeración eficiente.

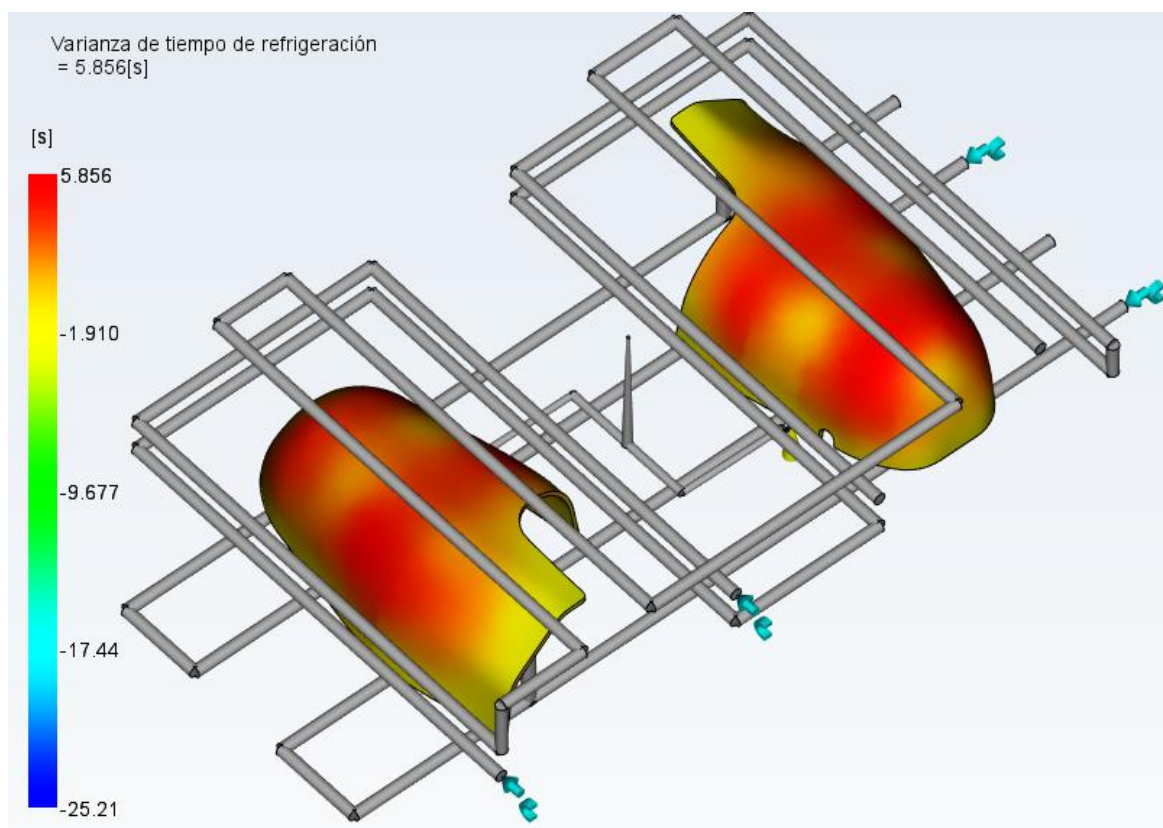
Se puede observar la variación máxima que se da en el circuito será desde 25°C hasta 27.15°C, siendo menor que 3°C, lo cual significa una refrigeración eficiente.

3.3.4.6 VARIANZA DE TIEMPO DE REFRIGERACIÓN

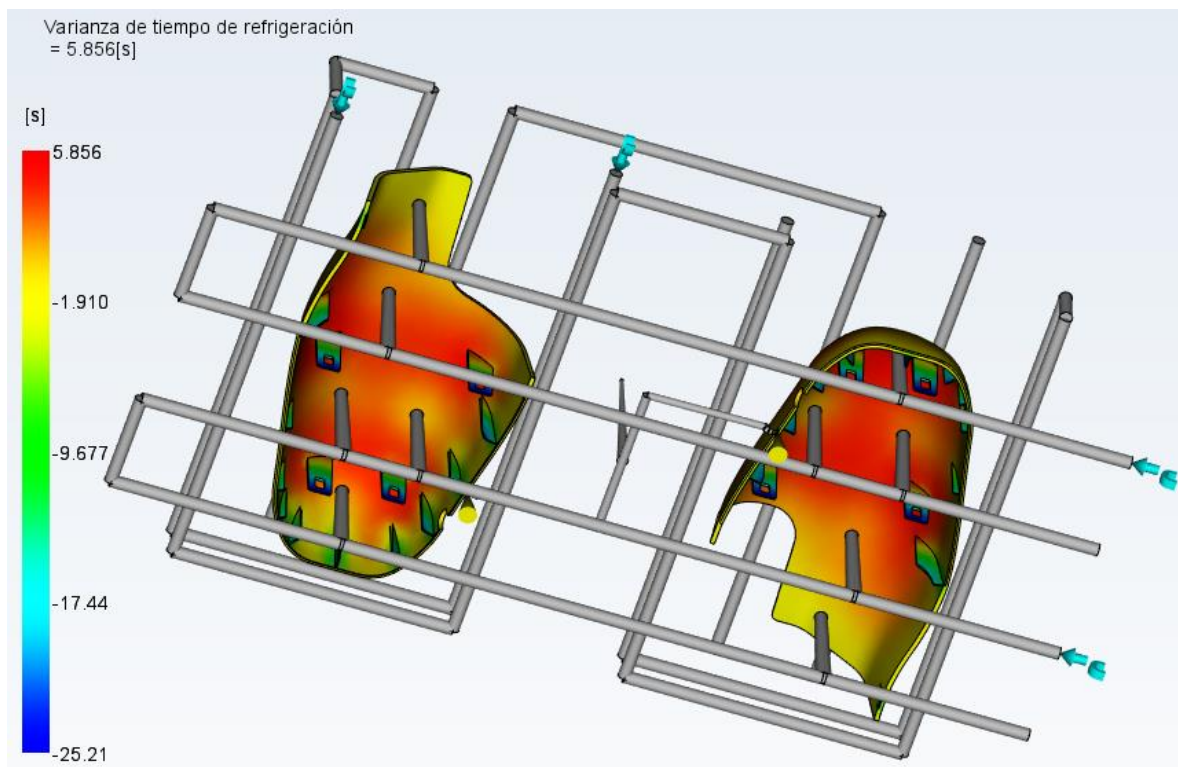
El resultado *varianza del tiempo de refrigeración* muestra la diferencia entre el tiempo que el polímero tarda en solidificarse en cualquier región de la pieza y el tiempo medio de solidificación de toda la pieza.

El tiempo medio de solidificación se calcula en función de la geometría de la pieza y el sistema de refrigeración.

Los resultados se representarán con franja de colores desde el color rojo, el cual muestra las regiones que tardan más en solidificarse que el tiempo medio de solidificación de la pieza, hasta el color azul, el cual tarda menos en solidificarse que el tiempo medio de solidificación. El valor cero en este resultado indica el tiempo medio de solidificación.



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



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

Teniendo en cuenta los resultados se puede observar como la mayor parte de la pieza se mantiene en un rango similar y equilibrado, evitando refrigeraciones demasiado rápidas/cortas.

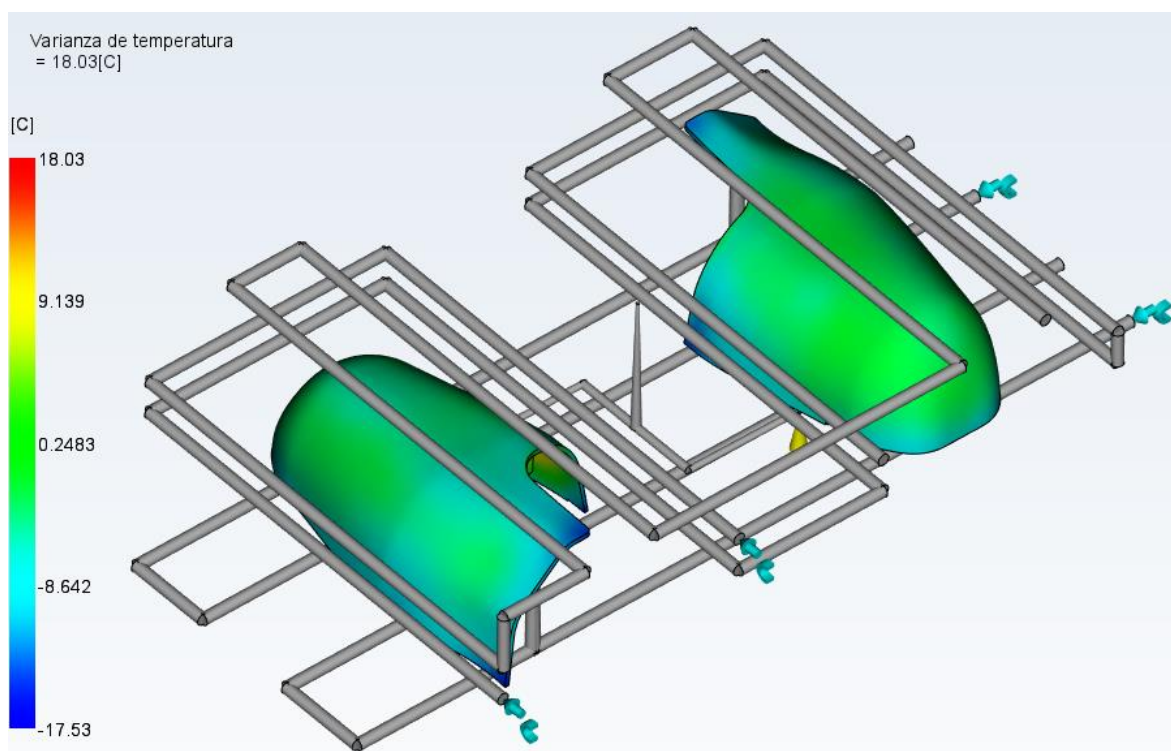
Los nervios de la pieza serán los que tendrán menor tiempo de refrigeración ya que estos tienen un espesor menor.

3.3.4.7 VARIANZA DE TEMPERATURA

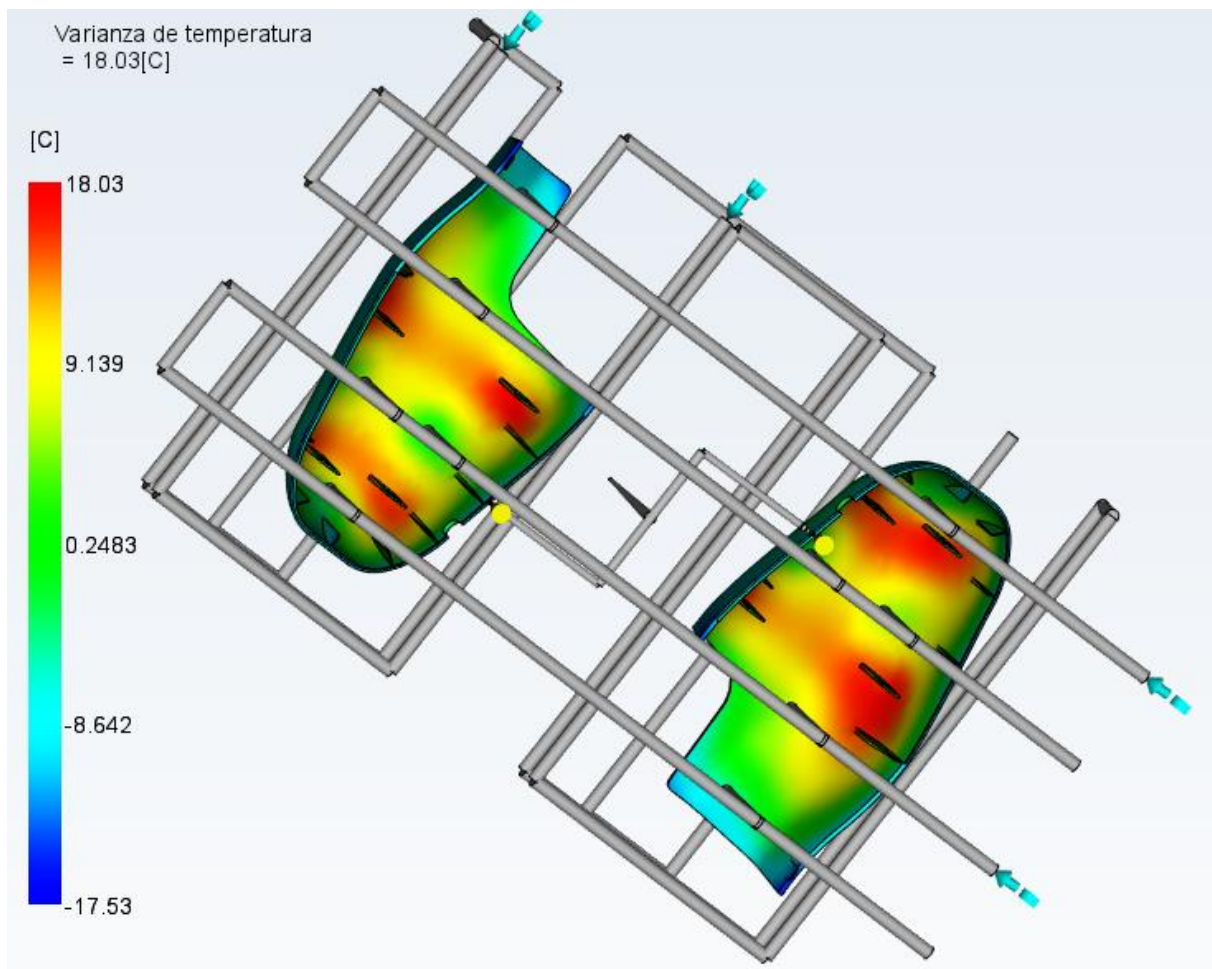
El resultado *varianza de temperatura* resalta áreas en las que la geometría y el sistema de refrigeración de la pieza harán que la superficie sea distinta de la temperatura media de la pieza, que se mide al final del ciclo.

Su valor se indicará mediante regiones de colores, desde el color rojo, el cual indicara áreas que están más calientes que la media, hasta el color azul, el cual indicara áreas que están más frías que la media.

El resultado *varianza de temperatura* muestra el efecto de la forma de la pieza en su temperatura superficial. Las secciones gruesas y atrapamientos de calor, como pequeñas áreas limitadas, también pueden tener un efecto en la manera en que el polímero se enfría y, por tanto, este resultado debe leerse junto con el resultado *varianza de tiempo de refrigeración*.



40. Figura. Varianza de temperatura, vista superior.



41. Figura. Varianza de temperatura, vista inferior.

Se puede observar como en la vista superior la pieza tiene una varianza de temperatura mínima.

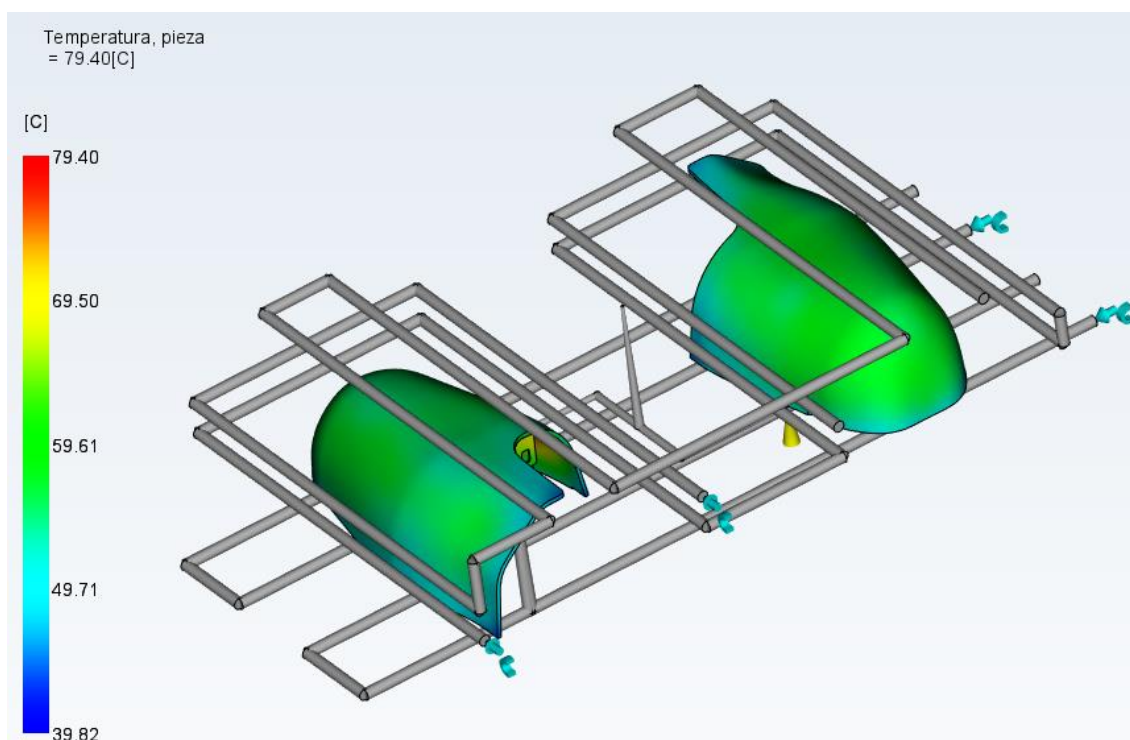
En cambio, en la vista inferior, observamos algunos puntos de calor. Estos son debido a la imposibilidad de colocar el sistema de refrigeración en dichos puntos debido a la existencia de desplazables.

Comparando con los resultados con los resultados 3.3.4.6 *Varianza de tiempo de refrigeración*, se observa que todas las zonas tienen el mismo valor, por lo cual, dando el resultado obtenido por adecuado.

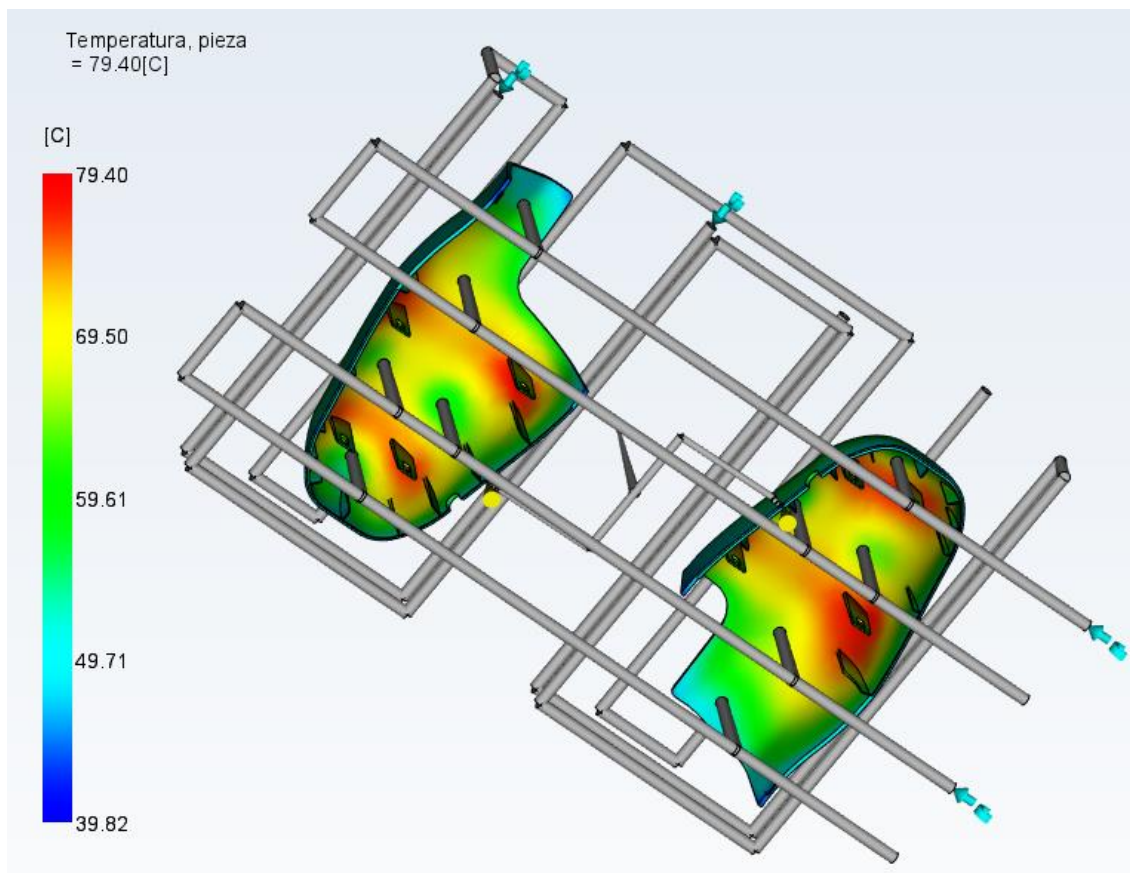
3.3.4.8 TEMPERATURA, PIEZA

El resultado *temperatura, pieza* muestra la temperatura media en el contorno de la pieza, que es el lado de la pieza en la interfaz pieza/molde, durante el ciclo.

Se recomienda que la diferencia entre la temperatura en la cara superior o inferior de la pieza y la temperatura del molde no debe ser mayor que $\pm 10^{\circ}\text{C}$. Además, la variación de temperatura en cada cara del molde no debe ser superior a 10°C . Por último, el resultado de valor máximo obtenido no debe superar la temperatura de entrada en más de $10\text{-}20^{\circ}\text{C}$.



42. Figura. Temperatura, pieza, vista superior.

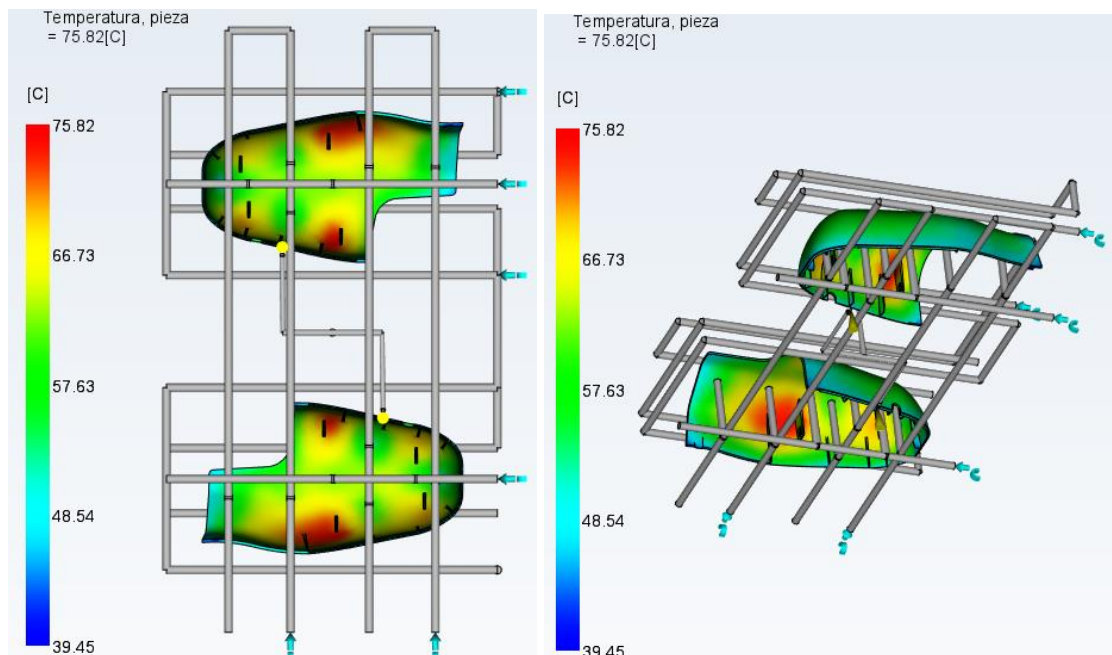


43. Figura. Temperatura, pieza. Mediciones cara interna.

Podemos observar, como alrededor del contorno de la pieza tenemos zonas frías, y en la cara inferior donde se colocan los desplazables tenemos zonas calientes.

Podemos observar, que el posicionamiento de la zona fría se realiza por debajo del primer tubo refrigerante, por lo cual, podemos afirmar que esta no se deba a un exceso de refrigeración.

En cambio, como se ha mencionado anteriormente, la aparición de las zonas caliente es debido a la imposibilidad de colocar un sistema de refrigeración en dichas zonas.



44. Figura. Temperatura, pieza, mejora de proceso.

Se realiza una mejora del proceso de refrigeración añadiendo dos circuitos mas para poder refrigerar de forma más adecuada dichas zonas.

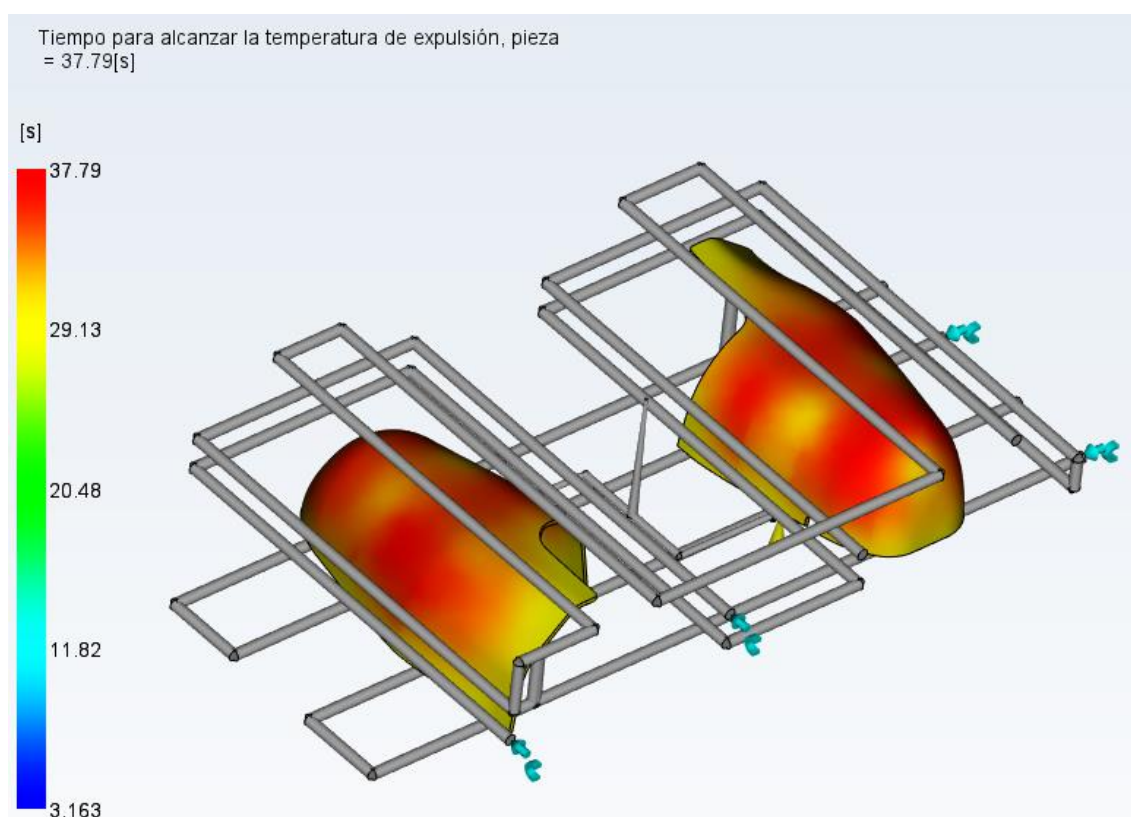
Se comprueba que se disminuye la zona caliente, pero no completamente. Además, se verifica tanto la calidad de la pieza como del refrigerante no sufren grandes variaciones respecto al sistema anterior.

En conclusión, al no mejorar en gran medida los resultados, al tener un gasto de mecanizado y mantenimiento superiores y al ser estas muy locales, se darán por buenos los resultados obtenidos con el sistema de refrigeración anterior.

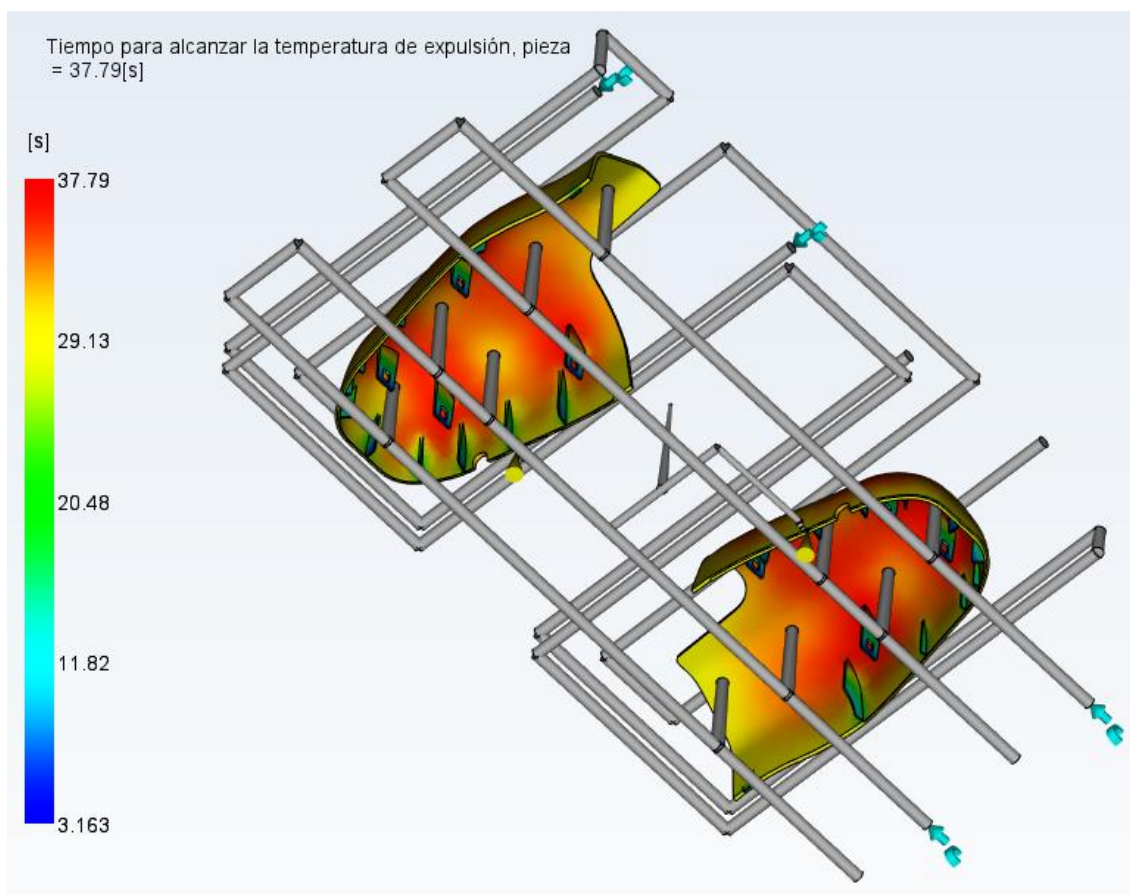
3.3.4.9 TIEMPO PARA ALCANZAR LA TEMPERATURA DE EXPULSIÓN, PIEZA

El resultado *tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión, pieza* se obtiene mediante un análisis de refrigeración y muestra el tiempo requerido para alcanzar la temperatura de expulsión, que se mide desde el inicio del ciclo. Al inicio de la medición, se presupone que la pieza está llena de material y a su temperatura de masa fundida.

Lo ideal es que la pieza se solidifica uniformemente. Las áreas de la pieza que tardan más en solidificarse pueden indicar zonas calientes o secciones transversales más gruesas.



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



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

Podemos observar un resultado equilibrado, requiriendo un mayor tiempo en el centro de la pieza y menores tiempos en los nervios de la pieza.

Se observa también que el tiempo de expulsión de la pieza es menor que el calculado en el apartado 3.3.3.8 *Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión*. Por lo cual, se deduce que se puede disminuir el tiempo de ciclo expulsando en conjunto de pieza y sistema de alimentación, antes que esta última se solidifique lo suficiente.

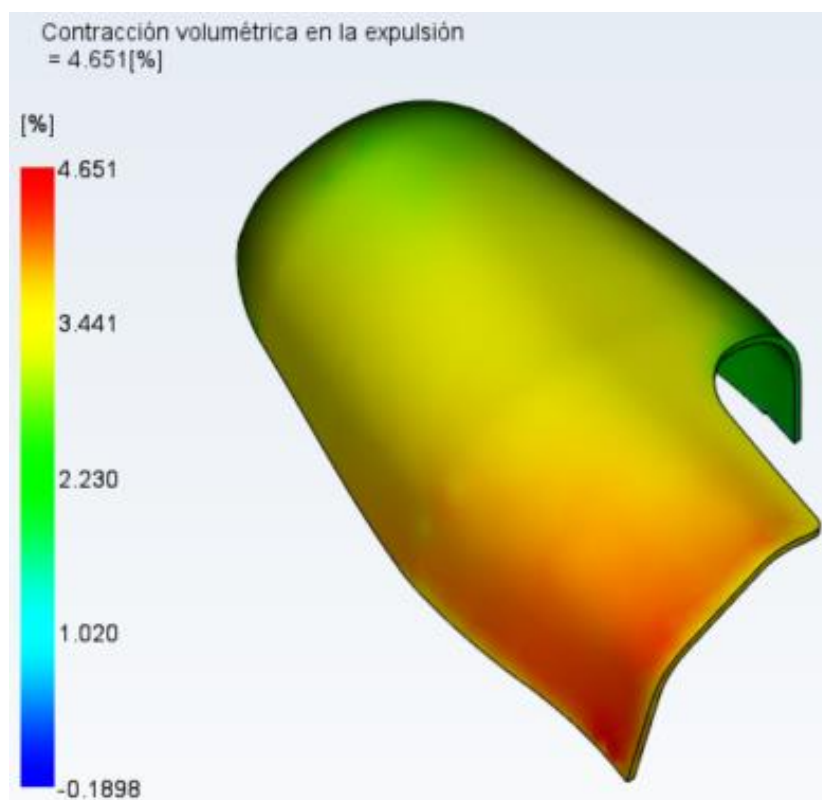
3.3.5 SISTEMA DE EXPULSIÓN

3.3.5.1 CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICA EN LA EXPULSIÓN

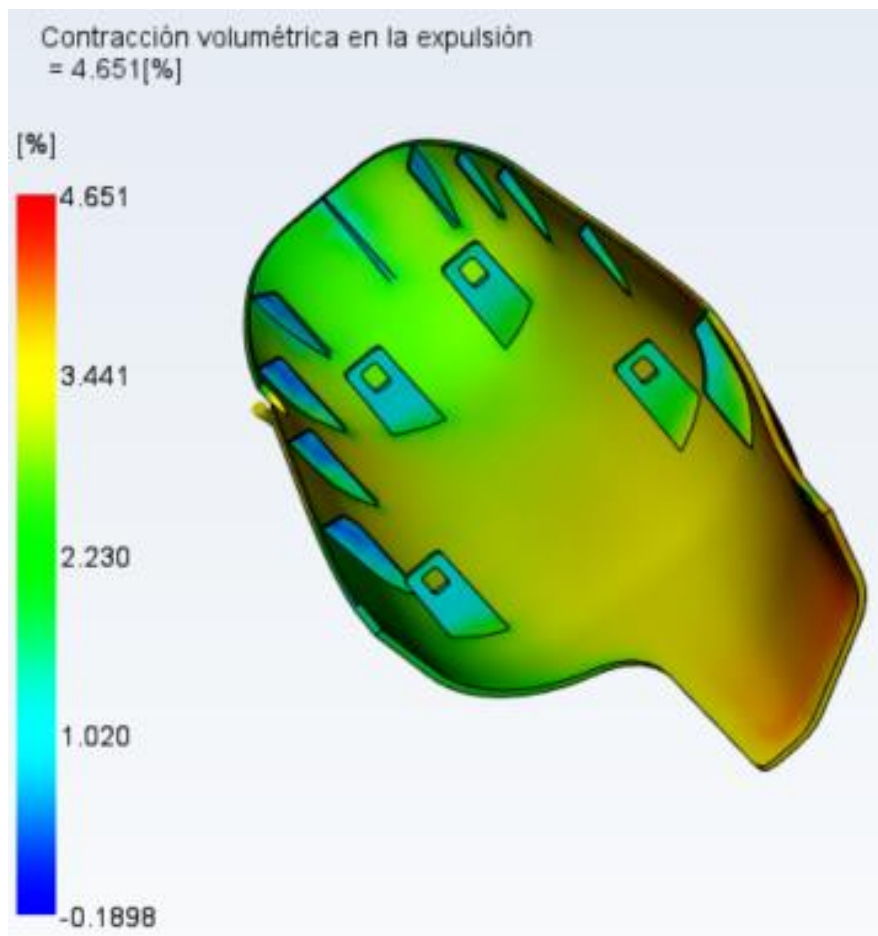
El resultado *contracción volumétrica en la expulsión* muestra la contracción volumétrica para cada área, expresada como un porcentaje del volumen moldeado original.

La contracción volumétrica en la expulsión es la disminución del volumen local desde el final de la fase de refrigeración hasta el momento en que la pieza se ha enfriado a la temperatura ambiente de referencia (25°C).

Unos valores de contracción elevados podrían indicar rechupes o vacíos dentro de la pieza



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



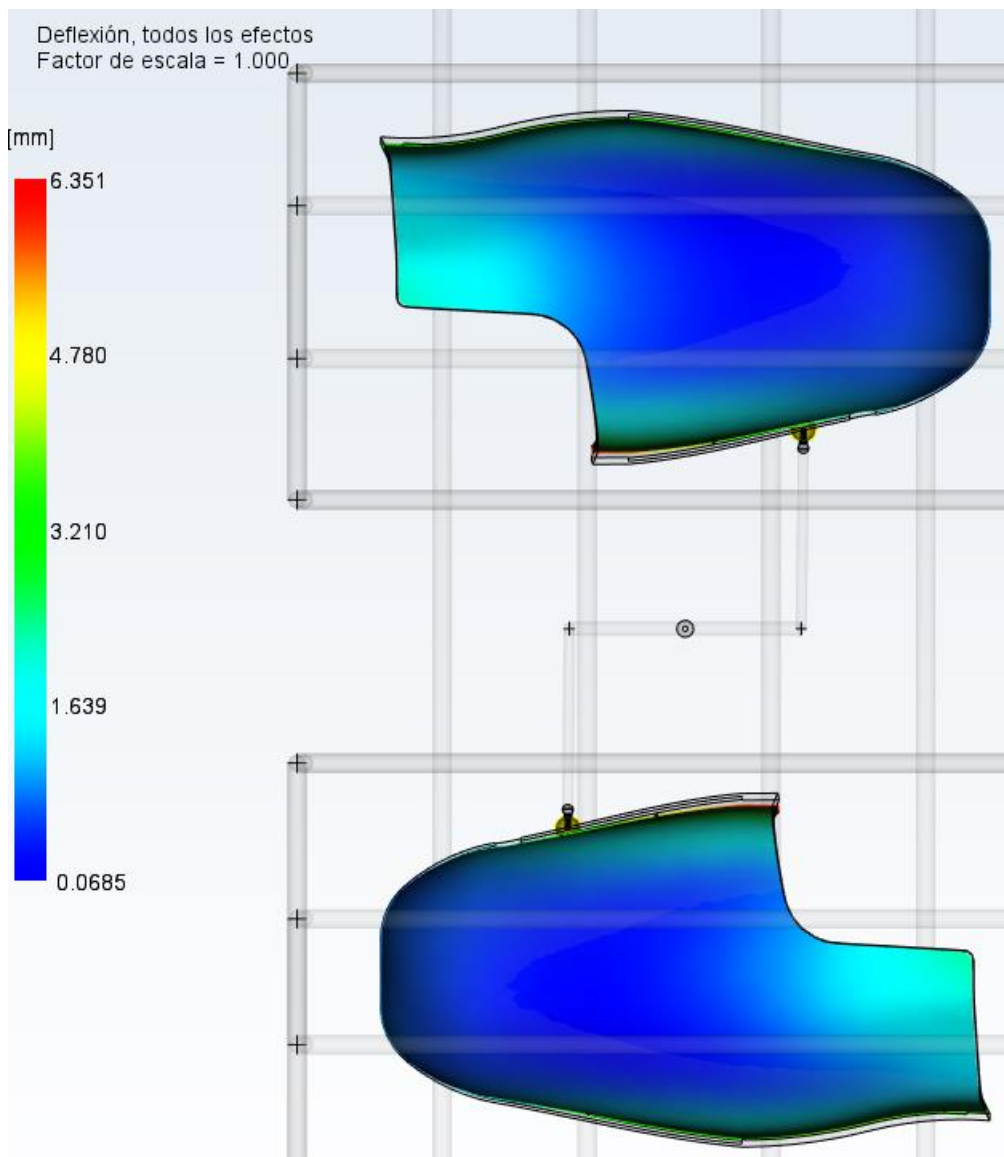
48. Figura. Contracción volumétrica en la expulsión, vista inferior.

Se puede observar que las zonas de mayor espesor tiene un valor de contracción volumétrica mayor. Además, cuanto la zona esté más alejada del punto de inyección, su valor de contracción volumétrica será mayor. Es por ello que los resultados obtenidos haya que verificarlos con el análisis de rechupes. Comparando con estos resultados, se confirma que los resultados obtenidos de la contracción volumétrica en la expulsión son correctos.

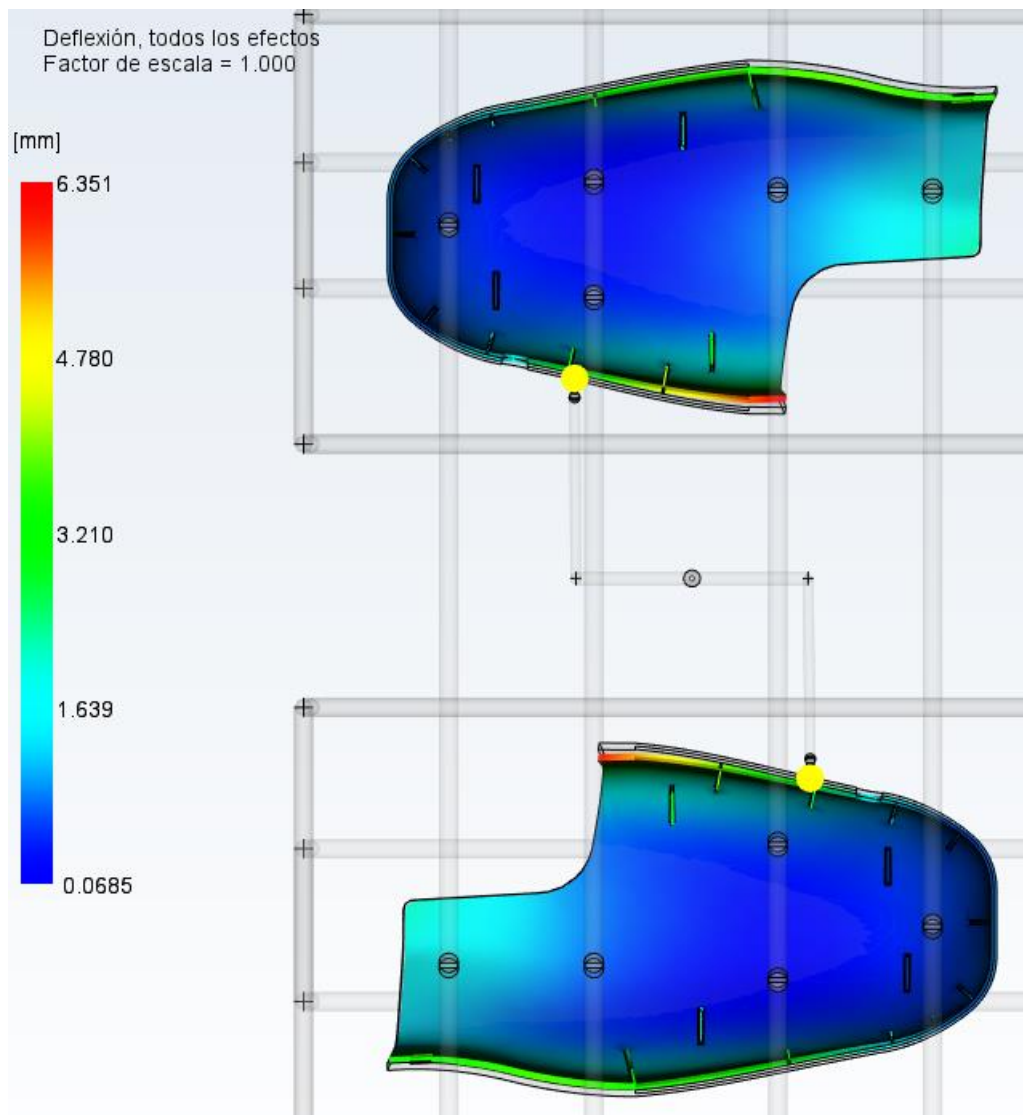
Los resultados obtenidos tienen una baja contracción volumétrica (4,65% máx.) y gran parte de la pieza mantiene resultados parejos, por lo que el proceso de compactación será correcto.

3.3.5.2 DEFLEXIÓN, TODOS LOS EFECTOS

El resultado *deflexión, todos los efectos* combina la refrigeración diferencial, la contracción y efectos de orientación para mostrar la deformación de la pieza final.



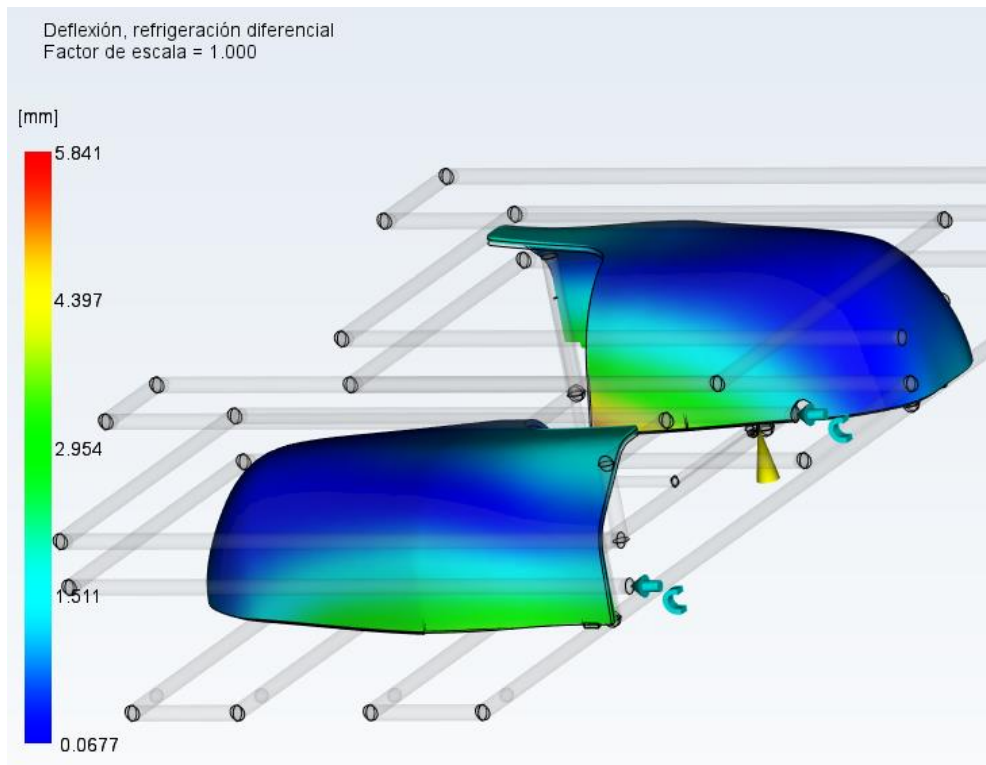
49. Figura. Deflexión, todos los efectos, vista superior.



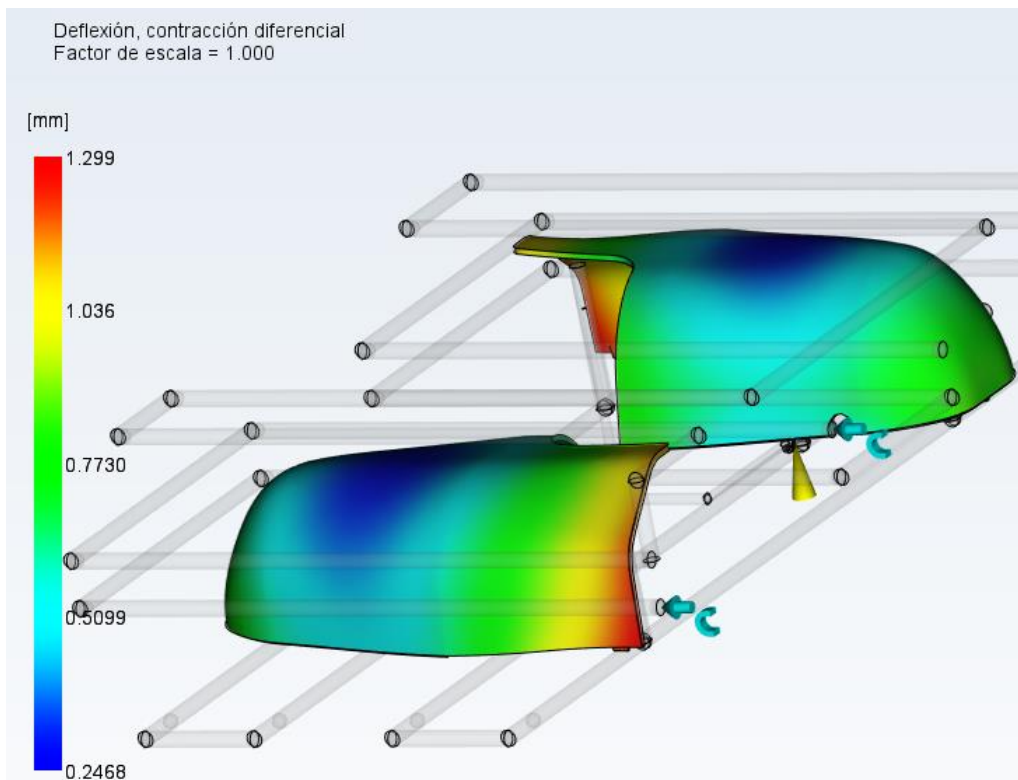
50. Figura. Deflexión, todos los efectos, vista superior.

Se observa como la pieza tiende a contraerse alrededor del núcleo, teniendo las contracciones máximas en el extremo más lejano del punto de inyección.

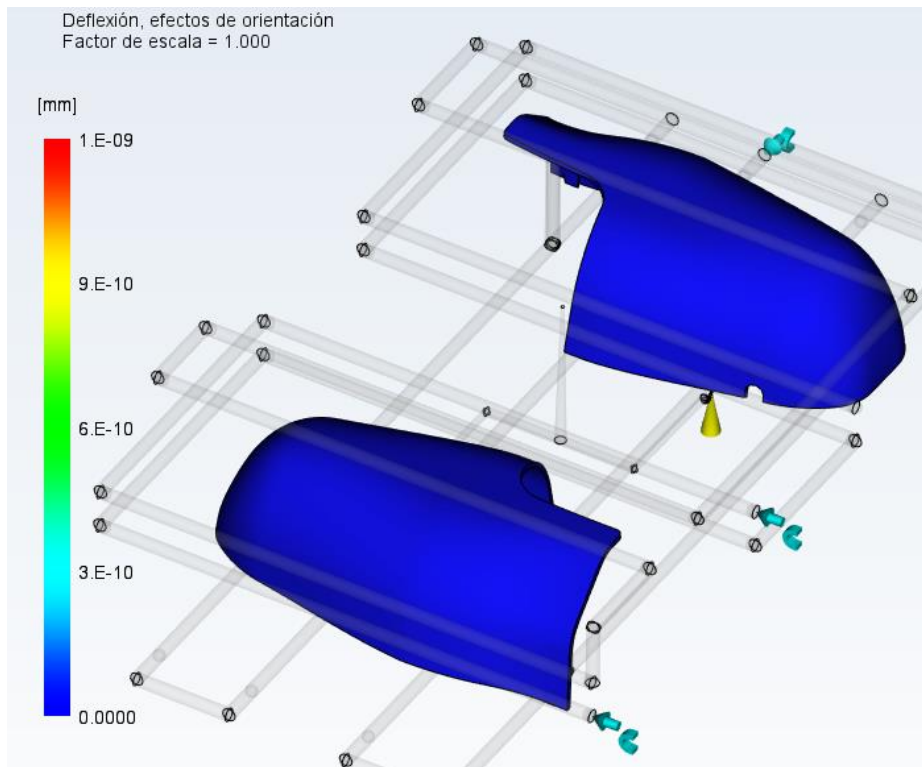
Como se ha mencionado anteriormente, estas deflexiones se darán por el diferencial de refrigeración, diferencial de contracción y diferencial de orientación. A continuación, se muestra el efecto de cada una.



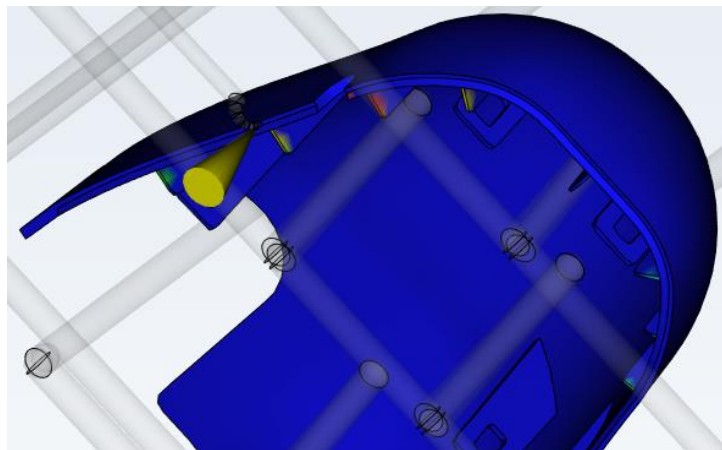
51. Figura. Deflexión, refrigeración diferencial.



52. Figura. Deflexión, contracción diferencial.



53. Figura. Deflexión, efectos de orientación, vista superior.



54. Figura. Deflexión, efectos orientación, detalle vista inferior.

Como se puede observar, la deflexión se dará debido a la refrigeración y principalmente por las contracciones en la pieza.

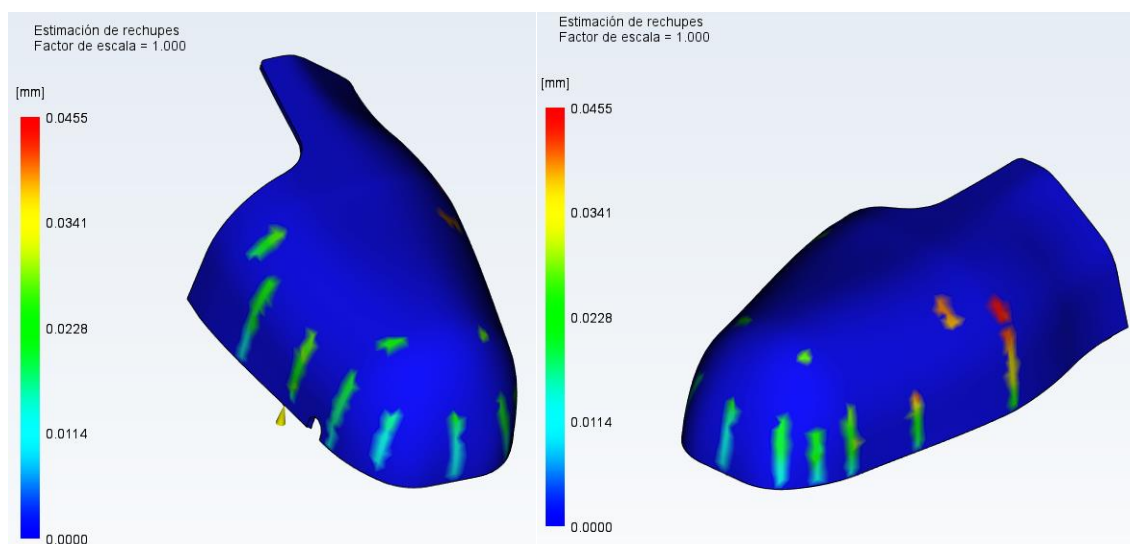
3.3.5.3 ESTIMACIÓN DE RECHUPES

El resultado de estimación de rechupes muestra rechupes simulados en la pieza.

Este resultado indica la presencia y ubicación de rechupes (y vacíos) que podrían deberse a características de la cara opuesta de la superficie. Los rechupes suelen aparecer en moldeados con secciones más gruesas o en ubicaciones con nervios opuestos, refuerzos o redondeos internos.

Como los rechupes son un defecto visual, no estructural, el resultado debe evaluarse teniendo en cuenta las especificaciones de diseño visual de la pieza.

Los resultados se representarán con una escala de colores desde el rojo, el cual indica áreas de mayor profundidad del rechupe, hasta el azul, el cual indica áreas sin rechupes.



55. Figura. Estimación de rechupes, vista superior.

Profundidad del rechupe	0.05 (mm)
Profundidad media del rechupe	0.02 (mm)
Porcentaje del modelo con propensión a rechupes	0.63 (%)

5. Tabla. Datos de la simulación estimación de rechupes

Se observa que la zona vista de la pieza es propensa a pariciones de rechupes, en concreto, zonas donde se colocan los nervios.

Se observa que la mayor profundidad de los rechupes es de 0,05mm, por lo cual no serán muy apreciables. Además, mas adelante toda la cara visible de la pieza será recubierta y pintada, por lo cual, serán adecuados los resultados obtenidos.

3.3.6 RESUMEN DE LAS SIMULACIONES

Los resultados obtenidos muestran una confianza del llenado del 100% y un sistema de refrigeración adecuado, con un tiempo de ciclo de 35s. Por lo cual, la pieza fabricada tendrá características mecánicas y ópticas adecuadas para su uso.

Además, no se prevé la aparición de líneas de soldaduras y los atrapamientos de aire se darán en la zona no visible de la pieza. Así mismo, en la superficie visible de la pieza aparecerán unos rechupes de profundidad máxima de 0,05 mm, por lo cual, no serán apreciables. Teniendo todo esto en cuenta se estima que estos errores no empeorarán las características mecánicas y ópticas de la pieza.

Por último, se verifica que la orientación de las fibras será adecuada.