

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
TRABAJO FIN DE GRADO

***MOLDE PARA INYECCIÓN DE PIEZAS
DE PLÁSTICO***

DOCUMENTO 4- ANÁLISIS REOLÓGICO

Alumno: Mikel González Esteban

Director: Roberto Lobato González

Curso: 2017/2018

Fecha: 18/06/2018

Índice

| | |
|--|---------------|
| 4.1. Consideraciones previas | pág. 1 |
| 4.1.1. Análisis dimensional | pág. 1 |
| 4.1.2. Propiedades del material | pág. 5 |
| 4.1.3. Condiciones de inyección | pág. 5 |
| 4.2 Resultados obtenidos | pág. 7 |
| 4.2.1. Llenado | pág. 7 |
| 4.2.2. Presión en la conmutación | pág. 8 |
| 4.2.3. Temperatura en el frente de flujo | pág. 9 |
| 4.2.4. Presión en el punto de inyección | pág. 10 |
| 4.2.5. Fuerza de cierre | pág. 11 |
| 4.2.6. Cizallamiento | pág. 12 |
| 4.2.7. Tiempo de solidificación | pág. 13 |
| 4.2.8. Rechupes | pág. 14 |
| 4.2.9. Contracción volumétrica | pág. 15 |
| 4.2.10. Atrapamientos de aire | pág. 16 |
| 4.2.11. Líneas de unión | pág. 17 |
| 4.2.12. Temperatura en los circuitos de refrigeración | pág. 18 |
| 4.2.13. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión (pieza) | pág. 19 |
| 4.2.14. Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión (canales alimentación) | pág. 20 |
| 4.2.15. Eficiencia de la refrigeración | pág. 21 |
| 4.2.16. Temperatura del molde | pág. 22 |

| | |
|-----------------------------|----------------|
| 4.2.17. Deformaciones | pág. 23 |
| 4.2.17. Deformaciones eje x | pág. 24 |
| 4.2.17. Deformaciones eje y | pág. 25 |
| 4.2.17. Deformaciones eje z | pág. 26 |
| 4.3 Conclusiones | pág. 27 |

4.1. Consideraciones previas

Este estudio se ha realizado para una sola pieza, siendo el molde de 2 cavidades. Esto es posible gracias a la simetría del mismo y a la disposición de un canal de refrigeración independiente para cada pieza, siendo por tanto los resultados válidos para cualquiera de las 2 piezas a conformar. Existe una excepción, para la fuerza de cierre, cuyo resultado debe multiplicarse por dos para corresponderse con la verdadera fuerza de cierre necesaria.

4.1.1 Análisis dimensional

La pieza tiene un espesor medio de 3mm, teniendo un máximo en 3,956mm en la zona del nervio que se extiende a lo largo de la superficie de partición, y un mínimo de 0,4038mm en uno de los extremos de las patillas. Las patillas tienen espesores medios de 2 y 1,5mm aproximadamente.

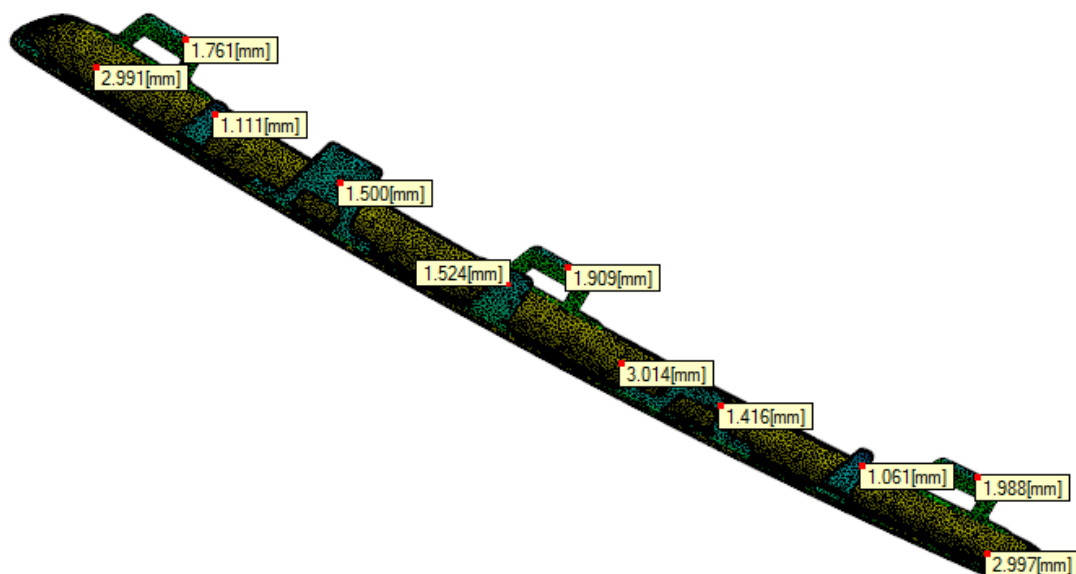


Figura 4.1.1. Espesores de la pieza.

Para el posicionamiento del punto de inyección, se ha hecho uso de la patilla de la pieza provista para tal fin, que se encuentra debidamente centrada para garantizar un llenado suficientemente equilibrado. De esta manera, la entrada será submarina, valiéndose de su facilidad para separarse de la pieza en la expulsión.

La entrada submarina se ha simulado con forma cónica para una entrada de 2,5mm de diámetro, ligeramente superior a la dimensionada originalmente en los planos. Esto se hace para evitar el cierre prematuro de la entrada durante la fase de compactación, debido a que el programa de simulación no permite la reproducción exacta de la geometría diseñada en los planos, y para el diámetro original el cono resultante no habría dispuesto de la suficiente acumulación de material en las proximidades de la pieza, provocando su cierre antes de que finalizase la compactación.

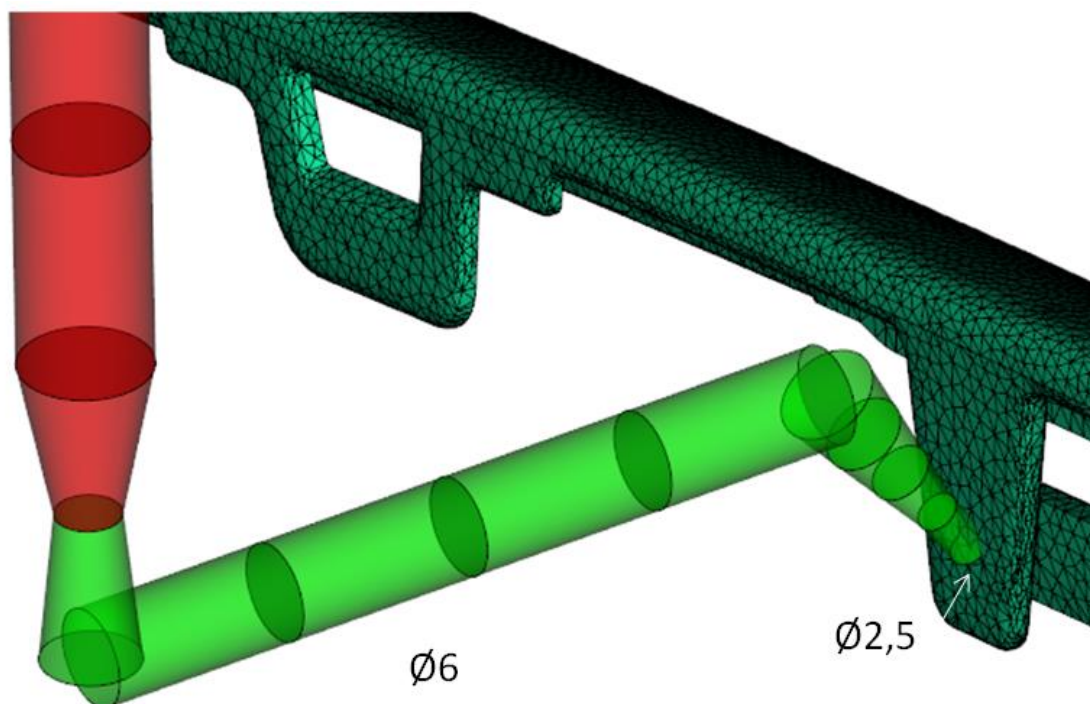


Figura 4.1.2. Entrada submarina.

Una vez dispuesto el canal de alimentación, se obtiene el volumen de material necesario para el llenado de una pieza, debiéndose suministrar el doble para el llenado de ambas cavidades.

Tabla 4.1.1. Resultados dimensionales.

| | |
|----------------------------|-----------------------|
| Volumen pieza | 24,07 cm ³ |
| Volumen canal distribución | 1,81 cm ³ |
| Volumen llenado | 25,88 cm ³ |
| Área proyectada total | 53,67 cm ² |

Por último, se han introducido los canales de refrigeración, siguiendo la línea de la pieza en la zona de máxima incidencia.

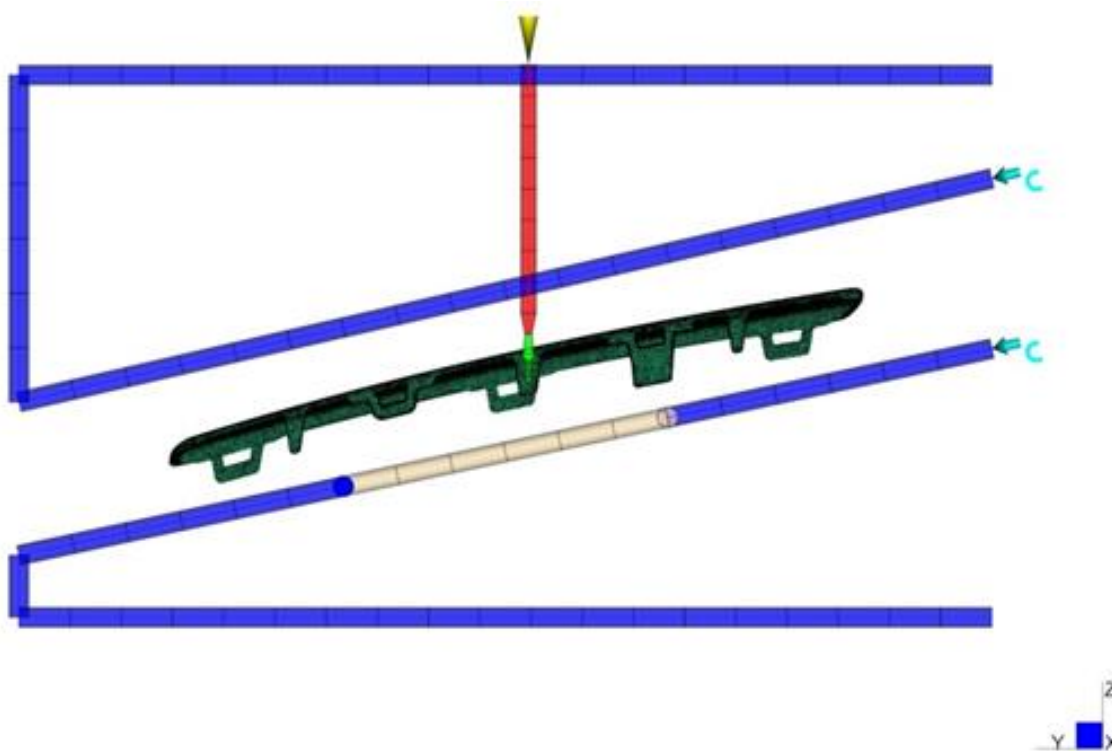


Figura 4.1.3. Vista lateral refrigeración.

Para la cavidad, se ha optado por alinear el plano del canal de refrigeración con la pieza, maximizando su incidencia. A su vez, en el núcleo esto no es posible debido a la posición de los expulsores, por lo que el plano de dicho canal se encuentra desplazado al lateral de la pieza. Para compensar esto último, se ha optado por redirigir el fluido refrigerante hacia la pieza de manera transversal, aprovechando el espacio libre entre las correderas y haciéndose valer de una conexión exterior mediante mangueras para su retorno al plano inicial.

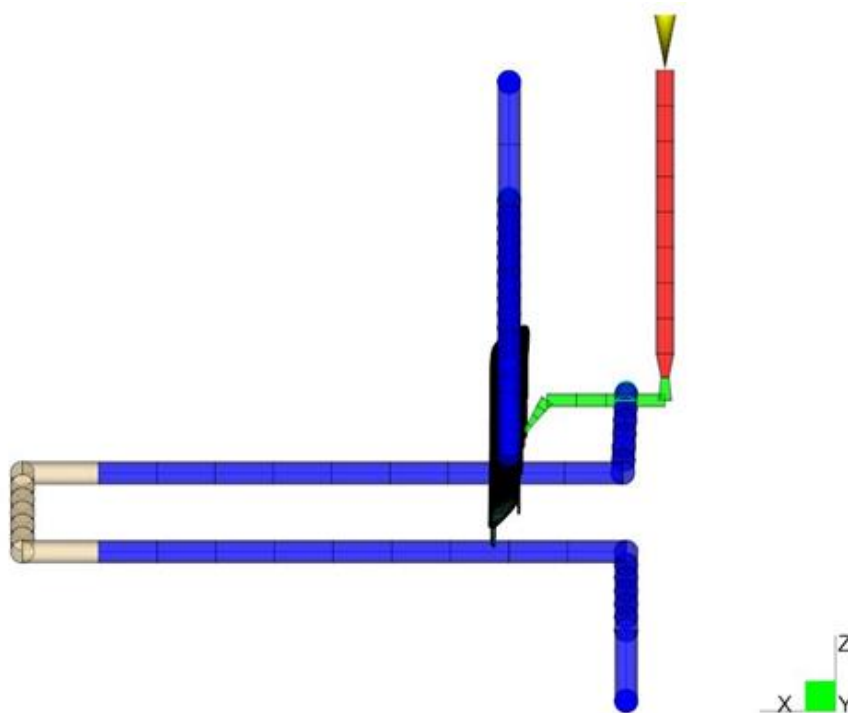


Figura 4.1.4. Vista frontal refrigeración.

Durante el paso del canal por debajo de la pieza, se ha valorado la opción de incluir refrigeradores de lámina para maximizar la eficiencia de la refrigeración del núcleo, siendo finalmente desechada dicha idea debido al escaso espacio disponible en la sección transversal de la pieza. Esto obligaba a un reducido dimensionamiento de los elementos, lo que provocaba que apenas tuviera incidencia en los resultados obtenidos para la refrigeración del núcleo. La inclusión de cartuchos termo-conductores se ha descartado finalmente debido a los buenos resultados obtenidos para la el sistema convencional.

Ambos canales se han dimensionado para un diámetro de 10mm, siendo su caudal el obtenido en los resultados para un Reynolds mayor que 10.000, de manera que se garantice el flujo turbulento en todo el circuito y por lo tanto, se maximice su eficiencia.

4.1.2 Propiedades del material

El material empleado es un ABS HI-121 de la marca LG Chemical, con un uso muy extendido para piezas de acabado cromado. Una vez cargado el material se accede a su base de datos, donde se incluyen los parámetros que se van a tener en cuenta a la hora de definir los parámetros de inyección.

Tabla 4.1.2.1. Propiedades de proceso.

| | |
|--|--------|
| Temperatura del molde (°C) | 60 |
| Temperatura de fusión del material (°C) | 240 |
| Rango de temperaturas del molde recomendada (°C) | |
| Mínimo | 40 |
| Máximo | 80 |
| Rango de temperaturas de fusión recomendada (°C) | |
| Mínimo | 230 |
| Máximo | 250 |
| Temperatura máxima absoluta de fusión (°C) | 290 |
| Temperatura de expulsión (°C) | 85 |
| Cizallamiento máximo (1/s) | 50.000 |

Tabla 4.1.2.2. Propiedades de contracción.

| | |
|-------------------------------|---------|
| Contracción nominal percibida | |
| Paralela | 0,5335% |
| Perpendicular | 0,5753% |
| Contracción percibida | |
| Mínima paralela | 0,3739% |
| Máxima paralela | 0,7503% |
| Mínima perpendicular | 0,3291% |
| Máxima perpendicular | 0,8325% |

4.1.3 Condiciones de inyección

Las condiciones que se muestran son las derivadas de los resultados de las simulaciones previas que, tras las correcciones oportunas, han permitido el establecimiento de dichas condiciones definitivas, cuyos valores deben validarse con los resultados obtenidos.

Se ha establecido un tiempo de llenado de 2 segundos, acorde con las dimensiones de la pieza, a una temperatura de 240°C tal y como recomienda el fabricante.

La conmutación se realiza al 98% del llenado, para una presión de 70MPa durante un tiempo de 15 segundos. Estos valores establecidos deberán contrastarse con los resultados obtenidos, siendo necesario comprobar que la entrada de inyección permanece abierta durante el tiempo de compactación, y corroborar que la contracción volumétrica experimentada para ese valor de presión se corresponde con la detallada por el fabricante (si la presión es insuficiente resultan valores de contracción superiores a los deseados). El tiempo de aplicación de la presión también debe verificarse con los resultados obtenidos para los rechupes, pudiendo ser necesario el aumento tanto de este como del valor de la presión en caso de resultar críticos.

El fluido escogido para la refrigeración será agua por ajustarse al su rango de temperaturas de trabajo. La temperatura del molde recomendada por el fabricante es de 60°C por lo que la temperatura del agua a la entrada de los canales de refrigeración deberá ser la que permita una temperatura media en el molde lo más cercana a la recomendada, sin superar el rango de temperaturas recomendado de 40-80°C. De esta manera, se ha determinado una temperatura de 45° para el núcleo y de 65°C para la cavidad. El tiempo destinado a la refrigeración consta de 13 segundos, que deberá comprobarse junto con los resultados de temperaturas en la pieza para ese tiempo, verificando que la pieza se encuentre en condiciones de ser expulsada, siendo su temperatura de expulsión de 85°C.

En base a los tiempos programados y para un tiempo de apertura del molde de 8 segundos, el tiempo de ciclo para cada par de piezas será de 38 segundos, siendo la combinación de los tiempos previstos para el llenado, compactación, refrigeración y apertura del molde.

Tabla 4.1.3. Condiciones de inyección.

| | |
|--|-----|
| Tiempo de llenado (s) | 2 |
| Temperatura de inyección (°C) | 240 |
| % llenado en la conmutación | 98% |
| Presión de mantenimiento (MPa) | 70 |
| Tiempo de mantenimiento (s) | 15 |
| Temperatura del agua en canales refrigeración (°C) | |
| Núcleo | 45 |
| Cavidad | 60 |
| Tiempo de refrigeración (s) | 13 |
| Tiempo apertura del molde (s) | 8 |

4.2. Resultados obtenidos

4.2.1 Llenado

El llenado está condicionado por la posición de la patilla dispuesta para la inyección. A pesar de esta limitación, se puede validar su posición ya que los resultados dan muestra de un proceso suficientemente equilibrado, quedando uno de los extremos ligeramente retrasado.

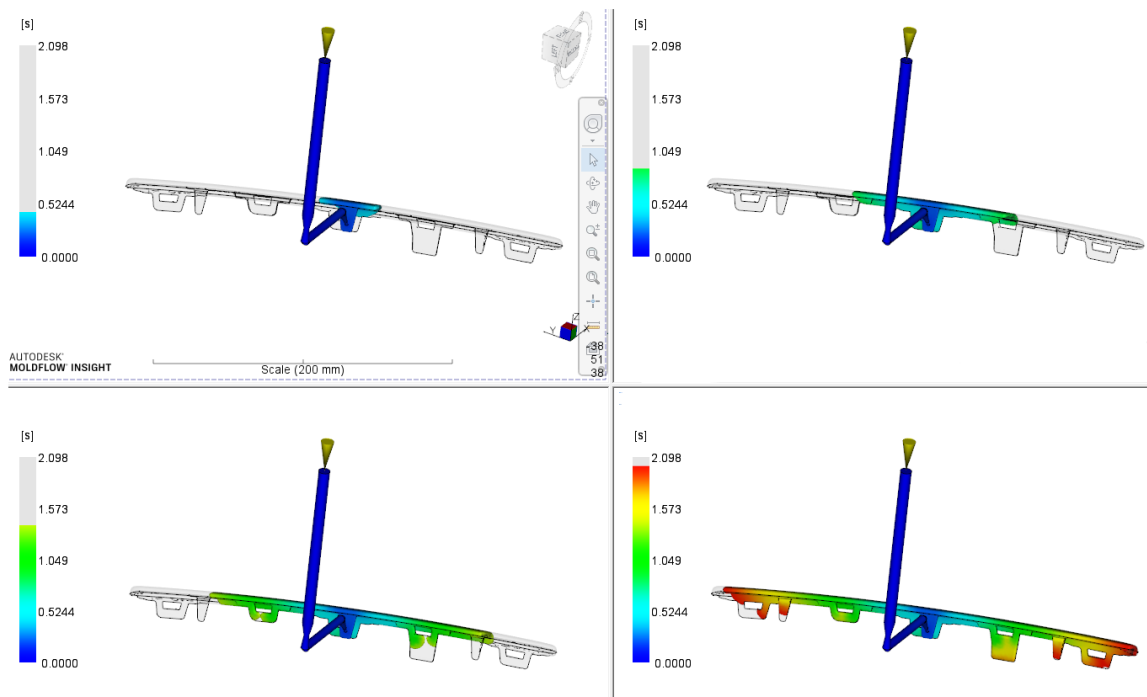


Figura 4.2.1. Fases del llenado.

4.2.2 Presión en la conmutación

Aporta el valor de la presión necesaria para llenar del todo la pieza. La conmutación se realiza con el 98% del llenado completado, tal y como se ha programado previamente.

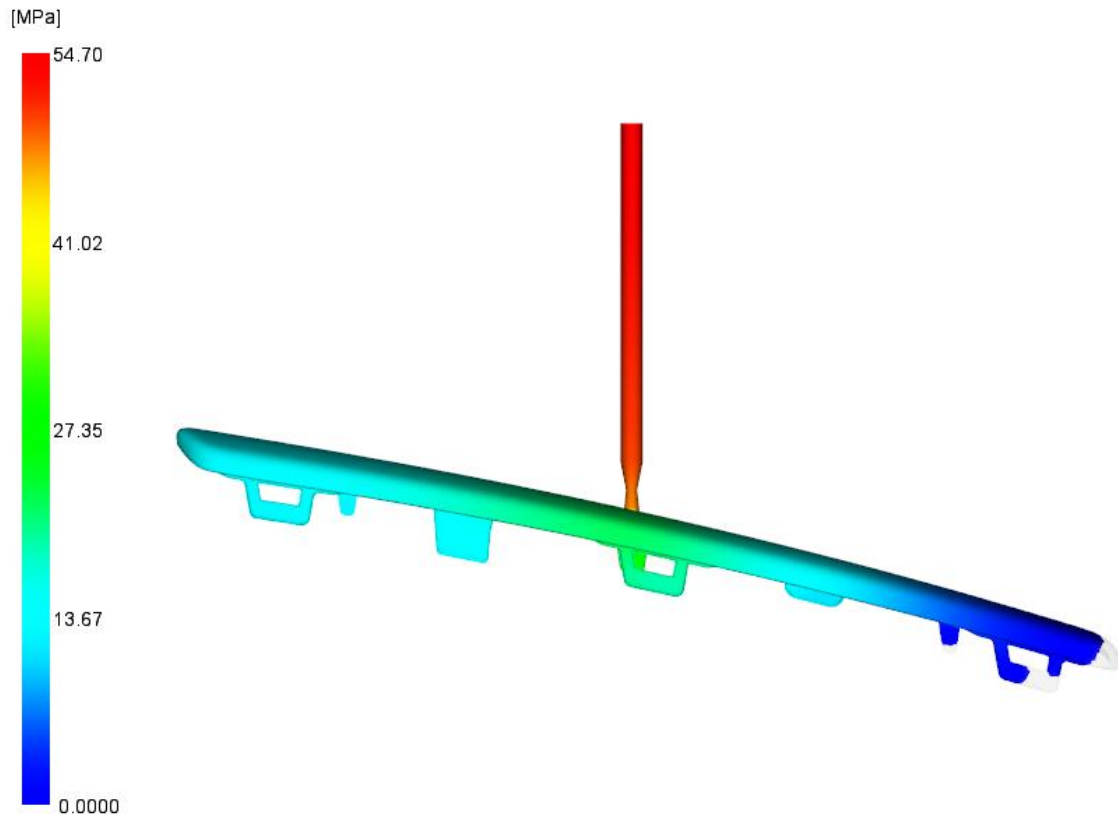


Figura 4.2.2. Presión en la conmutación.

4.2.3 Temperatura en el frente de flujo

El valor de la temperatura en el frente de flujo puede bajar a medida que se aleja del punto de inyección, o aumentar debido al cizallamiento. El rango de temperaturas experimentado va desde 246°C hasta 234,4°C, estando comprendido dentro del rango de temperaturas recomendado por el fabricante en la Tabla 4.1.2.1 y sin superar el máximo permitido de 290°C.

Además, en piezas con una finalidad estética, es conveniente que el rango de temperaturas en la cara estética sea lo más uniforme posible, a la hora de evitar posibles defectos estéticos en relación al brillo de la pieza. En este caso, en las superficies de la cara estética la temperatura se mantiene en un rango máximo de 6°C, estando la mayor parte de ella alrededor de los 3°C de diferencia y siendo en los extremos donde la temperatura difiere en mayor medida, debido al alejamiento respecto al punto de inyección.

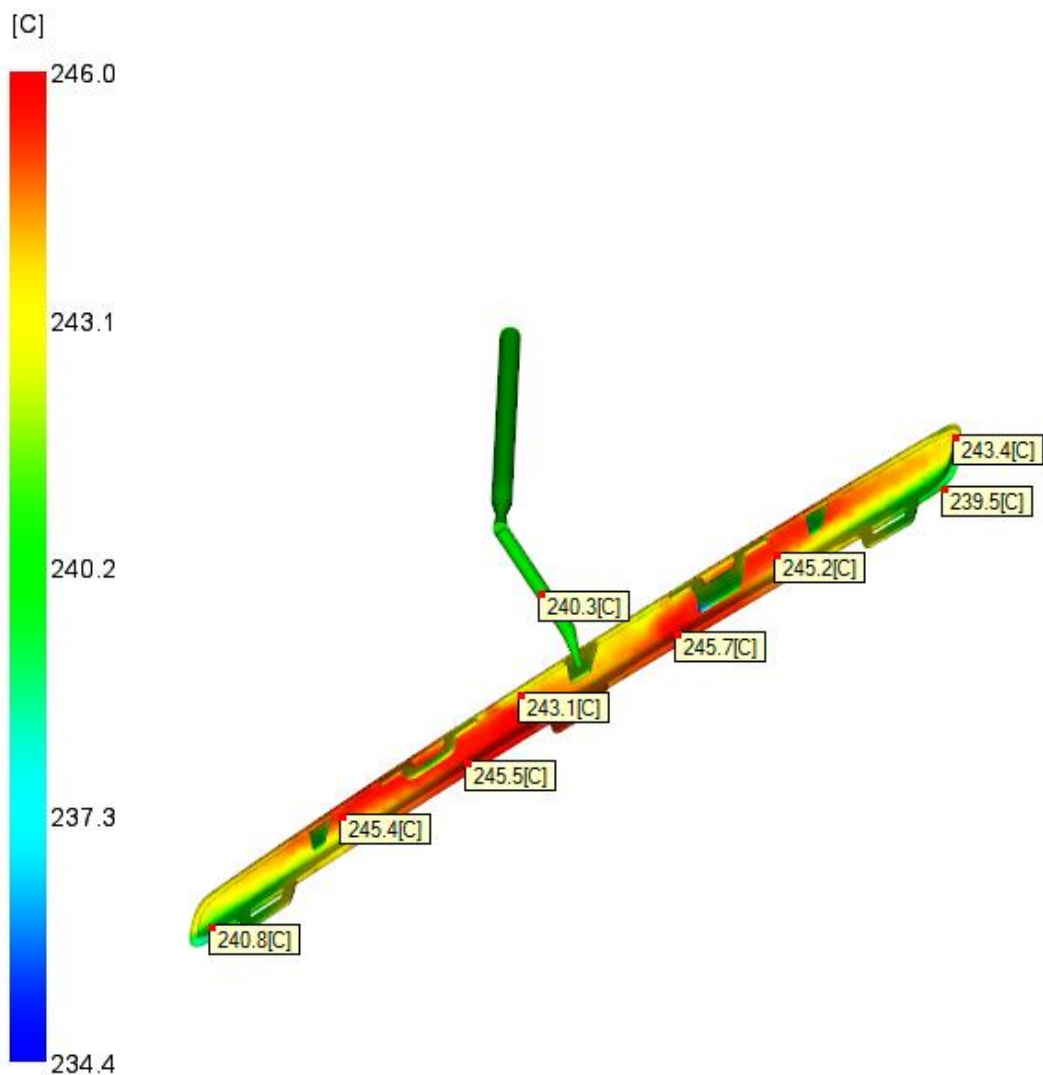


Figura 4.2.3. Temperatura en el frente de flujo.

4.2.4 Presión en el punto de inyección

Mediante la gráfica siguiente se visualiza el aumento de la presión durante el llenado, para luego dar paso a la presión de mantenimiento de 70MPa durante 15 segundos. Este resultado permite determinar la capacidad de la máquina a la que se deberá acoplar el molde, en este caso una de 70MPa como mínimo.

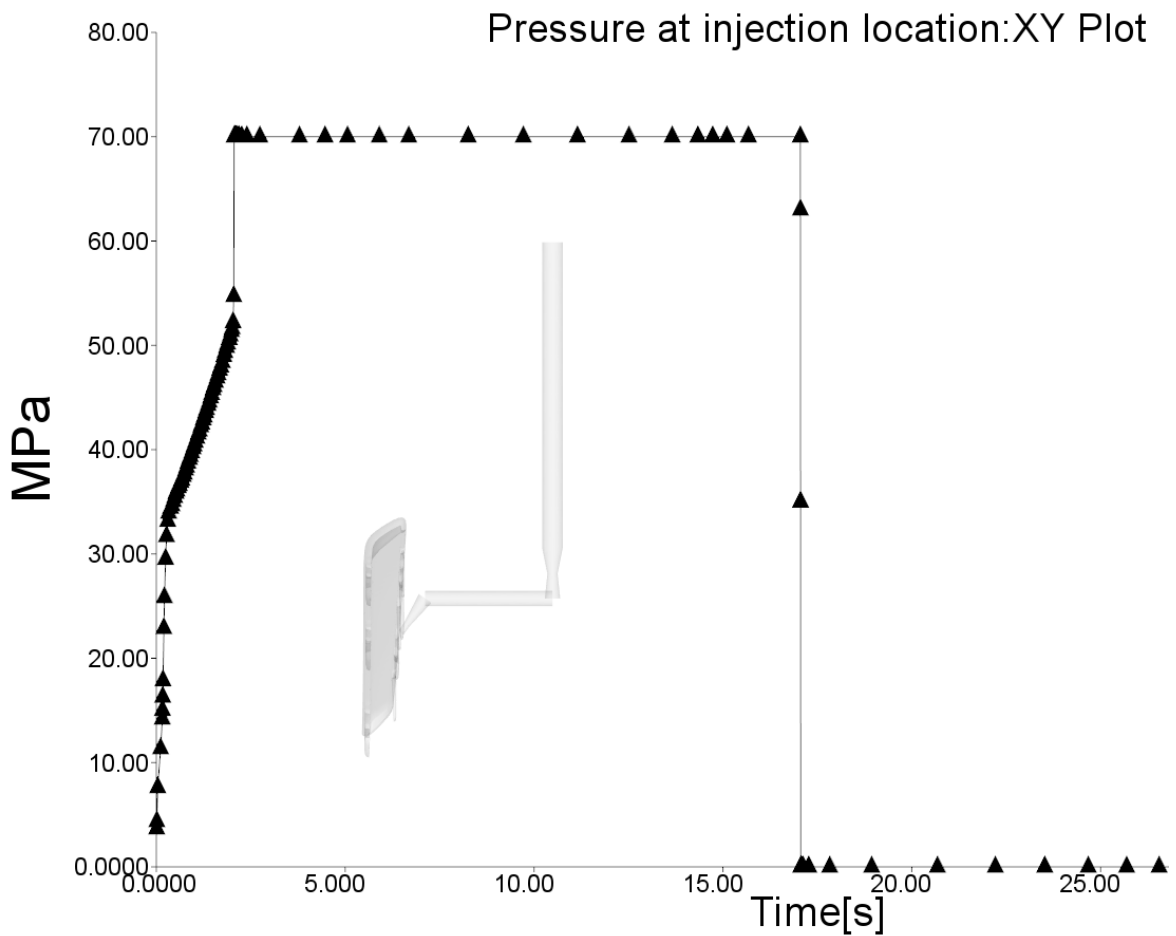


Figura 4.2.4. Presión en el punto de inyección.

4.2.5 Fuerza de cierre

Se trata de otro de los resultados que permiten elegir la máquina apropiada para realizar correctamente el proceso de inyección. Los datos obtenidos son para una sola cavidad, por lo que la capacidad de la máquina deberá ser el doble, es decir, de 70 toneladas. En caso de optar por una máquina de menor capacidad el riesgo de rebabas resultaría elevado.

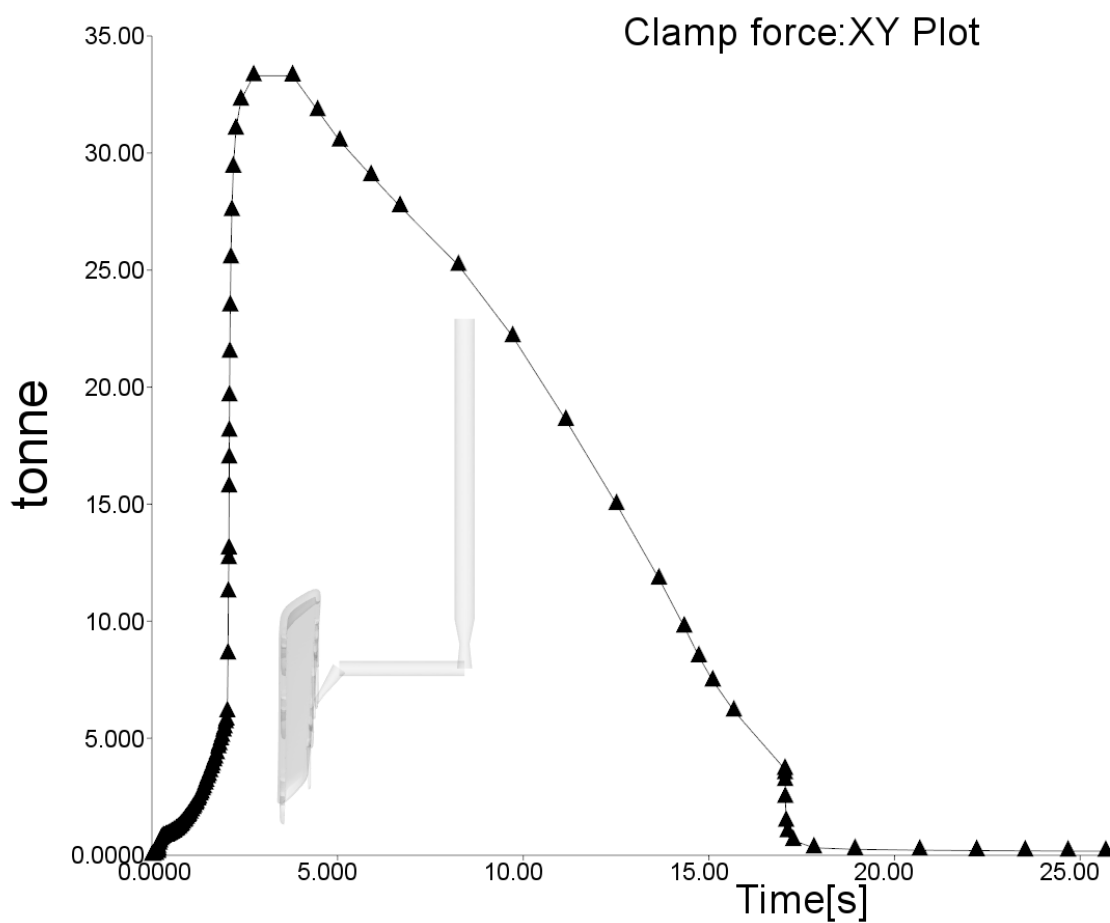


Figura 4.2.5. Fuerza de cierre.

4.2.6 Cizallamiento

El máximo cizallamiento se en la entrada de inyección en la conmutación, debido al aumento de la presión y a la reducción de la sección en la entrada. El valor máximo se mantiene inferior al máximo recomendado por el fabricante para este material, tal y como se ha detallado en la Tabla 4.1.2.1.

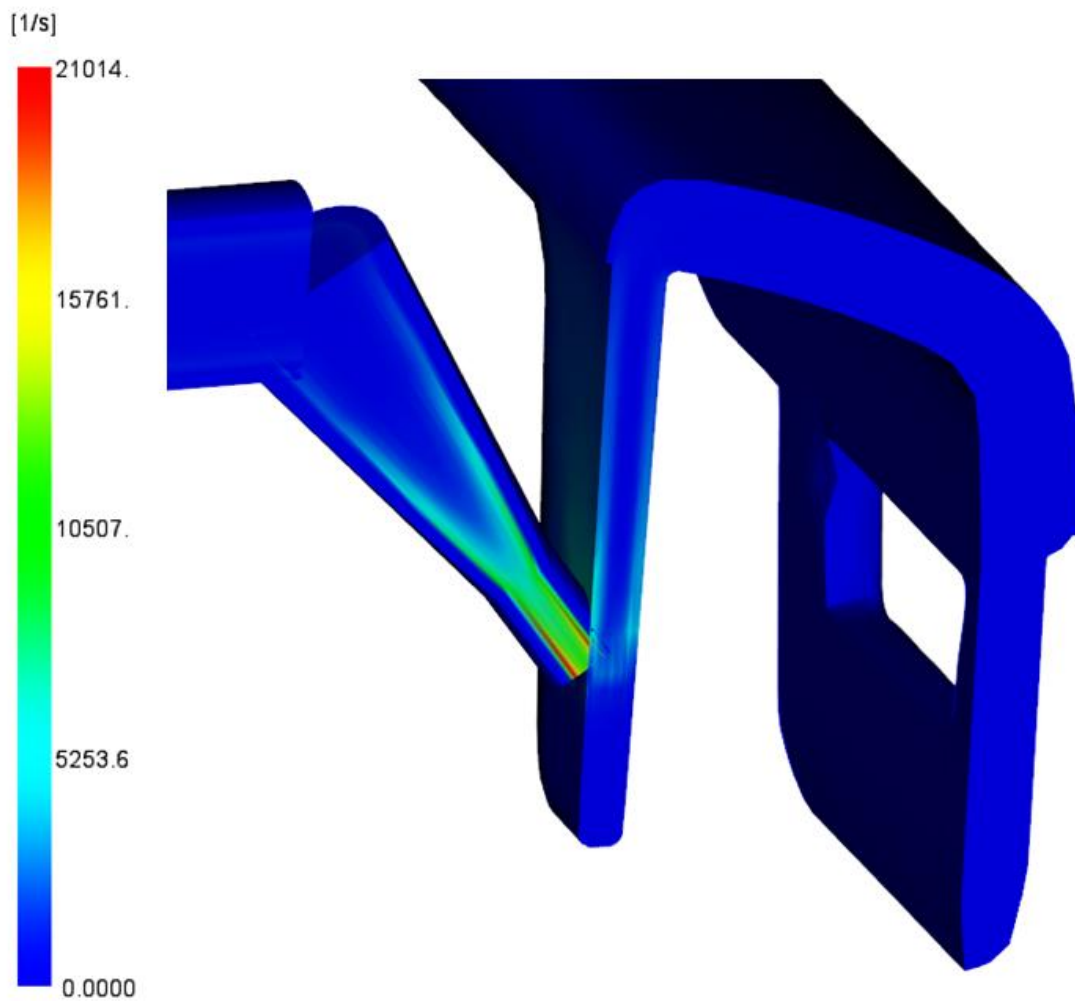


Figura 4.2.6. Cizallamiento en la entrada.

4.2.7 Tiempo de solidificación

La siguiente figura muestra la fracción de material solidificado en la entrada transcurridos 14,34 segundos desde el inicio de la inyección. La zona roja se corresponde con el volumen de material ya solidificado, por lo que se valida que para este instante la entrada aún permanece abierta y por tanto, la aplicación de la presión de compactación es efectiva.

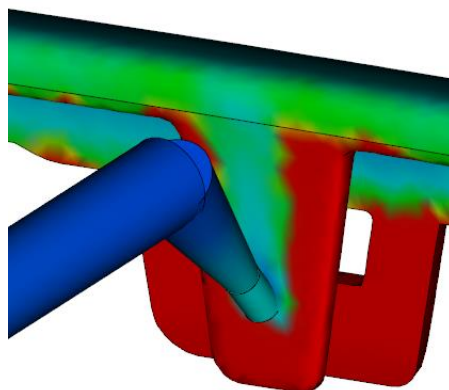


Figura 4.2.7.1. Solidificación en la entrada transcurridos 14,34 segundos.

El tiempo programado es ligeramente superior dado que el siguiente resultado aportado por el Moldflow se corresponde con un tiempo de 17,05, por lo que el cierre de la entrada se produce en un instante intermedio. Finalmente, se ha determinado un tiempo de 17 segundos para aprovechar el mayor tiempo posible en el que la entrada permanece abierta.

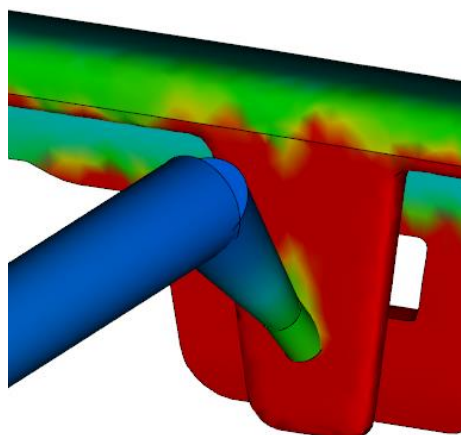


Figura 4.2.7.2. Solidificación en la entrada transcurridos 17,05 segundos

4.2.8 Rechupes

Los valores a analizar para los rechupes serán los correspondientes a la cara estética, ya que el resto de zonas van a quedar ocultas con el montaje de la pieza en el vehículo. En dicha zona los valores se mantienen por debajo de los 0,015mm y se encuentran localizados en los bordes de la pieza.

El radio que lleva asociado la pieza en dichos bordes, junto con el acabado cromado de la pieza, contribuye a disimular el efecto producido por los rechupes en esa zona. El resto de la superficie de la cara estética se mantiene sin riesgo de rechupe.

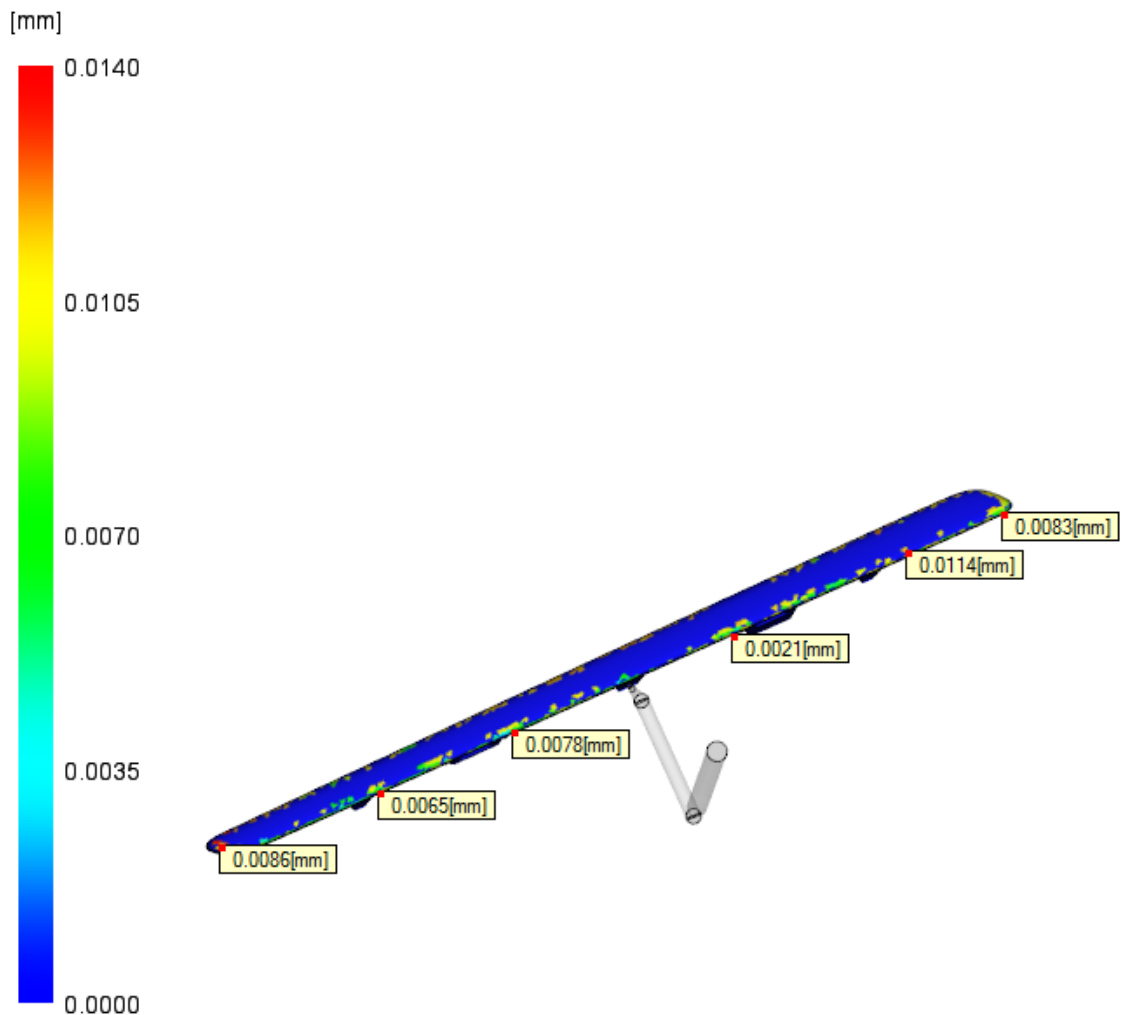


Figura 4.2.8. Rechupes.

4.2.9 Contracción volumétrica

Este resultado muestra la relación entre la contracción volumétrica y el espesor de la pieza, proporcionando una idea de la validez del valor de la presión de compactación establecido. Para un ABS los valores óptimos se sitúan entre 2,5% y 3%.

La pieza se encuentra bajo una contracción en su cara estética del 2,7% aproximadamente, manteniéndose dentro de los márgenes citados anteriormente y mostrándose muy homogénea a lo largo de toda la pieza. El resto de valores visualizados se deben a la geometría de la pieza, siendo normal para este tipo de piezas la disminución en los valores para las patillas. Los resultados negativos hacen referencia a las zonas en las que la expansión del material es superior a la contracción, estando muy localizados en los extremos de las patillas, siendo su valor lo suficientemente bajo como para descartar la posible formación de rebabas en la pieza.

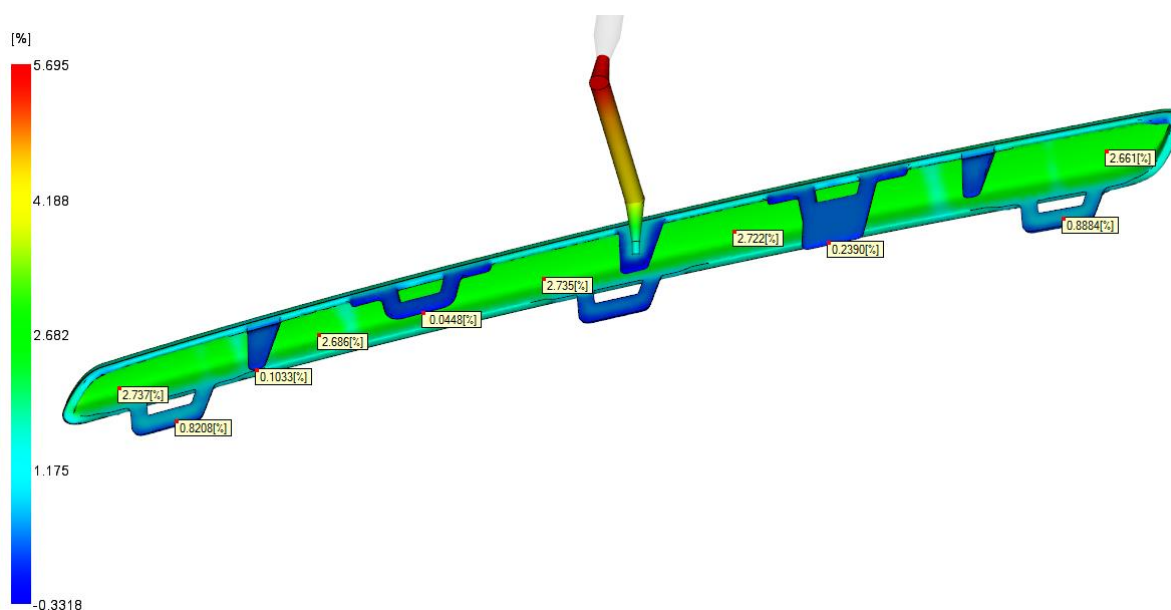


Figura 4.2.9. Relación entre contracción y espesor de la pieza, en porcentaje.

4.2.10 Atrapamientos de aire

Los posibles atrapamientos de aire que se puedan producir quedan localizados en los bordes de las patillas, siendo por tanto solucionados mediante el juego existente en los desplazables y correderas encargados de solucionar estas contrasalidas.

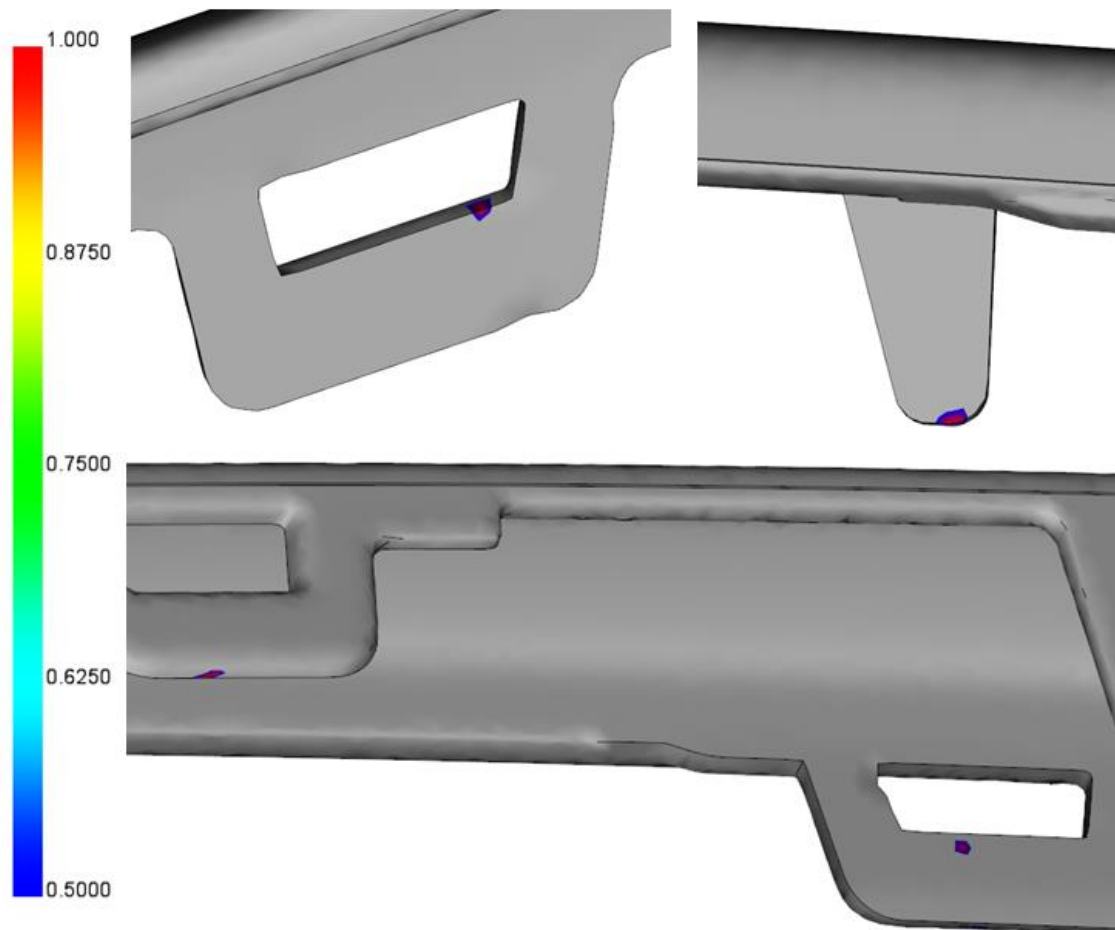


Figura 4.2.10. Atrapamientos de aire.

4.2.11 Líneas de unión

La visualización de este resultado permite descartar el riesgo de líneas de unión en la cara estética de la pieza, lo que podría suponer el rechazo de esta. De acuerdo al desarrollo del llenado de la pieza, los flujos de material convergen en las patillas, quedando por tanto ocultas las líneas de unión generadas.

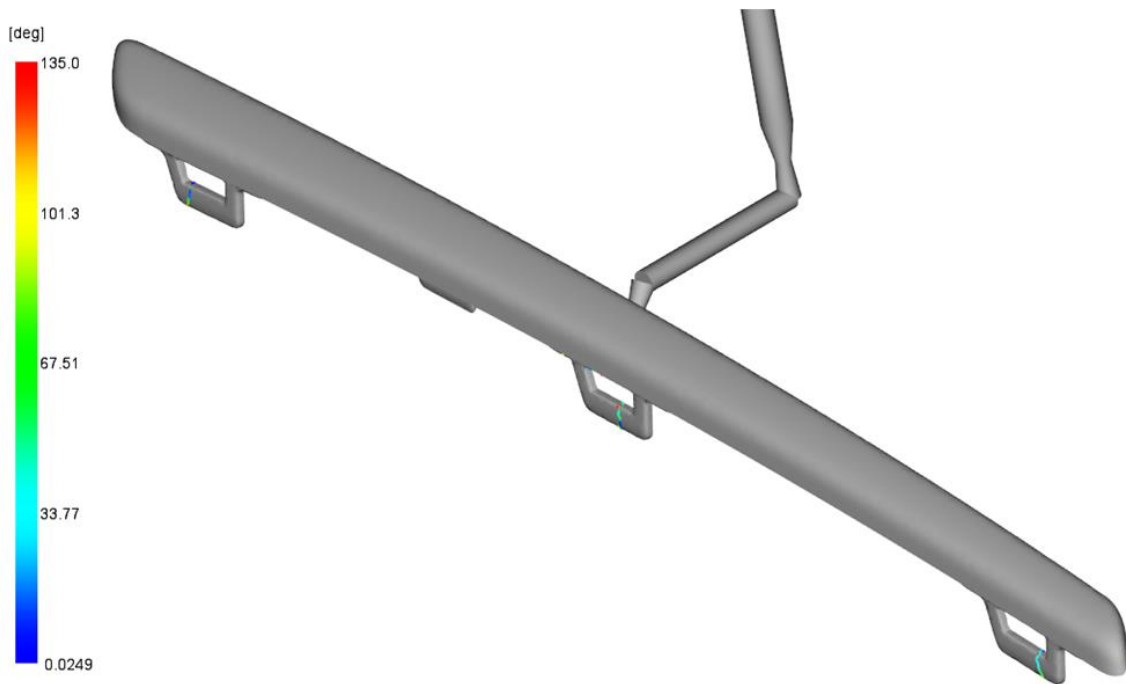


Figura 4.2.11. Líneas de unión.

4.2.12 Temperatura en los circuitos de refrigeración

La temperatura en los canales se comporta de manera muy diferente para núcleo y cavidad, dada la diferencia de temperaturas en las entradas.

En la cavidad, la temperatura entra a 65°C y experimenta una bajada a lo largo de la pieza de casi 5°C, mientras aporta calor a la cavidad. En el núcleo en cambio, la temperatura apenas varía 0,5°C entre la entrada y la salida. Estos resultados para el núcleo podrían dar idea de su ineficacia para refrigerar la pieza, sin embargo, su función es destacable a la hora de disipar el calor del núcleo a la hora de atravesar la proyección de la pieza, tal y como se puede apreciar para los resultados relacionados con la eficiencia de la refrigeración (apartado 4.2.15).

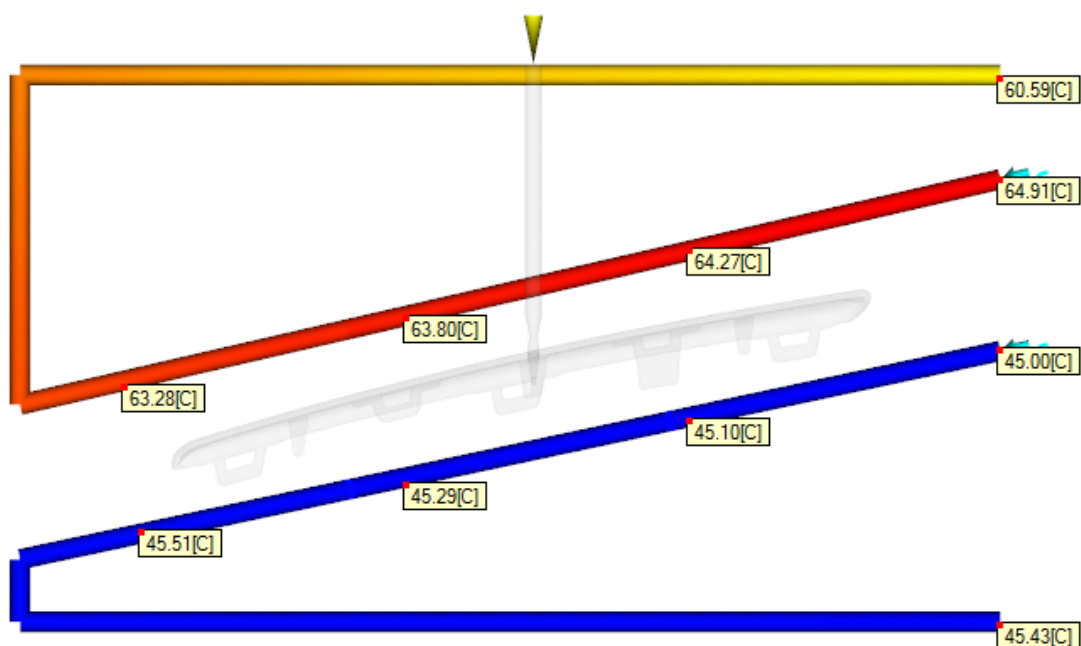


Figura 4.2.12. Temperatura en los canales de refrigeración.

4.2.13 Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión (pieza)

El tiempo de ciclo del proceso depende en gran medida del tiempo destinado a la refrigeración de la pieza, siendo conveniente el ajuste de este para la optimización del proceso.

La pieza requiere de unos 30 segundos para disponer de una temperatura adecuada para su expulsión (85°C de acuerdo a este material), de esta manera se garantiza la expulsión en un tiempo óptimo sin provocar defectos en la pieza. Este valor debe validarse también para el canal de alimentación, de manera que pueda facilitarse su expulsión para el tiempo establecido.

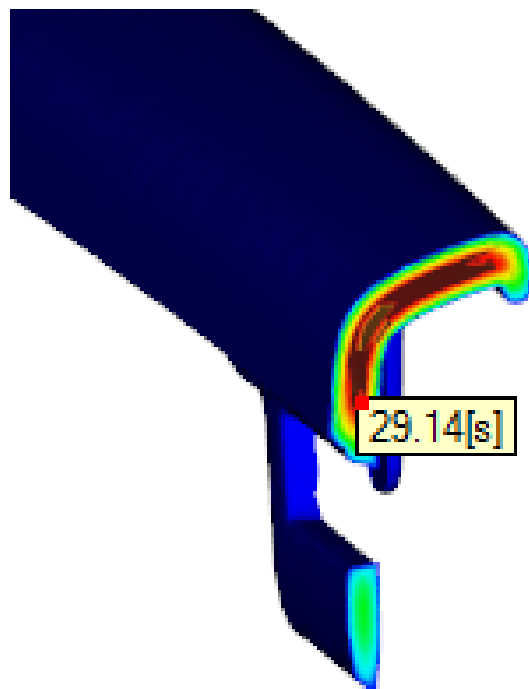


Figura 4.2.13. Tiempo para alcanzar temperatura de expulsión (pieza).

4.2.14 Tiempo para alcanzar la temperatura de expulsión (canales alimentación)

De acuerdo con el tiempo de refrigeración de 30 segundos establecido para la pieza, se comprueba la temperatura del canal de alimentación para comprobar que no exista riesgo de problemas que dificulten su expulsión.

Como se puede apreciar, tanto la entrada como la salida del canal se encuentran en valores apropiados, lo cual es positivo puesto que es en la entrada donde se sitúa el expulsor encargado de extraer el canal, siendo la salida dónde se produce el corte que permite su extracción. La temperatura superior en el resto del canal no es importante al tratarse de un elemento ajeno a la pieza, por lo que se valida el tiempo establecido de acuerdo al objetivo de optimizar el proceso lo máximo posible.

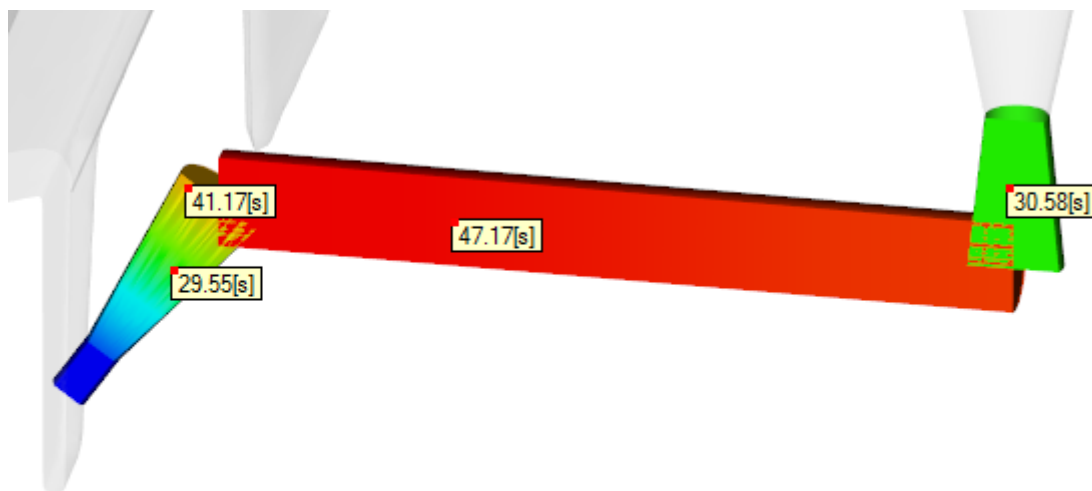


Figura 4.2.14. Tiempo para alcanzar temperatura de expulsión (alimentación).

4.2.15 Eficiencia de la refrigeración

Este resultado muestra la incidencia de los canales a la hora de aportar o extraer calor del núcleo y la cavidad, en valores que van desde el 1 positivo (100% extracción de calor) hasta el 1 negativo (100% aporte de calor).

De esta manera se aprecia la importancia de la disposición del circuito para el núcleo, siendo destacada su extracción de calor a la hora de atravesar la proyección de la pieza, con el objetivo de mantener la temperatura del molde lo más homogénea posible. El atemperamiento por parte del circuito de la cavidad es más constante, situándose por encima del 50% a su paso por la proyección de la pieza.

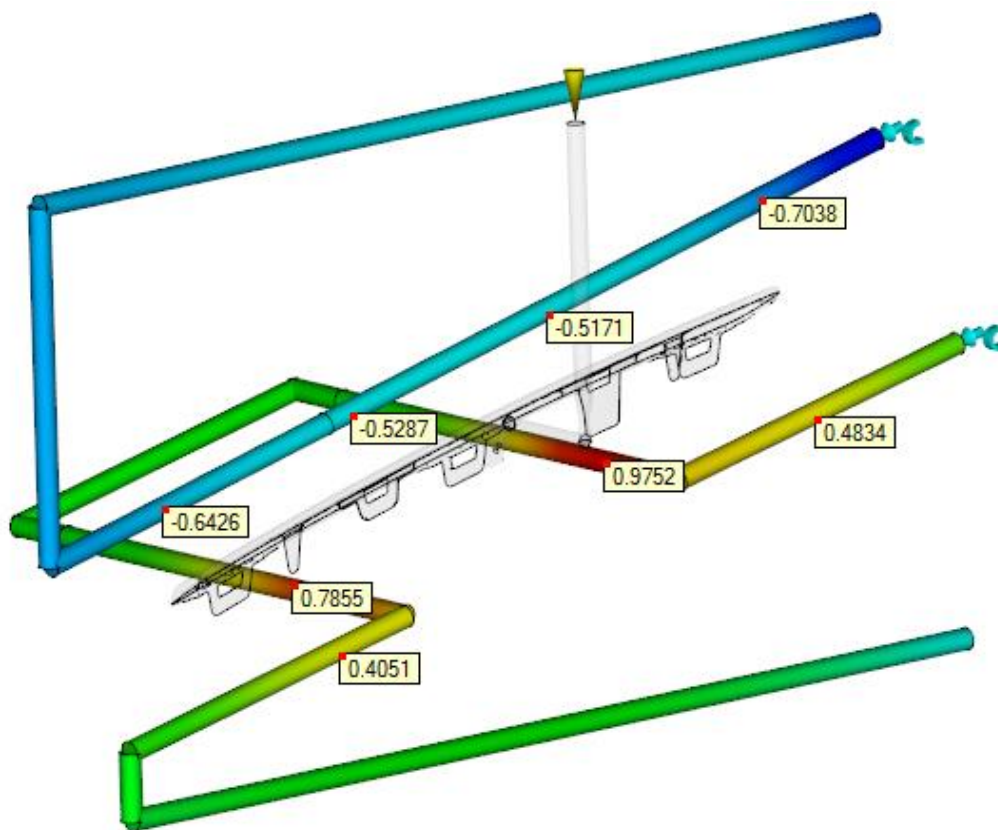


Figura 4.2.15. Eficiencia de la refrigeración.

4.2.16 Temperatura del molde

La temperatura del molde recomendada para este material es de 60°C de acuerdo con lo establecido en la Tabla 4.1.2.1. El diseño y los valores de temperatura adoptados para las entradas de la refrigeración tienen la finalidad obtener un rango de temperaturas lo más próximo a la temperatura objetivo, manteniéndose siempre dentro de los márgenes de 40°C y 80°C recomendados por el fabricante.

El valor de la temperatura media en el molde obtenido mediante la simulación es de 58,81°C, adoptando valores superiores en las proximidades de la entrada e inferiores para valores más alejados a esta (gracias a la refrigeración dispuesta, que impide que la temperatura sea mayor por efecto del calor del flujo de material). El pico de calor cerca de la entrada contribuye a mantenerla abierta durante la compactación, siendo por tanto favorable para el proceso.

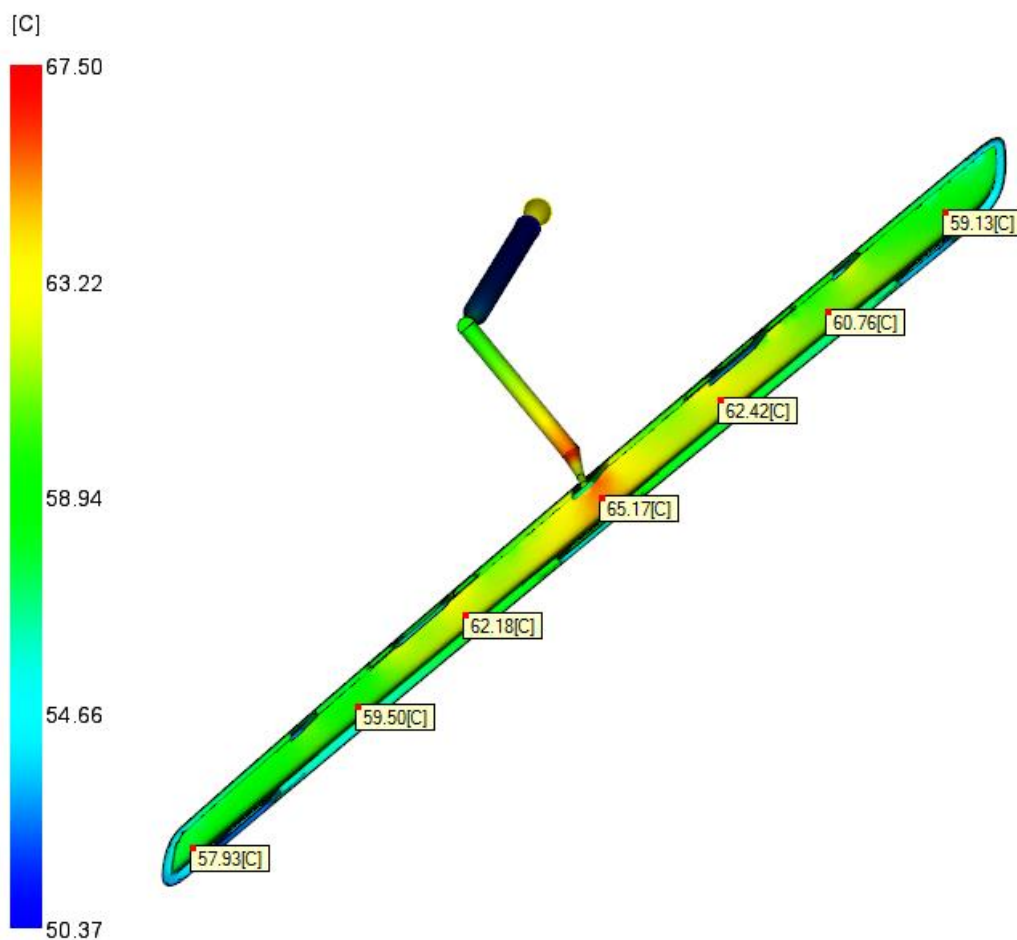


Figura 4.2.16.1. Temperatura del molde en el núcleo.

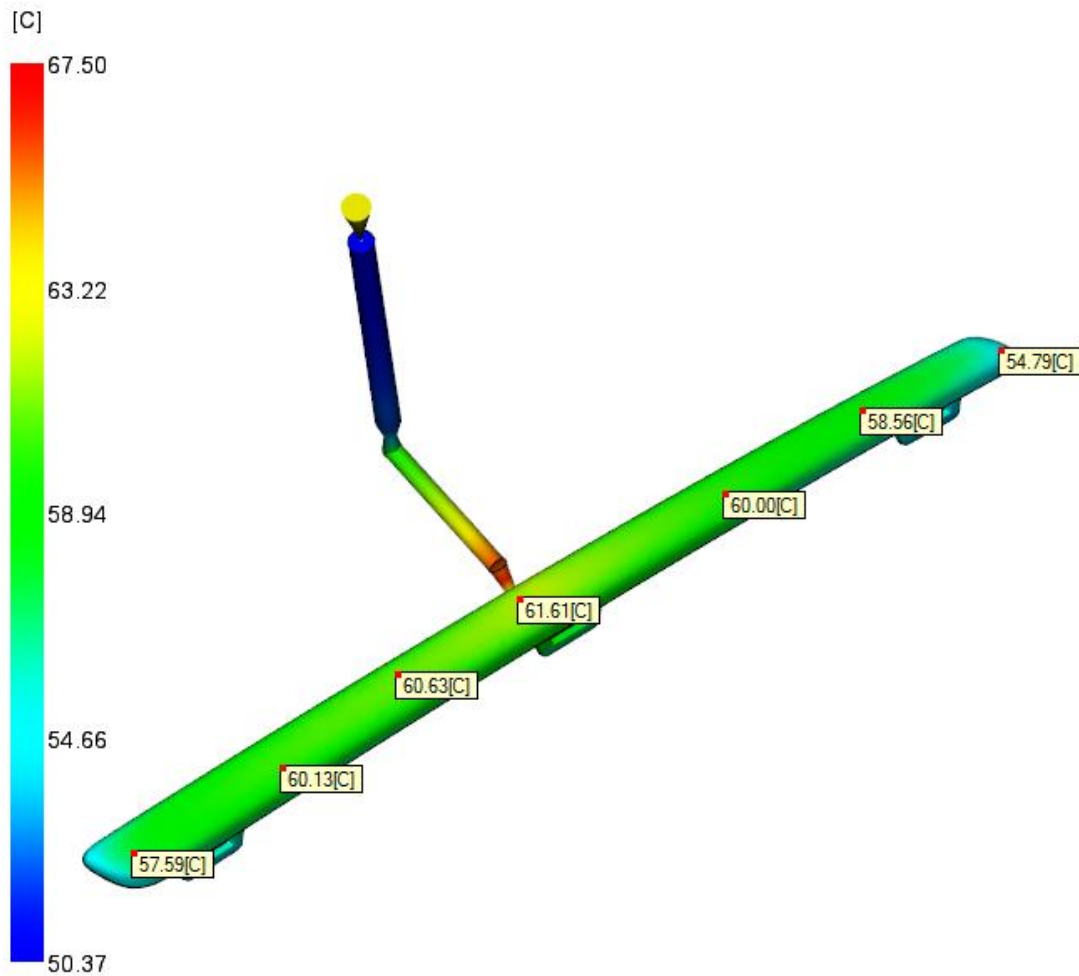


Figura 4.2.16.2. Temperatura del molde en la cavidad.

4.2.17 Deformaciones

Los resultados obtenidos para las deformaciones son las producidas para la pieza en estado libre. Llevan asociada una compensación de la contracción del material (la misma con la que se sobredimensionan las cavidades en el molde para obtener la pieza dentro del margen de tolerancias).

En este caso la contracción compensada es de 0,55% considerándola como isotrópica, lo cual no se corresponde con la realidad pero es una aproximación que se mantiene dentro del margen aportado por el fabricante en la Tabla 4.1.2.2.

4.2.17.1 Deformaciones (eje x)

Los resultados para el eje transversal de la pieza muestran como las puntas y la parte central tienden a deformar en sentidos opuestos.

Este tipo de deformaciones puede compensarse con la geometría de la pieza, puesto que dispone de patillas dispuestas a lo largo de su longitud para el anclaje en el vehículo que pueden adoptar una función de rectificadores de la forma de la pieza.

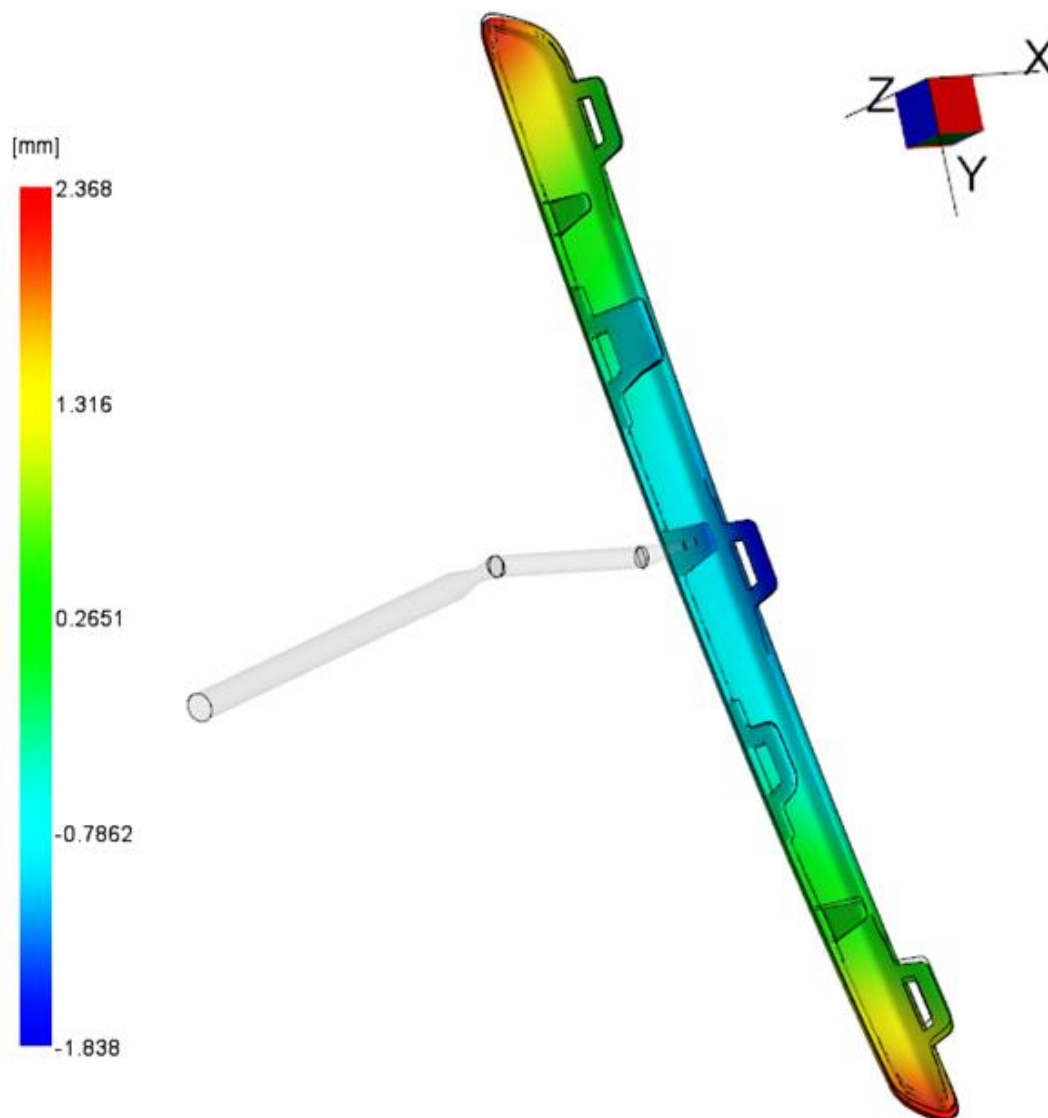


Figura 4.2.17.1. Deformaciones eje x.

4.2.17.2 Deformaciones (eje y)

Las deformaciones en el eje y se deben principalmente al levantamiento de las puntas, tal y como se aprecia en los resultados en el eje z, lo que provoca que la proyección de la pieza aumente y con ello el valor de los resultados.

La deformación producida en el eje transversal también contribuye a aumentar la proyección de la pieza sobre el eje y, por lo que puede deducirse que el efecto de las deformaciones propias del eje y es despreciable en relación a las producidas en los otros ejes.

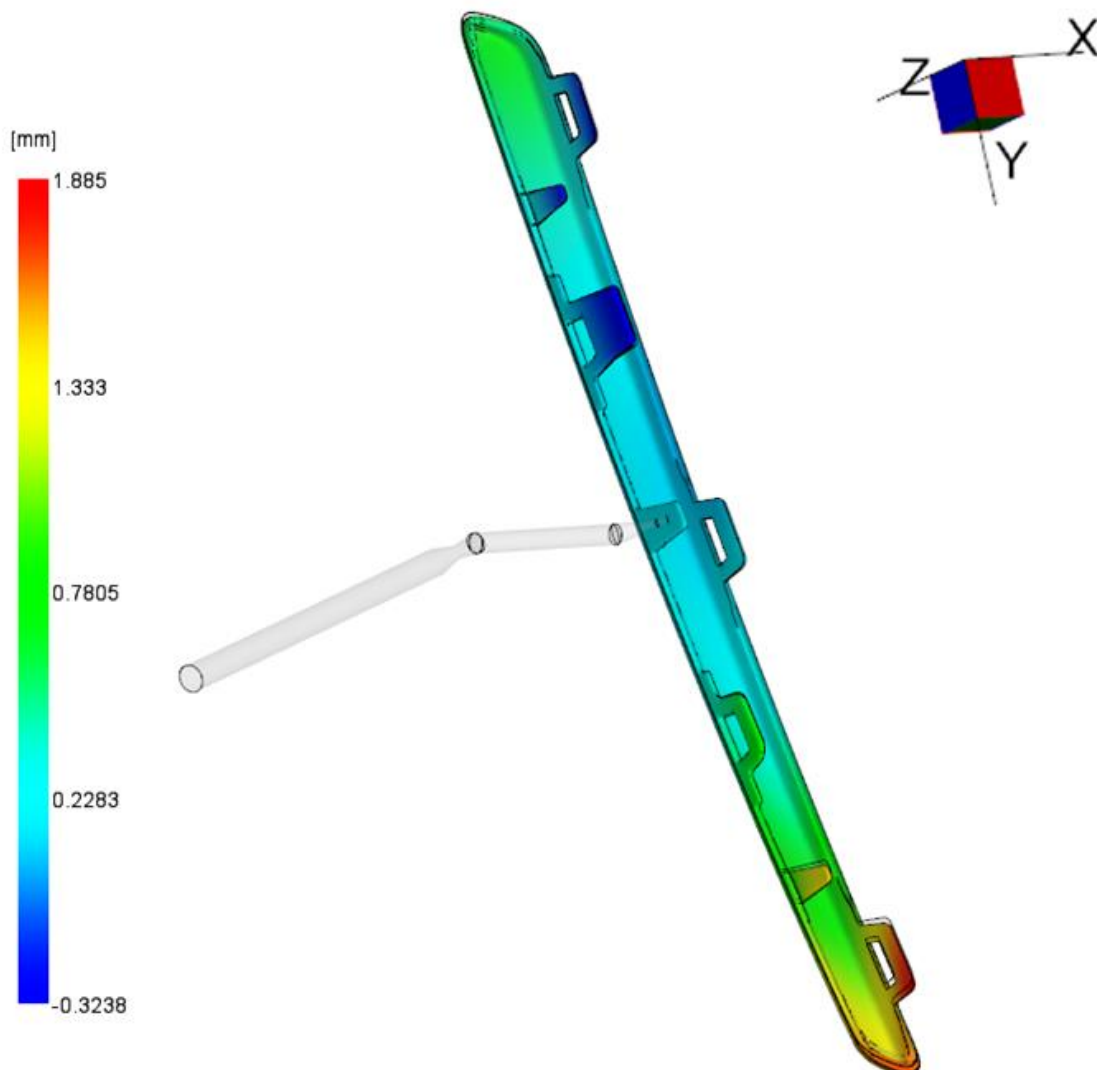


Figura 4.2.17.2. Deformaciones eje y.

4.2.17.3 Deformaciones (eje z)

Las piezas con este tipo de geometrías alargadas y con sección en forma de "U" tienen tendencia a levantar las puntas por efecto del calor almacenado en el material, al ser las últimas partes de la pieza en llenar.

Este tipo de deformaciones pueden suavizarse aumentando el espesor de los nervios laterales en relación a la cara perpendicular al eje z. De esta manera, el calor se mantiene en los laterales, que "sujetan" las puntas reduciendo su tendencia a levantarse.

El hundimiento de la parte central no supone un problema mayor puesto que se corrige con el montaje de la pieza en el vehículo, siendo por tanto más crítico el levantamiento de las puntas por las dificultades que pueda originar para el correcto anclaje de las patillas.

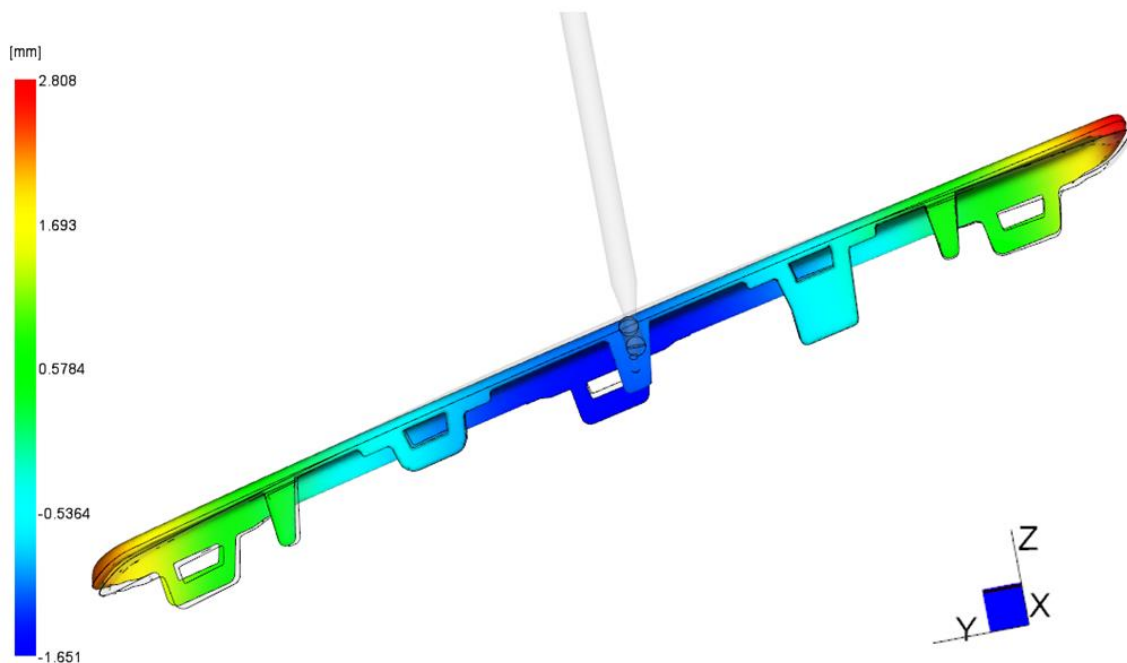


Figura 4.2.17.3. Deformaciones eje z.

4.3. Conclusiones

De acuerdo a los resultados analizados, se comprueba que la pieza obtenida para las condiciones de proceso planteadas cumple con los requisitos dimensionales y estéticos.

La máquina necesaria para llevar a cabo la inyección será de mínimo 70 toneladas de fuerza, de acuerdo con los resultados obtenidos para la fuerza de cierre, y de 70MPa para la inyección y posterior compactación. Además, se han obtenido los resultados para los valores del caudal mínimo necesario para garantizar un flujo turbulento a lo largo de los canales de refrigeración, obteniendo valores de 2,044 l/min para el núcleo y de 2.817 l/min para la cavidad.

En caso de resultar excesivo alguno de los resultados para las deformaciones, las medidas a adoptar se basarían en modificaciones de los espesores de la pieza. Sin embargo, las modificaciones en los espesores de la pieza pueden alterar los resultados para algunos de los requisitos estéticos como los rechupes, por lo que en caso de ser necesarias las modificaciones deben realizarse con el visto bueno del cliente.