

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño
Máster en Diseño y Fabricación Integrada Asistidos por Computador



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**Diseño y puesta a punto de simulaciones de
inyección de metales (MIM) mediante el uso
del software *Moldflow***

Alumno

Daniel Díez Díaz-Calonge

Tutores

Dr. Miguel J. Reig Pérez
Dr. Santiago Ferrándiz Bou



TABLA DE CONTENIDOS

1. Objetivos y justificación de la tesina	1
2. Estado del arte	2
2.1 Moldflow	2
2.2 MIM	3
2.3 Metales líquidos	5
2.4 Ecuaciones de estado	8
<i>2.4.1 Modelo de Cross-WLF</i>	8
<i>2.4.2 Modelo de Tait modificado</i>	10
3. Comparativa materiales termoplásticos-metales	12
3.1 Fluidos newtonianos y no newtonianos	12
<i>3.1.1 Fluidos newtonianos</i>	12
<i>3.1.2 Fluidos no newtonianos</i>	13
3.2 Termoplásticos	14
<i>3.2.1 Estructura macromolecular</i>	14
<i>3.2.2 Comportamiento reológico</i>	16
3.3 Metales	21
<i>3.3.1 Estructura de los metales</i>	22
<i>3.3.2 Comportamiento reológico</i>	23
4. Modelos matemáticos	29
4.1 Modelo de Cross-WLF	29
<i>4.1.1 Problema: Cross-WLF para metales líquidos</i>	30
4.2 Modelo de Tait modificado	36
<i>4.2.1 Problema: Tait para metales líquidos</i>	37



5. Simulaciones y análisis de resultados	41
5.1 Modelando el material	41
5.1.1 Aleación Zn-Al (Zamak)	42
5.1.2 Aluminio	46
5.2 Simulaciones	50
<i>Simulación 1</i>	54
<i>Simulación 2</i>	56
<i>Simulación 3</i>	58
<i>Simulación 4</i>	60
<i>Simulación 5</i>	62
<i>Simulación 6</i>	64
<i>Simulación 7</i>	66
<i>Simulación 8</i>	68
<i>Simulación 9</i>	70
<i>Simulación 10</i>	72
<i>Simulación 11</i>	74
<i>Simulación 12</i>	76
<i>Simulación 13</i>	78
<i>Simulación 14</i>	80
<i>Simulación 15</i>	82
<i>Simulación 16</i>	84
<i>Simulación 17</i>	86
<i>Simulación 18</i>	88
<i>Simulación 19</i>	90
<i>Simulación 20</i>	92
<i>Simulación 21</i>	94
<i>Simulación 22</i>	96
<i>Simulación 23</i>	98



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Diseño y puesta a punto de simulaciones de inyección de metales (MIM) mediante el uso del software *Moldflow*

Tabla de contenidos

<i>Simulación 24</i>	100
<i>Simulación 25</i>	102
<i>Simulación 26</i>	104
<i>Simulación 27</i>	106
<i>Simulación 28</i>	108
5.3 Análisis de resultados	111
5.3.1 <i>Placa de persiana</i>	111
5.3.2 <i>Tapa metálica</i>	113
5.3.3 <i>Pin-Logo escudo</i>	115
6. Conclusiones	117
7. Líneas de trabajo futuras	119
8. Referencias	120



1. Objetivos y justificación de la tesina

A lo largo del máster CAD/CAM/CIM se ha puesto de manifiesto la enorme cantidad de procesos de fabricación que existen en la actualidad. Se puede conformar o deformar plásticamente un material mediante laminación, forja, calandrado entre otros. También se puede arrancar el material mediante procesos de mecanizado, sinterización... Otros procesos son los moldeos por compresión, soplado o inyección. Es en este último caso, exactamente en el moldeo por inyección de metales o MIM (*Metal Injection Molding*), en el que está contextualizada la presente tesina.

A la hora de trabajar con moldeo por inyección, una herramienta imprescindible son los paquetes de software de ingeniería asistida por computador, o CAE por sus siglas en inglés (*Computer Aided Engineering*), ya que nos permiten analizar los diseños realizados en CAD simulando su comportamiento en las diferentes fases del proceso de inyección. Existen actualmente en el mercado distintas soluciones CAE. De entre todas ellas, *Autodesk Moldflow* es con la que se ha optado trabajar en el máster.

En la asignatura de aplicaciones CAD/CAM/CAE se ha utilizado *Moldflow* para simular inyecciones de plástico. La idea de poder utilizar este mismo software para simular inyecciones de metales ha llevado al planteamiento de esta tesina. El objetivo es comprobar si es posible adaptar *Moldflow* para simular la inyección de materiales metálicos en estado líquido. Para poder llevar a cabo esta adaptación es necesario entender las ecuaciones matemáticas que utiliza *Moldflow* para interpretar los materiales plásticos. Estas ecuaciones son el modelo de viscosidad Cross-WLF y el modelo pVT de Tait modificado.

Así pues, junto al objetivo principal de comprobar la viabilidad de utilizar *Moldflow* como simulador de inyecciones de materiales metálicos, hay que añadir los objetivos parciales de estudiar e interpretar las ecuaciones de Cross-WLF y Tait y modificar los parámetros adecuados para conseguir adaptar el programa.



2. Estado del arte

2.1 *Moldflow*

Moldflow es un software de ingeniería asistida por computador de la casa Autodesk. Está dedicado al análisis por elementos finitos del proceso de inyección de plásticos. A *Moldflow* se le puede introducir geometrías completas, entradas y demás elementos del proceso de inyección. Los canales de refrigeración del molde son configurables y nos permite obtener información del líquido refrigerante como caudal, gradientes de temperatura, etc. También es capaz de trabajar con GAIM (Gas Asisted Injection Molding). Como se puede ver, es un software CAE completo y con el que se pueden obtener muy buenos resultados analíticos que nos ayudarán en la optimización del proceso de inyección.

Hay muchas referencias de investigaciones que se han apoyado en *Moldflow* para simular inyecciones, sirva de primer ejemplo la presente tesina.

Zhang Wen-jiang y Zang Qi usan *Moldflow* en su estudio del proceso de inyección para carcasa de teléfonos móviles [1]. Importan el modelo en 3D y la malla para, primero obtener el número y posición óptimas de las entradas y por último analizar el llenado, refrigerado y deformaciones sufridas en la pieza. Gracias a los resultados obtenidos de los análisis hechos con herramientas CAE se pueden realizar rediseños de las piezas, moldes, etc. para conseguir los resultados deseados, como han hecho Zang Weng-jiang et al. en el artículo. Ser capaces de simular los errores antes de pasar a la fase de fabricación permite ahorrar costes así como ofrecer productos con mejor acabado y mayor calidad.

Behrooz et al. se han centrado en los fallos de deformación y contracción de piezas inyectadas, que han sido analizados con *Moldflow* [2]. En este caso, el software CAE se ha utilizado para obtener unos resultados en base a los cuales se ha realizado un proceso de optimización mediante el método Simplex. Los parámetros introducidos en el modelo de optimización son la temperatura del molde, temperatura de fusión del material, la presión de *switch-over*, la presión de inyección, el tiempo de proceso y la temperatura del líquido refrigerante. En el trabajo se demuestra que el uso del método Simplex es perfectamente viable para la optimización y ofrece buenos resultados.



Hsieh y Shu también evalúan los defectos de deformación, pero en este caso de las carcasas inferiores de las baterías de plomo y ácido [3] que se puede encontrar en cualquier vehículo convencional. Utilizan *Moldflow* para simular el flujo del plástico fundido dentro de la cavidad del molde y la presión de sostenimiento. De los resultados obtenidos con el software se entiende que los tiempos de inyección son el factor determinante a la hora de reducir los defectos de deformación y que, por tanto, si aumentamos los tiempos la cantidad de defectos disminuye considerablemente. El segundo factor importante es la temperatura del plástico fundido. Para evitar deformaciones en la pieza es necesario reducir la temperatura lo máximo posible.

Hay casos muy puntuales en los que las herramientas CAE no son todo lo precisas que se espera, como el trabajo de M. Azuddin et al. en el que han construido una máquina de moldeo por inyección vertical con la que estudian la fabricación micro piezas de plástico [4]. En este caso, se ha utilizado *Moldflow* para comparar las partes fabricadas con la máquina con los resultados extraídos del programa. Para piezas con tamaños tan reducidos, las diferencias entre los análisis y la fabricación real son importantes. Además, la máquina creada, aun siendo capaz de fabricar las piezas, deja defectos brillantes en las mismas.

Los anteriores casos son una pequeña muestra de la importancia que tienen los programas CAE, en particular *Moldflow*, en los procesos de fabricación.

2.2 MIM

El moldeo por inyección de metales es una técnica que se inició a principios de la década de los 70 pero que no alcanzó el reconocimiento actual hasta la década de los 90. El encargado de patentar la técnica y su nombre fue el Dr. Raymond E. Wiech Jr. [5] en 1980.

En el proceso patentado por el Dr. Raymond, el material inicial utilizado para la inyección es una combinación de polvos metálicos con ligantes poliméricos y ceras. Esta combinación se mezcla y se genera un granulado que más tarde se inyecta. Tras la inyección se procede a la eliminación del ligante para, al final, obtener la pieza de metal [6]. Hay numerosos especialistas que han realizado simulaciones y estudios numéricos sobre moldeo por inyección con este tipo de materia prima.

Por su parte, Berginc, Brezocnik, Kampus y Sustarsic han simulado una inyección de estas características con *Moldflow*, además de un estudio

reológico de la mezcla utilizada en el proceso y una comparación entre los estudios numéricos y resultados experimentales [7, pag.4 Tabla 1]. En el paper de Berginc et al. concluyen que *Moldflow* es capaz de realizar simulaciones de MIM si se cuenta con los datos correctos de viscosidad del material y de pvT. Este estudio es verdaderamente interesante pues abre la posibilidad real de utilizar un simulador de inyección de plásticos para otro tipo de moldeos por inyección.

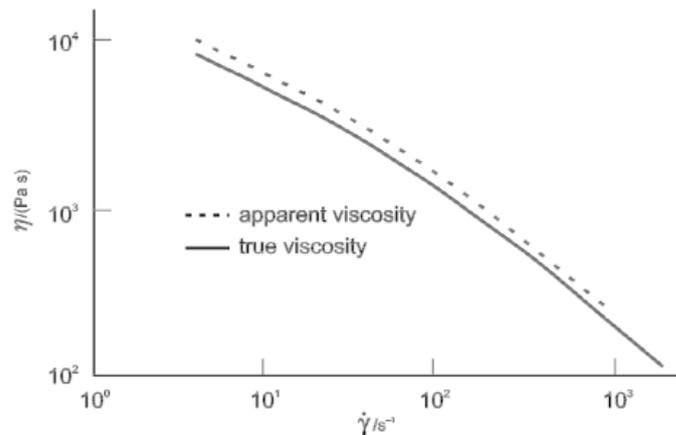


Figura 2.1 Curva de viscosidad calculada por Berginc y su equipo [7]

El Dr. Zhen-xing y su equipo han realizado una simulación en *Moldflow* de aleaciones de tungsteno con una mezcla de polietileno, cera y lubricante [8], estudiando las ecuaciones que describen los modelos de los materiales y analizando todo el proceso de inyección. En dicho estudio llegan a la conclusión de la importancia del control del caudal durante el proceso, además de la correcta situación de los puntos de entrada pues estos afectan a la distribución de temperaturas durante la inyección.

Mohamad, Muhamad, Ismail, Jamaludin, Ashmad e Ibrahim [9] analizan el comportamiento pseudoplástico del material y las causas de algunos de los defectos de las piezas fabricadas durante el proceso. Una vez más, se observa el gran papel que juega el correcto modelado de la viscosidad del material a inyectar y los beneficios de contar con una herramienta CAE para en control de defectos en la producción de piezas.

Li Yi Min et al. han llevado a cabo investigaciones sobre las propiedades reológicas y mecánicas, entre otras, de distintas mezclas de ceras y polímeros y el acero inoxidable 17-4PH [10]. También determinan que el acero 17-4PH presenta cualidades anticorrosivas muy buenas, así como un



período de corrosión largo, convirtiéndolo en un estupendo candidato para inyecciones de este tipo.

Un completo estudio de los parámetros óptimos para la fabricación de piezas mediante MIM libres de defectos y con unas propiedades mecánicas adecuadas es el que han llevado a cabo Th. Barriere, B. Liu y J.C. Gelin [11]. Este trabajo presta especialmente atención a las fases finales de la inyección: eliminación del ligante y sinterizado [6]. Con la ayuda de un algoritmo creado por ellos mismos, un molde con cinco cavidades para experimentar con distintas materias primas y el análisis con herramientas CAE, han conseguido optimizar las velocidades y presión de llenado dando como resultado piezas con gran exactitud respecto al diseño original.

Más trabajos, como el de C. Binet, D.F. Heaney, R. Spina y L. Tricarico, demuestran la concordancia entre la simulación y los resultados experimentales. Además, insisten, como Berginc et al. [7] y Mohamad et al. [9], en la importancia de focalizar esfuerzos en caracterizar correctamente el material a utilizar en el MIM, además de utilizar los modelos matemáticos adecuados para dicha empresa. Interesante también es la puerta abierta que deja a la investigación y perfeccionamiento de algoritmos genéticos con tal de optimizar el análisis de las simulaciones.

2.3 Metales líquidos

Tras el repaso del estado actual en el que se encuentran los procesos MIM hay que ocupar el caso de la presente tesina, que no pretende utilizar mezclas de ceras con polvo metálico, sino inyectar directamente metal en estado líquido. El comportamiento del metal líquido es totalmente distinto al de las mezclas de los estudios mostrados hasta ahora. Mientras que las materias primas utilizadas en los casos anteriores tienen un comportamiento no newtoniano tal y como se puede observar en la figura 1, los metales se comportan al revés, de manera newtoniana. Se ahondará en las diferencias entre los comportamientos de materiales plásticos, exactamente termoplásticos, y los metales en estado líquido más adelante, en el capítulo 3.

Sabiendo que ahora se trabaja con metales líquidos, es importante profundizar en la viscosidad y comportamiento pVT de los mismos, pues recordemos que se pretende utilizar los modelos matemáticos de *Moldflow* para modelar el comportamiento de los metales.

El estudio de la viscosidad y su relación con la temperatura y el volumen de los metales no es algo realmente nuevo, aunque sí lo son algunas



de las técnicas que se utilizan actualmente para poder realizar las mediciones. Métodos como la levitación electrostática para la medición de propiedades termofísicas son un ejemplo [12].

Hay artículos escritos en la década de los años 70, como el llevado a cabo por los doctores J.H Hildebrand y H. Lamoreaux [13] dónde se estudian la viscosidad y fluidez de distintos metales líquidos, además de la relación entre el volumen y la temperatura del metal según va aumentando éste. Como se puede observar, hay referencias de décadas atrás.

Centrando la investigación en los avances más recientes en el campo se llega a trabajos como el del Dr. Kaptay [14]. En su trabajo de 2004, el Dr. Kaptay realiza un exhaustivo estudio de los distintos modelos que describen la viscosidad de un metal líquido puro. Repasa las ecuaciones de Andrade para el punto de fusión de metales líquidos, las de Hildebrand [15], Cohen y Turnbull [16] entre otros, todo ello con el objetivo de obtener una ecuación que sea capaz de predecir el valor de la viscosidad y su dependencia de la temperatura introduciendo solamente dos valores semi-empíricos. Estos dos valores son prácticamente idénticos en los 15 metales líquidos analizados en el estudio de Kaptay [14, pag.4 Tabla 1]. Este trabajo es especialmente interesante, pues a parte de cumplir con su objetivo, revela la complicada matemática que se esconde detrás de este tipo de pruebas numérico-experimentales.

Qi, Çagin et al. han desarrollado una aproximación para predecir la viscosidad de las aleaciones de oro y cobre [17] gracias a la inclusión de valores de velocidad de cizalla en las ecuaciones de movimiento Hamiltonianas [18]. El estudio cuenta con varias tablas de viscosidad para Cu, Cu₃Au₁, Cu₁Au₁, Cu₁Au₃ y Au con sus respectivas relaciones de temperatura.

Konstantinova y Popel han estudiado la viscosidad de aleaciones de aluminio y cobre y su dependencia de la temperatura [19] mediante el uso de crisoles de BeO en vacío. Interesante es el comportamiento de las aleaciones de Al-Cu con 50% de cobre. Han observado en los análisis experimentales que, cuando se aumenta la temperatura de la aleación hasta los 1000 °C, la recta que representa su viscosidad sufre una deformación que la hace alejarse de la tendencia seguida hasta el momento. Cuando la temperatura alcanza los 1200-1250 °C se vuelve a estabilizar y continúa con la tendencia anterior.

Otras aleaciones, cuya viscosidad ha sido caracterizada mediante el uso de viscosímetros, son las de aluminio y zinc. Nunes, Lourenço, Santos y Nieto de Castro en su trabajo de 2010 [20] demuestran que, en el rango de

temperaturas utilizado, el metal líquido se comporta de manera newtoniana, tal y como se pretende que modele los materiales *Moldflow* en la presente tesina.

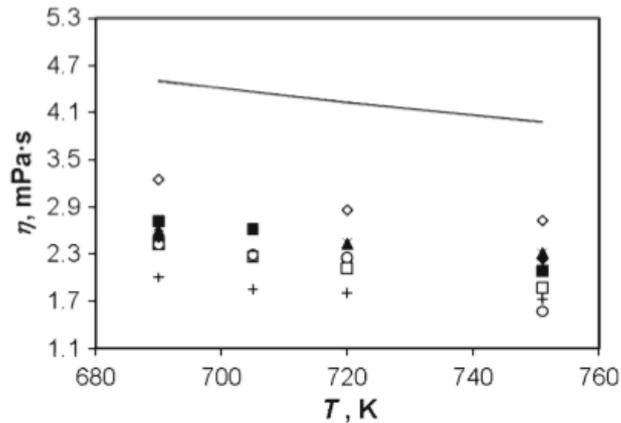


Figura 2.2 Curvas de viscosidad de distintas aleaciones de aluminio y zinc [20, pag.10]

En la Figura 2.2 se puede observar la caracterización de la viscosidad de algunas aleaciones de aluminio y zinc. En el mismo trabajo se estudian además, las variaciones que sufre la viscosidad de estas aleaciones al mezclarlas con otros elementos como plomo y magnesio. Tras las pruebas experimentales concluyen que, en las aleaciones que contienen aluminio, la fluidez del líquido aumenta, así como aumenta su resistencia a la corrosión. En cuanto al impacto en la viscosidad producido por el plomo y el magnesio, se observa que el plomo provoca un descenso de la viscosidad de la aleación mientras que, el magnesio, provoca el efecto contrario. También se ha realizado pruebas de mezclas con manganeso, resultando casi despreciable el impacto de éste en las viscosidades.

Por su parte, Eyvazov, Jabbarova et al. realizan mediciones empíricas para obtener los valores de viscosidad de algunos metales alcalinos como el litio, el rubidio o el sodio entre otros [21]. Comparan los valores obtenidos experimentalmente con los calculados y obtienen un acierto con un 4% de margen de error.

Más estudios, como el de G. Siwec y J. Labaj [22] analizan la viscosidad de aleaciones de cobre y zinc, obteniendo como resultado que, efectivamente, la viscosidad disminuye cuando la temperatura cae. También analizan aleaciones mezcladas con pequeñas dosis de antimonio, observando que la viscosidad de la aleación disminuye cuando se le añade antimonio y selenio y aumenta al introducir azufre.



Una aplicación de los metales líquidos es su uso como refrigerante. En un artículo de este mismo año, P. Popel, S. Strankus et al. [23] utilizan los métodos de atenuación gamma y el de oscilación [12] para medir la densidad y la viscosidad de metales líquidos refrigerantes para uso en reactores nucleares. Los metales analizados han sido el galio, indio, estaño, plomo, bismuto y una aleación de plomo y bismuto, obteniendo unos resultados con una precisión de 0,2 a 0,5% de margen de error.

Como apunte final, es interesante el recorrido histórico que realizan Flemings y Ragone en su trabajo de 2009 [24] del pudelado. En su investigación realizan un viaje desde el siglo XIX hasta la actualidad en el que estudian la técnica y cuenta con un análisis de viscosidad del acero inoxidable y acero de baja aleación. Se observa la dependencia de la viscosidad con la velocidad de cizalla, manteniéndose la viscosidad estable hasta que se alcanza un valor crítico de velocidad de cizalla. Alcanzado ese valor, la viscosidad aumenta de manera abrupta.

Queda patente que la investigación en el campo de los metales líquidos está a la orden del día y que constantemente se busca caracterizar y modelar mejor sus comportamientos para poder predecir fallos en su fabricación o las propiedades mecánicas de los productos que con ellos se fabriquen. Algunos trabajos, como el de Nunes et al. [20] pueden ser especialmente útiles de cara a las futuras simulaciones que se realizarán en *Moldflow*, tanto por lo reciente de la publicación como por los datos de viscosidad y temperaturas de distintos metales líquidos.

2.4 Ecuaciones de estado

Si en el apartado anterior se repasaba la actualidad de los metales líquidos, sus aplicaciones y cómo obtener sus relaciones de viscosidad, densidad, temperatura... en éste se abordarán las ecuaciones que describen estas relaciones y que se usarán para modelarlas en *Moldflow*: el modelo de viscosidad de Cross-WLF y el modelo de comportamiento pvT de Tait modificado.

2.4.1 Modelo de Cross-WLF

Como se ha comentado con anterioridad, Cross-WLF es un modelo que describe la viscosidad de líquidos no newtonianos. Existe también otros modelos, como el de segundo orden, que ha sido utilizado en varios trabajos de los expuestos en el apartado 2.1, como el estudio de Zhen-xing et al. [8] o



Berginc et al. [7]. En estos estudios se ha optado por el modelo de segundo orden ya que Cross-WLF es más adecuado para fluidos con una viscosidad prácticamente constante para valores bajos de velocidad de cizalla mientras que el modelo de segundo orden se comporta mejor con fluidos que tienen una viscosidad más variable.

En el caso de M.A Peydro, F. Parres et al. sí que han utilizado el modelo de Cross-WLF para su estudio del comportamiento reológico durante el proceso de recuperación de poliestireno de alto impacto [25]. En este trabajo de investigación del departamento de ingeniería de mecánica y de materiales del campus de Alcoy de la UPV se ha caracterizado la resistencia mecánica y la viscosidad del poliestireno reprocesado, resultando que la resistencia a la tracción aumenta un 15% y el alargamiento de rotura un 18%, mientras que la viscosidad disminuye en cada ciclo de reprocesado debido a la reducción de peso molecular causado por la degradación del material al reprocesarse continuamente.

Muy interesante es también el estudio que lleva a cabo Miguel Reig en su tesis doctoral [26] donde realiza un completo análisis de la modelización del comportamiento de los materiales reciclados. En su trabajo se encuentran descritos varios modelos de evaluación del comportamiento reológico del material: modelo exponencial, modelo de Cross-exponencial, modelo de Carreau-exponencial, modelo de Cross-WLF y modelo de Carreau-WLF [26, cap. 2].

La tesis doctoral deriva en un artículo [27] en el que se repasan distintos estudios realizados para determinar las condiciones óptimas del proceso de inyección y se desarrolla, mediante pruebas de laboratorio, un modelo de comportamiento reológico de las diferentes mezclas utilizadas cuyos datos han sido utilizados para efectuar simulaciones de inyección.

Shiu-Wu Chau propone un modelo matemático capaz de describir el comportamiento del gas en los procesos GAIM en su artículo de 2008. En este estudio [28] se utiliza el modelo de Cross-WLF para describir el comportamiento del material cuando se encuentra en estado fundido, obteniendo como resultado unas tablas con las constantes que utiliza el modelo para distintos polímeros.

Wan Aizan, Lee Tin y Abdul razak se apoyan en *Moldflow* para realizar simulaciones de inyección de *composites* de fibras naturales para la fabricación de un marco de una puerta [29]. En su investigación, usan el modelo de Cross-WLF que utiliza el programa para el estudio reológico de la viscosidad de la madera blanda, pues aun no se tienen datos del *composite* de cáscara de arroz que se quiere utilizar para fabricar el marco para realizar



simulaciones. Concluyen que si bien los resultados permiten la fabricación de marcos con *composites* naturales, los datos obtenidos son del material más parecido al de cáscara de arroz y, por tanto, hay que realizar más estudios en el campo para poder aumentar la precisión del análisis del producto.

Yong Kang et al. utilizan el modelo de Cross-WLF para modelar la viscosidad del polímero que han usado en su estudio de los defectos de fabricación en moldeo por inyección [30]. Se centran en las marcas en forma de onda que, durante la etapa de llenado, puede dejar el polímero inyectado. Para ello se han valido de una serie de análisis por elementos finitos y de pruebas experimentales, comprobando que factores como el comportamiento viscoelástico del polímero y el efecto de la viscosidad extensional tienen un impacto sobre las marcas en forma de onda del producto final.

Por su parte, T. Boronat también hace uso del modelo de Cross-WLF en su tesis doctoral [31] donde estudia inyecciones de materiales termoplásticos reciclados. En su trabajo determina los parámetros del modelo para polímeros tras ser inyectados y para una mezclas miscibles.

Como se puede observar, en las investigaciones presentadas, el modelo ha sido utilizado para describir el comportamiento de polímeros y *composites*. Es objetivo de esta tesina evaluar como se comportaría un metal e intentar modelizar su comportamiento mediante el modelo de Cross-WLF, sentando unas bases y proporcionando datos sobre el valor que deberían tomar sus constantes si el resultado de la evaluación fuese positivo.

2.4.2 Modelo de Tait modificado

El modelo anterior se encargaba de describir la viscosidad de un material. El modelo de Tait modificado modeliza el comportamiento p_vT del material.

Se puede encontrar una serie de curvas p_vT de ABS/PC modelizadas mediante el modelo de Tait modificado en la tesis doctoral de Miguel Reig [26]. En su estudio determina las constantes del modelo en base a resultados obtenidos anteriormente con el modelo de Cross-WLF y aplicando criterios de minimización de la función Chi Cuadrado.

Hassan, Regnier et al. utilizan el modelo de Tait para determinar el comportamiento de compresibilidad del polímero inyectado en su estudio del sistema de refrigeración y su impacto sobre la contracción y temperatura de la pieza [32]. Para el estudio se ha simulado una serie de inyecciones en



una pieza cuadrada obteniendo mayores rangos de contracciones en el exterior de la pieza que en el interior. También comprueban que la posición de los canales de refrigeración tiene un gran impacto sobre la pieza final, viéndose mejorado el proceso de refrigeración cuando estos canales se encuentran próximos a la pieza. Como análisis final, constatan que una refrigeración mejor no significa una distribución óptima de las contracciones de la pieza. Hay que optimizar el sistema para obtener buenos resultados tanto en la contracción como en refrigeración.

Por último, en el desarrollo de un sistema para medir las densidades de líquidos comprimidos en un rango de temperaturas entre 293 y 373 K y con presiones de hasta 70 MPa, Jianguo, Jiangtao et al. [33] se han servido del modelo de Tait para corroborar que los resultados experimentales resultantes de la medición de la densidad del éter etílico concuerdan con la teoría. Tras obtener los datos del experimento, observan que la desviación teórica respecto a los datos empíricos es de un 0,014%. El estudio amplía los datos de densidad del éter etílico que había hasta el momento, pasando de los 43 MPa a los 70 MPa estudiados en el trabajo.

Tras el repaso del estado actual en el que se encuentran las investigaciones en el contexto en el que se sitúa la presente tesina, se está en condiciones de avanzar al siguiente capítulo. En él se hará una comparativa entre los materiales termoplásticos y los metales para comprender sus diferencias y repasar características importantes de cara a las simulaciones futuras.



3. Comparativa materiales termoplásticos-metales

En este capítulo se hablará los materiales termoplásticos y metálicos y de sus propiedades más interesantes teniendo en cuenta los objetivos de la presente tesina. Además se abordarán las diferencias que existen entre ambos y como afectan las mismas a las simulaciones en *Moldflow*.

Antes de todo, es necesario introducir dos conceptos sobre los fluidos. Entre las distintas formas de clasificarlos, se puede hacer según éstos sean newtonianos o no newtonianos. Sus características son explicadas a continuación.

3.1 Fluidos newtonianos y no newtonianos

Como se ha subrayado en el párrafo anterior, una manera de clasificar a los fluidos según sus diferentes características es en newtonianos y no newtonianos. Otra forma de hacerlo sería clasificándolos como líquidos o gaseosos. Se introducirá primero los newtonianos para proseguir con los no newtonianos.

3.1.1 Fluidos newtonianos

Se conoce como fluido newtoniano aquel que posee una viscosidad¹ constante en el tiempo lo que significa que es indiferente el esfuerzo que se aplique o la velocidad a la que se mueva, siempre se mantendrá de esta forma. Este comportamiento se puede caracterizar mediante la Ley de Newton para la viscosidad.

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

Esta ecuación relaciona la viscosidad con la velocidad del fluido y la tensión cortante.

El agua es un ejemplo de fluido newtoniano. Los metales líquidos tienen un comportamiento muy similar al de este tipo de fluidos, por eso se simplifica su comportamiento analizándolos como si fueran tales.

Que los metales líquidos se comporten prácticamente como un fluido newtoniano conlleva una serie de problemas a la hora de simular su

¹ De la viscosidad se habla con mayor detalle en el apartado 3.2.2



inyección con *Moldflow*, de ahí los esfuerzos de la presente tesina en adaptar su comportamiento al software de simulación.

3.1.2 *Fluidos no newtonianos*

Un fluido no newtoniano es aquel que, a diferencia de los newtonianos, no tiene un valor constante de viscosidad, sino que ésta varía en función de la temperatura y las fuerzas constantes. En el caso de un fluido no newtoniano pseudoplástico, la viscosidad disminuye rápidamente según va aumentando la cizalladura.

Este tipo de sustancias se pueden clasificar como:

- Fluidos no newtonianos independientes del tiempo
- Fluidos no newtonianos dependientes del tiempo
- Fluidos visco-elásticos

En el caso de los polímeros termoplásticos, estos estarían en el primer grupo: fluidos no newtonianos independientes del tiempo, los cuales se caracterizan porque las tensiones tangenciales dependen exclusivamente de la velocidad de cizalla y no del tiempo. Dentro de ese grupo se encontrarían también los fluidos dilatantes, cuya viscosidad aumenta bajo condiciones de alta velocidad de cizalla.

Hay distintos modelos matemáticos capaces de caracterizar el comportamiento viscoso de estos fluidos como el modelo de Cross-exponencial, Carreau-exponencial o Cross-WLF, siendo este último caso de análisis en el siguiente capítulo ya que es el que utiliza *Moldflow* para interpretar la viscosidad de los fluidos.

En el caso de los no newtonianos dependientes del tiempo, en algunos casos, se puede aproximar su comportamiento como si fueran independientes con tal de facilitar los cálculos.

Algunos ejemplos que demuestran la importancia del estudio del comportamiento no newtoniano, son las investigaciones que se están llevando a cabo con este tipo de fluidos para la fabricación de chalecos antibalas [34]. Se aprovecha la naturaleza de los fluidos dilatantes ya que este tipo de materiales absorben la energía de un impacto a alta velocidad y permanecen flexibles cuando se produce a baja velocidad.



Otras sustancias no newtonianas son las pinturas, que cuando se aplican mediante un pincel y se ejerce una fuerza éstas fluyen mientras que, cuando se ha dejado de ejercerla, la viscosidad aumenta impidiendo el goteo.

3.2 Termoplásticos

Los termoplásticos son un tipo de plástico. Los plásticos son materiales sintéticos de la familia de los polímeros. Cuentan con una estructura macromolecular y pueden ser moldeados mediante calor, presión o una mezcla de ambos. Pertenecen además al grupo de fluidos no newtonianos debido al cambio de viscosidad que sufren al variar su temperatura.

Un termoplástico a temperatura ambiente tiene un comportamiento plástico y es deformable, a altas temperaturas se convierte en un material viscoso líquido y cuando se enfría se endurece. Junto a los termoestables son las dos maneras de clasificar un polímero según su comportamiento a altas temperaturas. La gran diferencia es que los primeros pueden fundirse y moldear un número de ciclos, alterando sus propiedades físicas cada vez, mientras que los últimos, una vez han solidificado, se convierten en materiales rígidos incapaces de fundirse de nuevo. Precisamente porque sufren alteraciones de sus propiedades tras cada ciclo, este tipo de materiales no pueden ser usados como elementos estructurales.

3.2.1 Estructura macromolecular

Las macromoléculas son moléculas que cuentan con una gran masa molecular. Éstas son el resultado de una unión de otras más pequeñas denominadas monómeros que, al juntarse, forman los polímeros. Hay otras macromoléculas a parte de los plásticos como pueden ser las proteínas o el ADN. En estos casos se estaría hablando de polímeros naturales mientras que, en el caso de los polímeros termoplásticos, se hablaría de polímeros sintéticos.

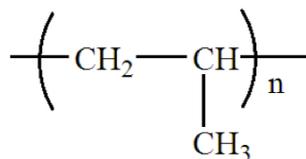


Figura 3.1 Estructura molecular del polipropileno.



Cuando se estudia el comportamiento de los termoplásticos, se observa que a medida que se aumenta la temperatura estos se vuelven cada vez más líquidos debido a que la fuerza entre los enlaces se debilita al aumentar la movilidad molecular. Este aumento de movilidad facilita el movimiento de las cadenas que se reorientan con menor esfuerzo al aplicar una fuerza. Según se realice el proceso de solidificación posterior del termoplástico y la forma que tome la molécula se obtiene dos tipos de polímeros termoplásticos: amorfos y cristalinos.

Termoplásticos amorfos

Los termoplásticos amorfos cuentan con una organización macromolecular desordenada, su estructura no está bien definida. Precisamente esta ubicación aleatoria de las cadenas poliméricas determina el color característico de este tipo de polímeros. Como la región ordenada más larga es del orden de 0,154 nm, al ser ese tamaño menor que el de la longitud de onda de cualquier color visible, los termoplásticos amorfos suelen ser de color transparente al menos que se les añada algún tipo de pigmentación.

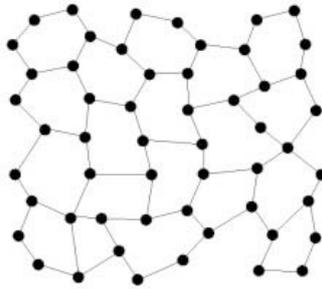


Figura 3.2 Ejemplo de estructura amorfa: las moléculas están desordenadas.

Debido al desorden estructural presentan una resistencia mecánica media y poca resistencia a la fatiga.

Algunos ejemplos de termoplásticos amorfos son: el policarbonato, el polimetilmetacrilato o el policloruro de vinilo, más conocido como PVC.

Entre los usos más comunes se pueden encontrar en artículos transparentes, aislamiento térmico, marcos de ventanas, claraboyas o lentes.

Termoplásticos cristalinos

Al contrario que los amorfos, la estructura molecular de los termoplásticos cristalinos es ordenada y con una estructura bien definida. Su nombre proviene del comportamiento de las macromoléculas, que al alinearse se pliegan sobre si mismas formando pequeñas estructuras cristalinas. El tamaño de estas estructuras es mayor que el de la luz visible, por tanto los termoplásticos cristalinos pueden aparecer de forma opaca o translúcida.

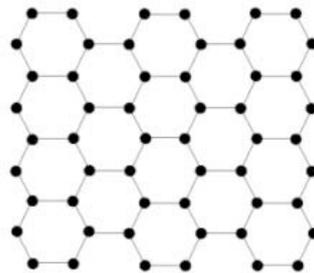


Figura 3.3 Ejemplo de estructura cristalina: las moléculas están ordenadas.

A diferencia del tipo anterior, los cristalinos cuentan con mayor resistencia mecánica, son más rígidos a la tracción y poseen mayor resistencia a la fluencia y al calor.

Algunos ejemplos de termoplásticos cristalinos son: el polietileno, el poliacetal o el polipropileno.

Se pueden encontrar en botellas, bolsas del mercado, fibras reforzadas o aplicaciones eléctricas.

Como se puede comprobar, los distintos materiales amorfos y cristalinos cuentan con una serie de propiedades mecánicas propias y diferentes unas de las otras. Gracias al conocimiento de las mismas han podido aparecer aplicaciones CAE como *Moldflow*, capaces de simular su comportamiento bajo distintas condiciones.

3.2.2 Comportamiento reológico

La reología es una parte de la física que se encarga del estudio de la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales fluidos. Uno de los objetivos de ésta es encontrar ecuaciones capaces de describir el comportamiento de los materiales. Dos de esas ecuaciones, el modelo de

viscosidad de Cross-WLF y el comportamiento pvT de Tait, son las que estudia la presente tesina.

Para obtener las ecuaciones, la reología utiliza una serie de aparatos llamados reómetros para medir las propiedades mecánicas de los materiales. Estos utensilios deforman y miden esfuerzos, siempre de manera controlada, y pueden medir propiedades como: viscosidad, tixotropicidad, coeficiente de expansión térmica o relaciones entre presión, temperatura y volumen. Como ya se ha explicado, a efectos de esta tesina, las propiedades que interesa estudiar son la viscosidad y el comportamiento pvT.

Viscosidad

La viscosidad es la resistencia que opone un fluido a la fluencia, es decir, la resistencia a que las láminas del fluido deslicen entre sus inmediatas. Esta oposición aparece cuando se aplica una fuerza tangencial. La viscosidad solamente se presenta cuando el líquido se encuentra en movimiento ya que, en caso de estar quieto, la superficie aparece plana sin ningún tipo de carga tangencial.

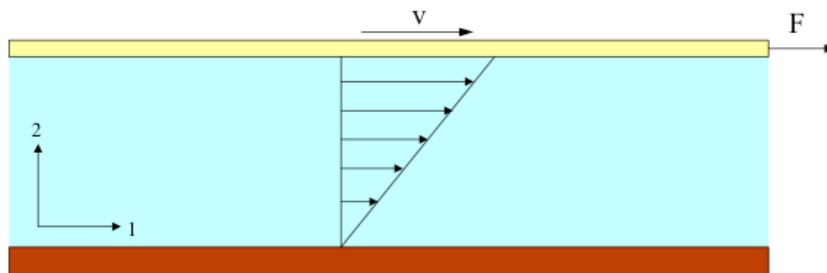


Figura 3.4 Esquema de un líquido fluyendo a través de un conducto.

En la figura 3.4 se puede apreciar como las capas superiores, fluyen con facilidad mientras que las inferiores lo hacen más lentamente por el efecto de la fuerza tangencial comentado anteriormente.

Matemáticamente, la viscosidad se puede definir de la siguiente forma:

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} \quad (2)$$

La ecuación (2) relaciona viscosidad con esfuerzo de cizalla y velocidad de deformación.

Los líquidos viscosos se pueden comportar de maneras distintas según su estructura macromolecular. En el caso de los polímeros termoplásticos, se hablaría de un comportamiento pseudoplástico.

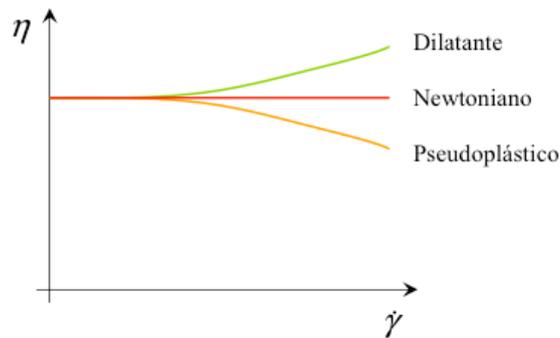


Figura 3.5 Gráfico viscosidad-velocidad de cizalla.

En la figura siguiente se puede apreciar con mayor detalle la organización macromolecular de los polímeros según disminuye la viscosidad y aumenta la velocidad de cizalla.

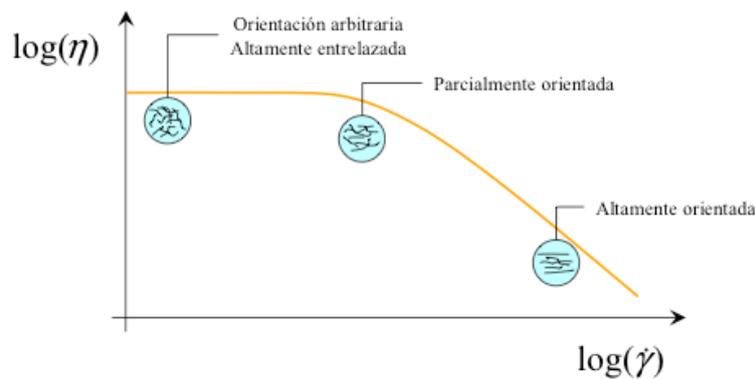


Figura 3.6 Orientación de las macromoléculas de un polímero en estado líquido en relación a su viscosidad y velocidad de cizalla.

La viscosidad también está directamente relacionada con otras magnitudes como la temperatura. Cuanto más baja sea ésta, menor será la viscosidad del polímero.

Por último, apuntar que la viscosidad posee una gran influencia sobre los esfuerzos necesarios para mover los polímeros en estado fluido, por eso se estudia los valores para determinar la viabilidad de desplazamiento del polímero a través de distintas geometrías o conductos. Como se ha



comentado con anterioridad, para esta tarea hay que utilizar reómetros. En este caso se deberían usar reómetros rotativos, de extrusión y capilares para medir la viscosidad a bajas, medias y altas velocidades respectivamente.

Comportamiento $p-v-T$

Existe una estrecha relación entre la presión, el volumen y la temperatura a la que se ve sometido un fluido. El conocimiento de este comportamiento del material es necesario para el análisis del moldeo de los materiales ya que los efectos de la compresibilidad y de la contracción del material son significativos.

En el caso de los polímeros, al ser estos compresibles, el efecto de la presión sobre el volumen y la temperatura es evidente, tal y como se puede observar en la figura de ejemplo siguiente:

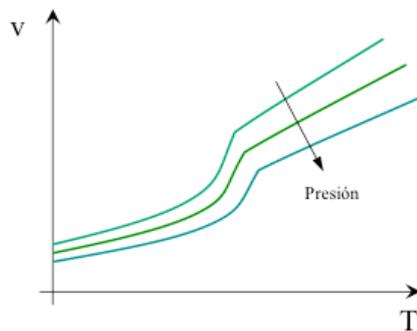


Figura 3.7 Ejemplo de gráfica de comportamiento $p-v-T$

Evaluar el comportamiento $p-v-T$ de un material es problemático debido a la degradación del propio material, o el efecto del grado de cristalinidad asociado a las velocidades de enfriamiento entre otros. Precisamente por eso se ha propuesto una serie de modelos matemáticos capaces de reflejar dicho comportamiento como las de Soave-Redlich-Kwong, Peng-Robinson o, en el caso de los polímeros, Tait modificado. Éste es uno de los modelos más utilizados ya que representa con suficiente fiabilidad el comportamiento real de los polímeros tanto amorfos como cristalinos.

3.2.3 Propiedades térmicas

Existen dos temperaturas características de los termoplásticos que marcan los límites del comportamiento del material: la temperatura de solidificación y la temperatura de transición vítrea.

Cuando el material se encuentra en estado líquido, tras superar la temperatura de fusión, su estructura es completamente amorfa. No es hasta que adquiere comportamiento rígido, por debajo de la temperatura de solidificación, que la ordenación macromolecular puede continuar siendo amorfa u ordenarse de manera cristalina, dando como resultado los dos tipos de termoplásticos presentados en el apartado anterior.

En el caso de los termoplásticos amorfos, las temperaturas de solidificación y transición vítrea son coincidentes, por lo que el comportamiento duro-elástico del material es más cuanto menor sea la temperatura.

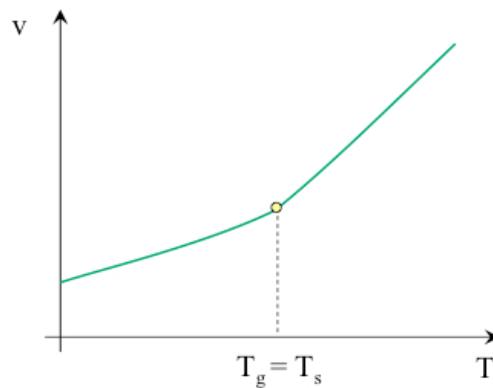


Figura 3.8 Gráfica volumen-temperatura de un material amorfo.

Distinto es el caso de los cristalinos, en los que la temperatura de transición vítrea se encuentra por debajo de la de solidificación con lo que el material presenta un comportamiento termoelástico/duro-elástico dentro del intervalo de dichas temperaturas. Una vez la temperatura se encuentre por debajo de la temperatura de transición vítrea, la fragilidad del material se va acusando según disminuye la temperatura.

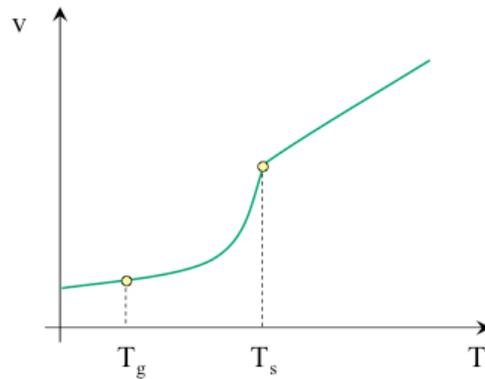


Figura 3.9 Gráfica volumen-temperatura de un material cristalino.

Hasta el momento, a modo de resumen, se ha hablado de los termoplásticos, un tipo de polímero con comportamiento pseudoplástico cuando se encuentra en estado fluido. También se ha analizado tanto su estructura macromolecular como sus propiedades térmicas, de viscosidad y comportamiento pvT.

A continuación se analizarán los metales para, por último, comparar sus propiedades más interesantes teniendo siempre en cuenta los objetivos de la tesina.

3.3 Metales

Los metales son un tipo de material que se puede describir químicamente como elementos que forman cationes fácilmente y que cuenta con enlaces metálicos. Los metales cuentan con propiedades conductoras, tanto de calor como eléctricas muy buenas, además de gran ductilidad y densidad. A temperatura ambiente se encuentran en estado sólido, exceptuando el mercurio que se encuentra en estado líquido, y a altas temperaturas se derriten pudiendo fluir como un líquido viscoso. Su estructura molecular en estado sólido es cristalina, es decir, sus moléculas están ordenadas. Cuando se habla de metales, engloba tanto a los elementos puros como a las aleaciones con propiedades metálicas.

Una aleación es una mezcla homogénea de varios metales o de metales con elementos no metálicos. Cuentan con unas propiedades conductoras inferiores a la de los metales puros y sus propiedades mecánicas pueden llegar a ser muy diferentes de las de sus componentes por separado. Algunas aleaciones ya han sido presentadas en el estado del arte como las de oro y cobre [17] o las de cobre y zinc [22].

Como en el caso de los termoplásticos, a continuación se hará un breve análisis de la estructura de los metales.

3.3.1 Estructura de los metales

Los metales están enlazados metálicamente. Los átomos del metal cuentan con con electrones débilmente ligados a sus núcleos pudiéndose mover de un átomo a otro y, además, estos átomos se agrupan muy cerca unos de otros formando estructuras muy compactas. Esta estructura explica algunas de las propiedades de los metales, como la gran conductividad eléctrica y térmica y su fuerza. Los electrones deslocalizados forman una especie de *mar de electrones* dotando a los metales de maleabilidad y ductilidad al permitir el movimiento de átomos dentro de este *mar*.

Como se ha explicado, los átomos de los metales se agrupan entre ellos formando estructuras. Existen tres tipos:

- Estructura cúbica centrada en el cuerpo o BCC (*Body-centered cubic*)
- Estructura cúbica centrada en las caras o FCC (*Face-centered cubic*)
- Estructura hexagonal compacta o HCP (*Hexagonal close packed*)

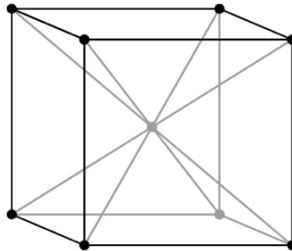


Figura 3.10 Ejemplo de estructura metálica: estructura BCC

En el caso de los metales fundidos, situación relevante para la presente tesina, el enlace metálico se conserva aunque su estructura ordenada se ha roto. Por lo tanto, las propiedades del material debidas a este enlace siguen presentes en estado líquido.

3.3.2 Comportamiento reológico

Viscosidad

En el punto 3.2.2 se ha hablado de la viscosidad de los materiales termoplásticos. Como se puede observar en la Figura 3.6 la viscosidad disminuye drásticamente al alcanzar valores altos de velocidad de cizalla. En el caso de los metales, en estado líquido, tienen un comportamiento prácticamente newtoniano. Ello implica que la viscosidad de este tipo de material líquido se mantiene casi invariable según aumente la velocidad de cizalla.

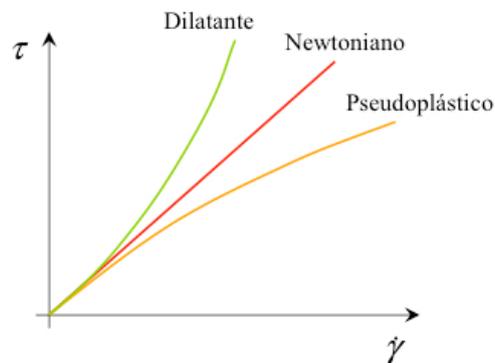


Figura 3.11 Gráfico esfuerzo cortante-velocidad de deformación

En la Figura 3.11 se observa la relación entre la velocidad de deformación (cizalla) y el esfuerzo cortante. Como la viscosidad sigue la relación (2) que recordemos es:

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} \quad (2)$$

o

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (3)$$

al ser lineal la dependencia esfuerzo-velocidad, también lo será la relación viscosidad-velocidad, tal y como se muestra en la Figura 3.12. La viscosidad varía muy poco según aumenta la velocidad de cizalla.

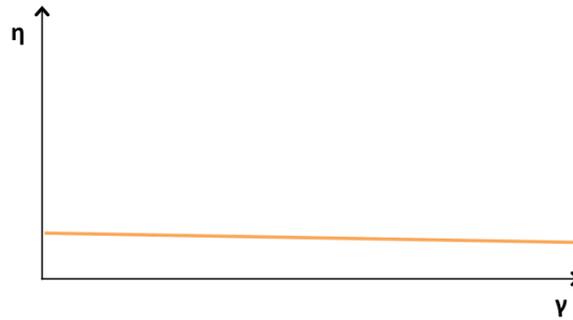


Figura 3.12 Gráfico viscosidad-velocidad de cizalla del metal

Es interesante también comprobar como evoluciona la viscosidad de los metales según varía la temperatura:

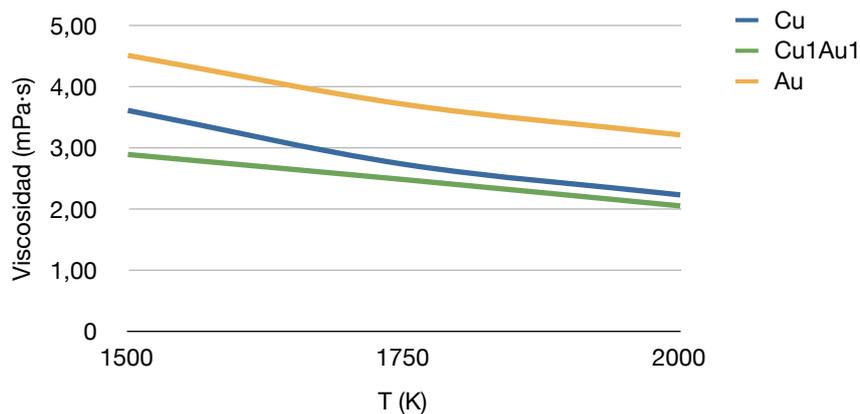


Figura 3.12 Gráfica de viscosidad-temperatura de cobre, oro y una aleación de cobre y oro (Cu_1Au_1)

Se puede observar como la viscosidad disminuye prácticamente linealmente según se ve aumentada la temperatura a la que están sometidos los materiales.

Comportamiento $p\nu T$

Una de las características de los metales es su no compresibilidad. Esta propiedad se debe a que las estructuras de átomos en los metales están muy cerca unas de otras, tal y como se ha explicado en el apartado 3.3.1. Las implicaciones en el comportamiento $p\nu T$ son evidentes. Si un metal no se puede comprimir, significa que la relación de volumen y temperatura no dependen de la variable de presión. En la figura siguiente se muestra el



cambio entre estado sólido y el líquido y como están relacionados la temperatura y el volumen.

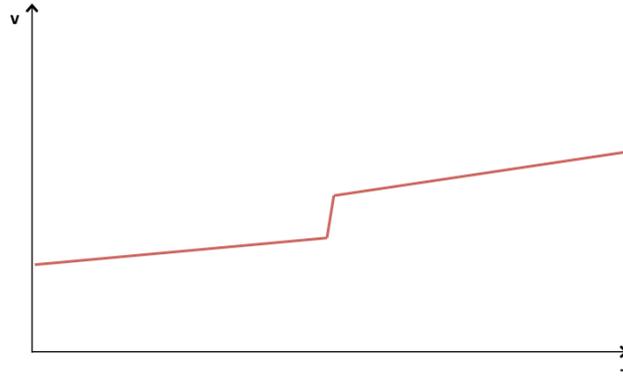


Figura 3.13 Gráfica volumen-temperatura del metal

Es interesante observar como esta propiedad, junto a la viscosidad constante del punto anterior, afecta a la inyección de metales líquidos. Al no poder ni comprimir ni hacer que el metal fluya mejor al aumentar la velocidad, las inyecciones de este tipo de materiales se ven comprometidas por la temperatura inicial a la que se puede inyectar el metal y el tiempo que tarda éste en enfriarse mientras está siendo inyectado.

3.3.3 Propiedades térmicas

A la hora de hablar de las propiedades térmicas de los metales se hará referencia a tres características típicas: conductividad térmica, expansión térmica y calor específico.

Conductividad térmica

Es la capacidad de un material para conducir el calor y en el caso particular de los metales es elevada. Físicamente, el fenómeno de la conductividad térmica se explica como un incremento de la energía cinética de las moléculas debido al calentamiento de la materia y que se transmite a otras moléculas adyacentes u otros materiales con los que se esté en contacto.

Este fenómeno es importante tenerlo en cuenta a la hora de realizar inyecciones, pues el metal líquido está en contacto con otros materiales y



puede transmitir el calor rápidamente disminuyendo así su temperatura y enfriándose, pudiendo llegar a solidificar antes de lo que se deseara.

<i>Material</i>	<i>Conductividad térmica (W/K·m)</i>
Aluminio	209,3
Bronce	151
Oro	308,2
Zinc	123

Tabla 3.1 Tabla con valores de conductividad térmica de algunos metales.

Como último apunte, la conductividad térmica es una magnitud intensiva, lo que quiere decir que tendrá siempre el mismo valor, dando igual la cantidad de materia, en el caso de estudio metal, o tamaño.

Expansión térmica

Cuando se habla de expansión térmica, nos referimos a la capacidad que tiene el material de expandir su volumen según aumenta la temperatura a la que se le somete.

Hay que distinguir entre la expansión cuando el material está en estado sólido o cuando éste se encuentra en estado líquido. Cuando un cuerpo se encuentra en estado sólido, la dilatación altera las dimensiones lineales del mismo, mientras que en los líquidos se produce una alteración de su volumen. Un ejemplo común de este fenómeno se encuentra en las vías del tren que en verano se dilatan y en invierno se contraen.

Calor específico

Se conoce como calor específico a la cantidad de energía calorífica que se le ha de administrar a un sistema para aumentar su temperatura una unidad. Conocer el valor de esta propiedad de la materia es necesario a la hora de inyectar aleaciones metálicas pues cuanto mayor sea el calor específico del material mayor será la energía calorífica que hay que administrarle al sistema para alcanzar altas temperaturas y, por tanto, una correcta elección del material inyectable puede significar un ahorro cuantioso que repercutirá sin dudas en el valor del producto final.

3.4 Comparativa entre materiales

A continuación se procederá a mostrar las principales diferencias entre los dos tipos de materiales estudiados hasta ahora.

Viscosidad

Una de las principales diferencias entre los termoplásticos y los metales es su comportamiento viscoso. Como ya se ha apuntado, los termoplásticos tienen un comportamiento no newtoniano pseudoplástico mientras que los metales se comportan prácticamente como un fluido newtoniano cuando se encuentran en estado líquido. Esto significa que la viscosidad de los primeros varía con el tiempo mientras que la de los segundos se mantiene siempre constante.

Además, los valores de viscosidad de los termoplásticos es de varios miles de Pa·s mientras que los metales líquidos son radicalmente inferiores, del orden de los mPa·s

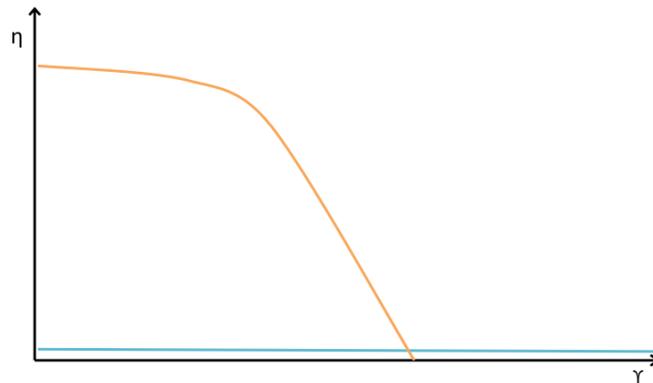


Figura 3.14 Gráfica comparativa entre la viscosidad de los termoplásticos (naranja) y la de los metales (turquesa)

Estructura

La forma en que están formados los materiales es completamente distinta. Mientras los termoplásticos están compuestos de macromoléculas ordenadas, los metales se componen de átomos enlazados metálicamente.

Esta diferencia estructural afecta directamente a las propiedades mecánicas de los materiales. Así un plástico presenta una resistencia

mecánica menor a la del metal. También afecta a la transmisión de calor y de corriente eléctrica, siendo superior en los metales.

Comportamiento p vT

Otra diferencia la encontramos en las relaciones de presión volumen y temperatura.

Por un lado, si se comparan las gráficas de los puntos anteriores, se observa como los cambios de volumen respecto a la temperatura se producen de formas distintas en los termoplásticos que en los metales.

Por otra parte, se observan diferencias en su dependencia de la presión. Los materiales termoplásticos sufren un cambio de volumen cuando la presión aumenta o disminuye. Este cambio en los metales no se produce pues éstos son independientes de la presión que se les aplique.

Se pueden resumir algunas de sus diferencias características en la siguiente tabla:

<i>Termoplásticos</i>	<i>Metales</i>
Fluido no newtoniano	Fluido newtoniano
Viscosidad alta	Viscosidad baja
Conductividad térmica baja	Conductividad térmica alta
Estructura macromolecular	Estructura atómica
Resistencia mecánica inferior a la de los metales	Resistencia mecánica alta
Resistencia a la conducción de electricidad	Material altamente conductor

Tabla 3.2 Diferencias entre termoplásticos y metales

En el siguiente capítulo se analizarán las ecuaciones que utiliza *Moldflow* para modelar los comportamientos de viscosidad y p vT. El estudio de los modelos matemáticos permitirá adaptar el programa a los metales y comprobar así si los resultados se adaptan a la realidad.



4. Modelos matemáticos

Como se ha ido comentando a lo largo del documento, se hace necesario adaptar al metal líquido los modelos matemáticos que utiliza *Moldflow* para modelar el comportamiento de los termoplásticos. Los modelos son ya conocidos pues han sido introducidos en capítulos anteriores. Se trata del modelo de Cross-WLF y de Tait modificado.

4.1 Modelo de Cross-WLF

El modelo matemático de Cross-WLF es una aproximación numérica del comportamiento de la viscosidad de los materiales pseudoplásticos. Es uno de los tres modelos que *Moldflow* maneja. Se utilizará porque los resultados que se obtienen tanto en las condiciones de llenado de los moldes como las de compactación son altamente fiables.

La expresión matemática del modelo es la siguiente:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (4)$$

Donde:

η_0 : Viscosidad del material en condiciones de cizalla nula.

τ^* : Tensión de cizalla a partir de la cual se produce el comportamiento pseudoplástico del material.

$\dot{\gamma}$: Velocidad de cizalla asociada a la tensión τ^* .

$1-n$: Pendiente del comportamiento pseudoplástico del material.

Además de la expresión anterior, también hay que atender al modelo de Williams-Landel-Ferry para el cálculo de la viscosidad en condiciones de cizalla nula:

$$\eta_0 = D_1 \cdot e^{A_1 \cdot \left(\frac{(T-\tilde{T})}{A_2 + (T-\tilde{T})} \right)} \quad (5)$$

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 \cdot p \quad (6)$$



$$\tilde{T} = D_2 + D_3 \cdot p \quad (7)$$

Donde:

D₁: Constante que indica la viscosidad del material en condiciones de cizalla nula, temperatura de transición del material y presión atmosférica.

D₂: Constante que indica la temperatura de transición del material.

D₃: Constante que relaciona la variación de temperatura con la presión.

\tilde{T} : Temperatura de transición del material.

A₁ y \tilde{A}_2 : Constantes del modelo.

4.1.1 Problema: Cross-WLF para metales líquidos

El modelo de Cross-WLF es altamente eficaz para comportamientos pseudoplásticos, pero el metal líquido se comporta de una forma totalmente distinta como ha quedado patente en los capítulos anteriores.

El problema a analizar es el siguiente: El metal, al ser un material prácticamente newtoniano, no sufre unas variaciones de viscosidad como las que describe el modelo de Cross-WLF. Por ello, se desea alterar las variables del modelo de tal forma que se pueda obtener:

$$\eta \approx \eta_0 \quad (8)$$

Para conseguirlo han de resolverse algunas cuestiones.

Por un lado, existe una relación exponencial entre la viscosidad η_0 y los cambios de temperatura que se producen en el material tal y como se puede comprobar observando la relación (5). El metal se comporta de manera newtoniana por tanto hay que arreglar esta dependencia de una constante exponencial.

Para ello se pueden tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Existe la necesidad de adaptar la relación (5) al caso de un metal líquido. Como este tipo de materiales se caracterizan por sufrir



variaciones de viscosidad del orden de décimas de $\text{mPa}\cdot\text{s}^2$ según aumenta la temperatura a la que se les somete se puede proceder:

$A_1=0$; al no haber cambios de viscosidad se anula la exponencial.

D_1 =viscosidad del metal líquido; se considera la viscosidad del metal como la viscosidad en condiciones de cizalladura nula.

De esta forma la relación (5) se resolvería así:

$$\eta_0 = D_1 \cdot e^{A_1 \left(\frac{(T-\tilde{T})}{A_2+(T-\tilde{T})} \right)}$$

$$\eta_0 = D_1 \cdot e^0$$

$$\eta_0 = D_1$$

- Aun y “eliminando” la exponencial, a *Moldflow* hay que introducirle igualmente los valores de temperatura. Es por eso, que la relación (7) se puede resolver considerando:

D_2 =temperatura a la que el metal funde; representa la transición entre el estado sólido y el líquido.

$D_3=0$; al tratarse de metal líquido, la dependencia entre presión y temperatura es prácticamente nula.

Así pues:

$$\tilde{T} = D_2 + D_3 \cdot p$$

$$\tilde{T} = D_2 + 0 \cdot p$$

$$\tilde{T} = D_2$$

En cuanto a la ecuación (6), el valor que tome la variable A_2 en el modelo no es determinante.

De esta forma se ha solucionado una parte del problema al utilizar una modelización de un comportamiento pseudoplástico en fluidos newtonianos. El siguiente problema que aparece concierne a la expresión (4).

² Podría llegar a algo más de $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, pero sería igualmente válida la simplificación que se va a realizar pues estos son valores muy pequeños.

Como se puede comprobar, para obtener la aproximación (8) hay que manipular (4) de tal forma que el denominador tome un valor muy cercano a 1:

$$1 + \left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n} \approx 1$$

por tanto:

$$\left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n} \approx 0 \quad (9)$$

Aparece esta vez un problema más complicado que el anterior.

Si se vuelve a analizar la Figura 3.14 del capítulo anterior:

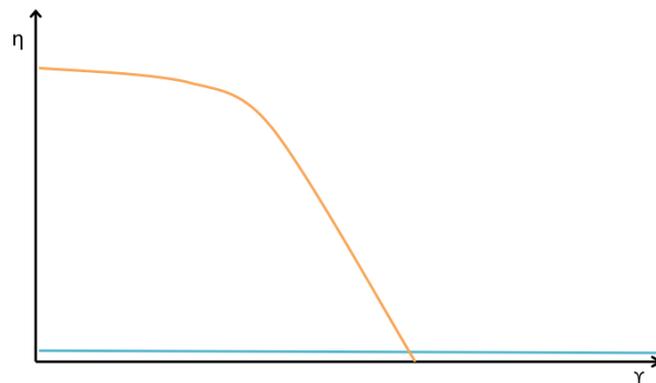


Figura 3.14

La pendiente que se observa en el material con comportamiento pseudoplástico (color naranja) queda descrita por la variable $1-n$ de la ecuación (4). Así, en un termoplástico se pueden encontrar valores de n en intervalos de $0,3 \div 0,4$ mientras que, en los metales líquidos, n puede tomar valores de $0,7 \div 0,9$.

Las únicas maneras que existen de hacer que se cumpla (9) es, o bien, *a)* que τ^* tome valores lo suficientemente altos como para que la relación se acerque lo máximo posible a valores cercanos a 0 anulando el efecto de n o, *b)* que con valores moderados tanto de τ^* como de $\dot{\gamma}$ se altere el valor de n en un rango de valores pequeños de tal forma que $1-n \approx 1$. En ambos casos hay que tomar en cuenta ciertos aspectos:



Caso a)

Para este caso se necesitan valores de tensión de cizalla muy elevados. Hay que tener en cuenta que si bien es cierto que en un metal líquido, al comportarse prácticamente newtonianamente, se pueden forzar valores de tensión altos (asociados, recordemos, a valores de deformación) estos se pueden alejar de la realidad al ser difícilmente alcanzables, sobre todo si el metal tiene un fuerte comportamiento newtoniano con valores de n tan cercanos a 1 que τ^* puede tender a infinito:

- Si $n \approx 1$

$$\lim_{n \rightarrow 1} \left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n} = 1$$

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} = \frac{\eta_0}{1+1}$$

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} = \frac{\eta_0}{1+1}$$

$$\eta = \frac{\eta_0}{2}$$

Como se puede comprobar, esta situación se aleja bastante de lo que pretende llevarse a cabo. Para poder anular el efecto de una n tan cercana a 1

el valor de $\left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}$ debería acercarse a magnitudes de 10^{-30} , quedando la

viscosidad así:

$$\eta \approx \frac{\eta_0}{1,001}$$

$$\eta \approx \eta_0$$



Caso b)

Este segundo caso también se aleja de la realidad al tomar valores de n bajos, un comportamiento típico de los materiales pseudoplásticos, no de los metales. Contando con eso, se actúa de la siguiente forma:

- Si $n \approx 0$ y τ^* y $\dot{\gamma}$ son valores moderadamente elevados:

$$\lim_{n \rightarrow 0} \left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n} = 0$$

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} = \frac{\eta_0}{1 + 0}$$

$$\eta = \eta_0$$

Este resultado sí que es el que se busca obtener, pero es la consecuencia de manipular la variable n alejándola de una descripción fiel del comportamiento real de la viscosidad del material.

De esta forma se han encontrado dos vías para obtener (8) pero en ambas se altera de una forma u otra las ecuaciones de manera que, aunque matemáticamente se obtenga la relación deseada, la fidelidad con la que describe el comportamiento real se puede llegar a perder.

Así, se puede resumir lo que se ha evaluado hasta el momento:

El modelo de Cross-WLF está pensado para comportamientos pseudoplásticos. Se ha planteado dos adaptaciones matemáticas para que cumpla con los requisitos deseados mediante dos técnicas distintas, pero en ambas se pierde fidelidad respecto a la descripción del comportamiento real del material. Cabe comprobar si, a costa de sacrificar esta fidelidad, los resultados que se obtengan son aceptables, acercándose a lo que se espera obtener o si, por el contrario, son desechables.

La tabla siguiente refleja los valores planteados que deben tomar las variables del modelo de Cross-WLF para que cumpla con el propósito deseado:



<i>Modelo de Cross-WLF</i>		
<i>Variable</i>	<i>Caso a)</i>	<i>Caso b)</i>
n	0,9	0,3
τ	↑ ↑ ↑ ↑ ↑	↑ ↑ ↑
A_1	0	0
A_2	indiferente	indiferente
D_1	η_{metal}	η_{metal}
D_2	T_{fusion}	T_{fusion}
D_3	0	0

Tabla 4.1 Valores que deben tomar las constantes del modelo de Cross-WLF.

Mediante la ayuda de *Moldflow* se comprobará la veracidad de los valores planteados y como afectan estos a la hora de modelar la viscosidad de los metales líquidos.

En el siguiente punto se planteará otra problemática, esta vez respecto al uso del modelo de Tait modificado. Se expondrá, como en el caso de Cross-WLF, el problema acompañado de un análisis de la solución o soluciones.



4.2 Modelo de Tait modificado

El modelo de Tait modificado es un modelo matemático que describe el comportamiento pVT de los materiales poliméricos. *Moldflow* se vale de este modelo ya que refleja con suficiente fiabilidad el comportamiento real de los polímeros ya sean estos amorfos o cristalinos.

La expresión matemática es la siguiente:

$$v(p, T) = v_0(T) \cdot \left(1 - 0,0894 \cdot \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right) + v_f(p, T) \quad (10)$$

El modelo recoge el comportamiento según el material se encuentre por encima o por debajo de la temperatura de transición vítrea.

• **Para $T \geq T_g$:**

$$v_0(T) = b_{1m} + b_{2m} \cdot (T - b_5) \quad (11)$$

$$B(T) = b_{3m} \cdot e^{-b_{4m} \cdot (T - b_5)} \quad (12)$$

$$v_f(p, T) = 0 \quad (13)$$

• **Para $T < T_g$:**

$$v_0(T) = b_{1s} + b_{2s} \cdot (T - b_5) \quad (11.1)$$

$$B(T) = b_{3s} \cdot e^{-b_{4s} \cdot (T - b_5)} \quad (12.1)$$

$$v_f(p, T) = b_7 \cdot e^{(b_8 \cdot (T - b_5) - b_9 \cdot p)} \quad (13.1)$$

Además:

$$T_g = b_5 + b_6 \cdot p \quad (14)$$

Todas las constantes del modelo ($b_1 \div b_9$) se discutirán a continuación, adaptando el modelo a las circunstancias de la tesina.



4.2.1 Problema: Tait para metales líquidos

Como en el caso anterior, se debe adaptar el modelo de Tait al caso de los metales líquidos.

Para ello se toman en cuenta los siguientes puntos:

- El modelo de Tait expresa matemáticamente el comportamiento del material tanto en estado sólido como en líquido. Como en este caso se pretende estudiar solamente el metal líquido, se puede simplificar toda la matemática de los sólidos.
- Los metales no dependen prácticamente de la presión, por lo tanto hay se eliminarán las posibles dependencias del modelo con tal de simplificar los cálculos.

De esta forma:

b_7, b_8 y $b_9=0$; el estado sólido del metal no es cuestión de estudio.
 $b_6=0$; se elimina la dependencia de la T_g respecto a la presión
 $b_5=T_{\text{fusión del metal}}$; quedando como resultado final una forma simplificada de (14):

$$T_g = T_{\text{fusión}} \quad (15)$$

Por otro lado, también hay que solucionar la dependencia exponencial del modelo. Ello se puede solucionar así:

$b_{4s}=b_{4m}=0$; se elimina la exponencial en el modelo para comportamiento sólido y líquido reflejada en (12) y (12.1), quedando una forma simplificada de la misma:

$$B(T) = b_{3s} \quad (16)$$

Hasta el momento no ha habido problemas adaptando el modelo al caso de estudio, pero la situación se complica un poco con las últimas constantes.



Si se observa la Figura 3.13 del capítulo 3:

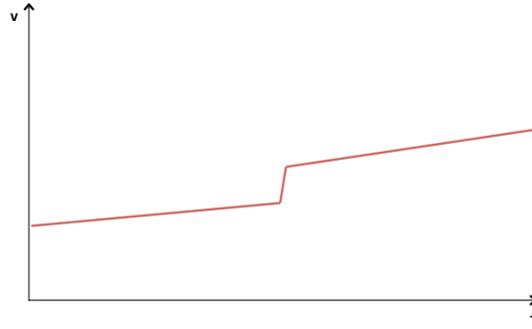


Figura 3.13

Al analizar el denominador $B(T)$ de (10), éste forma parte de un logaritmo neperiano que hay que modificar ya que, como se puede observar en la figura anterior, el comportamiento p/T del metal no tiene nada que ver con esa forma matemática.

A su vez, a $B(T)$ está determinado por las variables b_{3m} , b_{3s} y la exponencial que se ha simplificado anteriormente dándole el valor correcto a b_{4s} y b_{4m} , tal y como se puede comprobar en (16).

Atendiendo a estas circunstancias, se puede proceder de la siguiente manera.

- Si b_{3m} y b_{3s} toman valores elevados³:

$$B(T) = b_{3m}$$

$$B(T) = \uparrow\uparrow\uparrow\uparrow$$

$$\ln\left(1 + \frac{p}{B(T)}\right) = \ln\left(1 + \frac{p}{\uparrow\uparrow\uparrow\uparrow}\right)$$

$$\ln(1 + \downarrow\downarrow\downarrow\downarrow) \approx \ln(1)$$

$$\ln(1) = 0$$

³ Se utiliza la expresión con b_{3m} para los cálculos pero éstos son extrapolables a b_{3s}



Entonces, al sustituirse en (10):

$$v(p,T) = v_0(T) \cdot \left(1 - 0,0894 \cdot \ln \left(1 + \frac{P}{B(T)} \right) \right) + v_f(p,T)$$

$$v(p,T) = v_0(T) \cdot (1 - 0,0894 \cdot 0)$$

$$v(p,T) = v_0(T)$$

Con este proceso se ha conseguido eliminar la dependencia de Tait modificado de la presión.

El problema matemático se resuelve pero surge otro, y es que no se sabe con exactitud que valores deben adquirir las variables b_{3m} y b_{3s} , por lo que se está ante un caso de “prueba y error” que se debe solucionar mediante el análisis de los resultados que arroje *Moldflow* en las simulaciones.

Lo mismo sucede con las variables b_{2m} y b_{2s} que describen v_0 en (11) y (11.1). No hay datos sobre sus valores, por lo que al desconocer su dependencia se tomará valor inicial 0 en ambas y su modificación dependerá de los resultados que proporcione *Moldflow*.

Las últimas constantes del modelo a las que hay que darle valores son b_{1m} y b_{1s} . En este caso, el valor que adoptarán será el del volumen del metal líquido de tal forma que:

$$v_0(T) = b_{1m} + b_{2m} \cdot (T - b_5)$$

$$v_0(T) = v_{metal}(T) + 0 \cdot (T - b_5)$$

$$v_0(T) = v_{metal}(T)$$

Así, la forma final del modelo de Tait modificado adaptado a los metales, se ha conseguido reducir a lo siguiente:

$$v(p,T) = v_0(T) \quad (17)$$



Como ya no existe relación con la presión:

$$v(T) = v_0(T)$$

$$v(T) = v_{metal}(T)$$

Mediante este proceso se ha logrado anular matemáticamente la relación del modelo respecto la presión, simplificando la matemática y haciendo así que los metales puedan ser descritos mediante dicho modelo. También se han alterado sus constantes para que se ciñan al comportamiento newtoniano del metal líquido.

La siguiente tabla resume el valor de las constantes del modelo:

<i>Constante</i>	<i>Valor</i>
b_1	v_{metal}
$b_{2m}=b_{2s}$	0
$b_{3m}=b_{3s}$	↑ ↑ ↑ ↑ ↑
$b_{4m}=b_{4s}$	0
b_5	$T_{fusión}$
$b_6= b_7= b_8= b_9$	0

Tabla 4.2 Valores de las constantes del modelo de comportamiento pvT de Tait modificado.

Queda claro entonces que, tanto las constantes del modelo de Cross-WLF como las de Tait modificado necesitan ser evaluadas mediante *Moldflow* para comprobar su validez y, si se da el caso, ser modificadas o, en el peor de todos ellos, comprobar que aunque se intente alterar los modelos para que *Moldflow* pueda trabajar con inyecciones de metal líquido, los resultados se alejan de la realidad.

En el siguiente capítulo, el análisis de los resultados que arrojen las simulaciones permitirá concluir si todos los cálculos anteriores son correctos y, por tanto, la simulación de inyecciones de metal líquido es posible.

5. Simulaciones y análisis de resultados

En este capítulo se pondrán en práctica los conocimientos teóricos de los capítulos anteriores, realizando una serie de simulaciones para comprobar si, efectivamente, la hipótesis de que *Moldflow* se puede adaptar para simular inyecciones de metales líquidos es correcta o si, por el contrario, no se puede modelar los materiales metálicos siendo *Moldflow* incapaz de trabajar con estos.

5.1 Modelando el material

Lo primero que hay que hacer es crear un material nuevo. *Moldflow* cuenta con un potente editor de materiales. Además permite la creación de una base de datos personalizada con los materiales que el usuario haya creado. En base a los datos recopilados, se han modelado dos materiales distintos: una aleación de Zn-Al (Zamak) y Aluminio S380.

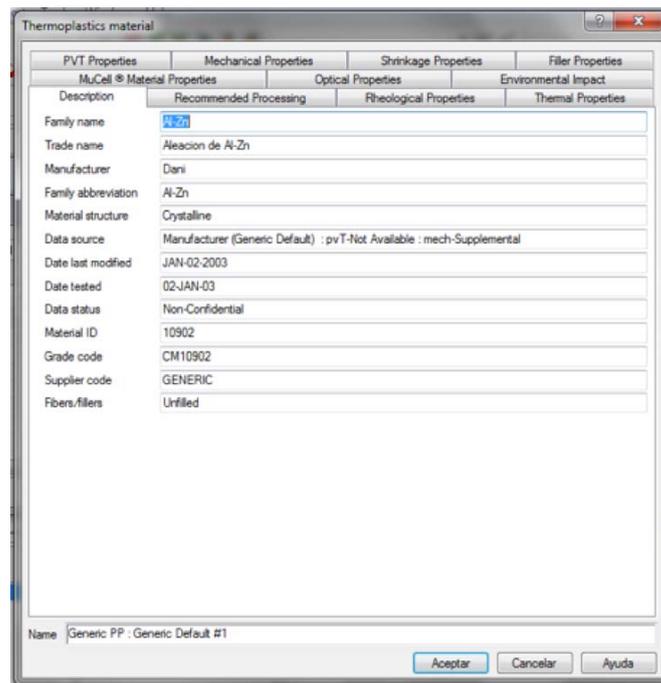


Figura 5.1 Editor de materiales de *Moldflow*.

En la figura anterior se aprecian todas las propiedades del material que el software deja editar al usuario. Para la presente tesina es necesario modificar las propiedades reológicas, térmicas y mecánicas, así como el comportamiento pvT y el procesado recomendado.

5.1.1 Aleación Zn-Al (Zamak)

Zamak es el nombre comercial de un tipo de aleación metálica con base de zinc con aluminio, magnesio y cobre. Este tipo de aleación recibió el nombre en los años veinte de la mano de la compañía New Jersey Zinc Company, una empresa norteamericana productora de zinc y otros materiales.

El Zamak es muy utilizado en procesos de inyección. Hay varios tipos de Zamak. De entre todos ellos se ha escogido modelar el denominado Zamak 3 ya que es el que cuenta con mayor presencia en el mercado.

Las propiedades más interesantes son las siguientes:

- Es altamente resistente a la corrosión
- Posee una viscosidad baja, permitiendo crear piezas pequeñas
- Se enfría rápidamente, disminuyendo así los ciclos de producción
- Es muy buen conductor de electricidad
- Posee excelentes propiedades mecánicas: gran ductilidad y alta resistencia al impacto
- Muy económico para piezas pequeñas
- Punto de fusión bajo
- Acabado superficial de alta calidad.
- Se pueden crear piezas complejas de una sola inyección

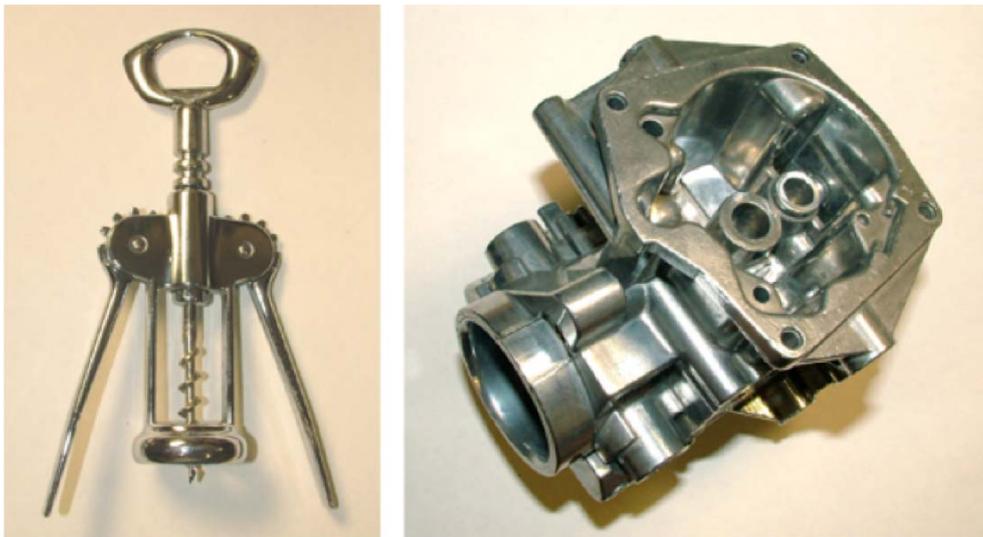


Figura 5.2 Ejemplos de piezas que se pueden fabricar mediante inyección de Zamak



Se puede encontrar un amplio abanico de piezas hechas de Zamak como herramientas, piezas de automóvil, candados, juguetes, etc.

A la hora de modelar el material en *Moldflow* se necesitan una serie de datos de las propiedades del material. Son los que aparecen en las siguientes tablas:

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
Módulo de Young	82 GPa
Coefficiente de Poisson	0,26
Módulo de Cizalladura	30 GPa
Viscosidad	3,25 mPa

Tabla 5.1 Propiedades mecánicas del material

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
Calor específico	415 J/Kg °C
Conductividad térmica	108 W/m °C
Temperatura de fusión	360÷380 °C

Tabla 5.2 Propiedades térmicas del material

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
Densidad en estado líquido	6,57 g/cm ³
Conductividad térmica	7,14 g/cm ³

Tabla 5.3 Propiedades pvT



Diseño y puesta a punto de simulaciones de inyección de metales (MIM) mediante el uso del software *Moldflow*

Simulaciones y análisis de resultados

<i>Variable</i>	<i>Caso a)</i>	<i>Caso b)</i>
n	0,9	0,3
τ	$9 \cdot 10^8$	10000
A_1	80	54
A_2	51,6	51,6
D_1	0,004	0,004
D_2	653,88	653,88
D_3	0	0

Tabla 5.4 Valores del modelo de Cross-WLF

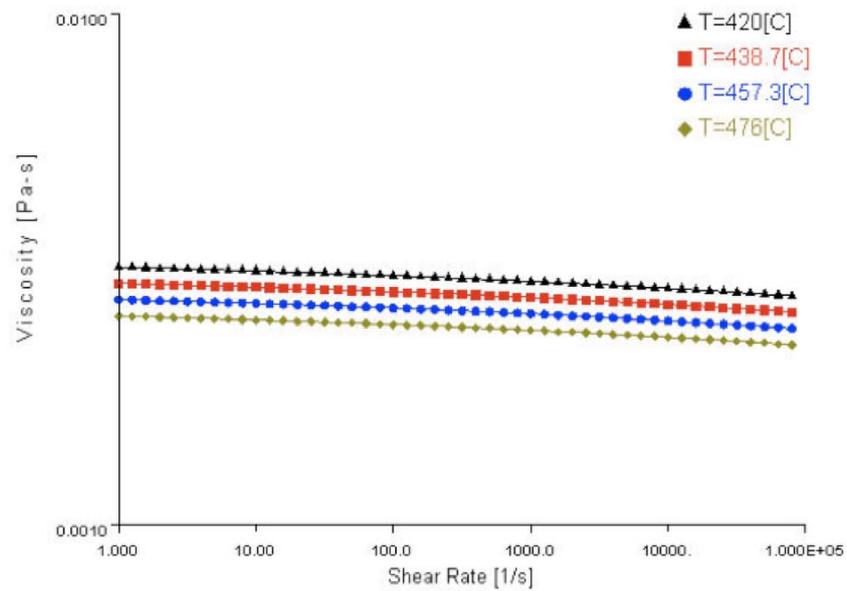


Figura 5.3 Viscosidad del Zamak en el *Caso a)*

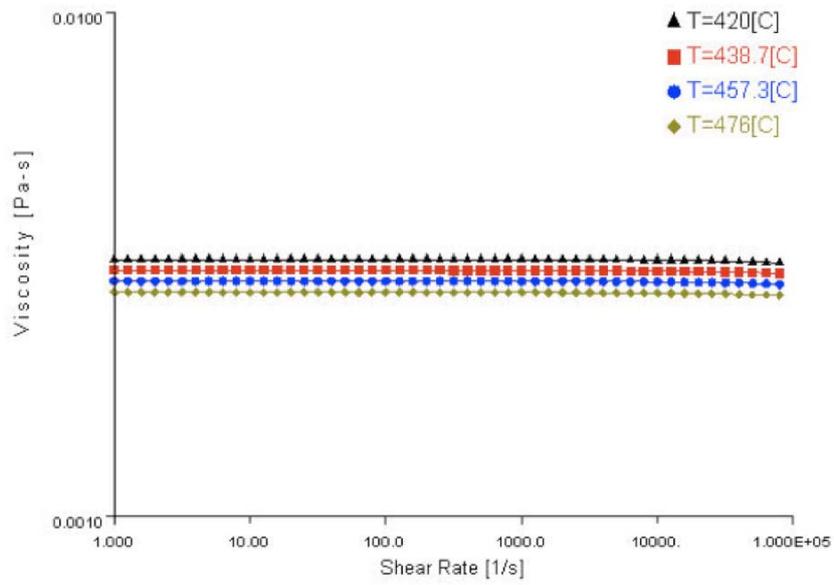


Figura 5.4 Viscosidad del Zamak en el *Caso b)*

<i>Constante</i>	<i>Valor</i>
$b_{1m}=b_{1s}$	0,0001526
$b_{2m}=b_{2s}$	10^{-8}
$b_{3m}=b_{3s}$	$4,9 \cdot 10^{10}$
$b_{4m}=b_{4s}$	10^{-6}
b_5	653,88
$b_6= b_7= b_8= b_9$	0

Tabla 5.5 Valores del modelo de Tait modificado

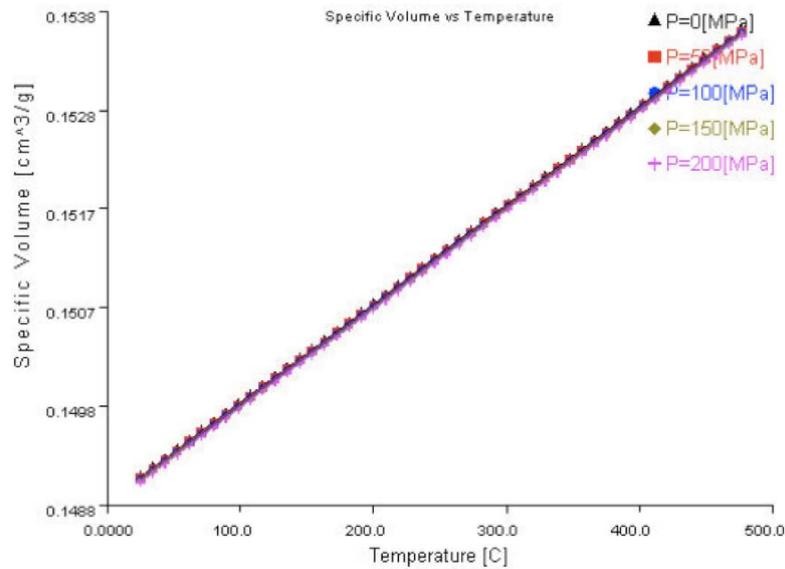


Figura 5.5 Gráfica comportamiento pvT del Zamak

5.1.2 Aluminio

Junto al Zamak se ha modelado el aluminio para contar con otro material de características distintas al anterior y probar así la versatilidad de *Moldflow* a la hora de inyectar metales.

El aluminio es un metal también muy utilizado en procesos de inyección. Es un material no ferromagnético y es el tercer metal más abundante en la corteza terrestre por detrás del hierro y el silicio. Este metal es blando y poco resistente a la tracción, por lo que se alea con otros elementos para dotarlo de mejores propiedades mecánicas. Precisamente por alearse con otros materiales, se puede encontrar en el mercado distintos tipos de aluminios, de entre los cuales se ha optado por modelar el Aluminio S380.

Las propiedades más interesantes de este metal son:

- Estupendo acabado y muy atractivo
- Gran resistencia a la corrosión
- Propiedades conductoras excelentes: gran conductor térmico y eléctrico
- Resistencia a altas temperaturas
- Tolerancias de fabricación muy ajustadas lo que disminuye los requerimientos de post-mecanizado después la inyección.

Algunos ejemplos de piezas hechas de aluminio son los tubos de escape, palos de golf, láminas para contenedores, latas de bebida, carcasas de ordenadores portátiles, etc.



Figura 5.6 Ejemplos de piezas que se pueden fabricar mediante inyección de aluminio

Como en el caso anterior, los datos que se han necesitado para modelar el material en *Moldflow* han sido los siguientes:

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
Módulo de Young	75 GPa
Coefficiente de Poison	0,36
Módulo de Cizalladura	25 GPa
Viscosidad	1 ÷ 1,4 mPa

Tabla 5.6 Propiedades mecánicas del material

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
Calor específico	982 J/Kg °C
Conductividad térmica	98 W/m °C
Temperatura de fusión	520 °C

Tabla 5.7 Propiedades térmicas del material



Diseño y puesta a punto de simulaciones de inyección de metales (MIM) mediante el uso del software *Moldflow*

Simulaciones y análisis de resultados

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
Densidad en estado líquido	2,37 g/cm ³
Conductividad térmica	2,7 g/cm ³

Tabla 5.8 Propiedades pvT

<i>Variable</i>	<i>Caso a)</i>	<i>Caso b)</i>
<i>n</i>	0,9	0,3
τ	9·10 ⁸	10000
<i>A₁</i>	10 ⁻³⁰	10 ⁻³⁰
<i>A₂</i>	1	1
<i>D₁</i>	0,0013	0,001
<i>D₂</i>	833,15	833,15
<i>D₃</i>	0	0

Tabla 5.9 Valores del modelo de Cross-WLF

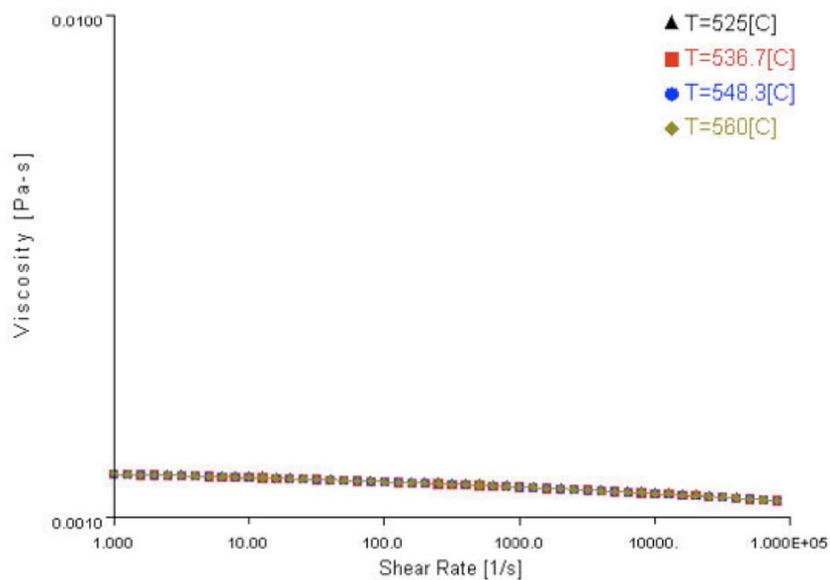


Figura 5.7 Viscosidad del aluminio en el *Caso a)*

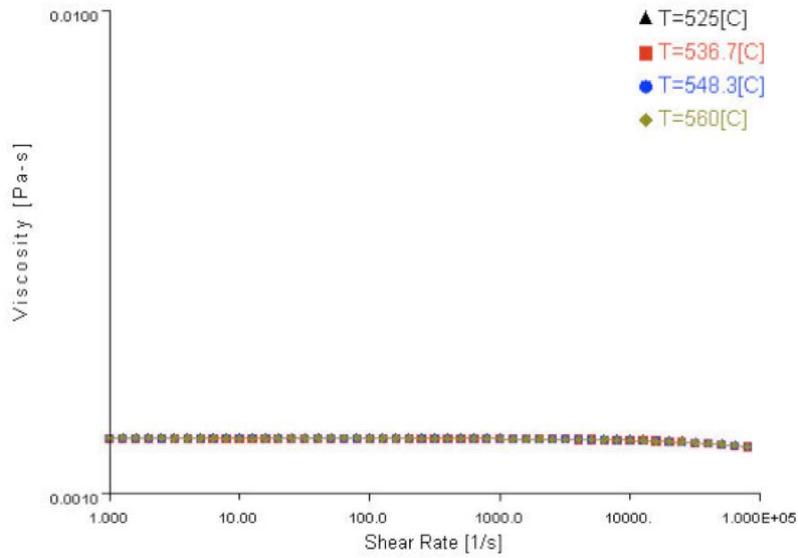


Figura 5.8 Viscosidad del aluminio en el *Caso b)*

<i>Constante</i>	<i>Valor</i>
$b_{1m}=b_{1s}$	0,0004219
$b_{2m}=b_{2s}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$
$b_{3m}=b_{3s}$	$4,9 \cdot 10^{10}$
$b_{4m}=b_{4s}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$
b_5	833,16
$b_6= b_7= b_8= b_9$	0

Tabla 5.10 Valores del modelo de Tait modificado

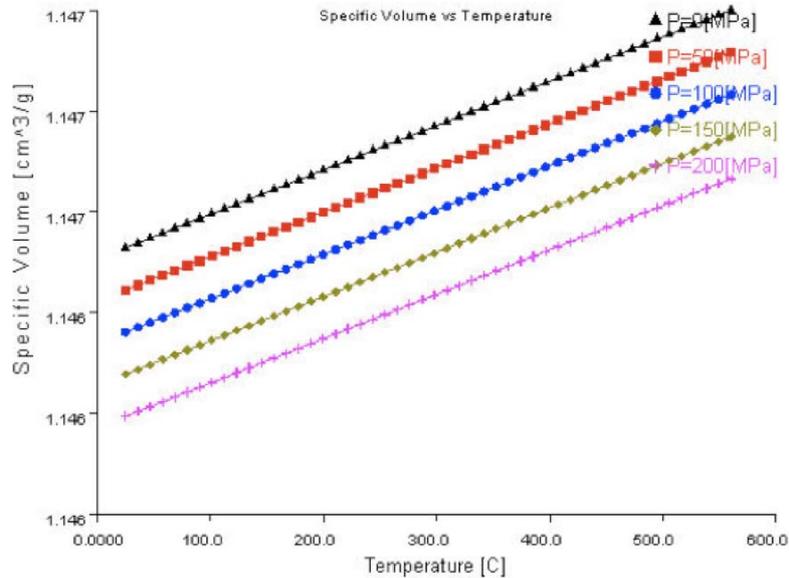


Figura 5.9 Gráfica comportamiento pvT del aluminio

Como se puede observar mirando las tablas, algunos de los parámetros de Tait y Cross-WLF teóricamente deberían ser 0. A la práctica *Moldflow* no permite declarar esas constantes con valor nulo, por lo tanto se ha optado por introducir el valor mínimo posible.

En el siguiente punto se abordarán las simulaciones y los resultados obtenidos.

5.2 Simulaciones

Llegado el momento de llevar a cabo las simulaciones, se ha optado por analizar tres figuras distintas: una pequeña tapa redonda, una placa de persiana y un pin o logotipo con forma de escudo.

A continuación se pueden ver las tres piezas con las que se ha trabajado con *Moldflow*:

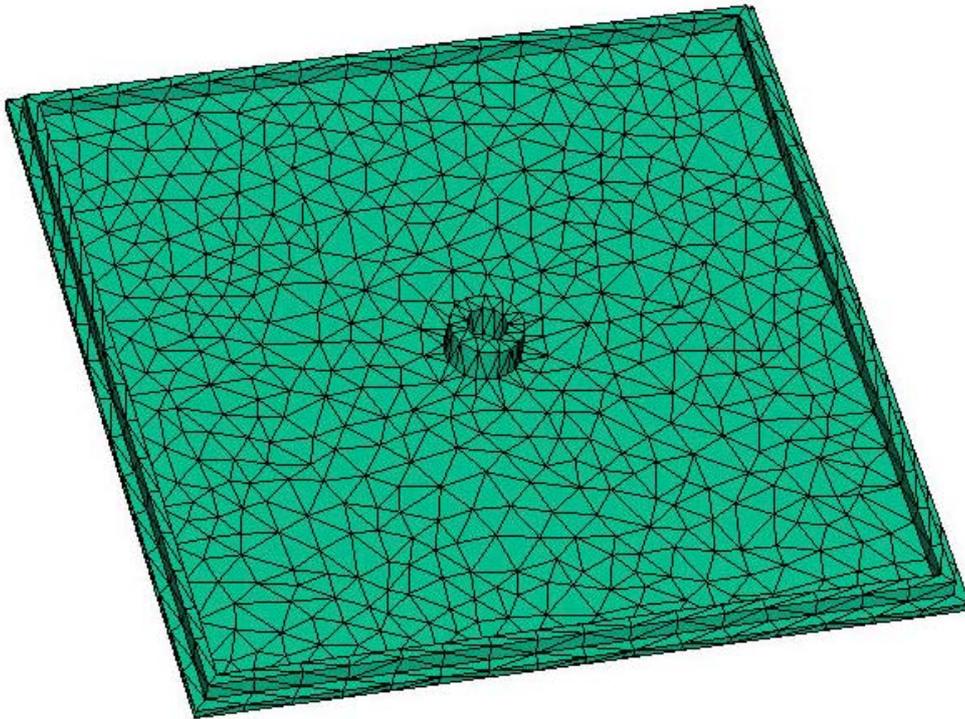


Figura 5.10 Placa de persiana

<i>Ancho</i>	300 mm
<i>Largo</i>	300 mm
<i>Espesor</i>	3 mm

Tabla 5.11 Dimensiones de la placa de persiana

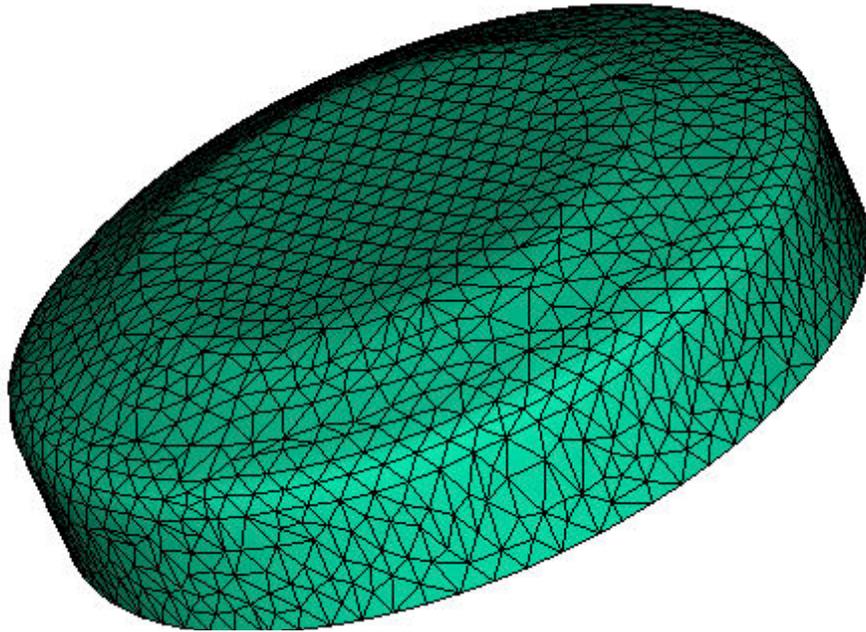


Figura 5.11 Tapa metálica

<i>Radio</i>	13,33 mm
<i>Altura</i>	3,68 mm
<i>Espesor</i>	2 mm

Tabla 5.12 Dimensiones de la tapa redonda

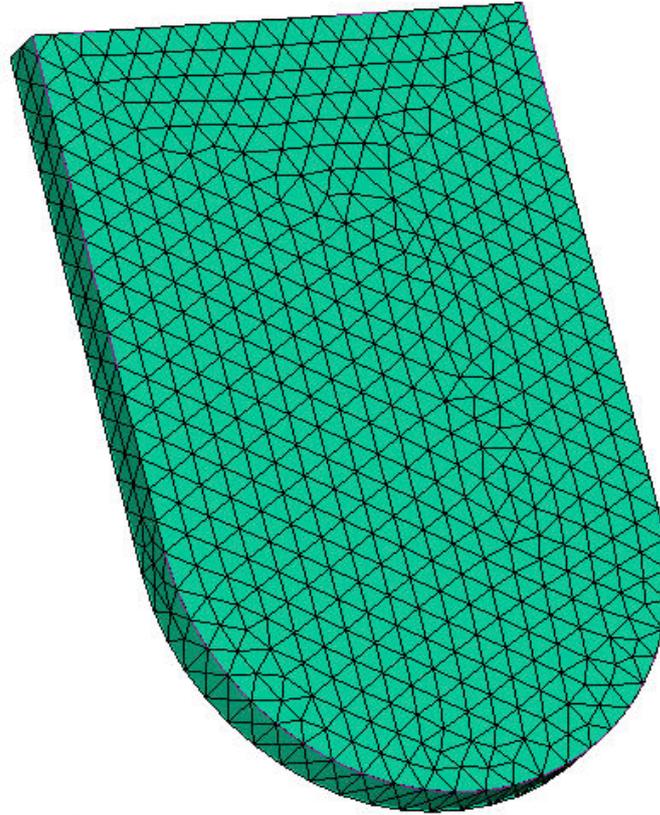


Figura 5.12 Pin-escudo

<i>Ancho</i>	10 mm
<i>Largo</i>	15 mm
<i>Espesor</i>	1 mm

Tabla 5.13 Dimensiones de la placa de persiana

Se han llevado a cabo un total de 24 simulaciones entre las dos piezas. Han sido simulados distintos tiempos de inyección, modelos de Cross-WLF y materiales.

Las simulaciones son las siguientes:

Simulación 1

<i>Pieza</i>	Plancha persiana
<i>Material</i>	Zamak
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso a)
<i>Tiempo</i>	Llenado automático
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	420 °C

Tabla 5.14 Condiciones iniciales de la simulación 1

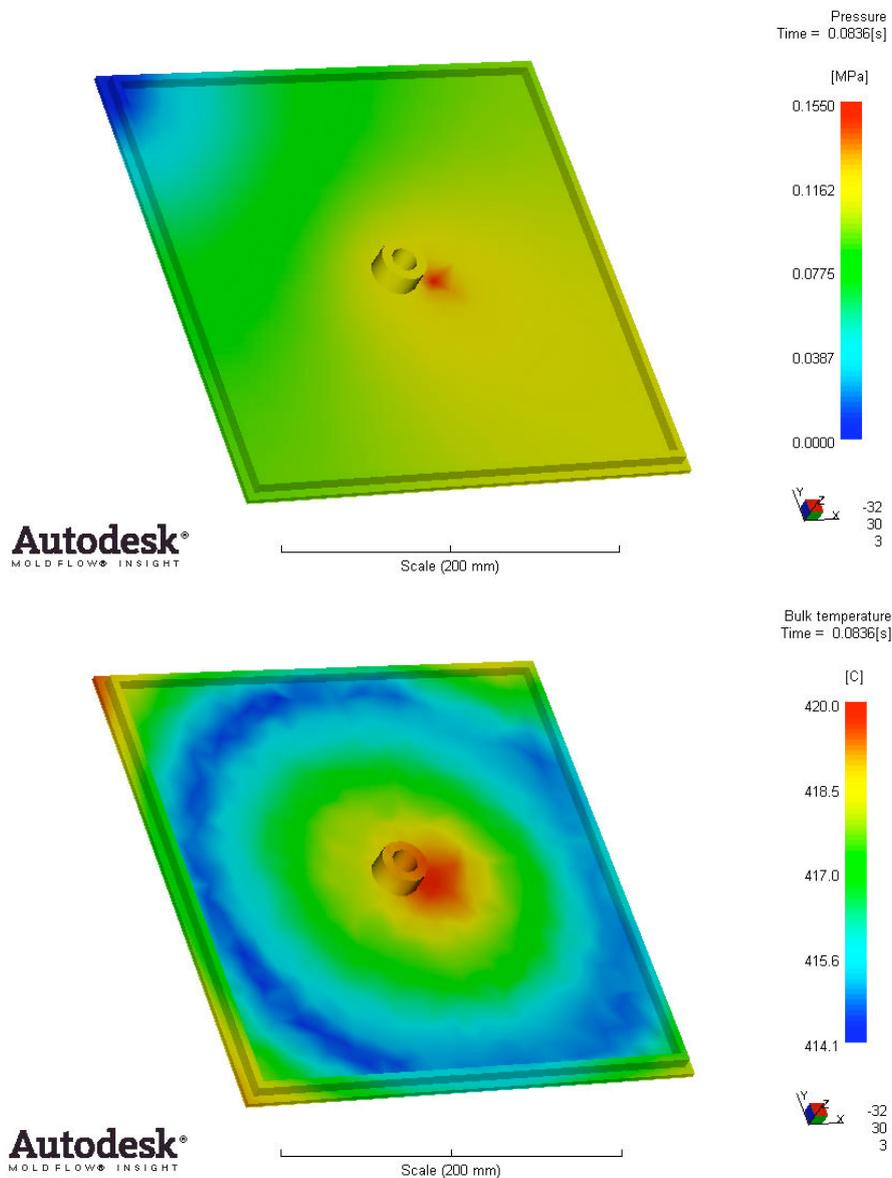


Figura 5.13 Presión y temperatura del material al final de la inyección

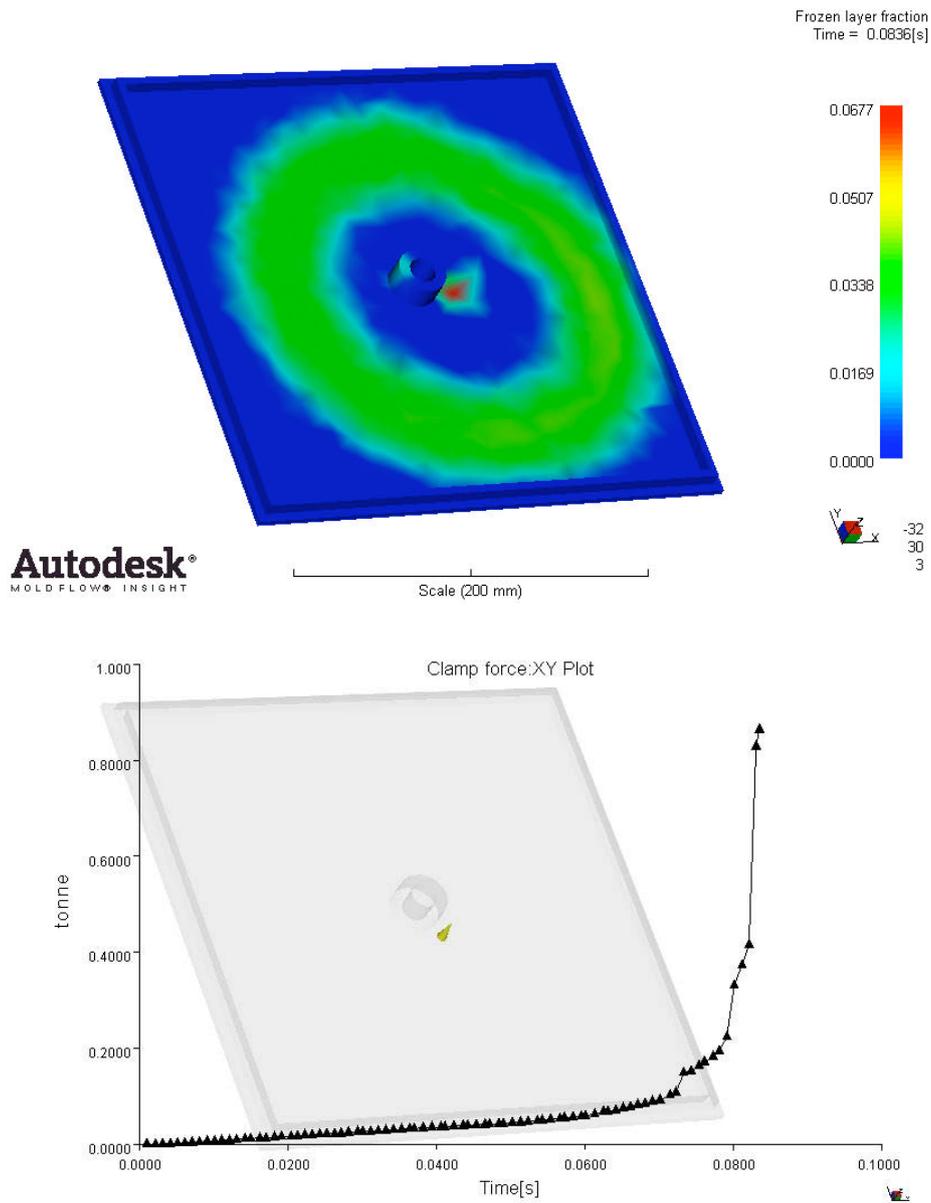


Figura 5.14 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	0,155 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	0,86 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	1,501 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,0836 s

Tabla 5.15 Resultados de la simulación 1

Simulación 2

<i>Pieza</i>	Plancha persiana
<i>Material</i>	Zamak
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso b)
<i>Tiempo</i>	Llenado automático
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	420 °C

Tabla 5.16 Condiciones iniciales de la simulación 2

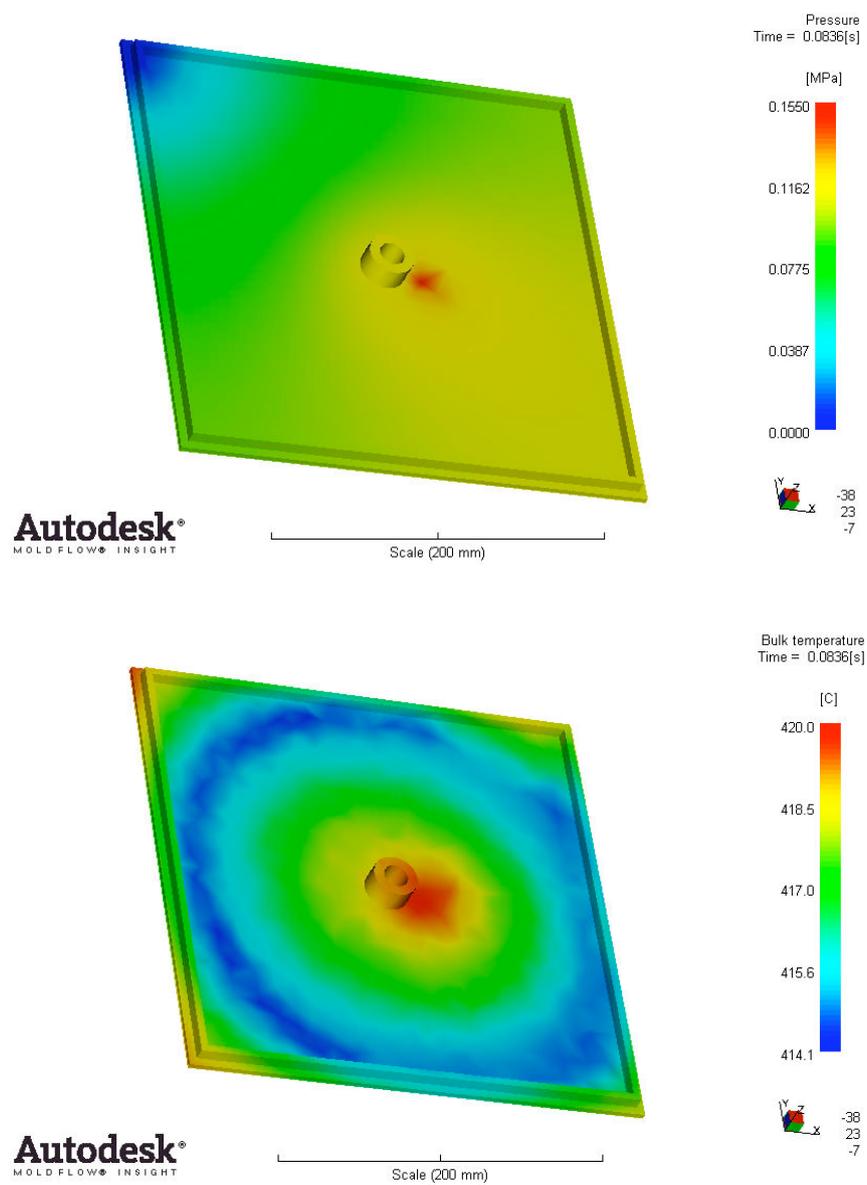


Figura 5.15 Presión y temperatura del material al final de la inyección

Diseño y puesta a punto de simulaciones de inyección de metales (MIM) mediante el uso del software *Moldflow*

Simulaciones y análisis de resultados

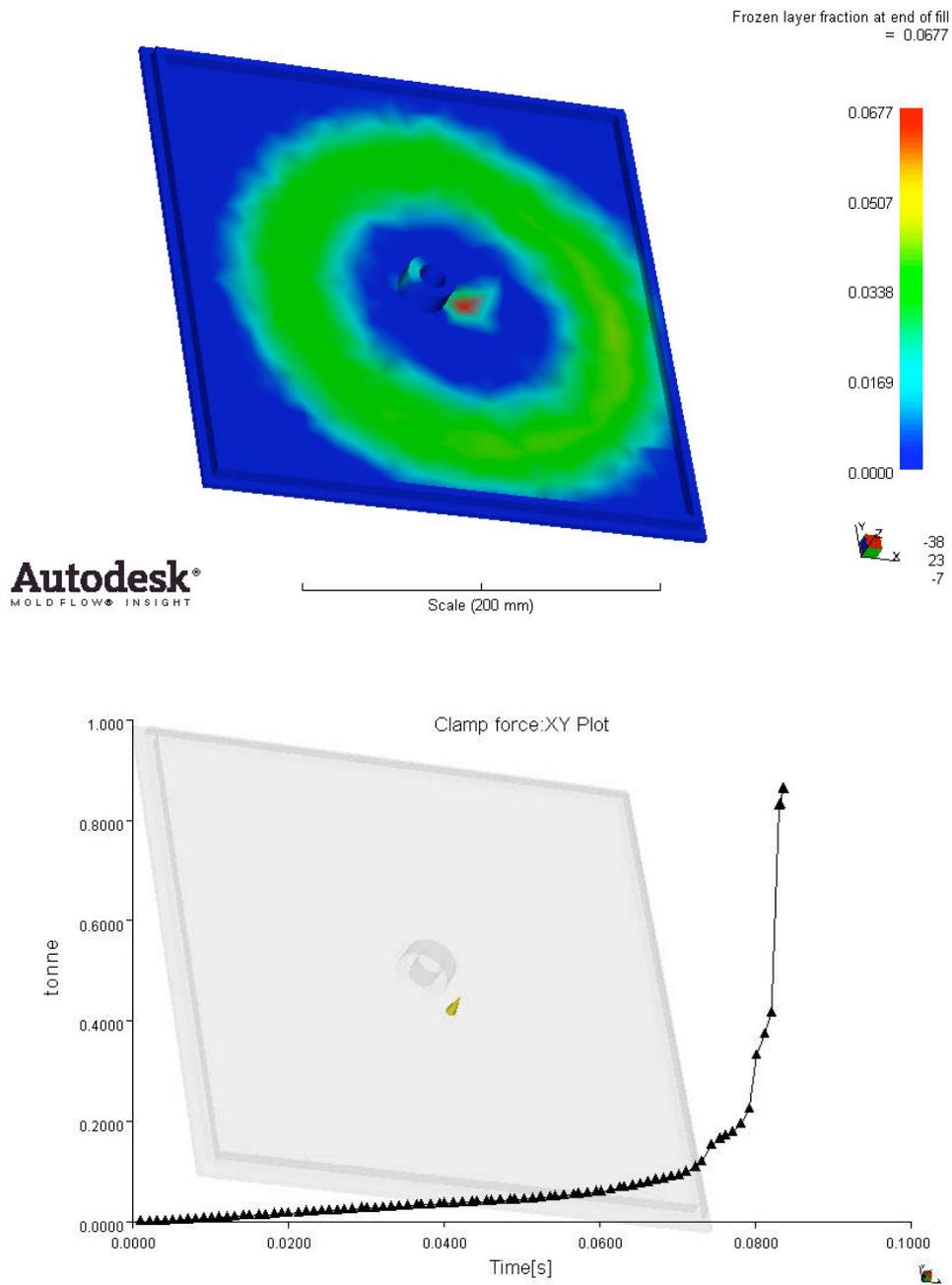


Figura 5.16 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	0,155 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	0,8630 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	1,501 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,0836 s

Tabla 5.17 Resultados de la simulación 2

Simulación 3

<i>Pieza</i>	Plancha persiana
<i>Material</i>	Zamak
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso a)
<i>Tiempo</i>	1 s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	420 °C

Tabla 5.18 Condiciones iniciales de la simulación 3

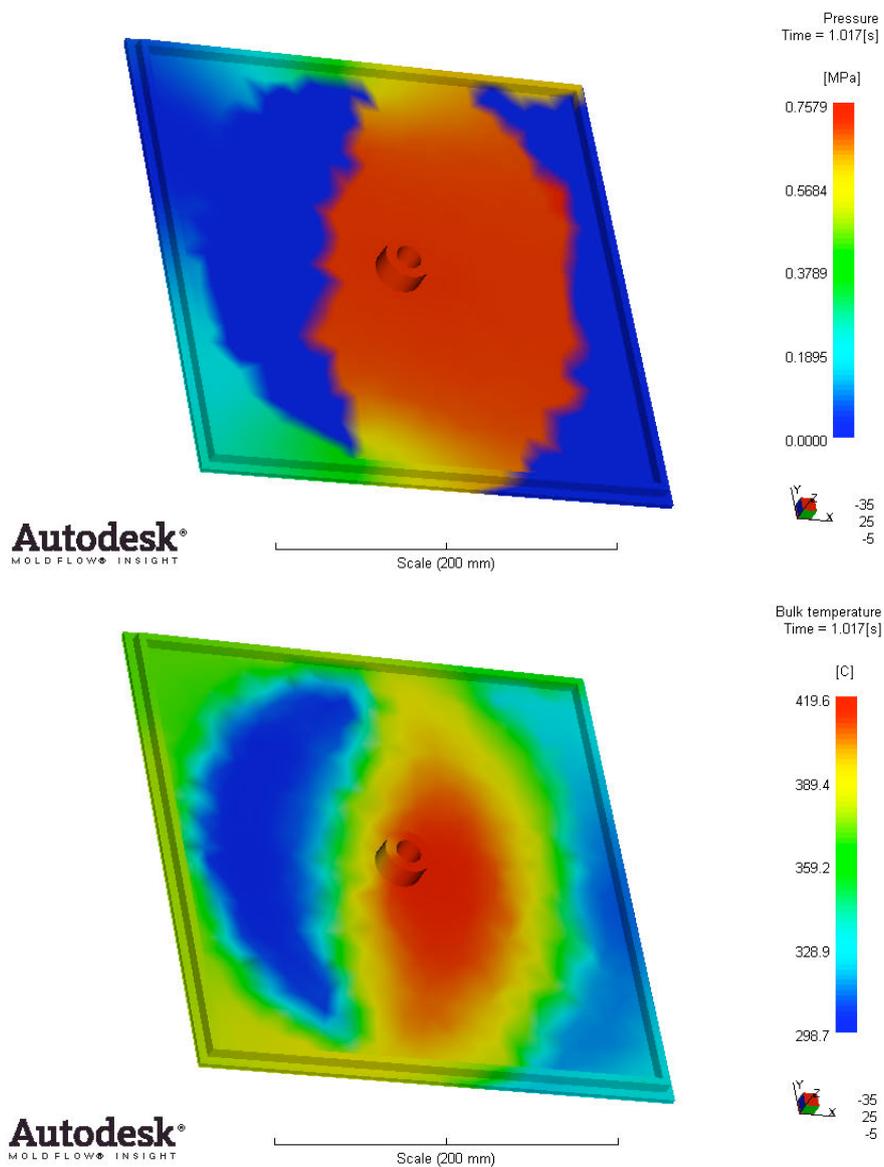


Figura 5.17 Presión y temperatura del material al final de la inyección

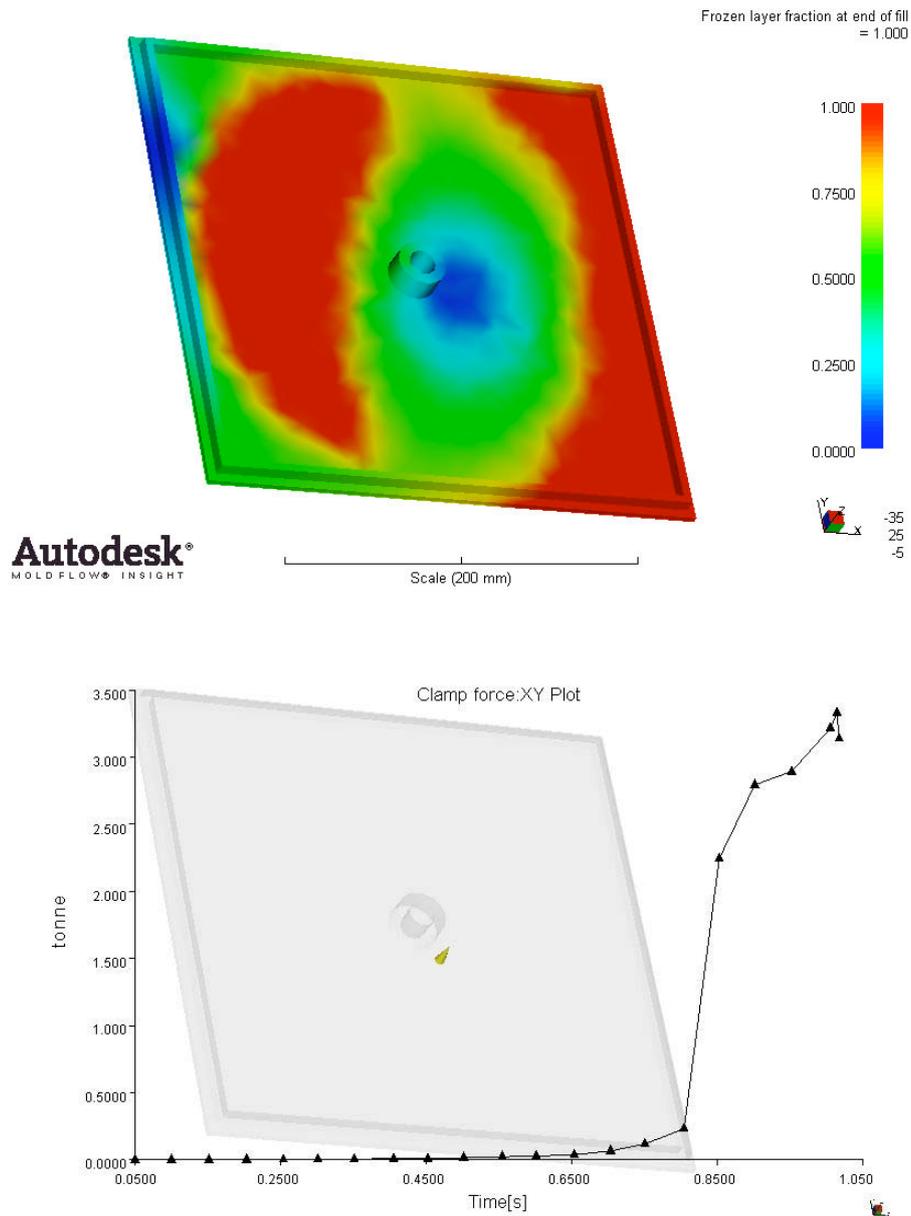


Figura 5.18 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	0,7579 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	3,3278 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	1,2503 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	1,017 s

Tabla 5.19 Resultados de la simulación 3

Simulación 4

<i>Pieza</i>	Plancha persiana
<i>Material</i>	Zamak
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso b)
<i>Tiempo</i>	1 s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	420 °C

Tabla 5.20 Condiciones iniciales de la simulación 4

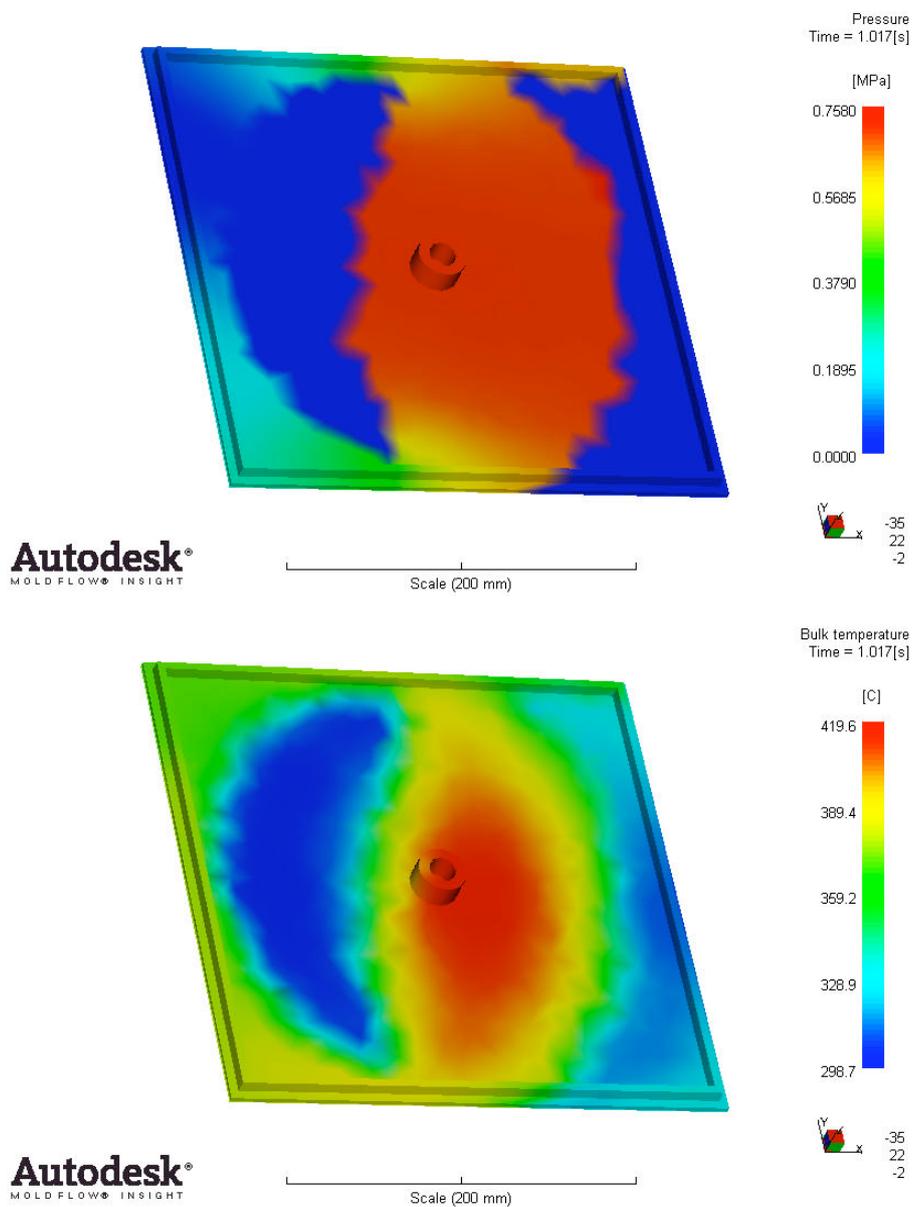


Figura 5.19 Presión y temperatura del material al final de la inyección

Diseño y puesta a punto de simulaciones de inyección de metales (MIM) mediante el uso del software *Moldflow*

Simulaciones y análisis de resultados

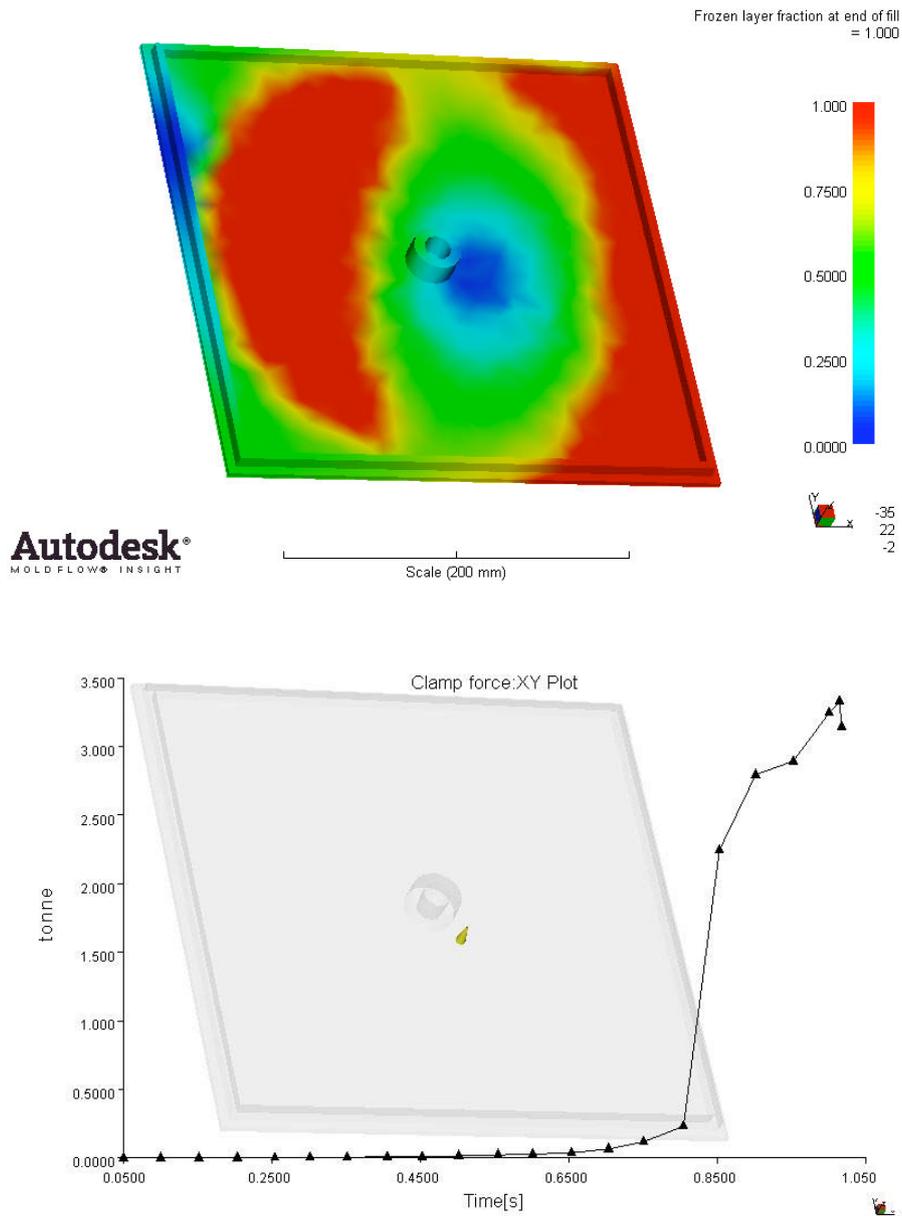


Figura 5.20 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	0,7580 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	3,3282 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	1,253 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	1,017 s

Tabla 5.21 Resultados de la simulación 4

Simulación 5

<i>Pieza</i>	Plancha persiana
<i>Material</i>	Zamak
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso a)
<i>Tiempo</i>	2,3 s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	420 °C

Tabla 5.22 Condiciones iniciales de la simulación 5

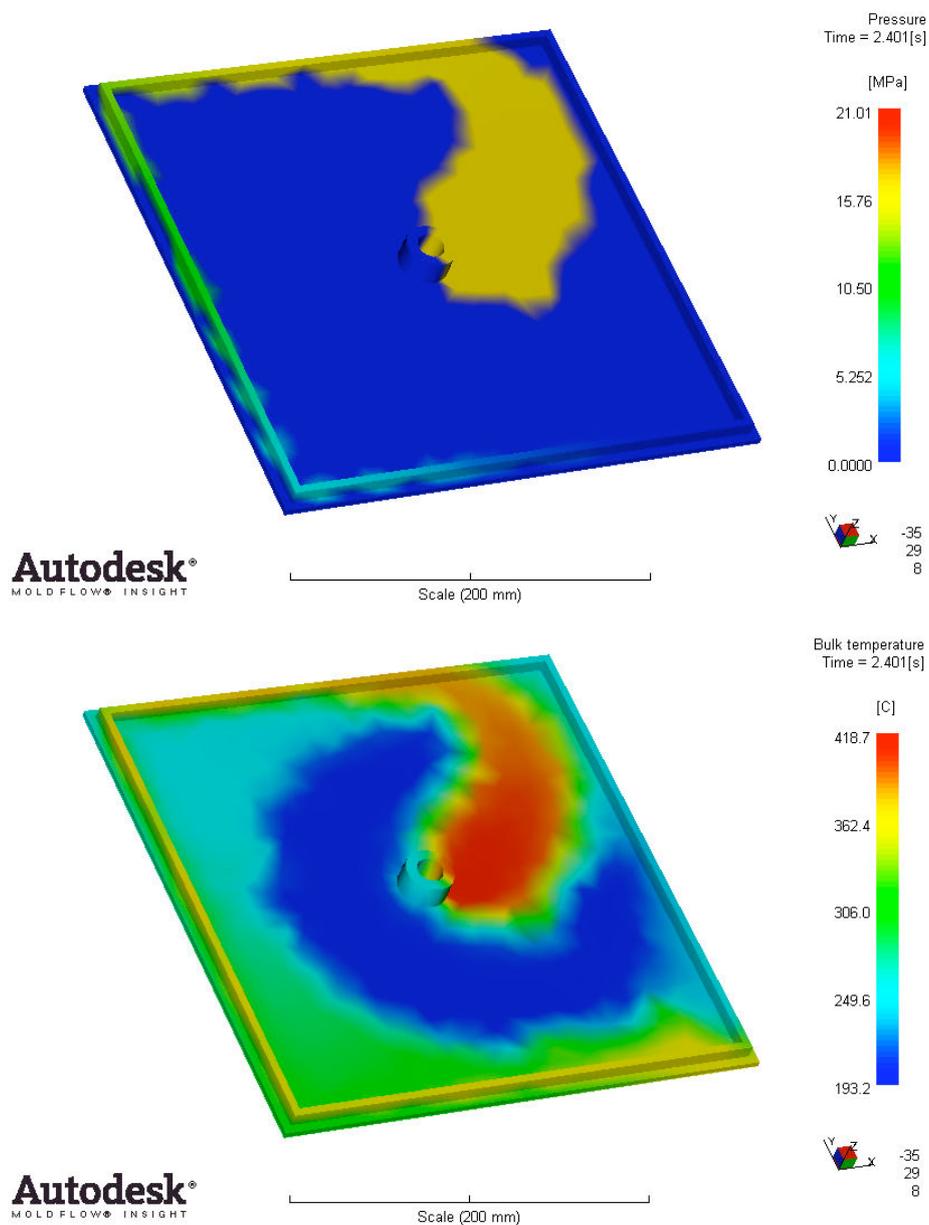


Figura 5.21 Presión y temperatura del material al final de la inyección



Diseño y puesta a punto de simulaciones de inyección de metales (MIM) mediante el uso del software *Moldflow*

Simulaciones y análisis de resultados

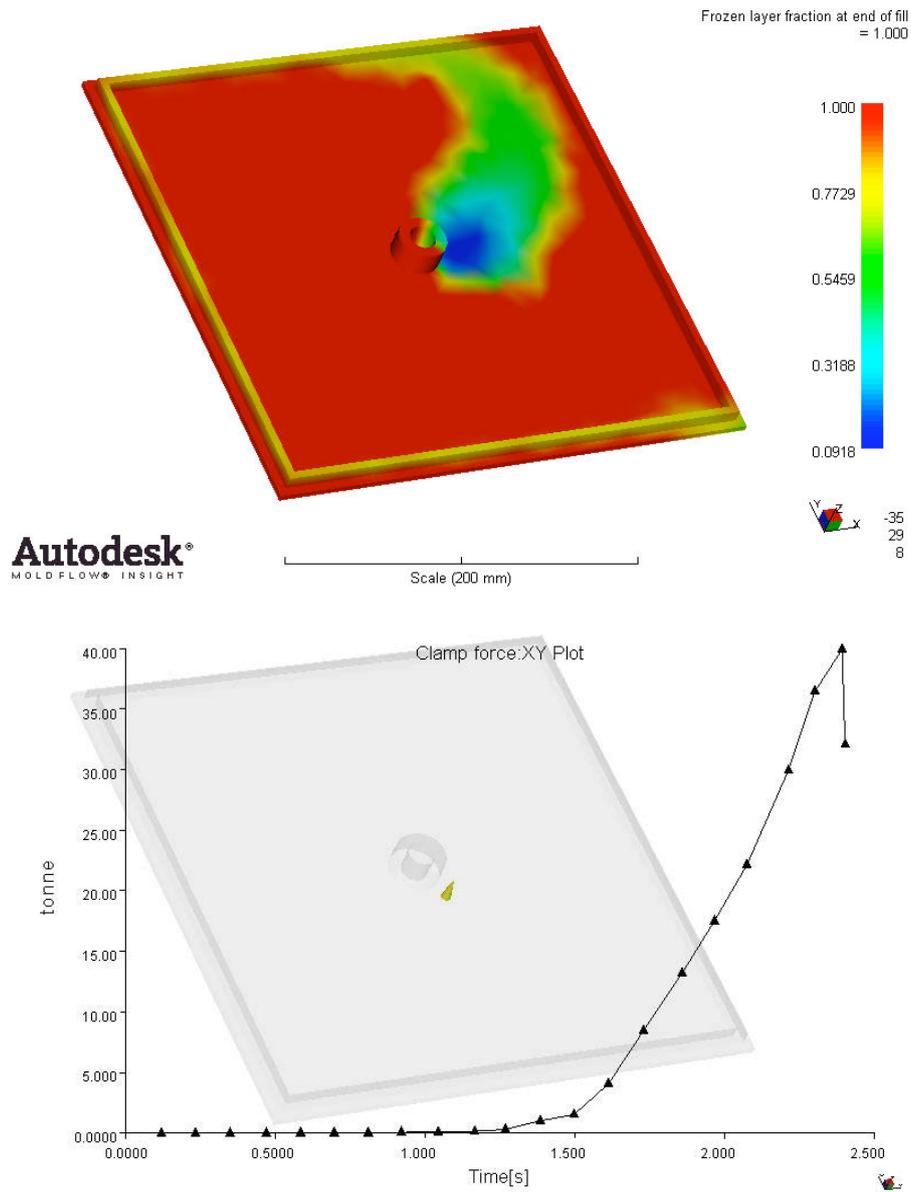


Figura 5.22 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	21,01 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	39,9232 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	1,26 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	2,401 s

Tabla 5.23 Resultados de la simulación 5

Simulación 6

<i>Pieza</i>	Plancha persiana
<i>Material</i>	Zamak
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso b)
<i>Tiempo</i>	2,3 s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	420 °C

Tabla 5.24 Condiciones iniciales de la simulación 6

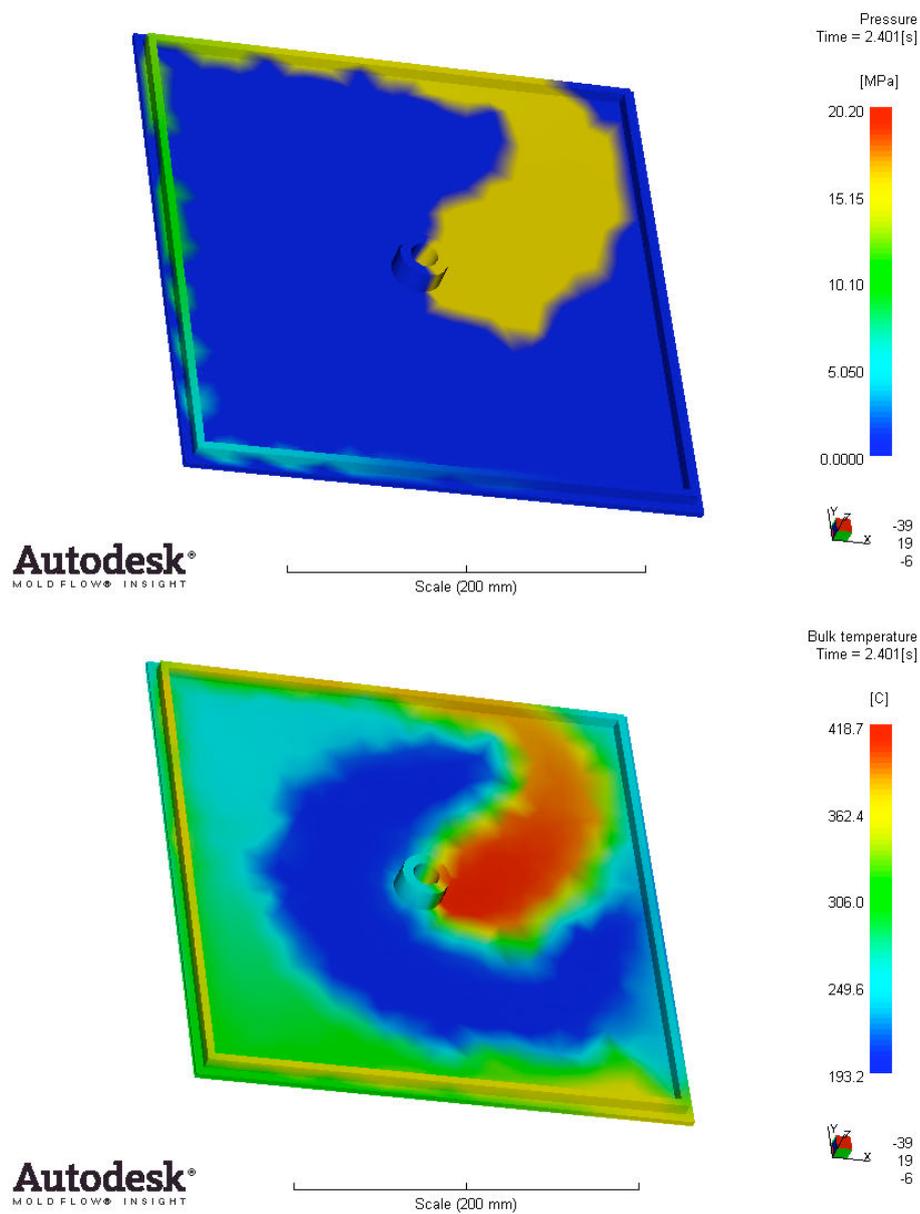


Figura 5.23 Presión y temperatura del material al final de la inyección

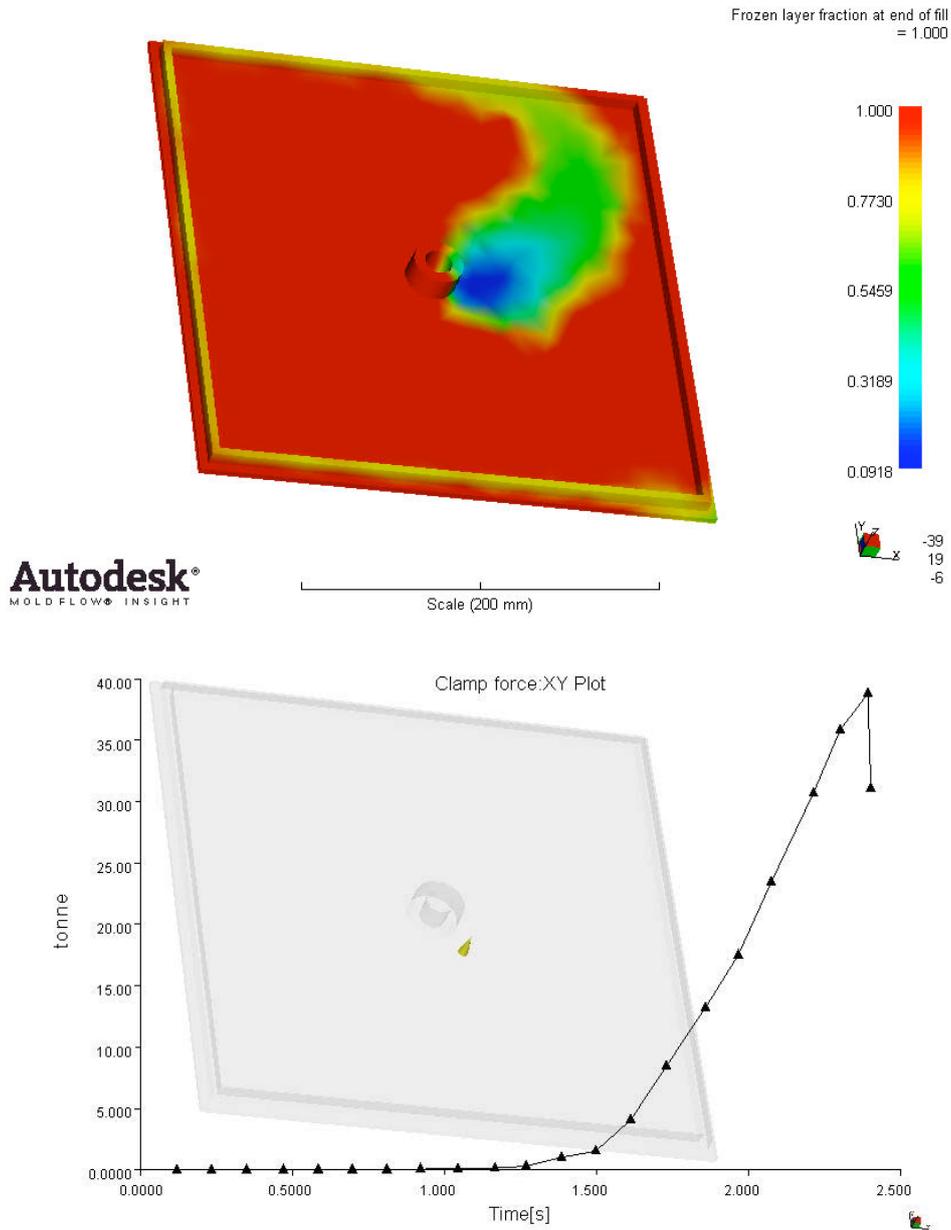


Figura 5.24 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	20,20 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	38,8049 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	1,26 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	2,401 s

Tabla 5.25 Resultados de la simulación 6

Simulación 7

<i>Pieza</i>	Plancha persiana
<i>Material</i>	Aluminio
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso a)
<i>Tiempo</i>	Automático
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	650 °C

Tabla 5.26 Condiciones iniciales de la simulación 7

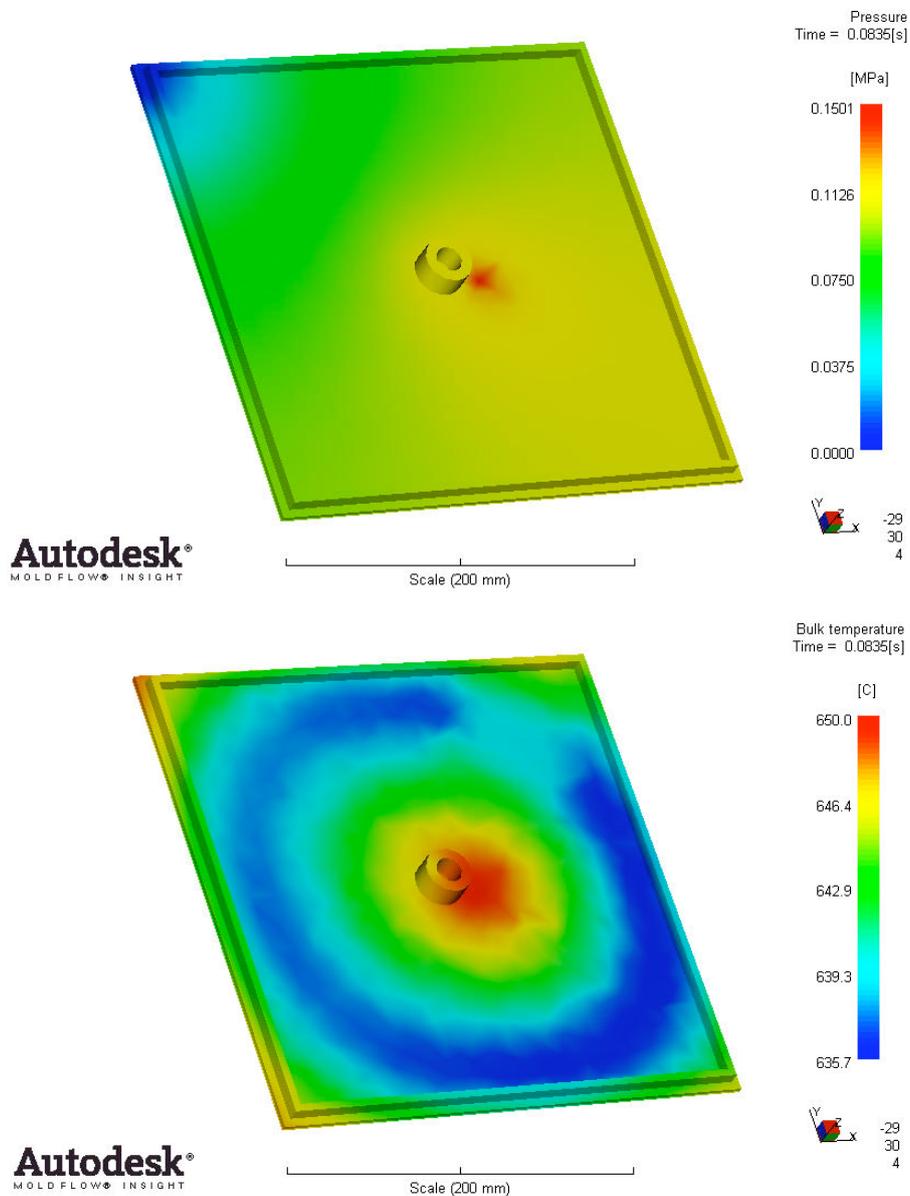


Figura 5.25 Presión y temperatura del material al final de la inyección

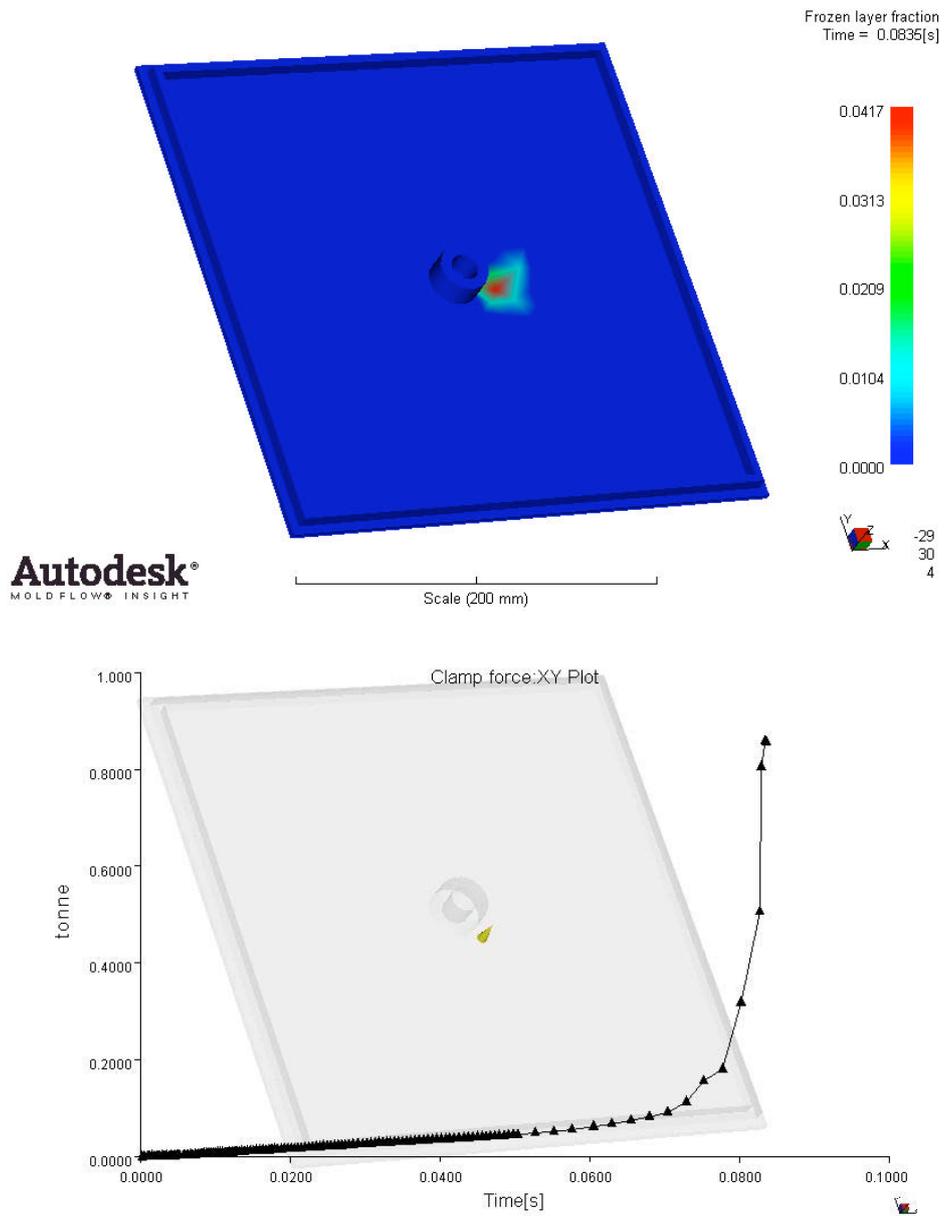


Figura 5.26 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	0,1501 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	0,8584 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	1,501 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,0835 s

Tabla 5.27 Resultados de la simulación 7

Simulación 8

<i>Pieza</i>	Plancha persiana
<i>Material</i>	Aluminio
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso b)
<i>Tiempo</i>	Automático
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	650 °C

Tabla 5.28 Condiciones iniciales de la simulación 8

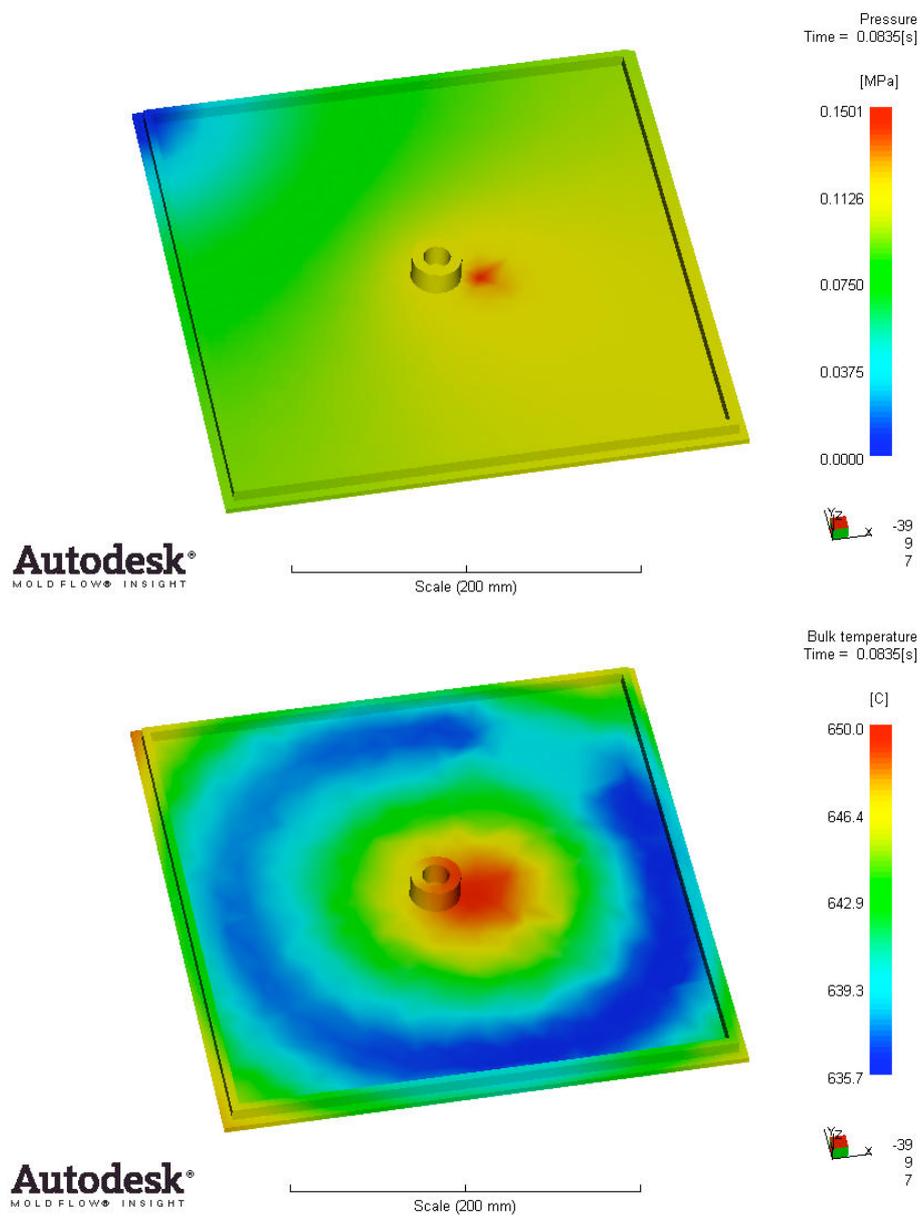


Figura 5.27 Presión y temperatura del material al final de la inyección

Diseño y puesta a punto de simulaciones de inyección de metales (MIM) mediante el uso del software *Moldflow*

Simulaciones y análisis de resultados

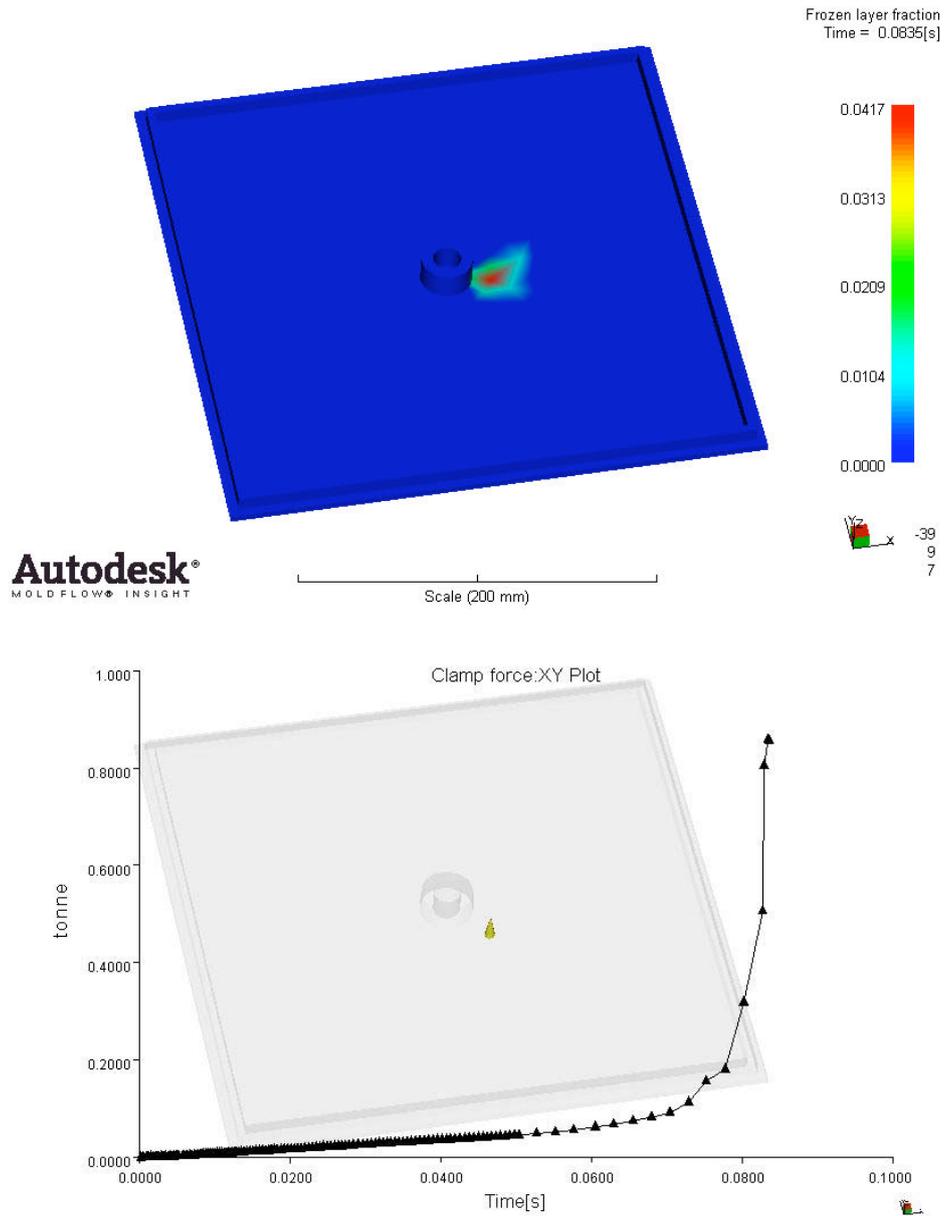


Figura 5.28 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	0,1501 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	0,8584 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	1,501 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,0835 s

Tabla 5.29 Resultados de la simulación 8

Simulación 9

<i>Pieza</i>	Plancha persiana
<i>Material</i>	Aluminio
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso a)
<i>Tiempo</i>	1 s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	650 °C

Tabla 5.30 Condiciones iniciales de la simulación 9

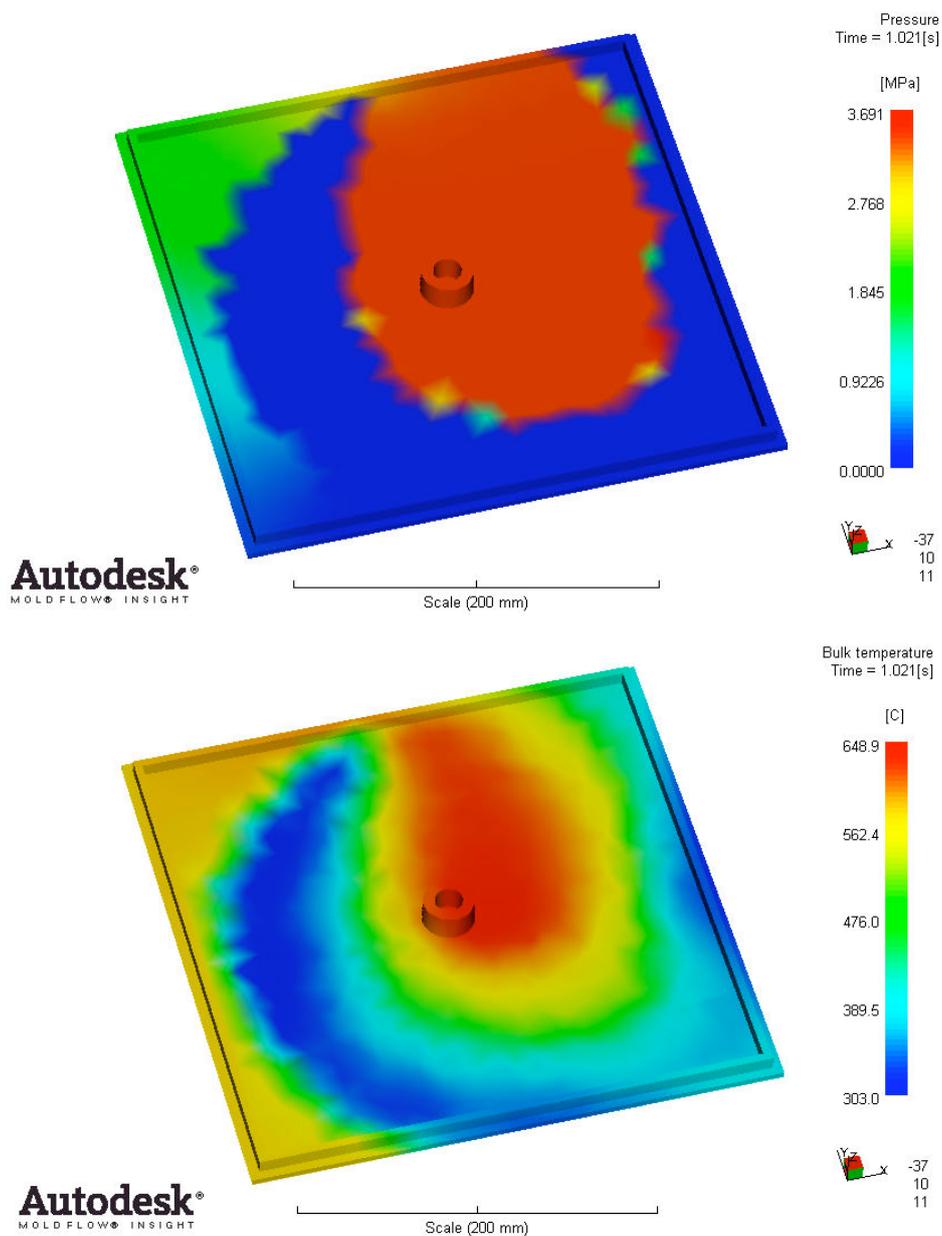


Figura 5.29 Presión y temperatura del material al final de la inyección

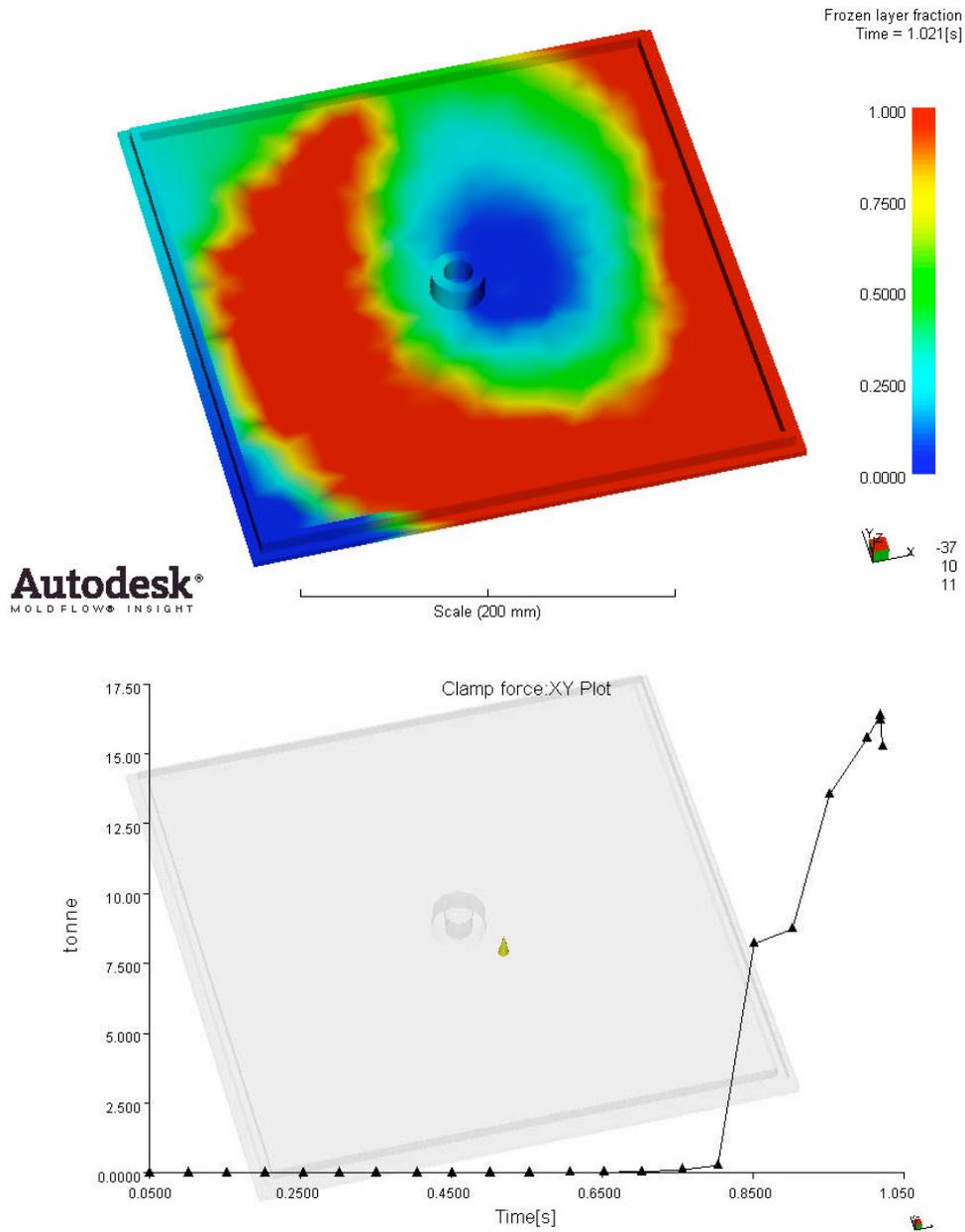


Figura 5.30 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	3,691 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	16,3601 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	1,504 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	1,021 s

Tabla 5.31 Resultados de la simulación 9

Simulación 10

<i>Pieza</i>	Plancha persiana
<i>Material</i>	Aluminio
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso b)
<i>Tiempo</i>	1 s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	650 °C

Tabla 5.30 Condiciones iniciales de la simulación 10

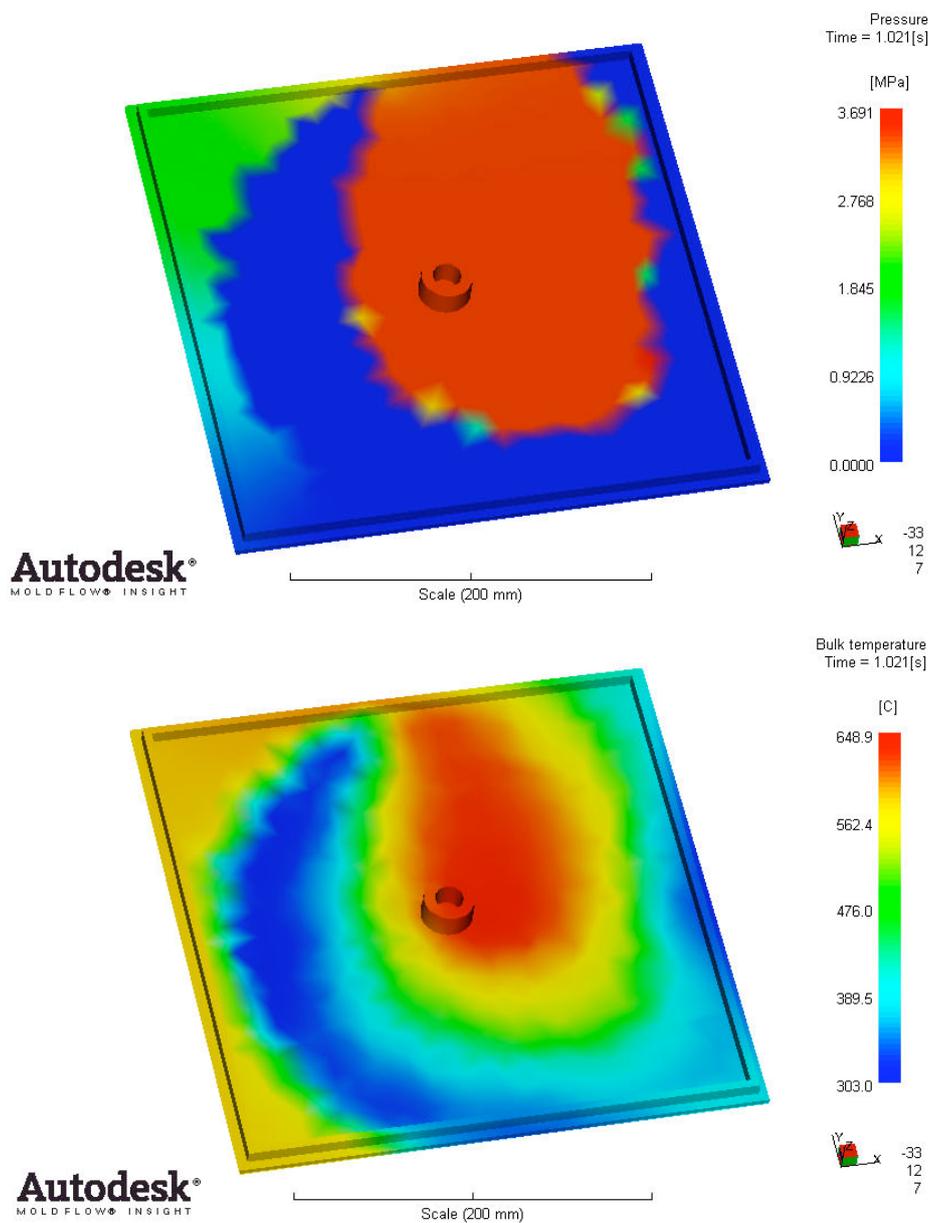


Figura 5.31 Presión y temperatura del material al final de la inyección



Diseño y puesta a punto de simulaciones de inyección de metales (MIM) mediante el uso del software *Moldflow*

Simulaciones y análisis de resultados

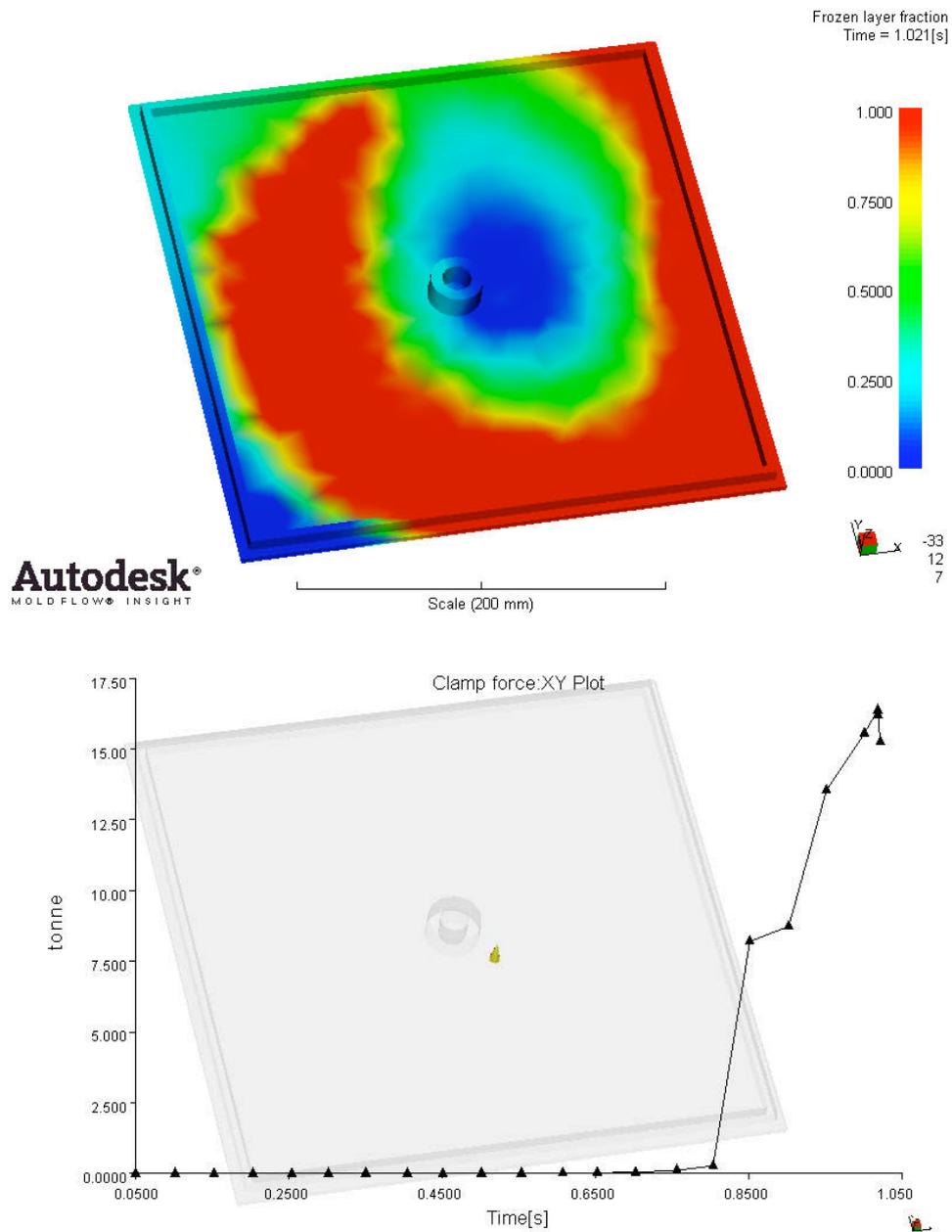


Figura 5.32 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	3,691 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	16,3601 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	1,504 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	1,021 s

Tabla 5.31 Resultados de la simulación 10

Simulación 11

<i>Pieza</i>	Plancha persiana
<i>Material</i>	Aluminio
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso a)
<i>Tiempo</i>	2 s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	650 °C

Tabla 5.32 Condiciones iniciales de la simulación 11

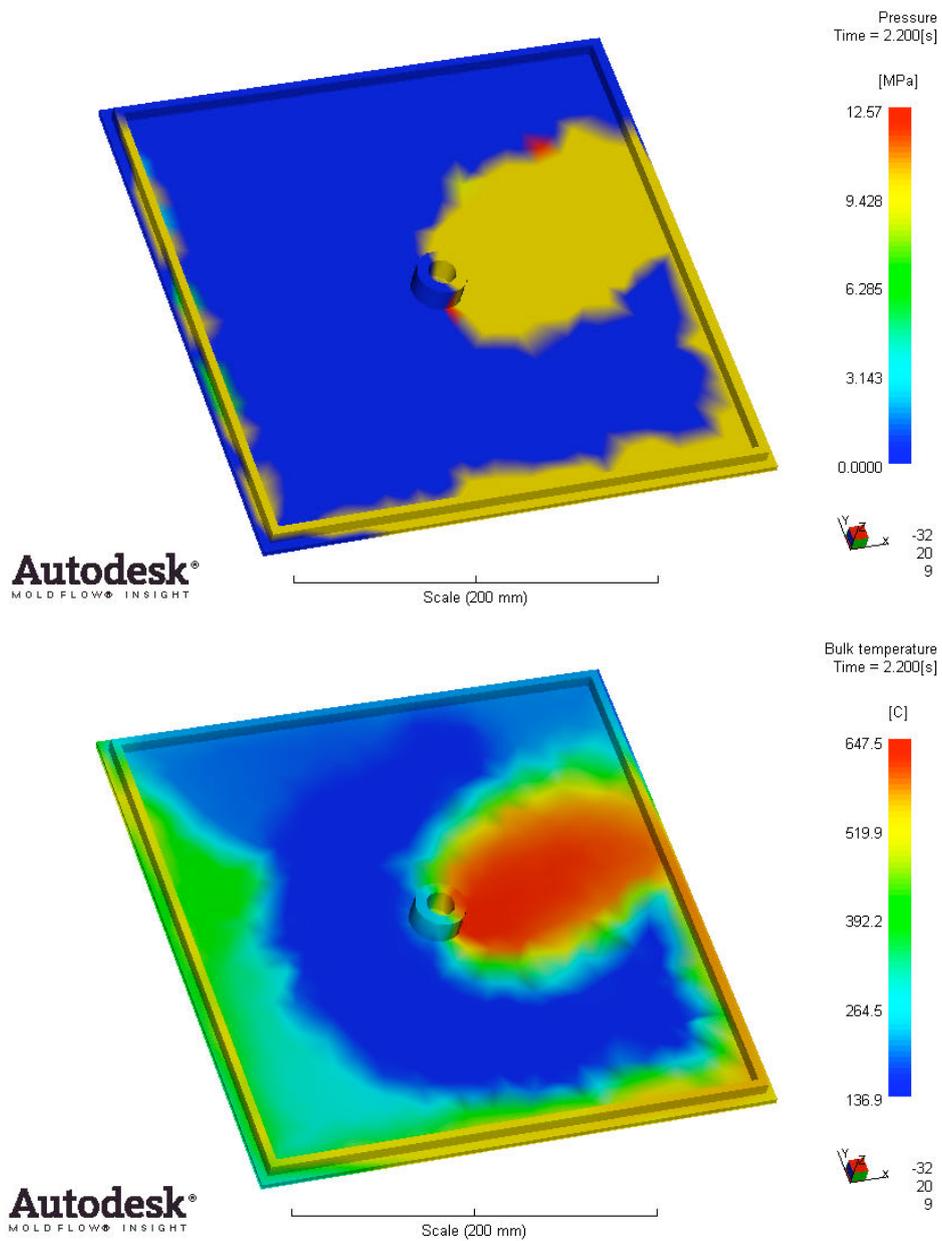


Figura 5.33 Presión y temperatura del material al final de la inyección

Diseño y puesta a punto de simulaciones de inyección de metales (MIM) mediante el uso del software *Moldflow*

Simulaciones y análisis de resultados

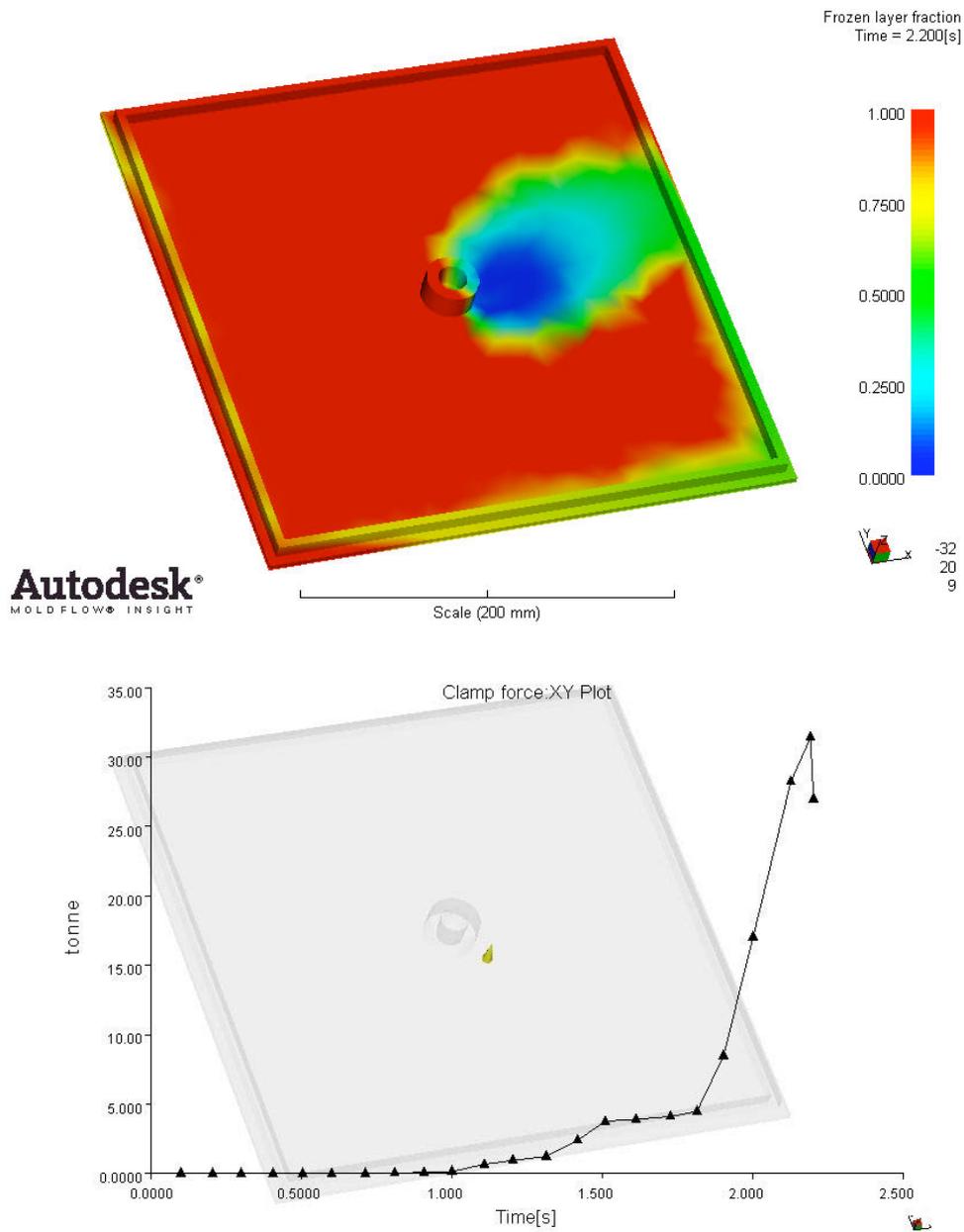


Figura 5.34 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	12,57 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	31,4090 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	1,26 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	2,2 s

Tabla 5.33 Resultados de la simulación 11

Simulación 12

<i>Pieza</i>	Plancha persiana
<i>Material</i>	Aluminio
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso b)
<i>Tiempo</i>	2 s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	650 °C

Tabla 5.34 Condiciones iniciales de la simulación 12

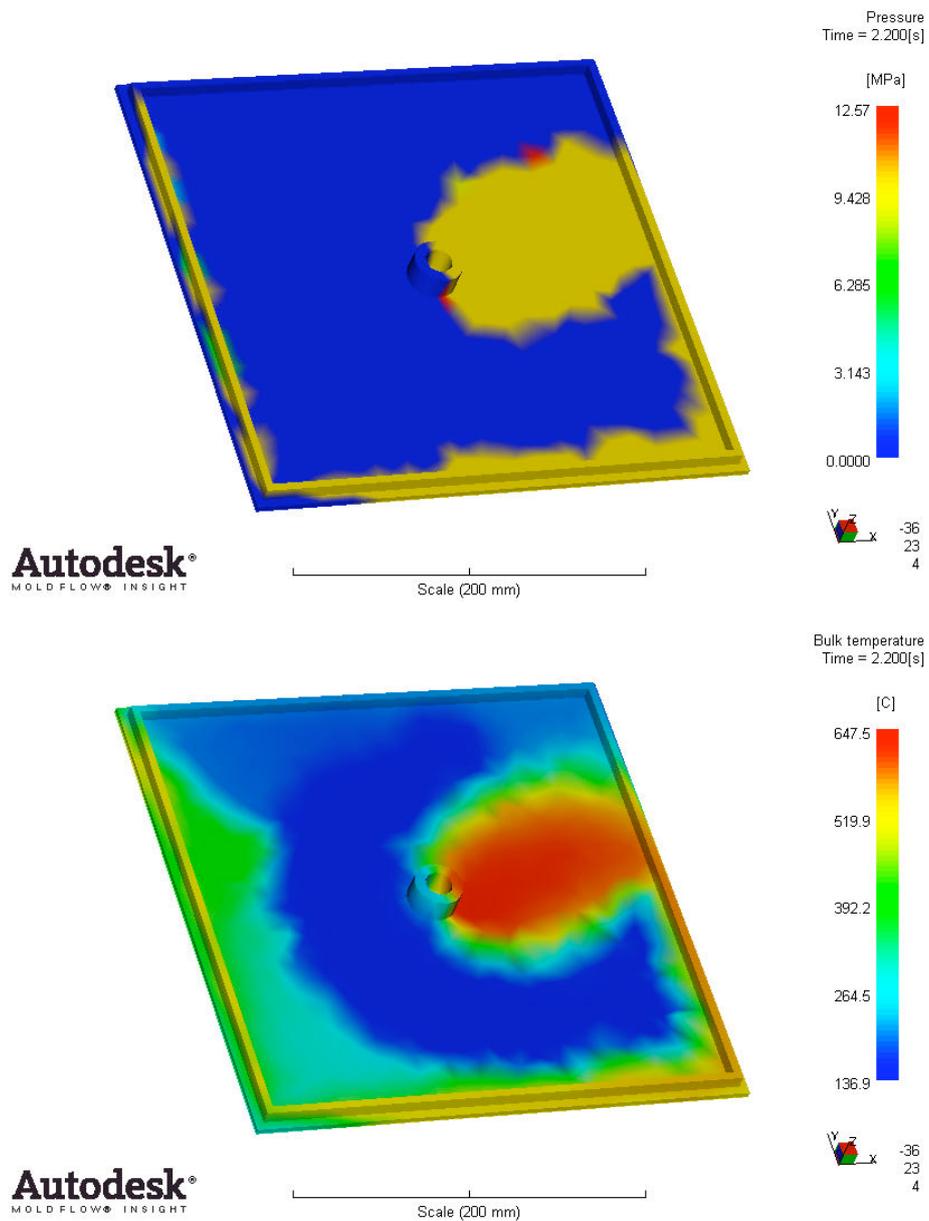


Figura 5.35 Presión y temperatura del material al final de la inyección

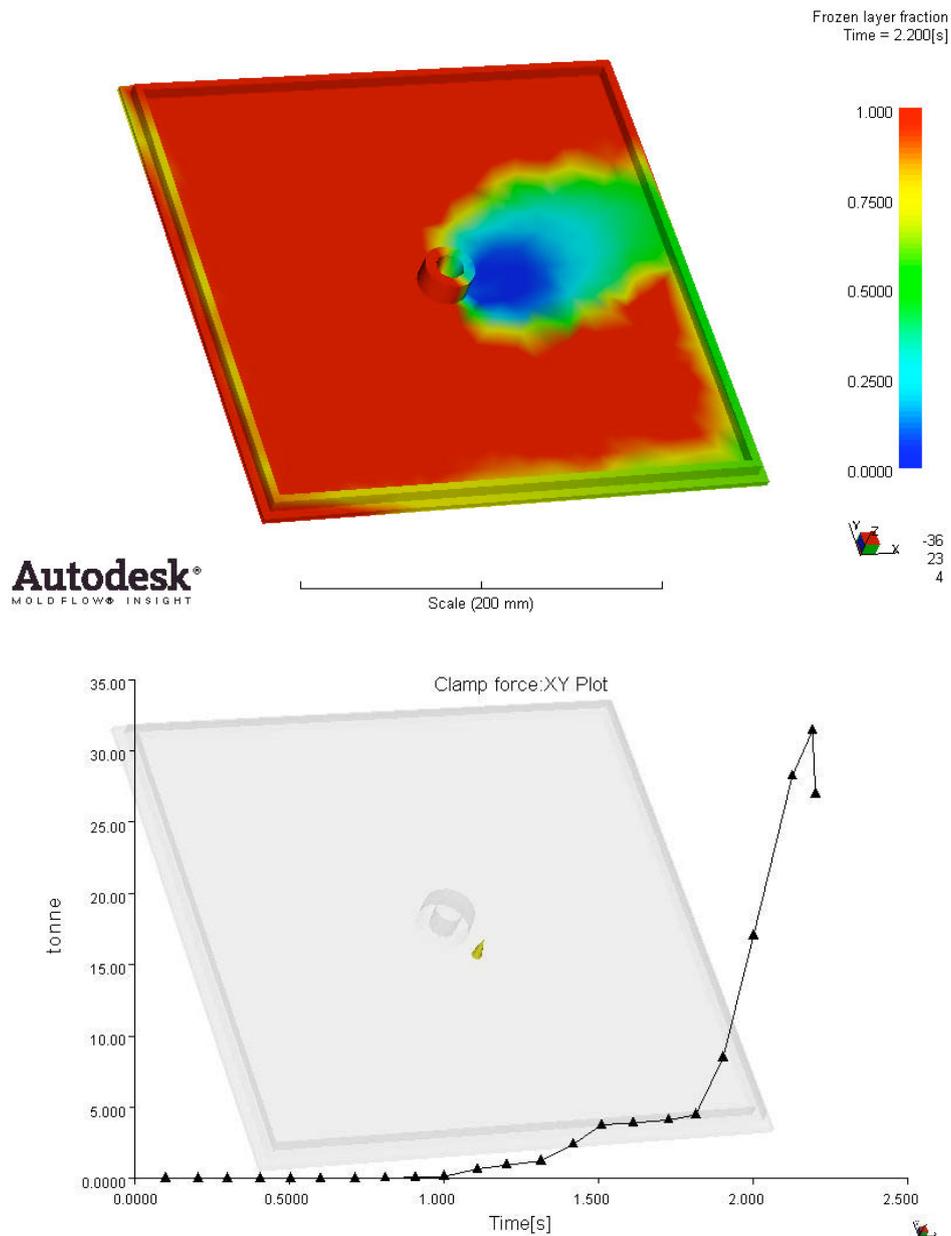


Figura 5.36 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	12,57 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	31,4090 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	1,26 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	2,2 s

Tabla 5.35 Resultados de la simulación 12

Simulación 13

<i>Pieza</i>	Tapa redonda
<i>Material</i>	Zamak
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso a)
<i>Tiempo</i>	Automático
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	420 °C

Tabla 5.36 Condiciones iniciales de la simulación 13

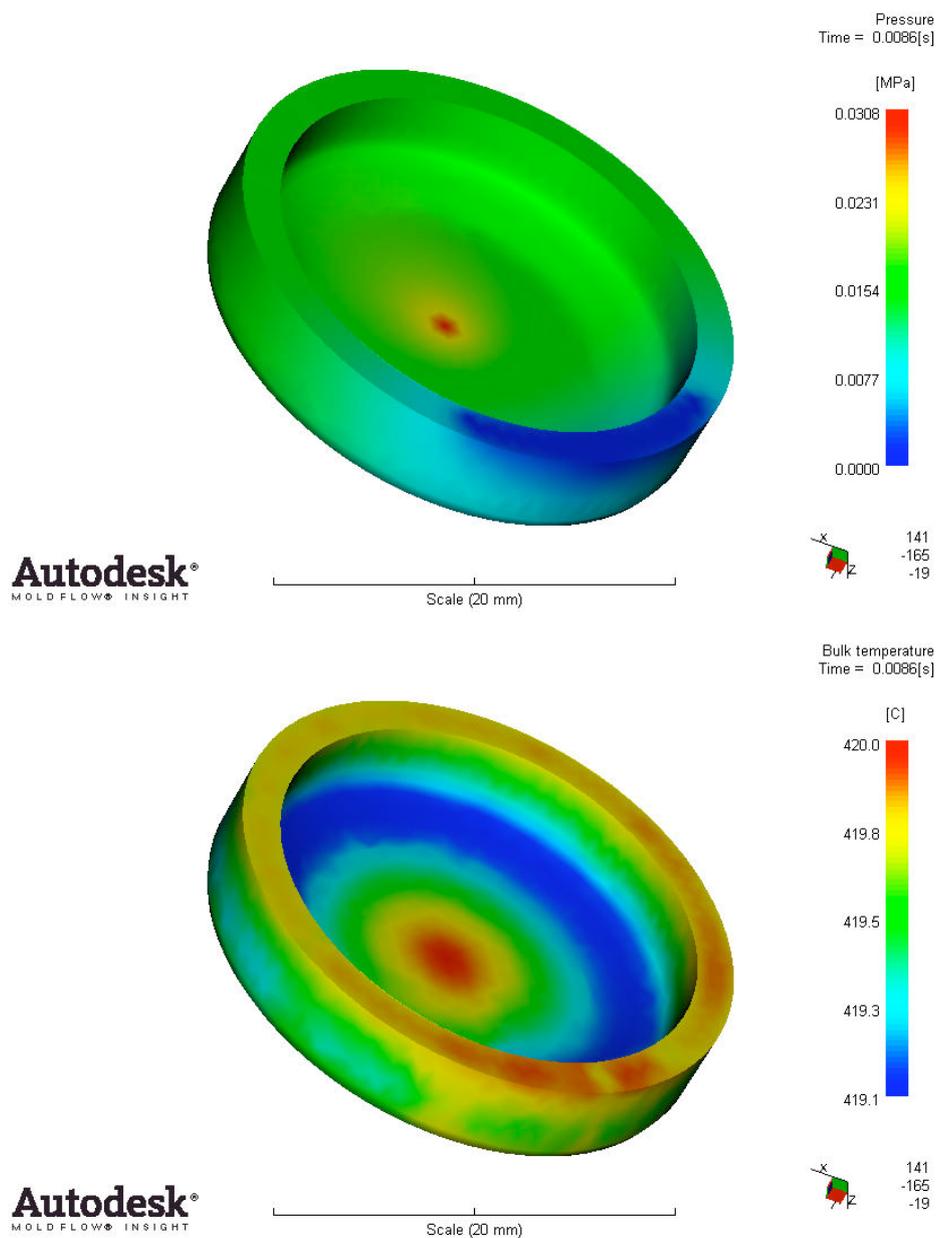


Figura 5.37 Presión y temperatura del material al final de la inyección

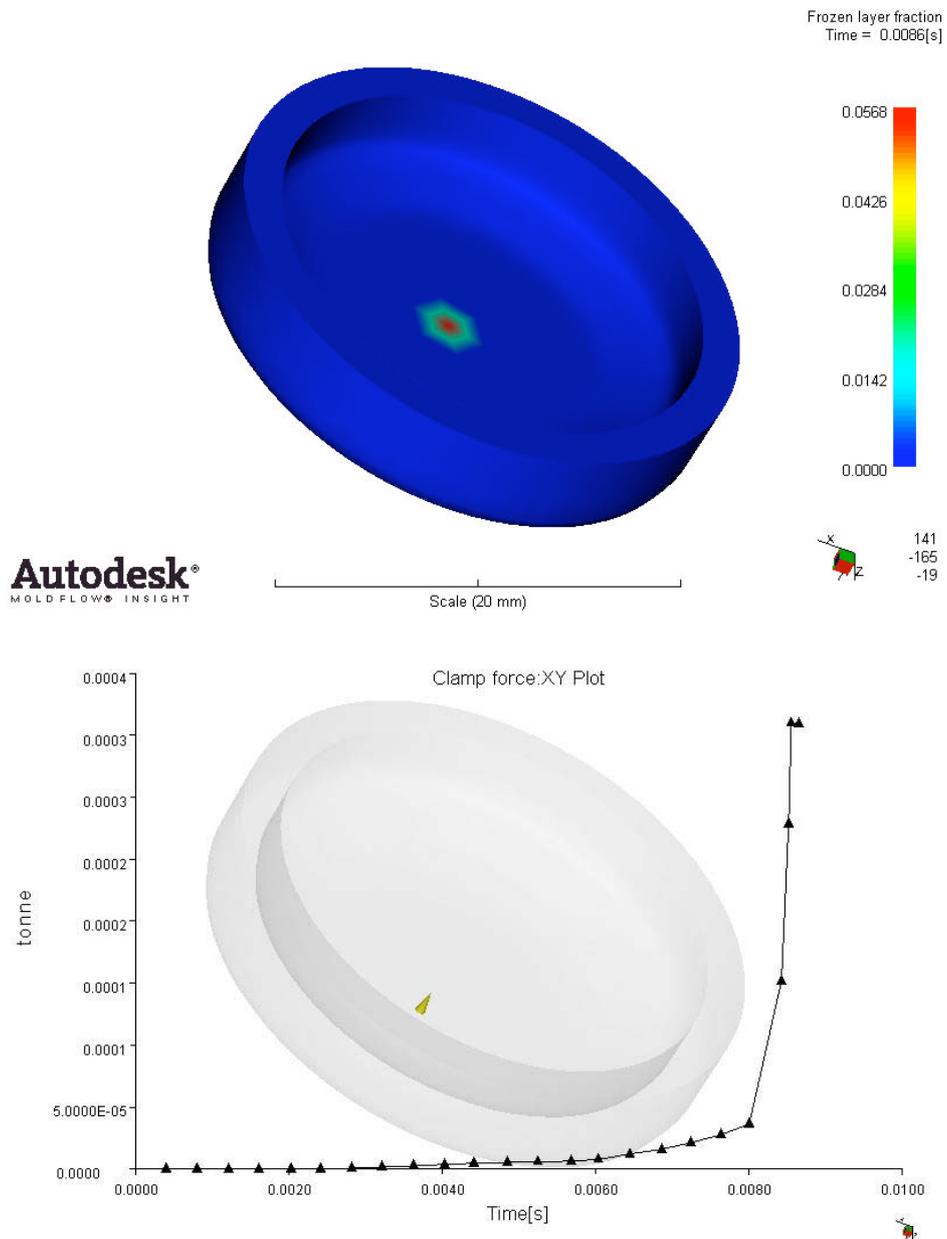


Figura 5.38 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	0,0308 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	0,0004 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	0,5001 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,0086 s

Tabla 5.37 Resultados de la simulación 13

Simulación 14

<i>Pieza</i>	Tapa redonda
<i>Material</i>	Zamak
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso b)
<i>Tiempo</i>	Automático
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	420 °C

Tabla 5.38 Condiciones iniciales de la simulación 14

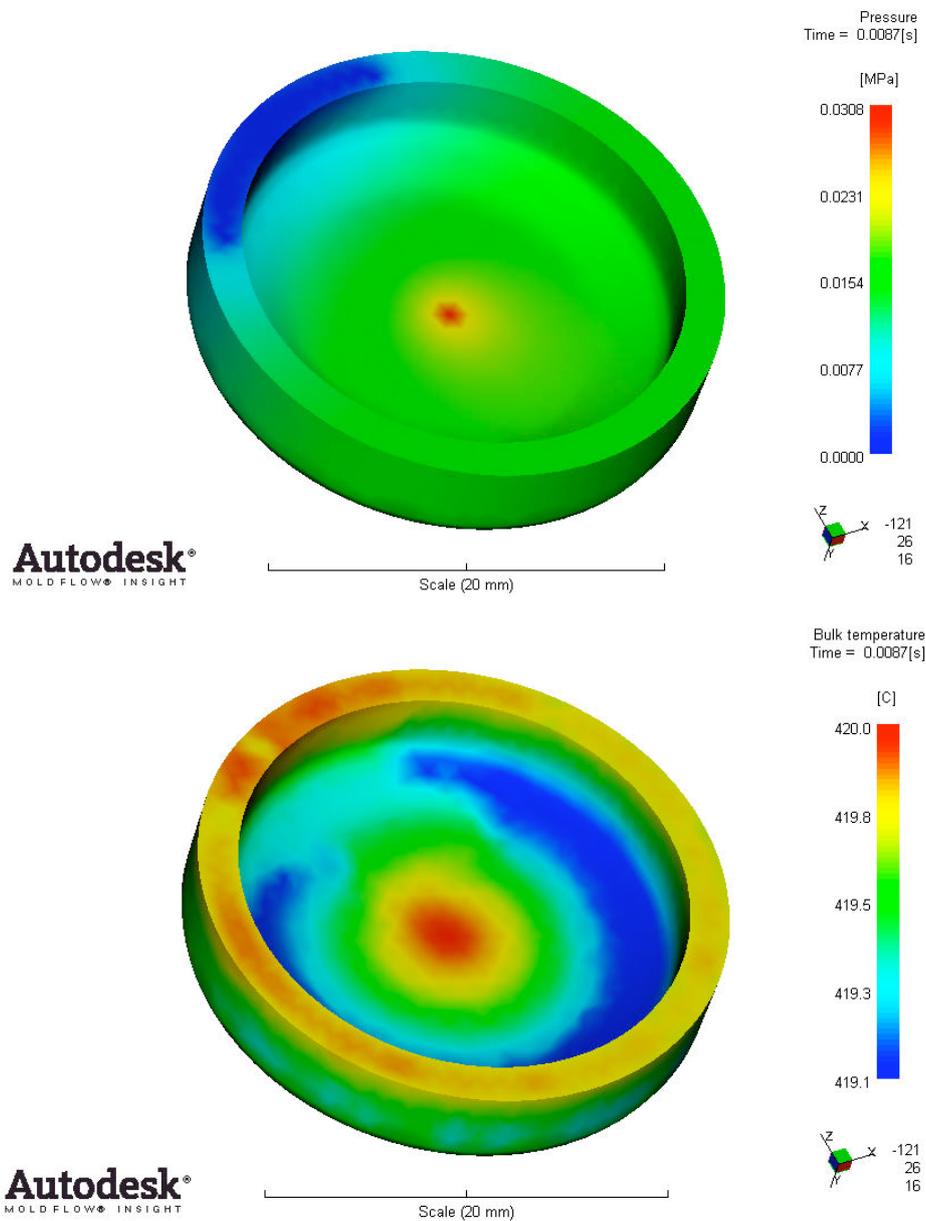


Figura 5.39 Presión y temperatura del material al final de la inyección

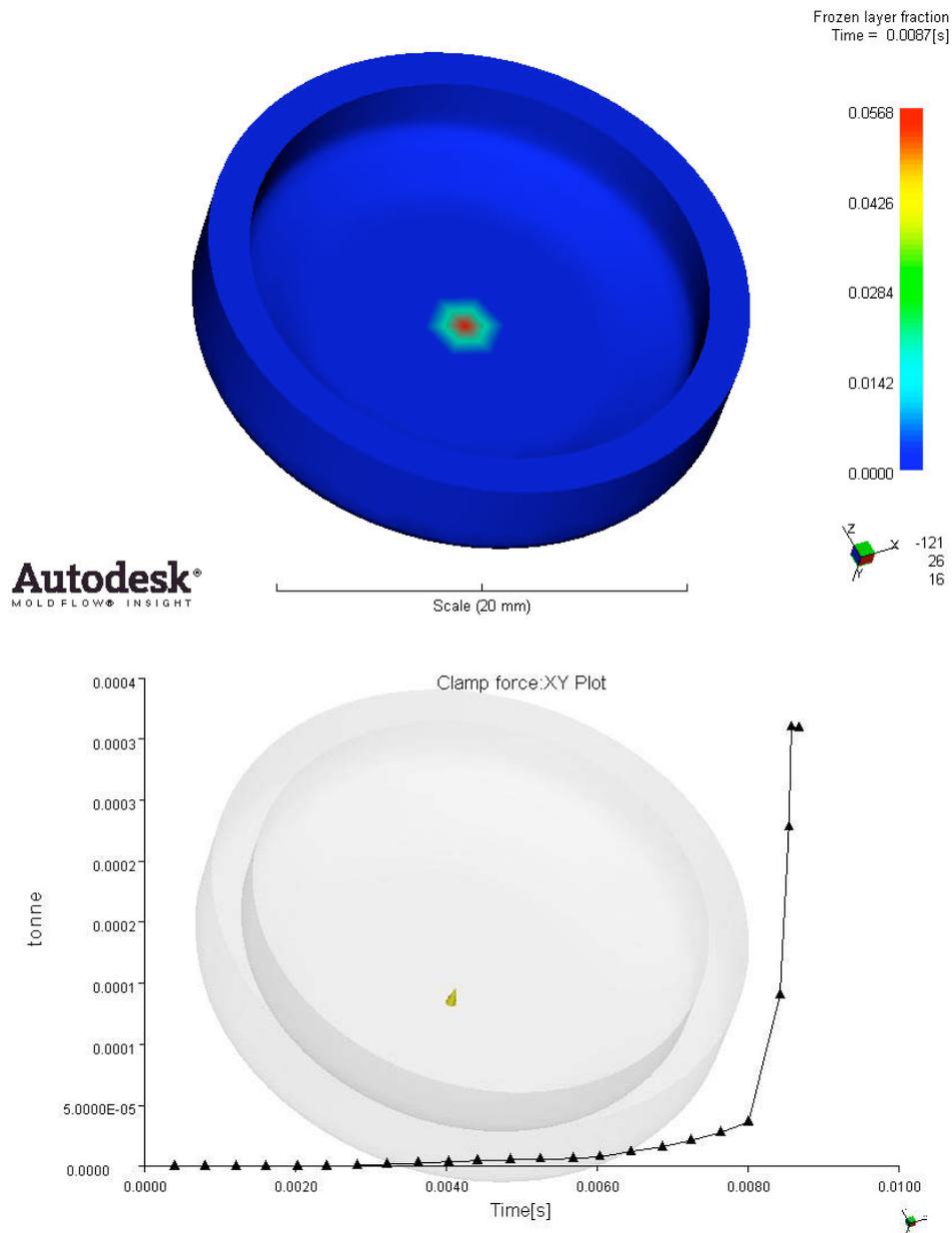


Figura 5.40 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	0,0308 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	0,0004 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	0,5001 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,0087 s

Tabla 5.39 Resultados de la simulación 14

Simulación 15

<i>Pieza</i>	Tapa redonda
<i>Material</i>	Zamak
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso a)
<i>Tiempo</i>	0,3 s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	420 °C

Tabla 5.40 Condiciones iniciales de la simulación 15

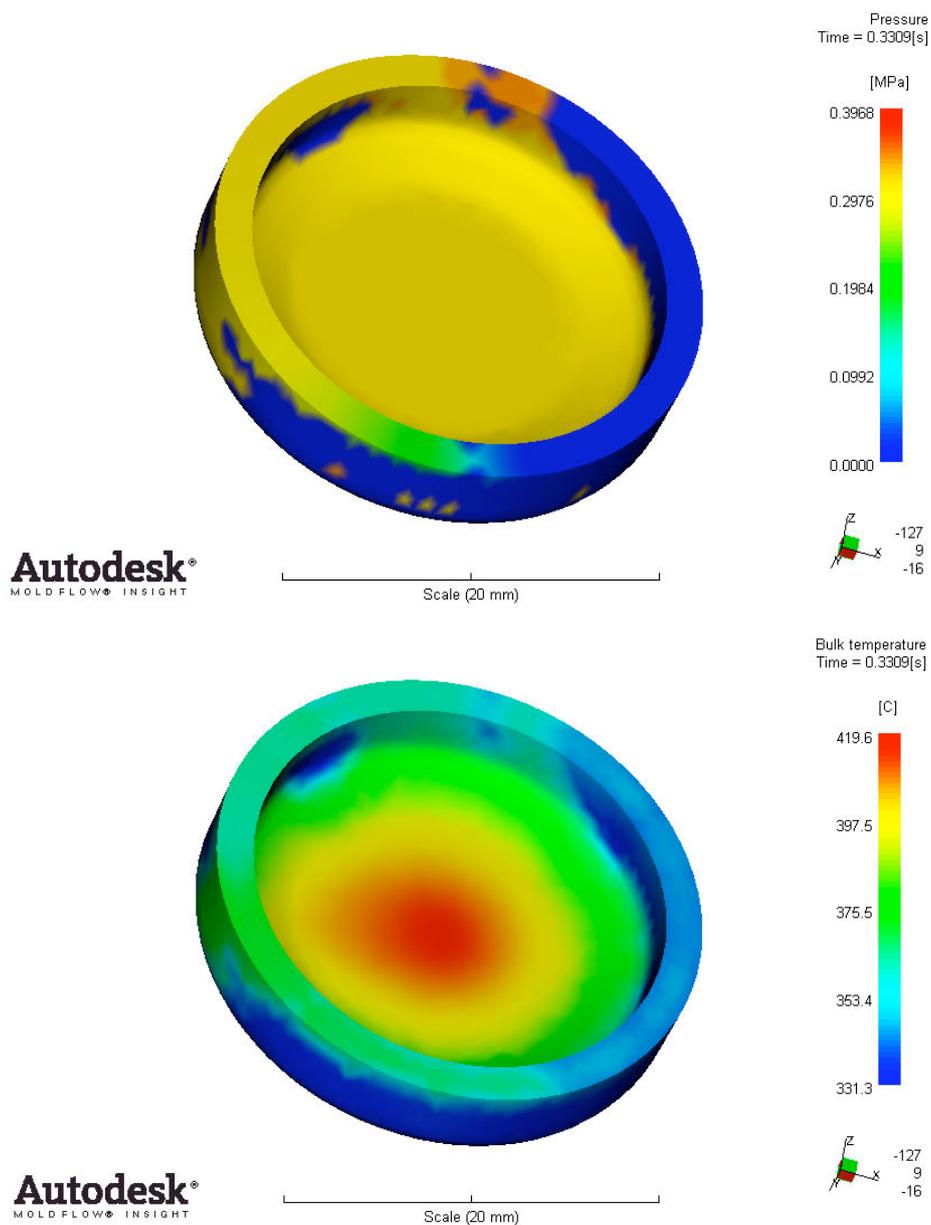


Figura 5.41 Presión y temperatura del material al final de la inyección

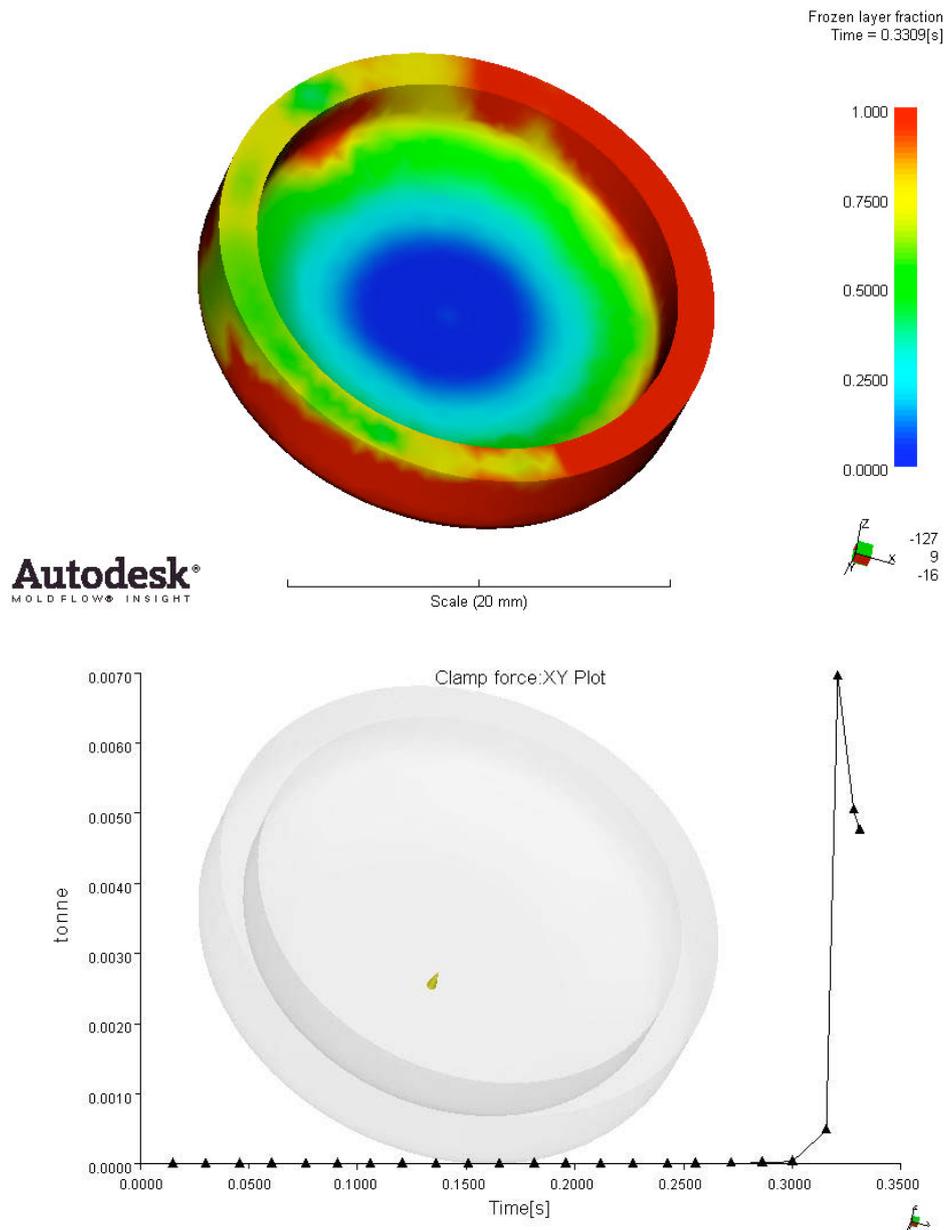


Figura 5.42 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	0,3968 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	0,0069 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	0,26 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,3309 s

Tabla 5.41 Resultados de la simulación 15

Simulación 16

<i>Pieza</i>	Tapa redonda
<i>Material</i>	Zamak
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso b)
<i>Tiempo</i>	0,3 s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	420 °C

Tabla 5.42 Condiciones iniciales de la simulación 16

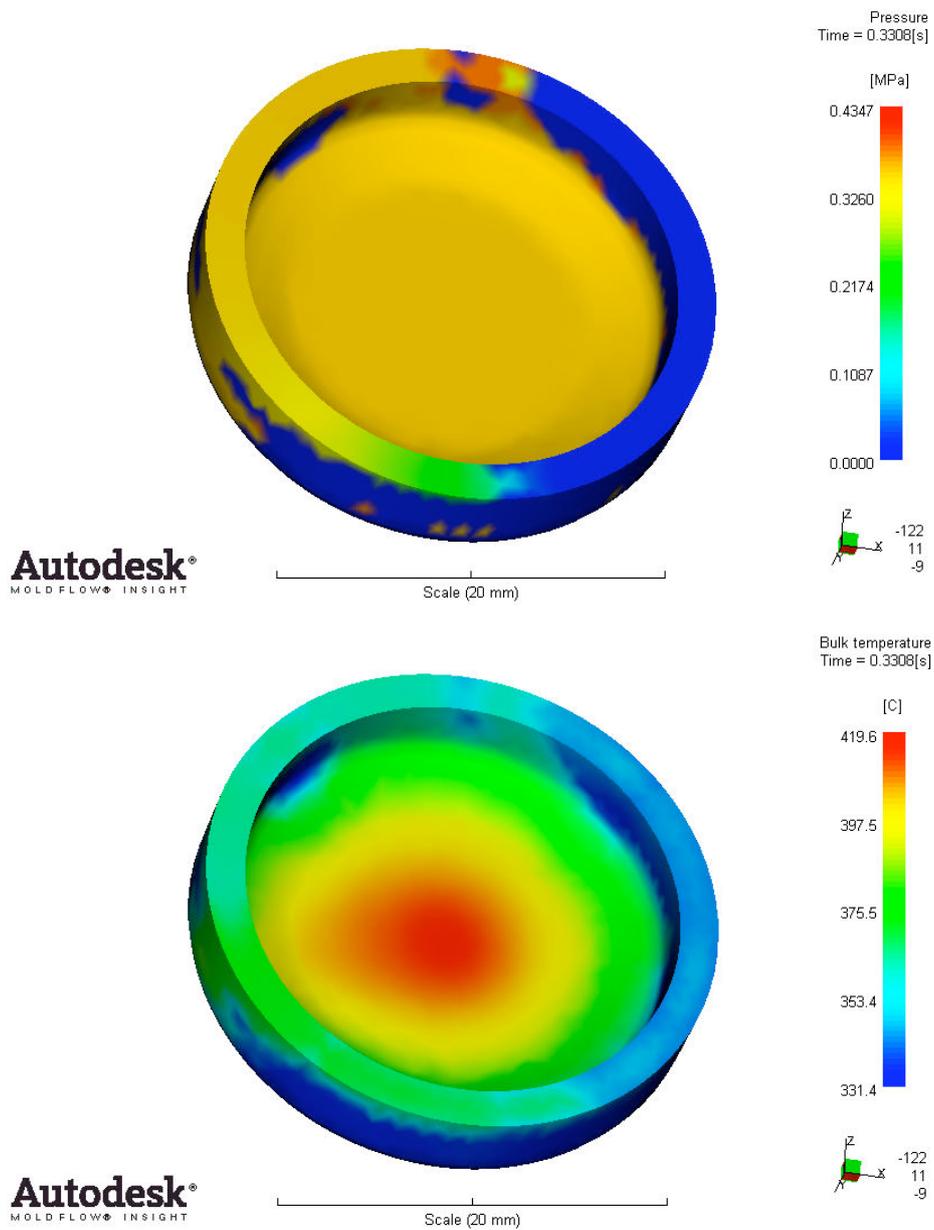


Figura 5.43 Presión y temperatura del material al final de la inyección



Diseño y puesta a punto de simulaciones de inyección de metales (MIM) mediante el uso del software *Moldflow*

Simulaciones y análisis de resultados

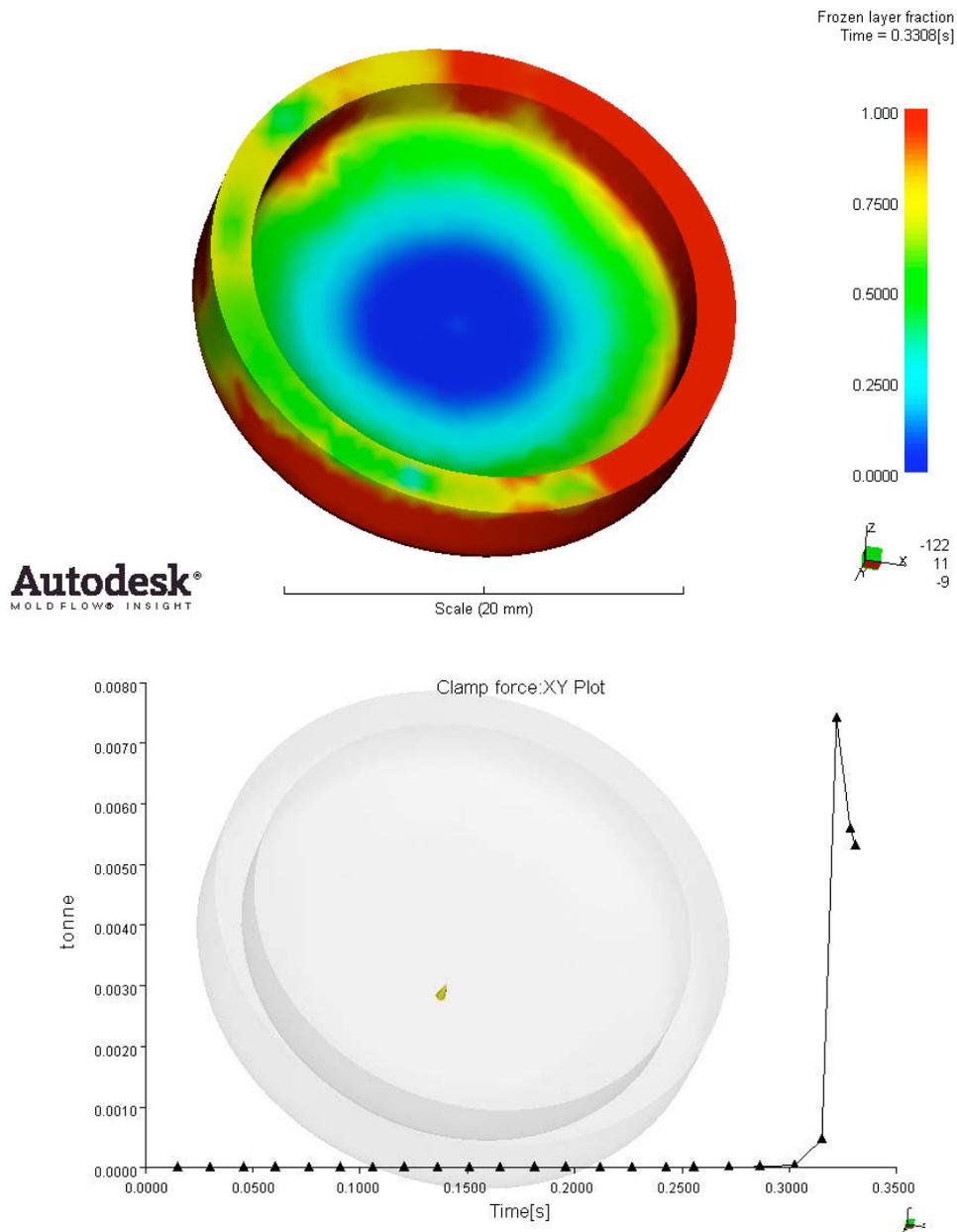


Figura 5.44 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	0,4347 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	0,0074 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	0,2589 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,3308 s

Tabla 5.43 Resultados de la simulación 16

Simulación 17

<i>Pieza</i>	Tapa redonda
<i>Material</i>	Zamak
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso a)
<i>Tiempo</i>	0,59 s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	420 °C

Tabla 5.44 Condiciones iniciales de la simulación 17

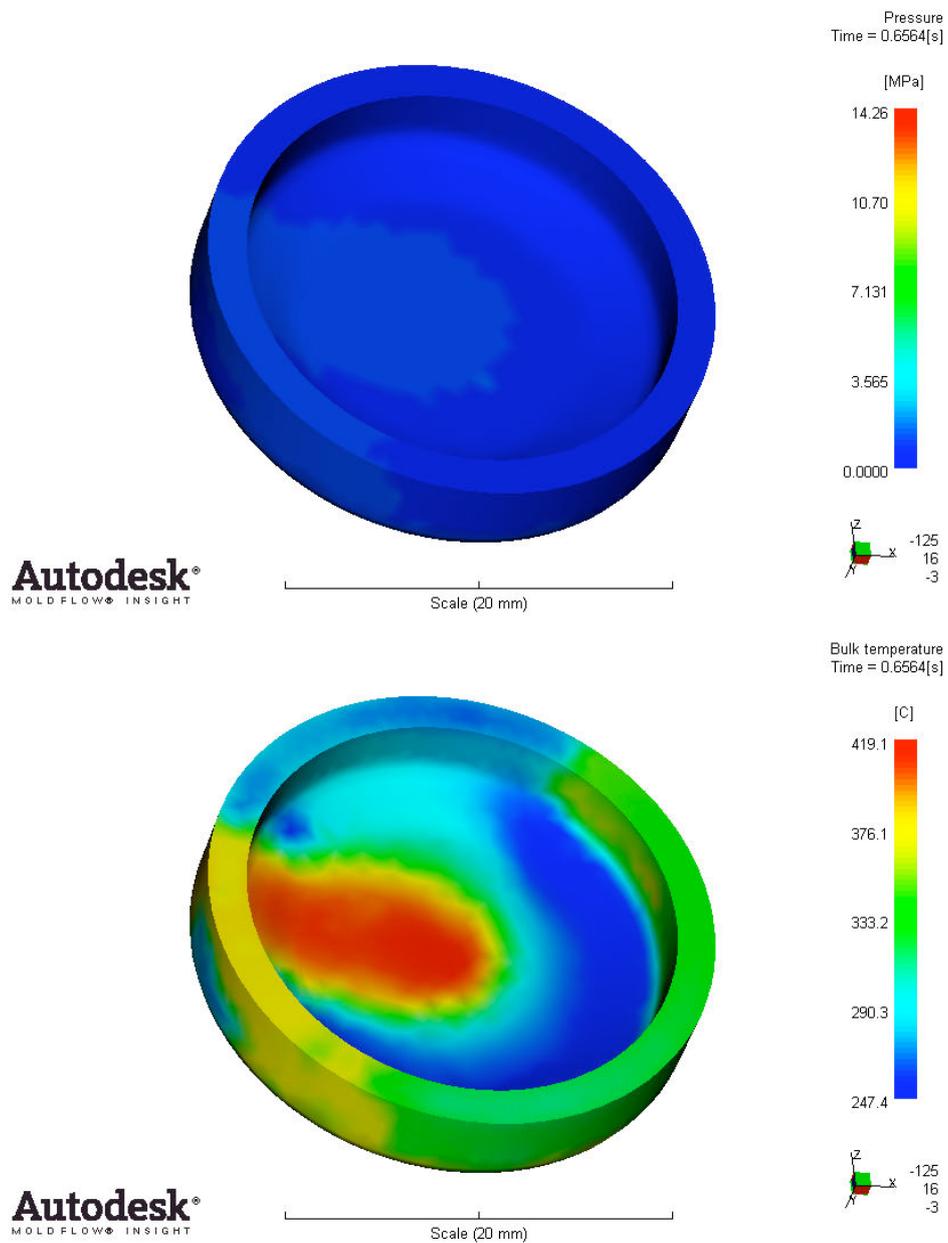


Figura 5.45 Presión y temperatura del material al final de la inyección

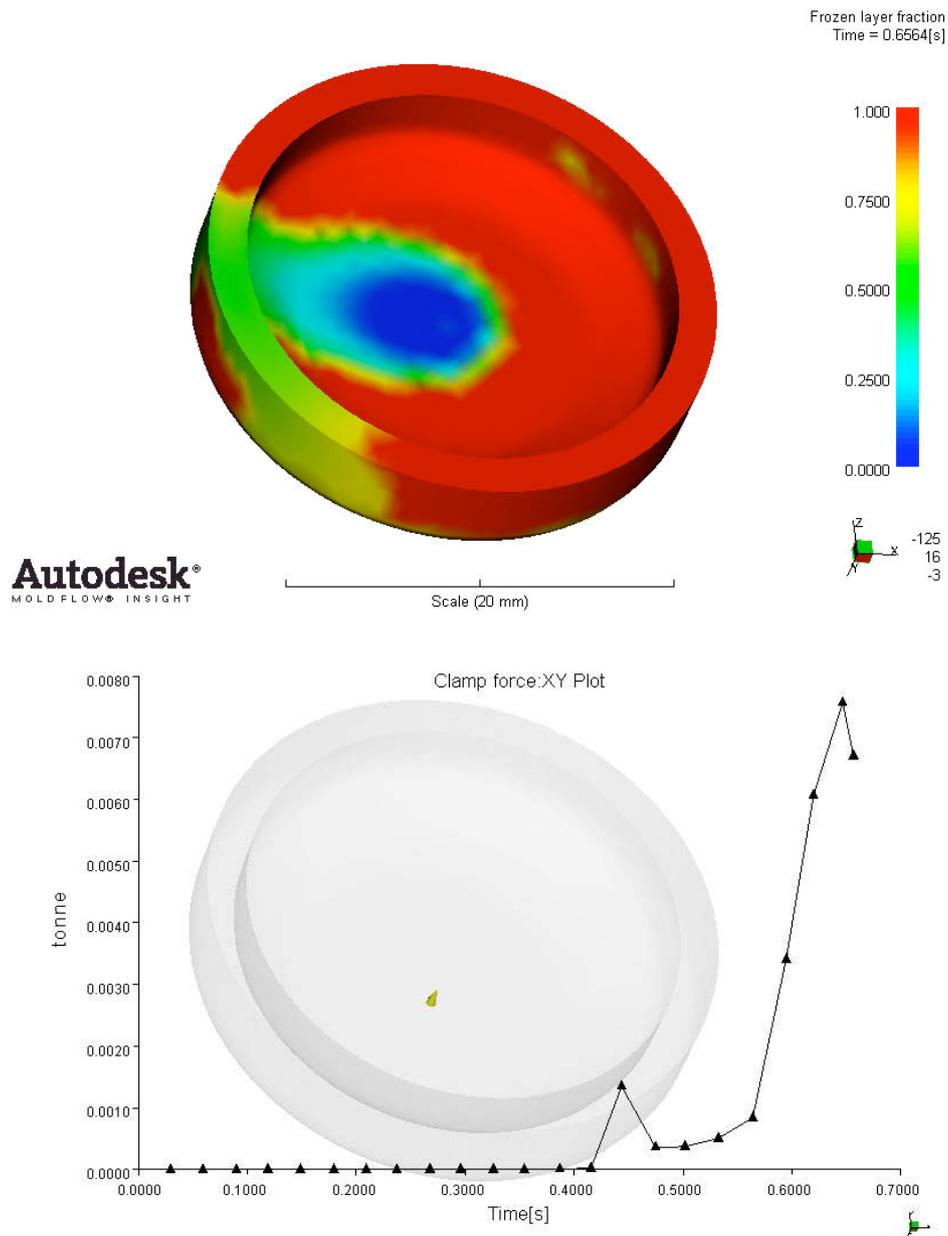


Figura 5.46 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	14,26 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	0,0076 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	0,26 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,6564 s

Tabla 5.45 Resultados de la simulación 17

Simulación 18

<i>Pieza</i>	Tapa redonda
<i>Material</i>	Zamak
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso b)
<i>Tiempo</i>	0,59 s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	420 °C

Tabla 5.46 Condiciones iniciales de la simulación 18

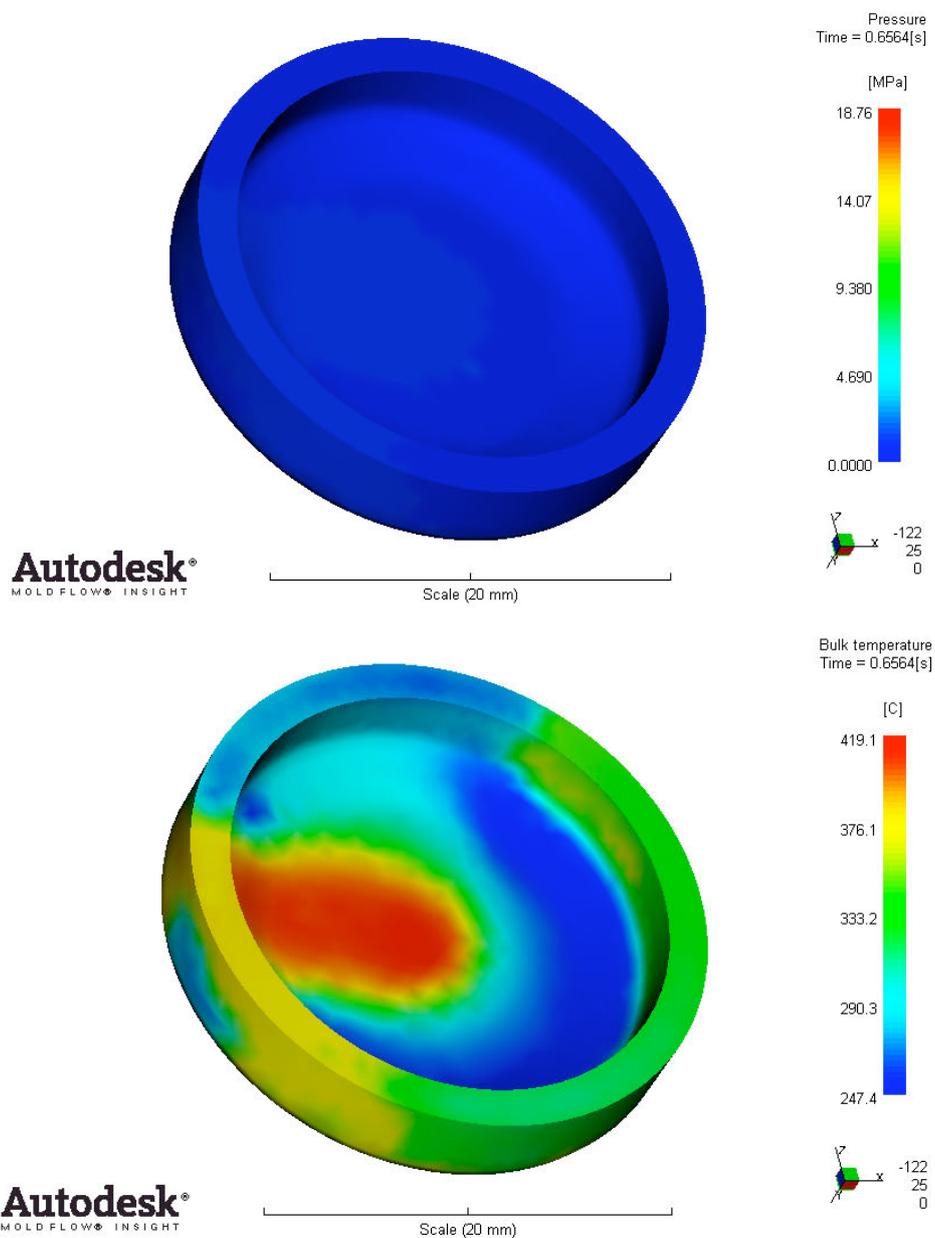


Figura 5.47 Presión y temperatura del material al final de la inyección

Diseño y puesta a punto de simulaciones de inyección de metales (MIM) mediante el uso del software *Moldflow*

Simulaciones y análisis de resultados

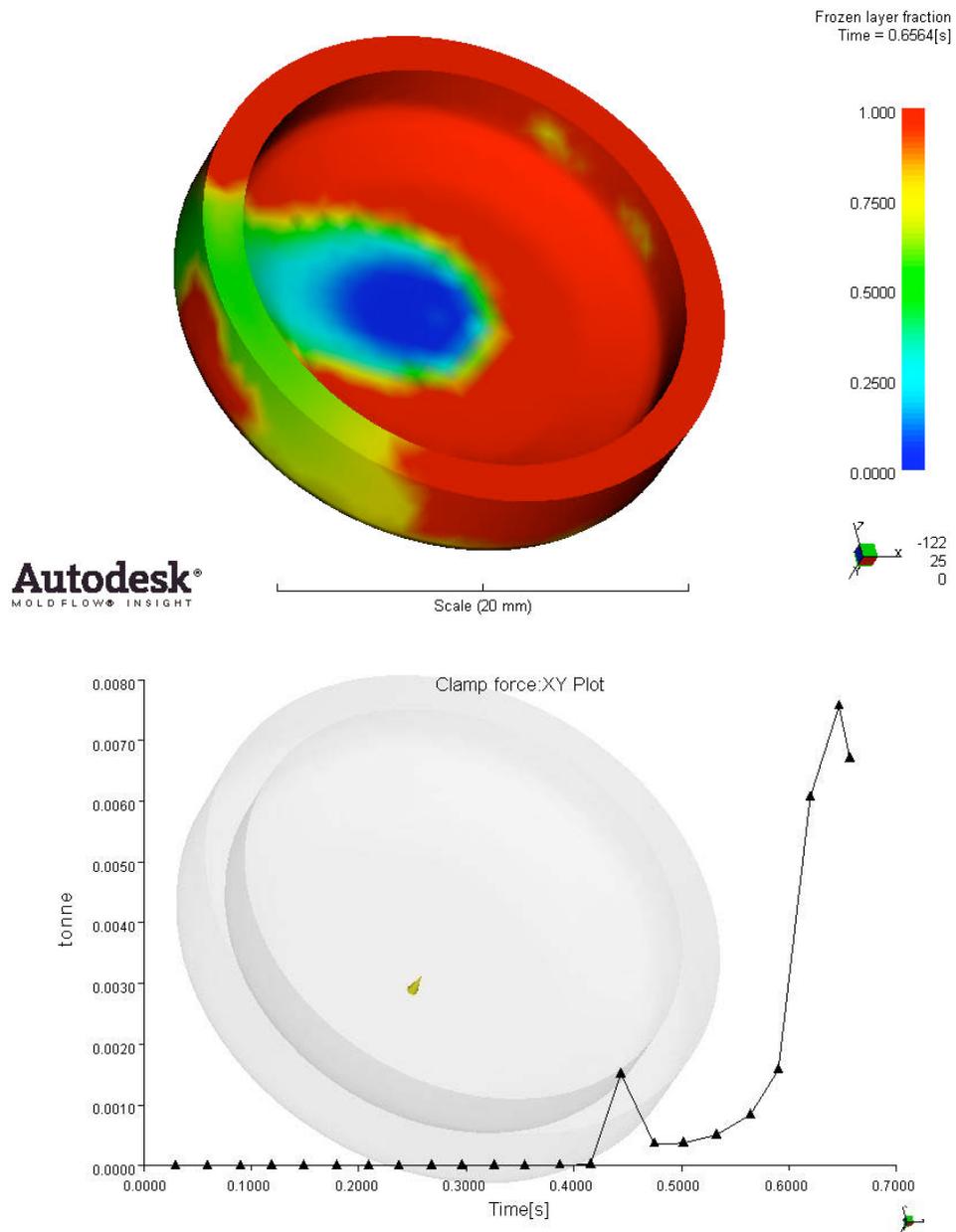


Figura 5.48 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	18,76 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	0,0076 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	0,26 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,6564 s

Tabla 5.47 Resultados de la simulación 18

Simulación 19

<i>Pieza</i>	Tapa redonda
<i>Material</i>	Aluminio
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso a)
<i>Tiempo</i>	Automático
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	650 °C

Tabla 5.48 Condiciones iniciales de la simulación 19

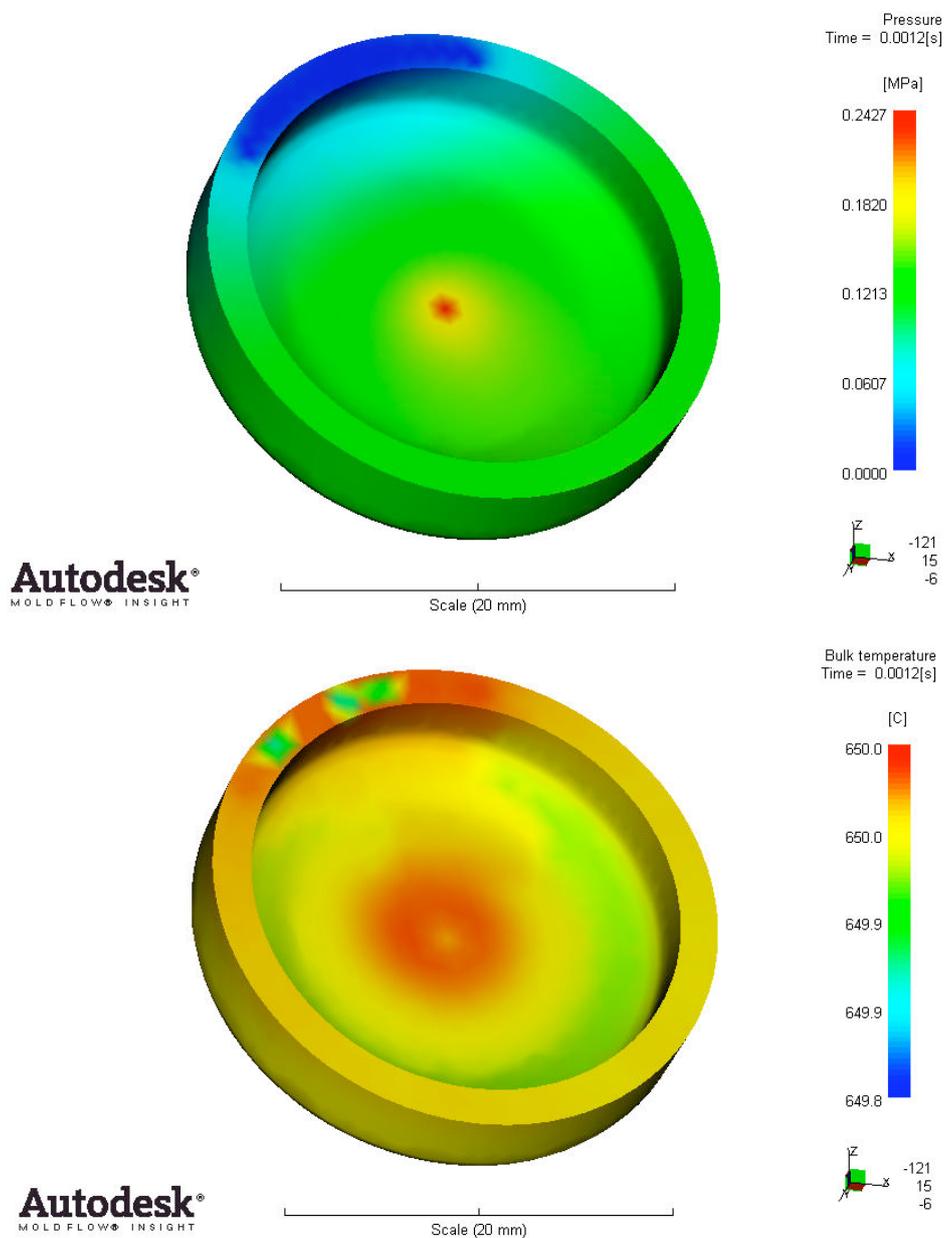


Figura 5.49 Presión y temperatura del material al final de la inyección

Diseño y puesta a punto de simulaciones de inyección de metales (MIM) mediante el uso del software *Moldflow*

Simulaciones y análisis de resultados

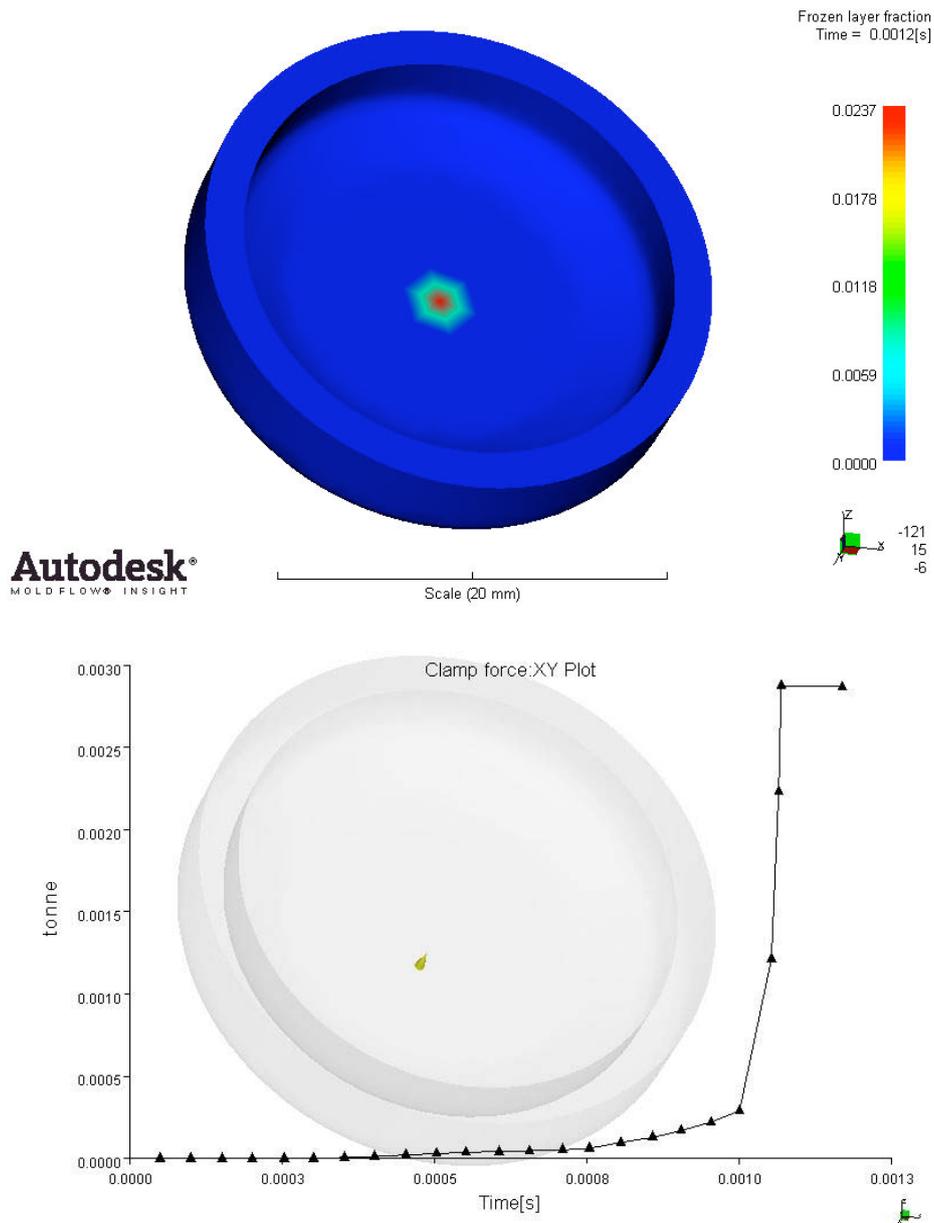


Figura 5.50 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	0,2427 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	0,0029 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	0,5001 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,0012 s

Tabla 5.49 Resultados de la simulación 19

Simulación 20

<i>Pieza</i>	Tapa redonda
<i>Material</i>	Aluminio
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso b)
<i>Tiempo</i>	Automático
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	650 °C

Tabla 5.50 Condiciones iniciales de la simulación 20

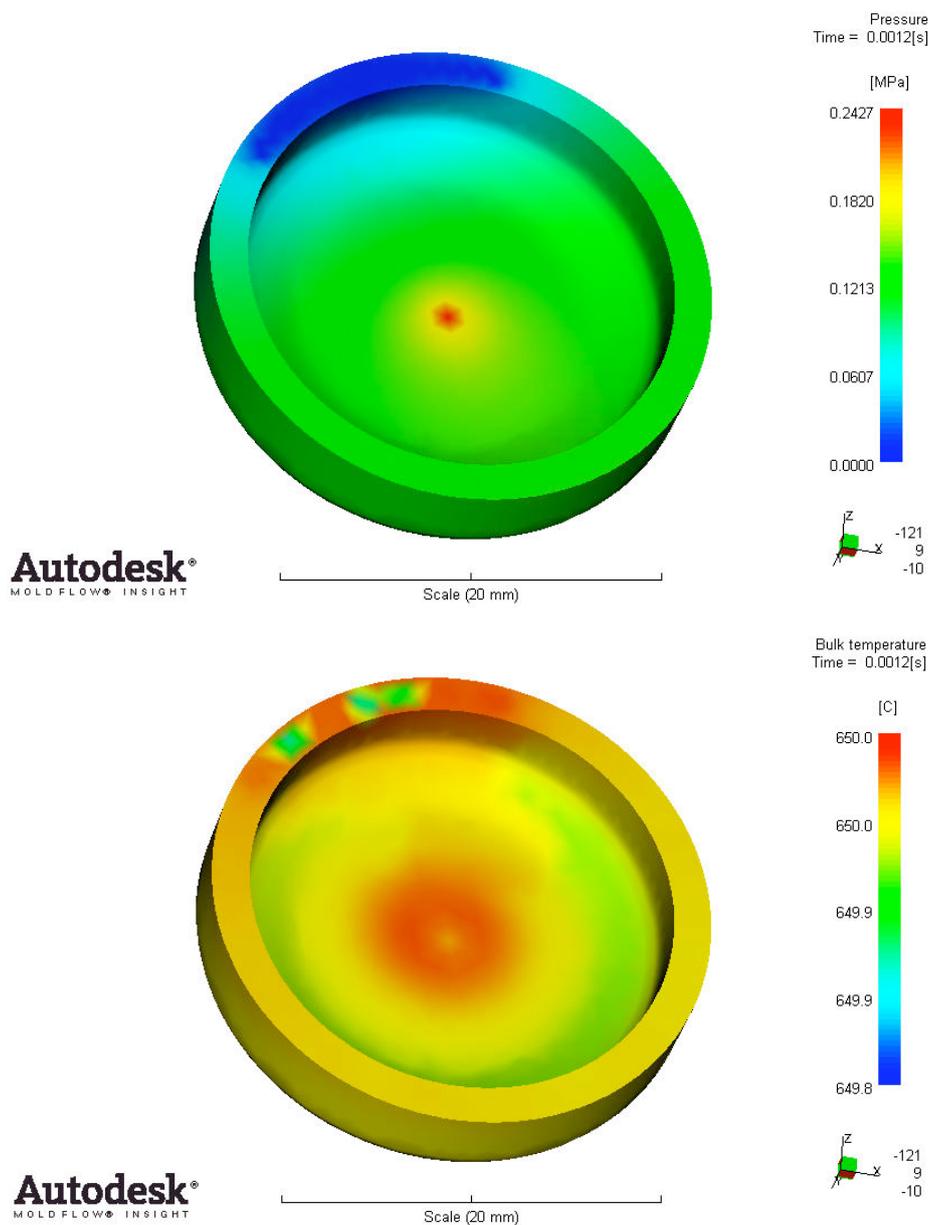


Figura 5.51 Presión y temperatura del material al final de la inyección

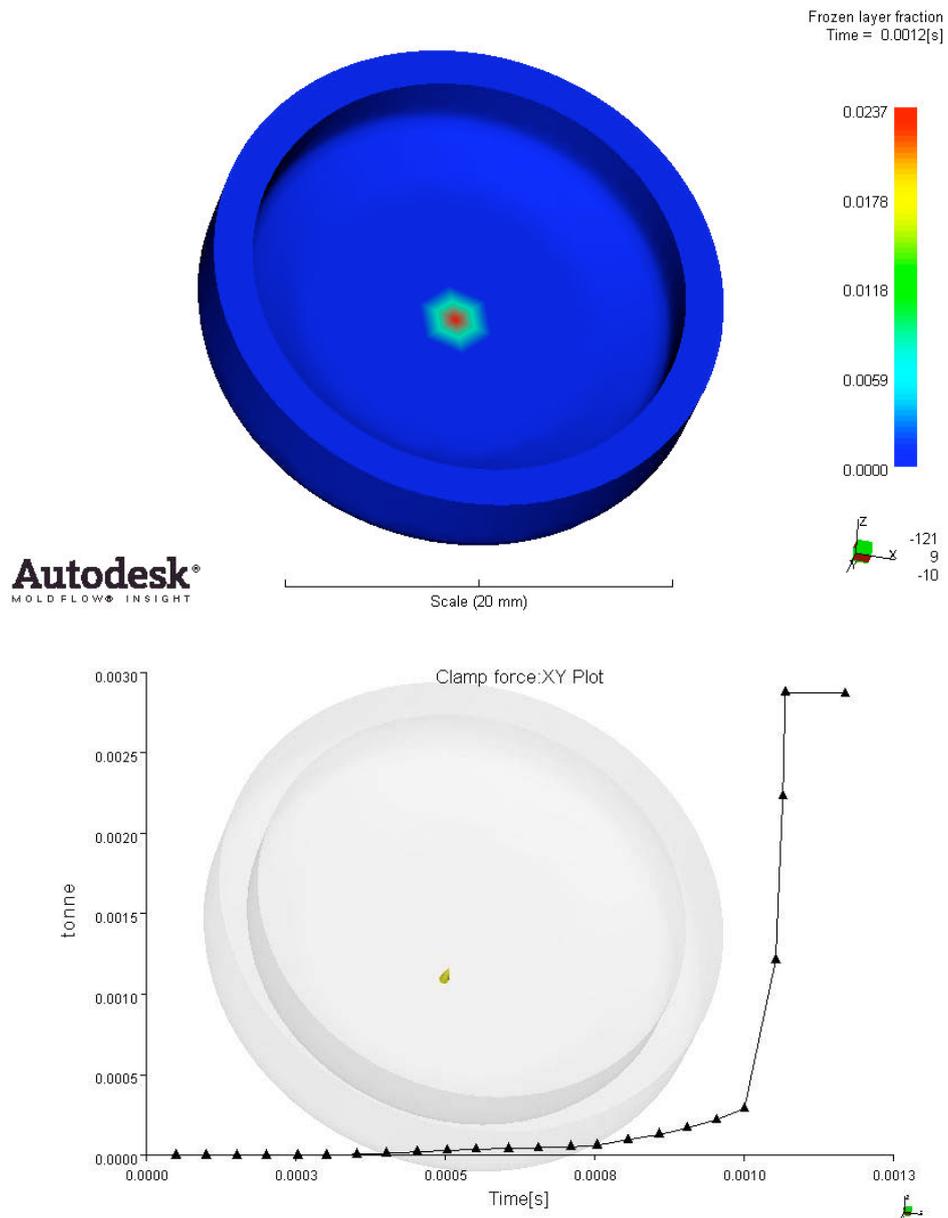


Figura 5.52 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	0,2427 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	0,0029 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	0,5001 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,0012 s

Tabla 5.51 Resultados de la simulación 20

Simulación 21

<i>Pieza</i>	Tapa redonda
<i>Material</i>	Aluminio
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso a)
<i>Tiempo</i>	0,3 s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	650 °C

Tabla 5.52 Condiciones iniciales de la simulación 21

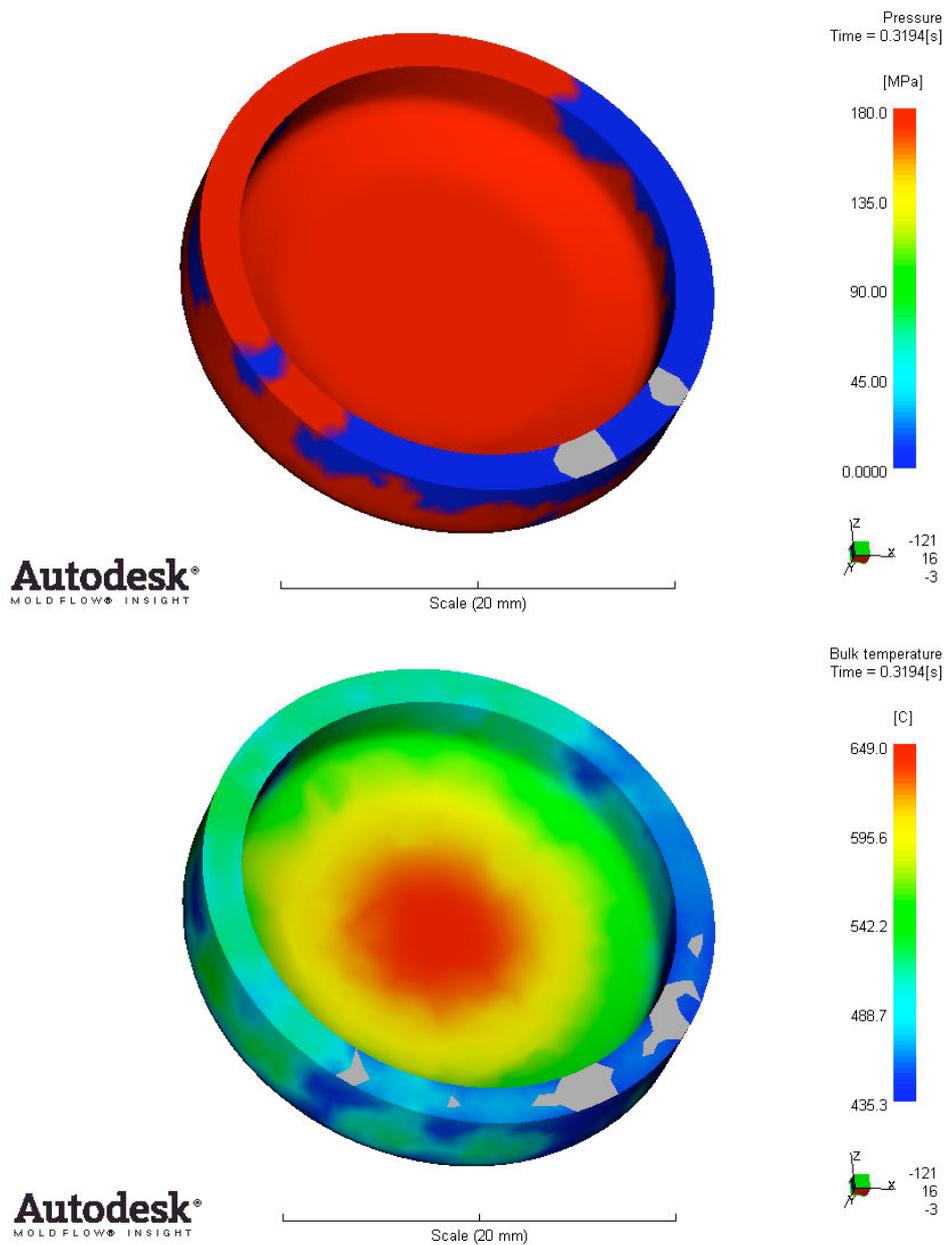


Figura 5.53 Presión y temperatura del material al final de la inyección

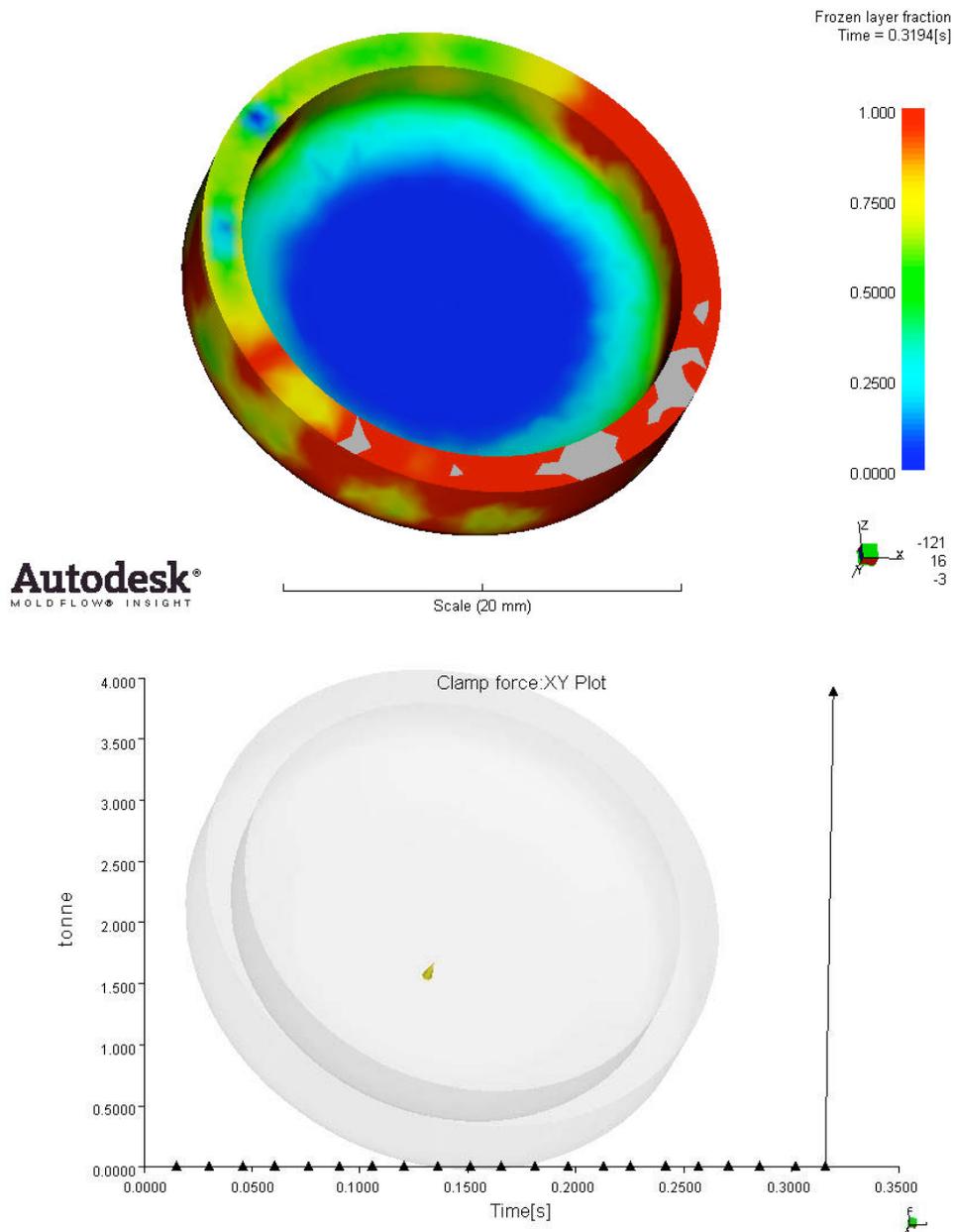


Figura 5.54 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	180 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	3,8825 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	0,5001 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,3190 s

Tabla 5.53 Resultados de la simulación 21

Simulación 22

<i>Pieza</i>	Tapa redonda
<i>Material</i>	Aluminio
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso b)
<i>Tiempo</i>	0,3 s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	650 °C

Tabla 5.54 Condiciones iniciales de la simulación 22

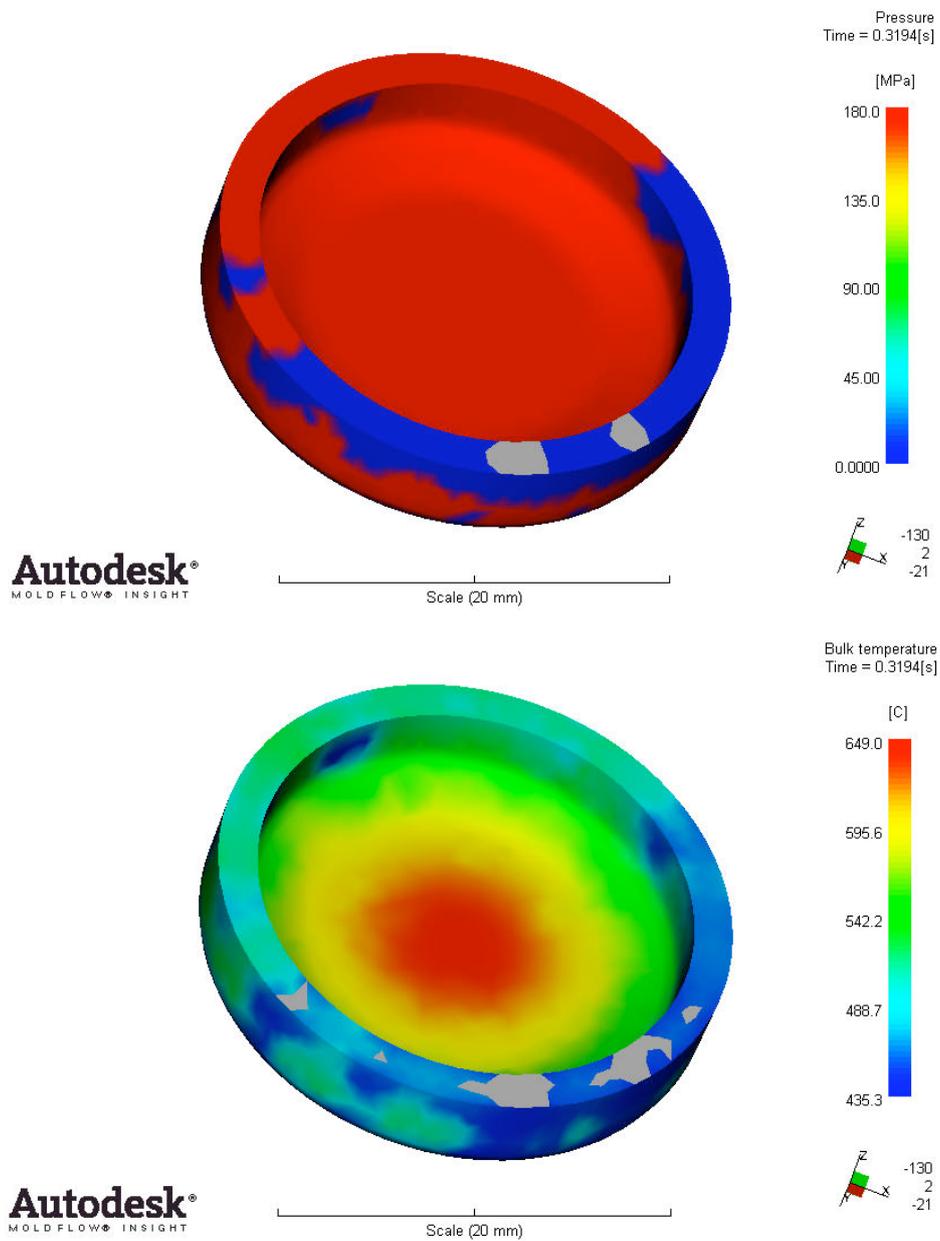


Figura 5.55 Presión y temperatura del material al final de la inyección

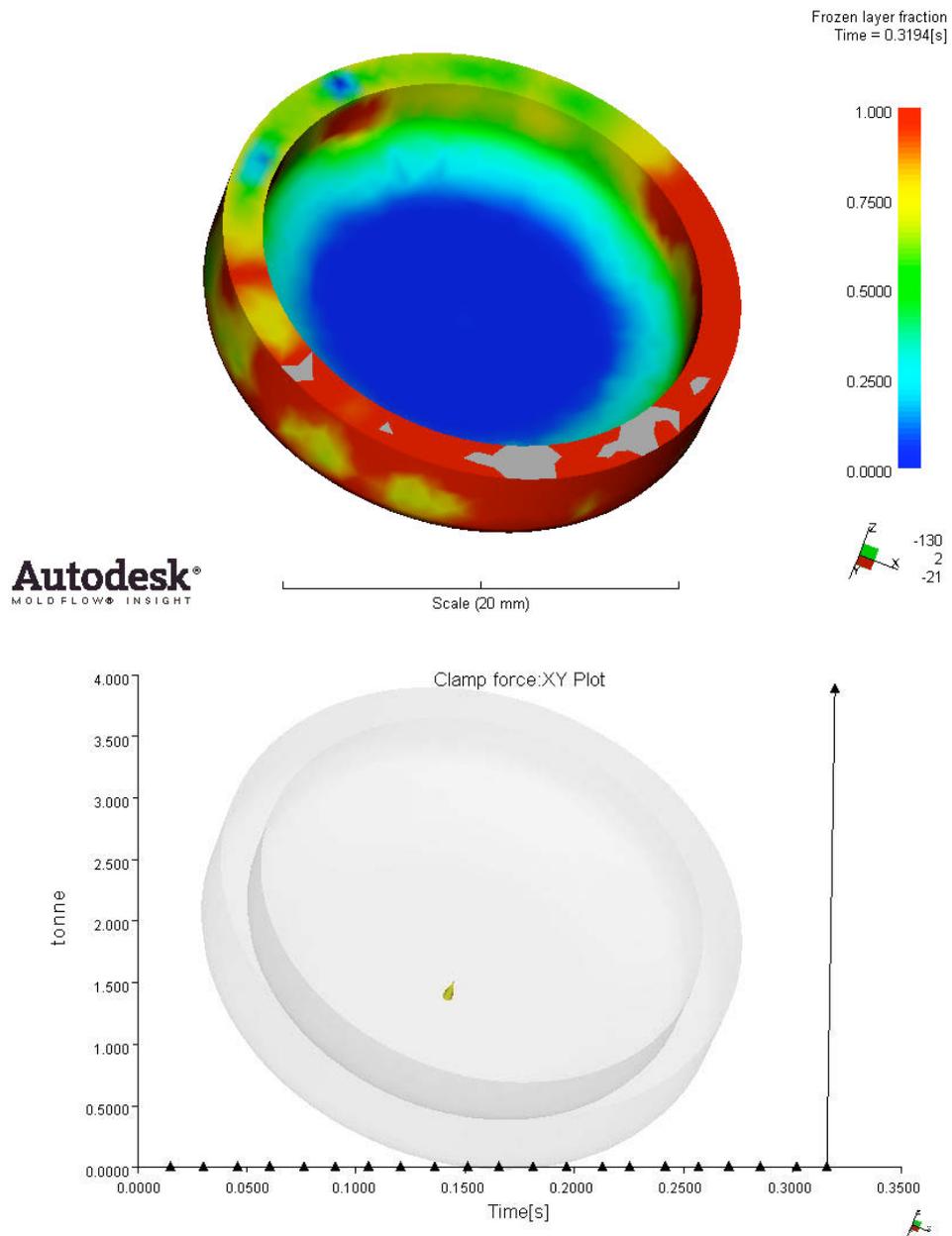


Figura 5.56 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	180 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	3,8825 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	0,5 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,3190 s

Tabla 5.55 Resultados de la simulación 22

Simulación 23

<i>Pieza</i>	Tapa redonda
<i>Material</i>	Aluminio
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso a)
<i>Flow rate</i>	4,14 cm ³ /s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	650 °C

Tabla 5.56 Condiciones iniciales de la simulación 23

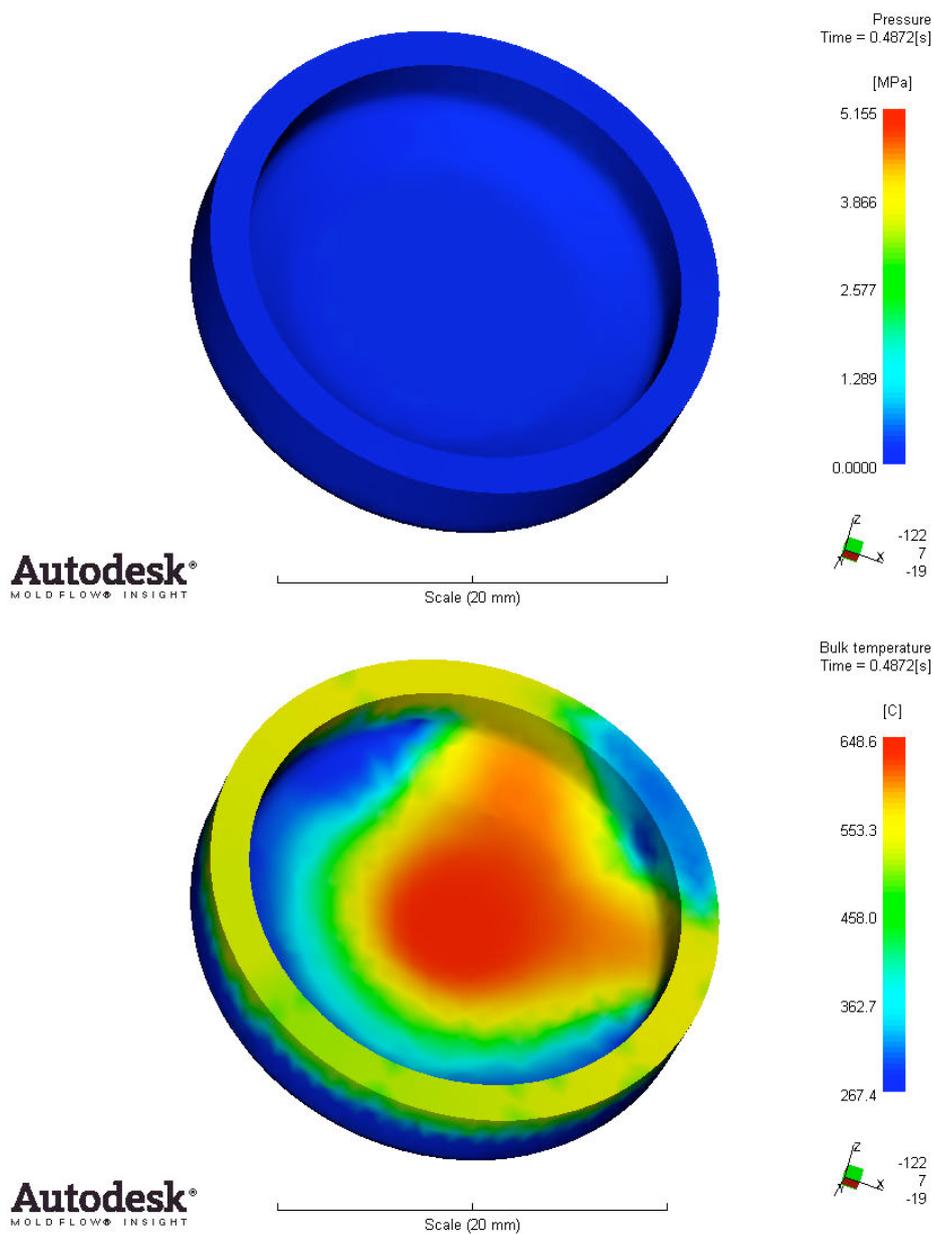


Figura 5.57 Presión y temperatura del material al final de la inyección

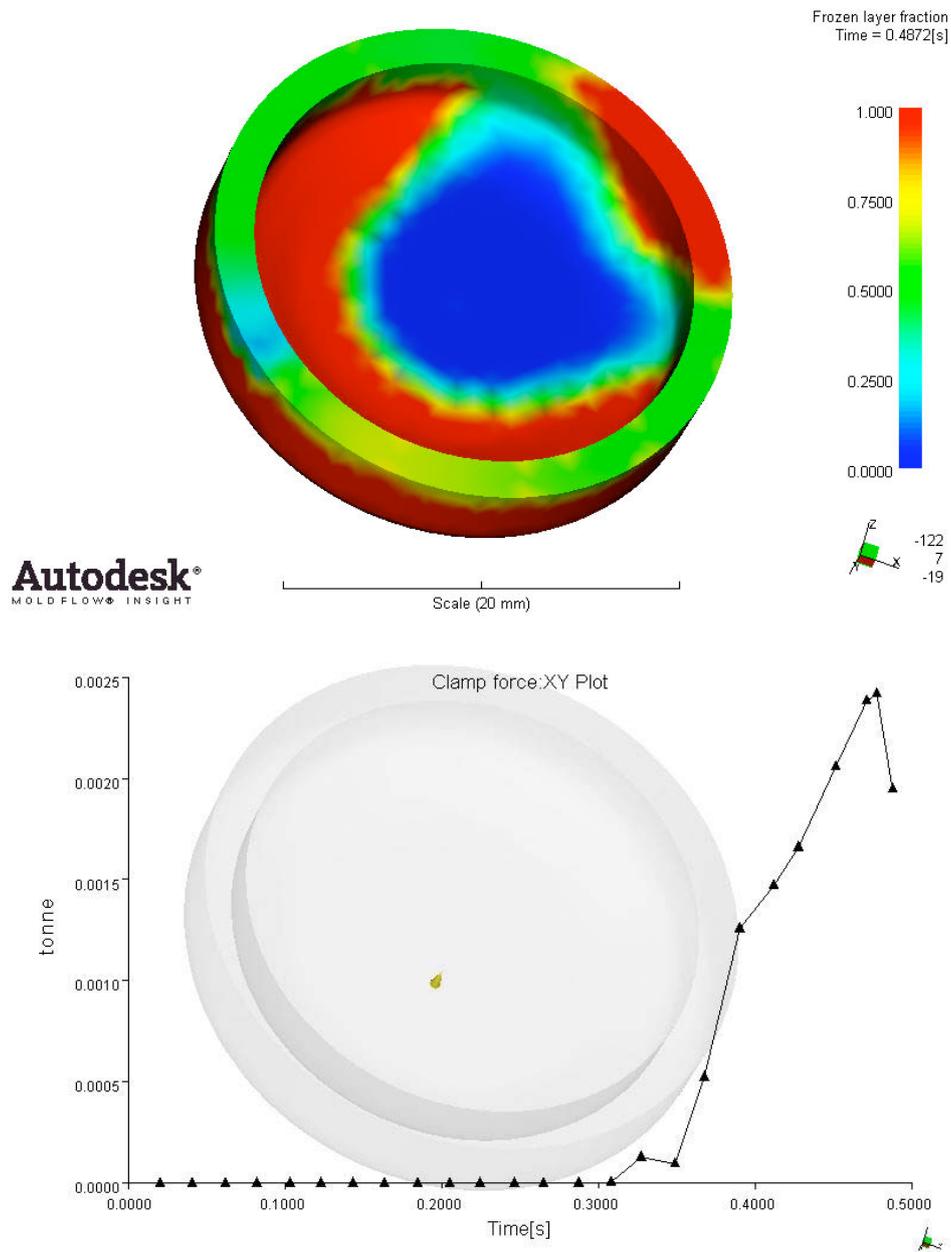


Figura 5.58 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	5,155 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	0,0024 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	0,51 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,4872 s

Tabla 5.57 Resultados de la simulación 23

Simulación 24

<i>Pieza</i>	Tapa redonda
<i>Material</i>	Aluminio
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso b)
<i>Flow rate</i>	4,14 cm ³ /s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	650 °C

Tabla 5.58 Condiciones iniciales de la simulación 24

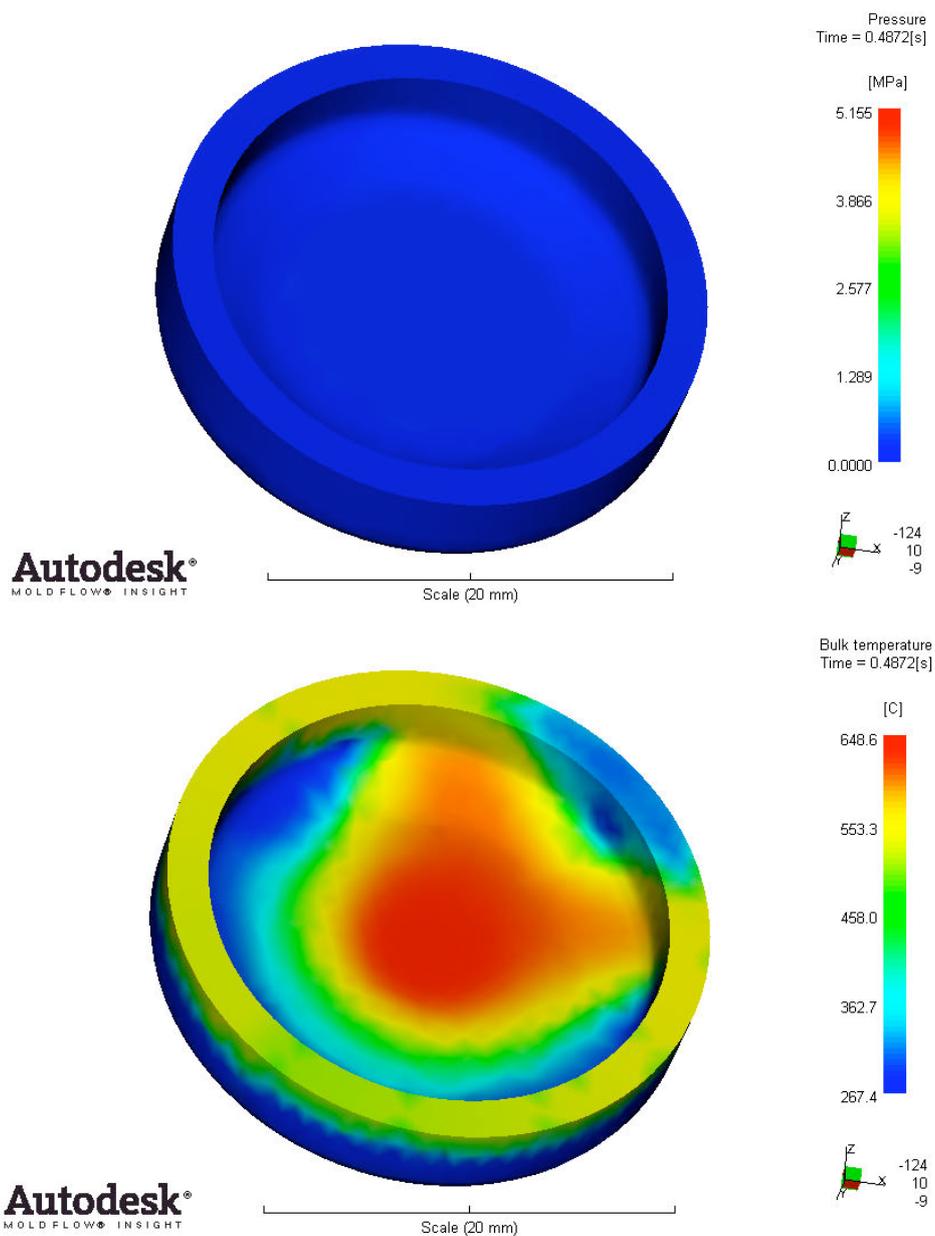


Figura 5.59 Presión y temperatura del material al final de la inyección

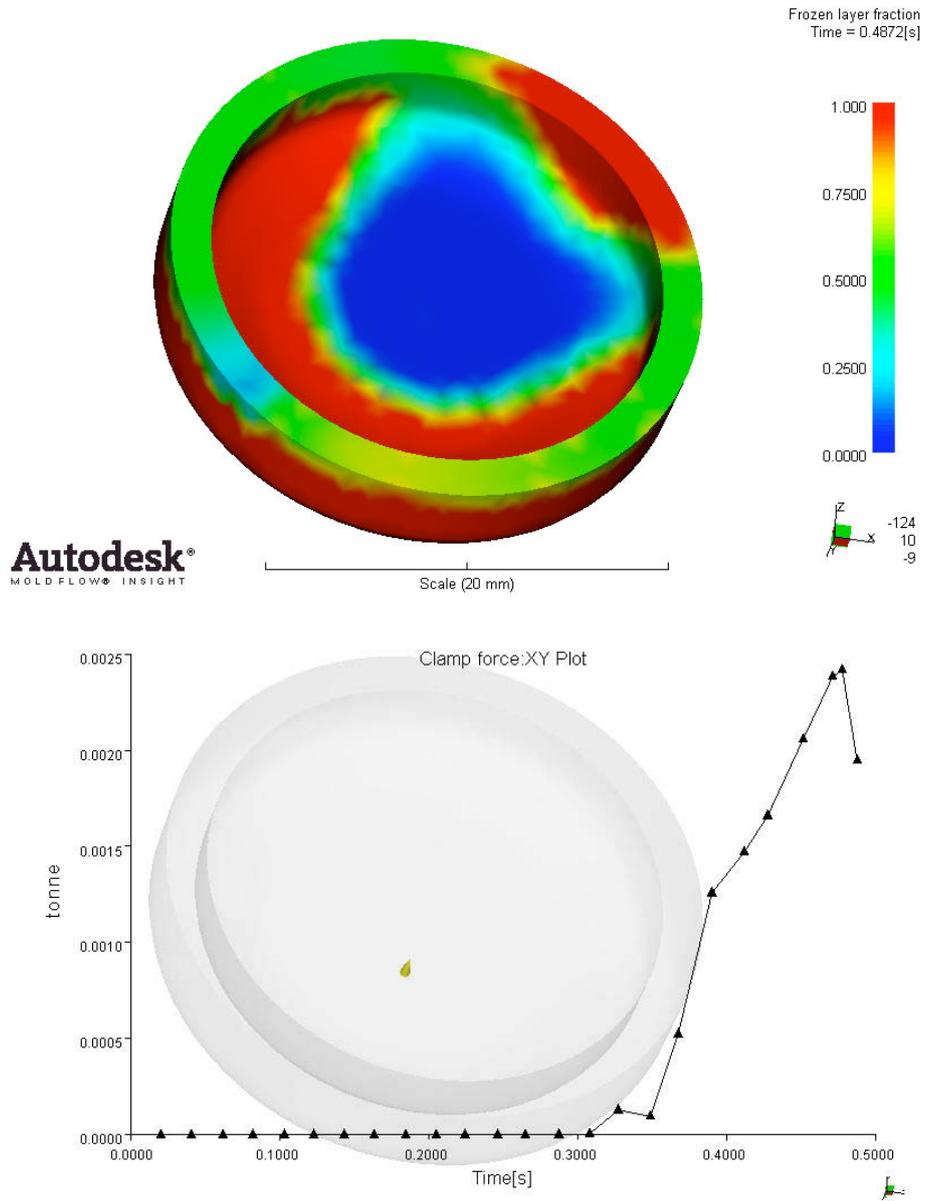


Figura 5.60 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	5,155 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	0,0024 Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	0,51 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,4872 s

Tabla 5.59 Resultados de la simulación 24

Simulación 25

<i>Pieza</i>	Pin-escudo
<i>Material</i>	Zamak
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso a)
<i>Tiempo</i>	0,1 s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	420 °C

Tabla 5.60 Condiciones iniciales de la simulación 25

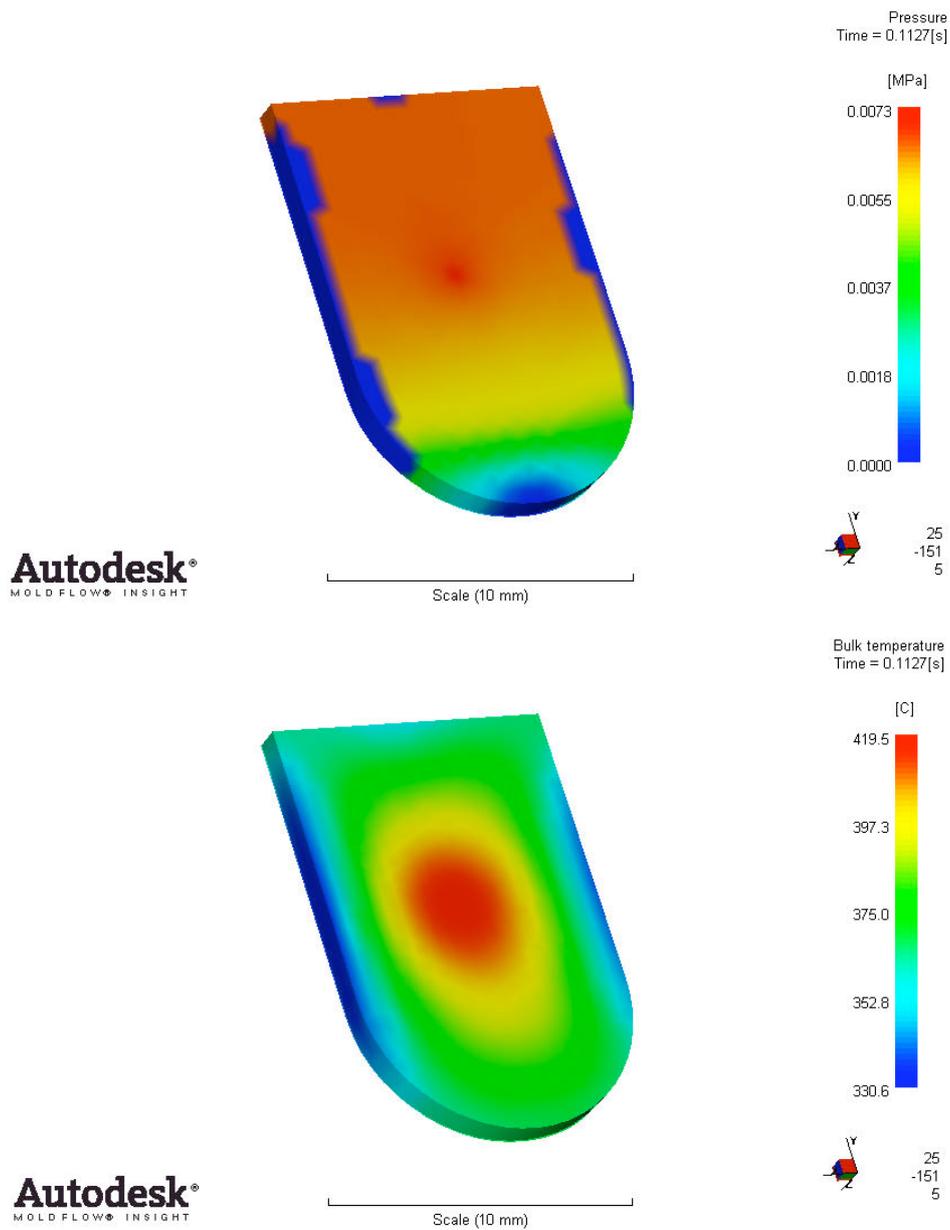


Figura 5.61 Presión y temperatura del material al final de la inyección

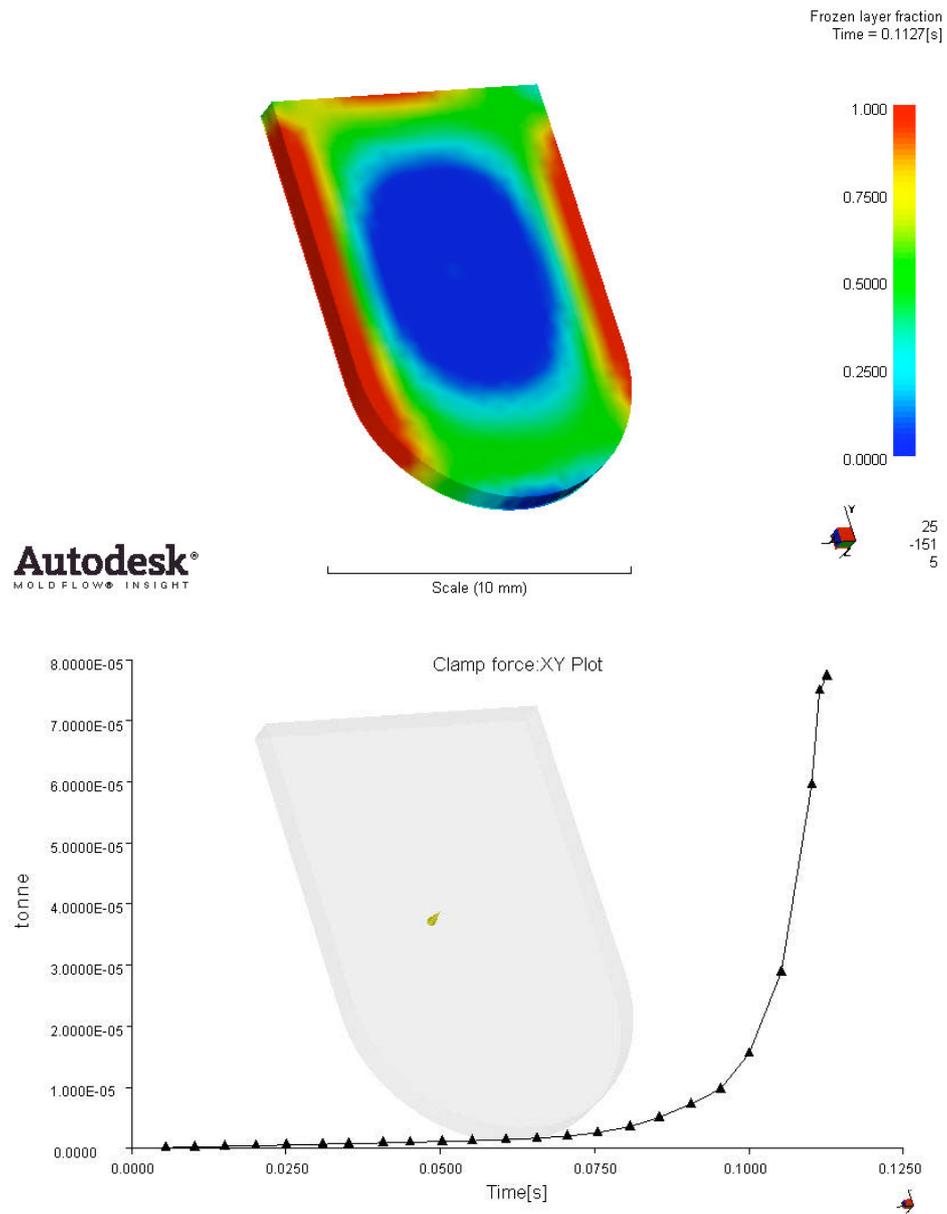


Figura 5.62 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	0,0073 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	$7,7361 \cdot 10^{-5}$ Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	0,2513 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,1127 s

Tabla 5.61 Resultados de la simulación 25

Simulación 26

<i>Pieza</i>	Pin-escudo
<i>Material</i>	Zamak
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso b)
<i>Tiempo</i>	0,1 s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	420 °C

Tabla 5.62 Condiciones iniciales de la simulación 26

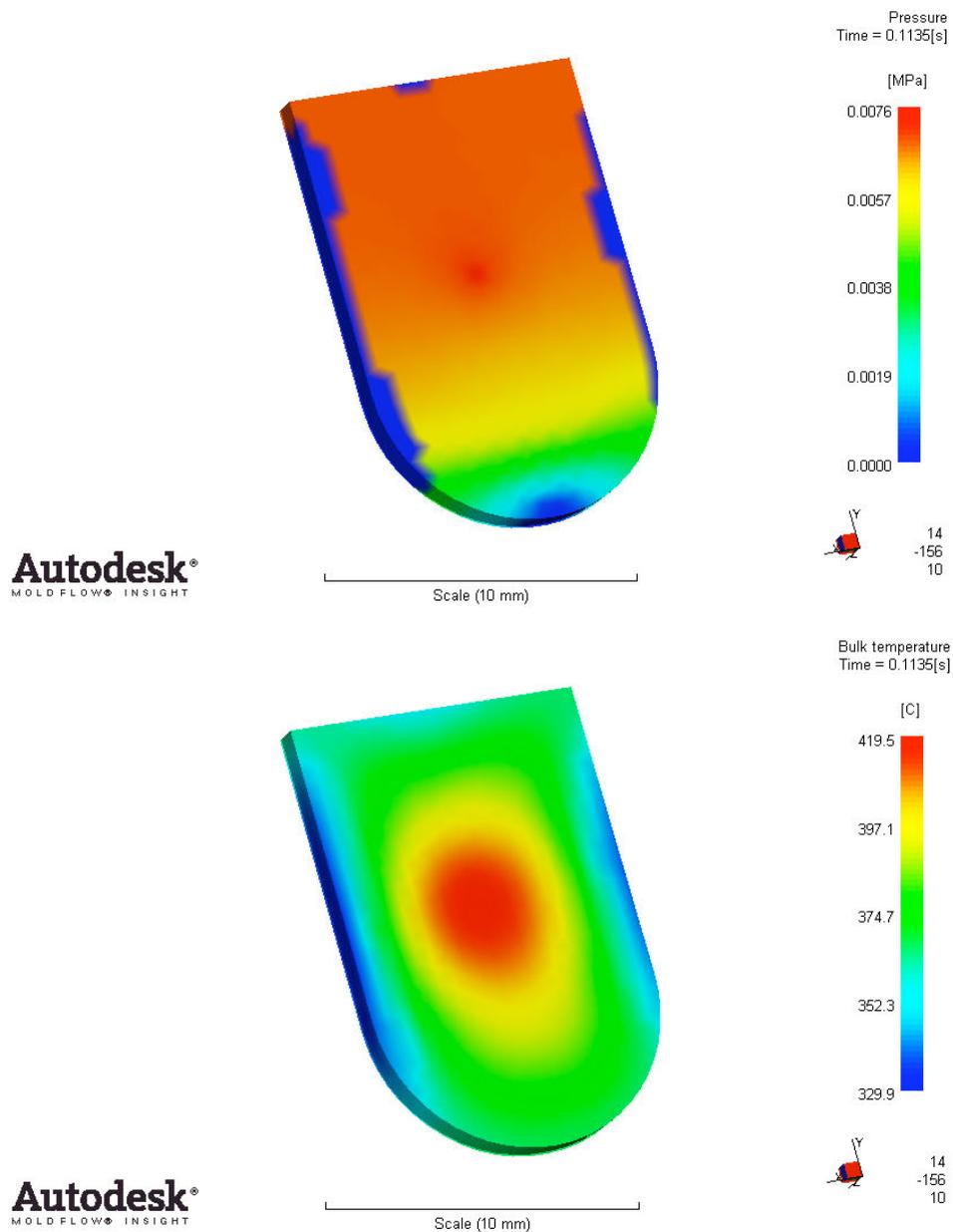


Figura 5.63 Presión y temperatura del material al final de la inyección

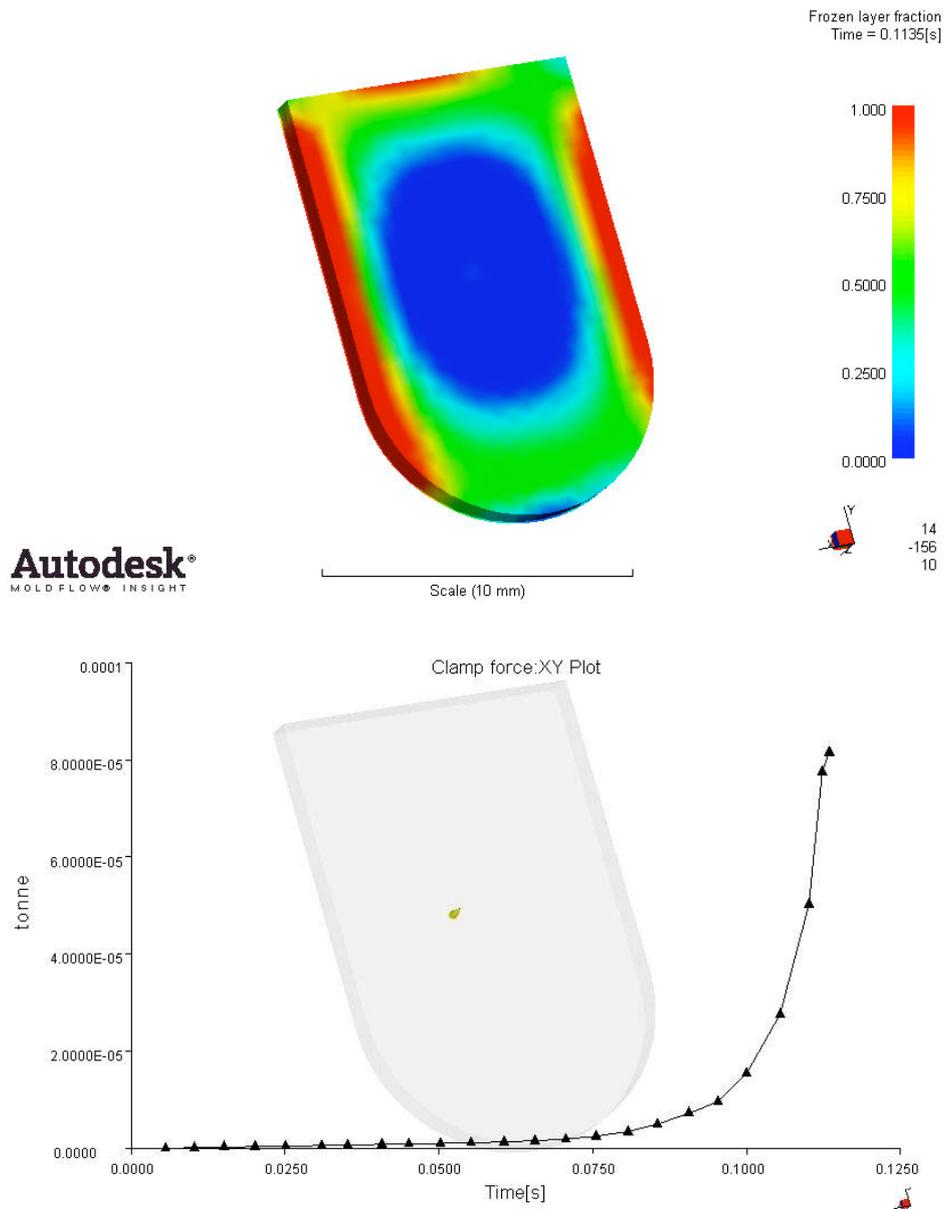


Figura 5.64 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	0,0076 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	8,1485·10 ⁻⁵ Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	0,2512 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,1135 s

Tabla 5.63 Resultados de la simulación 26

Simulación 27

<i>Pieza</i>	Pin-escudo
<i>Material</i>	Aluminio
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso a)
<i>Tiempo</i>	0,1 s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	650 °C

Tabla 5.64 Condiciones iniciales de la simulación 27

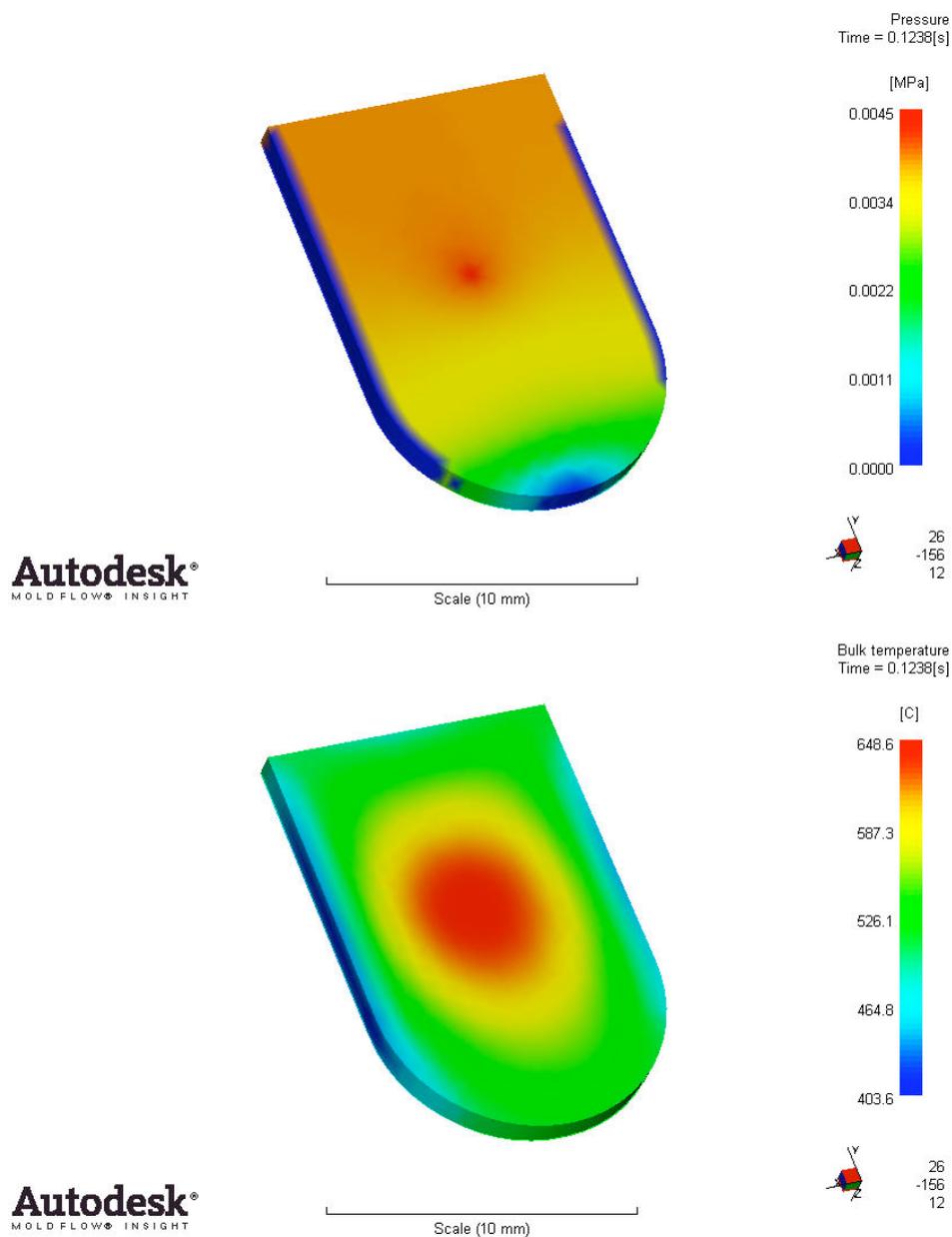


Figura 5.65 Presión y temperatura del material al final de la inyección

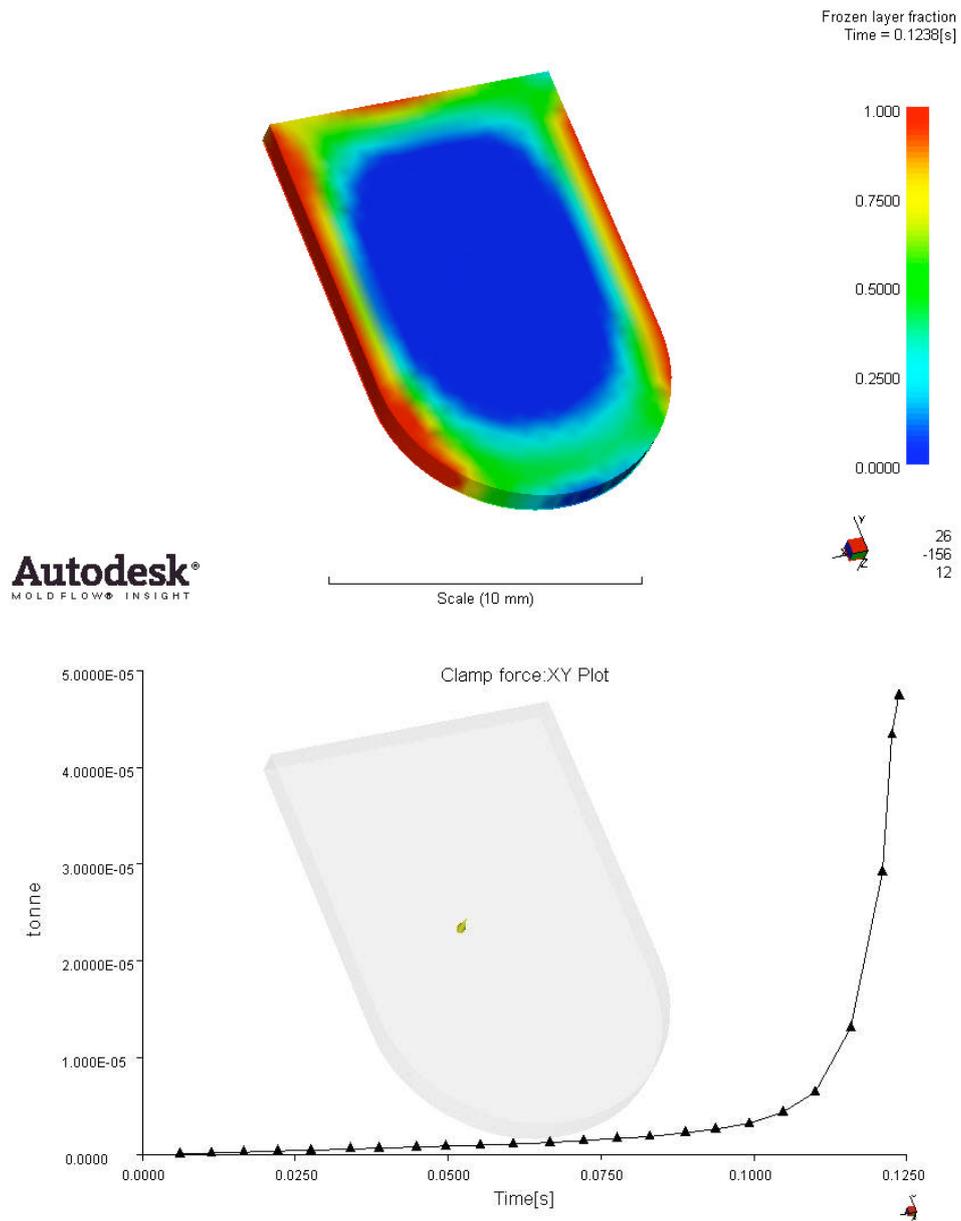


Figura 5.66 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	0,0045 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	$4,7419 \cdot 10^{-5}$ Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	0,2513 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,1238 s

Tabla 5.65 Resultados de la simulación 27

Simulación 28

<i>Pieza</i>	Pin-escudo
<i>Material</i>	Aluminio
<i>Modelo de Cross-WLF</i>	Caso b)
<i>Tiempo</i>	0,1 s
<i>Temperatura molde</i>	120 °C
<i>Temperatura metal</i>	650 °C

Tabla 5.66 Condiciones iniciales de la simulación 28

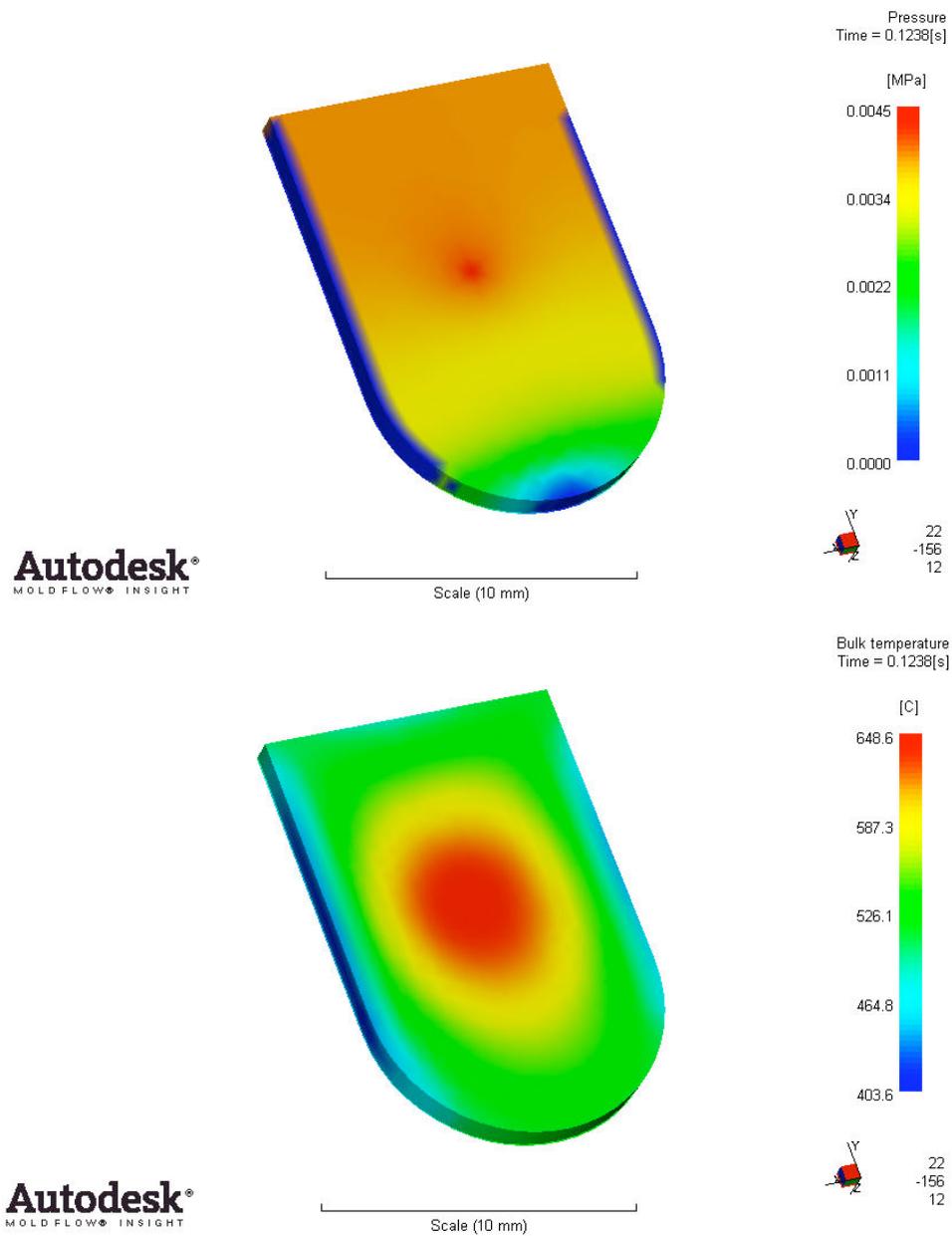


Figura 5.67 Presión y temperatura del material al final de la inyección

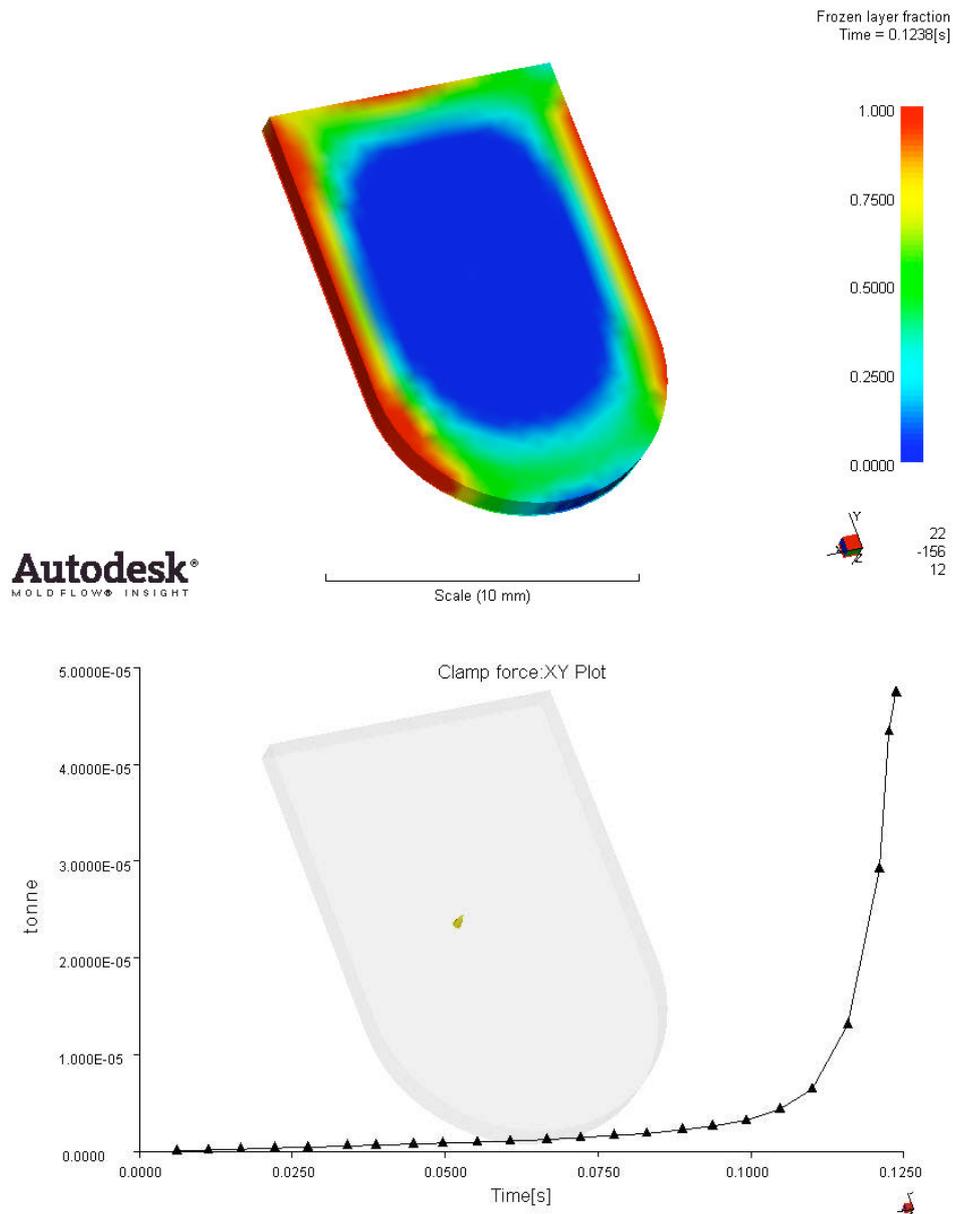


Figura 5.68 Fracción de capa solidificada y evolución de la fuerza de cierre del molde

<i>Presión máxima de inyección</i>	0,0045 MPa
<i>Fuerza de cierre del molde</i>	4,7419·10 ⁻⁵ Ton
<i>Tiempo estimado de solidificación</i>	0,2513 s
<i>Tiempo de llenado final obtenido</i>	0,1238 s

Tabla 5.67 Resultados de la simulación 28

La siguiente tabla resume los datos obtenidos en las simulaciones anteriores:



Diseño y puesta a punto de simulaciones de inyección de metales (MIM) mediante el uso del software *Moldflow*

Simulaciones y análisis de resultados

Nº Simulación	Presión máxima inyección (MPa)	Fuerza de cierre del molde (Ton)	Tiempo estimado solidificación (s)	Tiempo de llenado final (s)
Simulación 1	0,155	0,86	1,501	0,0836
Simulación 2	0,155	0,8630	1,501	0,0836
Simulación 3	0,7579	3,3278	1,2503	1,017
Simulación 4	0,7580	3,3282	1,2503	1,017
Simulación 5	21,01	39,9232	1,26	2,401
Simulación 6	20,20	38,8049	1,26	2,401
Simulación 7	0,1501	0,8584	1,501	0,0835
Simulación 8	0,1501	0,8584	1,501	0,0835
Simulación 9	3,691	16,3601	1,504	1,021
Simulación 10	3,691	16,3601	1,504	1,021
Simulación 11	12,57	31,4090	1,26	2,2
Simulación 12	12,57	31,4090	1,26	2,2
Simulación 13	0,0308	0,0004	0,5001	0,0086
Simulación 14	0,0308	0,0004	0,5001	0,0086
Simulación 15	0,3960	0,0069	0,26	0,3309
Simulación 16	0,4347	0,0074	0,2539	0,3308
Simulación 17	14,26	0,0076	0,26	0,6564
Simulación 18	14,26	0,0076	0,26	0,6564
Simulación 19	0,2527	0,0029	0,5001	0,0012
Simulación 20	0,2527	0,0029	0,5001	0,0012
Simulación 21	180	3,8825	0,5001	0,3190
Simulación 22	180	3,8825	0,5	0,3190
Simulación 23	5,155	0,0024	0,51	0,4872
Simulación 24	5,155	0,0024	0,51	0,4872
Simulación 25	0,0073	$7,7361 \cdot 10^{-5}$	0,2513	0,1127
Simulación 26	0,0076	$8,1485 \cdot 10^{-5}$	0,2512	0,1135
Simulación 27	0,0045	$4,7419 \cdot 10^{-5}$	0,2513	0,1238
Simulación 28	0,0045	$4,7419 \cdot 10^{-5}$	0,2513	0,1238

Tabla 5.68 Resumen de los datos obtenidos en las simulaciones.

En rojo los resultados de las simulaciones que no han conseguido llenar del todo.

5.3 Análisis de resultados

A continuación se analizarán los resultados de las simulaciones del punto 5.2. Dado que se trata solamente de simulaciones que no han sido corroboradas por pruebas experimentales, los valores de los resultados son puramente estimativos y el análisis se centrará en destacar los resultados y las diferencias que se observan entre los distintos modelos trabajados.

5.3.1 Placa de persiana

Las primeras 12 simulaciones pertenecen a la placa de una persiana. Seguidamente se analizarán respetando el orden de simulación.

Simulaciones 1-6:

Las simulaciones de la 1 a la 6 pertenecen a la placa de una persiana fabricada mediante inyección de Zamak. Se ha utilizado Zamak a 420 °C pues es la temperatura de procesamiento recomendada para este material. Por su parte, la temperatura de trabajo del molde es de 120 °C, también dentro del margen de trabajo en moldeos de este tipo.

Las primeras dos simulaciones reflejan un tiempo de llenado final de 0,0836 s. una cifra del todo imposible pues las máquinas serían incapaces de inyectar material en tan poco tiempo. Este resultado se da porque *Moldflow* detecta que el material tiene una viscosidad muy baja y, por tanto, una gran fluidez. Como no se le ha puesto ningún tipo de restricción respecto a la velocidad de inyección de la máquina, el programa utiliza la máxima posible cumpliendo con su cometido de inyectar en el menor tiempo posible pero dando como resultado valores que se alejan de la realidad. Con tiempos de llenado tan rápidos el material a penas se enfría, habiendo una diferencia de unos 6°C entre el momento inicial de inyección y el final del llenado, tal y como puede observarse en la Figura 5.13 y 5.15.

Para las siguientes dos simulaciones se ha aumentado el tiempo de llenado hasta 1 s. Tras la simulación se comprueba que el llenado se ha completado correctamente a los 1,017 s. Estos tiempos son más realistas y, como se puede comprobar en la Figura 5.18 y 5.20, hay parte de la pieza que ya ha solidificado al final del llenado debido a la gran conductividad térmica del metal. La presión máxima y la fuerza de cierre que se obtienen varía según se utilice un modelo de Cross-WLF u otro, aunque, como se puede comprobar en la tabla resumen 5.68, esta diferencia es de, a penas, unas milésimas.



Las últimas dos simulaciones del grupo 1-6 se han llevado a cabo con un tiempo de llenado de 2 s. aunque finalmente la pieza se ha completado en 2,401 s. Este es el tiempo más alto que se puede alcanzar en la fase de llenado. Más allá de ese valor el material solidifica antes de completarse el proceso. Con estos tiempos la diferencia entre la temperatura del material inyectado y el que ya ha solidificado es de unos 225 °C, habiendo ya una gran parte de la pieza completamente sólida cuando se ha terminado el llenado, tal y como se puede observar en la Figura 5.22. En cuanto a la presión máxima y la fuerza de cierre del molde en el caso más lento, estas toman el valor de 21-20 MPa y 39-38 Ton aproximadamente según se analice utilizando el modelo de Cross del *Caso a)* o el *Caso b)*.

Como se observa en los análisis efectuados hasta el momento, respecto las diferencias encontradas entre las simulaciones llevadas a cabo con distintos modelos de Cross-WLF, si bien los tiempos de llenado son exactamente los mismos independientemente del modelo utilizado, hay leves variaciones en la presión máxima alcanzada y la fuerza de cierre del molde.

Simulaciones 7-12:

Las siguientes seis simulaciones son las que se han realizado utilizando como material el aluminio. En este caso, el metal se inyecta a una temperatura de 650 °C y el molde continúa con la misma temperatura que en los casos anteriores.

Las primeras dos simulaciones de este grupo se han llevado a cabo con un tiempo de llenado automático. El resultado, como en el caso anterior, es un tiempo muy bajo, exactamente de 0,0835 s. Nuevamente se trata de un tiempo imposible debido a las limitaciones de la maquinaria actual. En este caso, la diferencia de temperaturas al final de la inyección es de unos 30 °C y la pieza prácticamente no ha comenzado a solidificarse, tal y como se puede comprobar en las figuras de la 5.25 a la 5.28.

En las siguientes dos simulaciones, el tiempo de llenado que se ha forzado es de 1 s. aunque el tiempo final ha sido realmente de 1,017 s. a penas una centésima por encima. Con estos tiempos, la mitad de la pieza ha solidificado en el momento en el que el llenado se encuentra al 100% como reflejan las figuras 5.30 y 5.32.

Las dos últimas simulaciones del conjunto 7-12 se han llevado a cabo con un tiempo de llenado de 2 s. aunque, de nuevo, el resultado final varía unas décimas respecto al esperado, resolviéndose esta vez el llenado en 2,2 s.



Como ocurrió con el Zamak, también en el caso del aluminio se ha alcanzado el tiempo de llenado más alto posible. Valores más altos harían imposible completar el proceso. Al finalizar el llenado hay aproximadamente un 80% de la pieza ya solidificada.

Por último, y a diferencia de lo que ocurre en el caso del Zamak, en las inyecciones de aluminio no se ha observado ningún tipo de variación de resultados según se haya usado un modelo de Cross-WLF u otro. Se puede comprobar la no variación en las tablas pertinentes o en la Tabla 5.68.

5.3.2 Tapa metálica

Las siguientes 12 simulaciones pertenecen a las de una pequeña tapa metálica. Se han llevado a cabo con el punto de inyección situado en la parte superior de la misma, si bien es cierto que en una producción en cadena el punto debería estar en la periferia para poder fabricar varias piezas a la vez. Aun y así, se ha optado por la parte superior como primera aproximación y para validar el modelo con el simulador.

Como en el caso anterior, se procederá a analizar los resultados en el mismo orden en el que han sido simulados.

Simulaciones 13-18:

Para estas seis simulaciones se ha utilizado nuevamente el Zamak. Las condiciones de procesado son las mismas: material a 420 °C y molde a 120 °C.

Como hasta ahora, las dos primeras simulaciones se llevan a cabo con un tiempo de llenado automático. En este caso, el llenado de completa satisfactoriamente 0,0086 s. De nuevo, *Moldflow* determina valores temporales incluso más bajos que con la pieza anterior, valores que, también como en el anterior caso, son completamente imposibles de llevar a cabo.

Siguiendo con las simulaciones, las dos siguientes se han llevado a cabo con un tiempo de llenado de 0,3. Como ha ocurrido hasta el momento, el llenado se completa finalmente en un tiempo un poco por encima, en este caso en 0,3309 s. utilizando el modelo de Cross-WLF tal y como queda descrito en el *Caso a)*, y 0,3308 utilizando la descripción del *Caso b)*. La fracción de capa solidificada, tal y como se comprueba en las figuras 5.42 y 5.44, no es muy alta y aun hay gran parte de la pieza sin solidificar cuando termina de inyectarse el material, habiendo una diferencia de 20 °C entre la



parte ya solidificada y la última zona en terminar de ser llenada. Los valores de presión y fuerza de cierre son también pequeños, de a penas 0,39 y 0,43 MPa en el caso de la presión y de 0,006 y 0,007 Ton cuando se trata de la fuerza de cierre, dependiendo del caso de modelo de Cross-WLF que se utilice.

Para las simulaciones 17 y 18 se ha optado por un tiempo de inyección de 0,59 s. El tiempo final de llenado obtenido ha sido de 0,6564 s. Este tiempo es el más lento posible, valores superiores impiden que el llenado se complete del todo. Con este tiempo de llenado, cerca del 80% de la pieza ya ha solidificado al terminar el llenado existiendo una diferencia de 180 °C entre la zona solidificada y el material que se inyecta. La presión máxima ha aumentado hasta los 14,26 MPa y la fuerza de cierre sube hasta las 0,0076 Ton. Este resultado, presiones altas y fuerzas de cierre tan pequeñas, no debería producirse, pues un aumento de la presión debería ir acompañado también de un aumento considerable de fuerza de cierre. Se ha comprobado mediante las simulaciones que el pico de 14,26 MPa se produce a los 0,44 s. acompañado con un aumento de fuerza de cierre que sube hasta las 0,0013 Ton. una fuerza que, a priori, parece insuficiente. Habría que acompañar las simulaciones de un estudio empírico para comparar resultados y observar como evoluciona el sistema.

En esta pieza, el impacto que supone escoger un caso u otro de modelo de Cross-WLF es menor que en la anterior, aun y así éste existe alterando en algunas décimas ciertos valores de presión máxima y unas milésimas valores fuerza de cierre de molde.

Simulaciones 19-24:

Para las últimas seis simulaciones de la tapa metálica se ha vuelto a utilizar el aluminio en las mismas condiciones de trabajo que con anterioridad: 650°C el material líquido y el molde a 120 °C.

En los dos primeros casos se ha hecho un llenado automático. *Moldflow* ha determinado que el tiempo óptimo de llenado es de 0,0012 s. aun más rápido que si se tratase del Zamak. Obviamente se trata de otro caso de tiempo de llenado imposible.

Para las dos simulaciones siguientes se ha optado por imponer un tiempo de llenado de 0,3 s. Con este tiempo no se consigue completar el proceso, disparándose la presión hasta los 180 MPa y la fuerza de cierre hasta prácticamente las 4 Ton. Como se observa en las figuras 5.54 y 5.56 hay zonas que ya han solidificado impidiendo que el fluido avance, por eso la



máquina tiene que ir aumentando la presión llegando hasta el límite máximo. Ante esta situación, al no estar en su gran mayoría solidificada la pieza y rozar 0,3 s. los límites de lo que se puede considerar un tiempo razonable, se ha estudiado la velocidad del flujo durante el proceso para intentar obtener un tiempo de llenado más lento.

Así pues, para los últimos dos estudios, se optado por modificar la velocidad del flujo en vez de forzar un tiempo de llenado determinado. Como el valor de la velocidad del flujo de las simulaciones anteriores era de 5,61 cm³/s, para estas dos últimas se ha utilizado un valor de 4,14 cm³/s. Este es el valor más lento al que se puede mover el metal líquido del estudio. Valores inferiores provocan que se solidifique el material antes de que se llegue a completar el proceso. Con esta cifra se comprueba que el proceso de llenado se completa en 0,4872 s. y la pieza ha solidificado al final del mismo en un porcentaje elevado, como puede verse en la Figura 5.60. En esta ocasión la diferencia de temperaturas es de unos 380 °C y la presión y fuerza de cierre máximos asciende hasta los 5,155 MPa y 0,0024 Ton respectivamente. Estos últimos resultados recuerdan a los de las simulaciones 17 y 18, en los que se produce un pico de presión, en este caso a los 0,39 s. acompañado de una fuerza de cierre demasiado pequeña para la presión. Como en esos casos, pruebas empíricas serían necesarias para comprobar que efectos se producirían durante la etapa de llenado.

De nuevo, usar un caso u otro de modelo de Cross-WLF no tiene ningún tipo de repercusión a la hora de realizar las simulaciones. Los resultados son los mismos en ambos casos.

5.3.3 Pin-Logo escudo

Las cuatro últimas de esta serie de simulaciones pertenecen a las ejecutadas sobre el la figura pin o logo en forma de escudo.

Simulaciones 25-26:

Estas dos simulaciones se han realizado sobre el pin-escudo con Zamak a 420 °C y el molde a 120 °C como viene siendo habitual.

Se observa en estos dos casos como en un tiempo de 0,1 s. aproximadamente el metal consigue solidificar, disminuyendo la temperatura en 100 °C en la pieza como se puede comprobar en las figuras 5.61 y 5.63. Simulaciones posteriores han sido incapaces de conseguir resultados superiores a los 0,1. En este tipo de tiempos es prácticamente imposible



ejecutar un llenado pues las máquinas son incapaces de trabajar en esas condiciones tan extremas.

Como sucede en anteriores simulaciones con Zamak, la elección de un modelo de Cross-WLF u otro altera los resultados mínimamente. En este caso particular, los resultados sufren unas variaciones más que insignificantes al tratarse de cambios del orden de $\pm 10^{-5}$.

Simulaciones 27-28:

Las últimas dos simulaciones pertenecen también al pin-escudo, esta vez con aluminio a 650°C y el molde nuevamente a 120 °C.

Como en las dos simulaciones anteriores, 0,1 s. es el tiempo más lento que se ha conseguido en esta pieza. Se trata nuevamente de un tiempo rapidísimo y muy difícil de alcanzar. Las variaciones de temperatura en la pieza son incluso mayores que en el caso anterior: 240°C en a penas una décima de segundo.

En cuanto a la elección del modelo de Cross-WLF, se escoja un caso u otro los resultados no varían.

Es interesante comprobar como difieren los resultados entre un tipo de material y otro, así como el comportamiento de los mismos según la figura de la que se trate. Se observan dificultades para obtener tiempos de llenado relativamente lentos en figuras de grosor inferior a los 3 mm y de pequeño tamaño. Estas dificultades aumentan cuando el material a inyectar se trata de aluminio líquido, existiendo una diferencia de 0,2 s. entre este último y el Zamak en el caso de las simulaciones 17-18 y 23-24. Es posible que estas dificultades sean provocadas tanto por la diferencia entre los dos metales como por las mismas restricciones que impone *Moldflow* a la hora de modelar los materiales.

Por último, se observa también una independencia mayor de los resultados en el aluminio que en el Zamak respecto al modelo de Cross-WLF utilizado a la hora de ejecutar las simulaciones. Aunque en el caso del Zamak esta dependencia supone unas variaciones en los resultados de pocas décimas o milésimas, existe y, por tanto, ha de ser tenida en cuenta.

Se evaluarán estas situaciones en el siguiente capítulo y se propondrán algunas ideas sobre los fenómenos encontrados durante las simulaciones.



6. Conclusiones

Tras haber ejecutado y analizado las simulaciones en el capítulo anterior, se ha llegado a una serie de conclusiones que se exponen a continuación.

Uno de los objetivos de la presente tesina, estudiar y utilizar los modelos matemáticos que describen el comportamiento de los plásticos para modelar materiales metálicos, se ha logrado llevar a cabo con éxito, eso sí, con una serie de pequeñas discrepancias entre el valor de alguna de las variables teóricas apuntadas en el capítulo cuarto y el utilizado finalmente en las simulaciones. Esta situación se debe, por un lado, a la diferencia que existe entre el comportamiento de la aproximación teórica y el comportamiento real del material y, por otro, a las restricciones que impone el propio software que impide que algunas de las variables tomen el valor propuesto y sean utilizados en su lugar valores lo más próximos posible.

Las restricciones dadas por el programa también afectan a la hora de definir las constantes térmicas. Algunas de ellas como la conductividad térmica o la temperatura de transición afectan a metales que cuentan con valores altos de estas constantes, como el caso del aluminio, que maneja una temperatura de transición de 530-560 °C mientras que *Moldflow* solamente admite un valor máximo de 500 °C.

Todas estas situaciones influyen en los resultados de las simulaciones de forma directa. Cuanta más información se tenga del comportamiento pVT y de viscosidad del metal líquido que se quiere modelar, mejor se podrán ajustar las variables de los modelos matemáticos, pudiendo llevar a cabo simulaciones más precisas dentro del margen de trabajo que permiten las restricciones que impone *Moldflow*. En las simulaciones del capítulo quinto se puede apreciar como existen pequeñas diferencias en los resultados según se inyecte Zamak utilizando el modelo de Cross-WLF con los valores del *Caso a)* o el *Caso b)*, mientras que, cuando el material es el aluminio, tales diferencias no existen. Esto es debido precisamente a que la información con la que se contaba a la hora de modelar los materiales era mucho más precisa en el caso del Zamak que en el del aluminio. Cuanto más datos se posean más diferencias aparecerán entre los distintos casos del modelo Cross-WLF. Llegado este punto, es necesario decantarse por un modelo u otro. El *Caso a)* es el correcto ya que presenta unas curvas de viscosidad más acordes con el comportamiento esperado del metal en estado líquido.

Otro aspecto a tener en cuenta es como afecta la propia geometría de las piezas con las que se quiere trabajar en las simulaciones. Se observa un



comportamiento extraño cuando el espesor de la pieza se reduce a menos de 2-3 mm. Esta situación es fácilmente comprensible ya que el metal líquido se ha de inyectar sobre piezas con un mínimo de unos 3 mm de espesor para que el material no solidifique nada más comenzar el proceso de llenado. Así, los tiempos y presiones imposibles que se pueden observar en las simulaciones realizadas sobre el pin, no son más que un indicador de que el proceso no podría llevarse a cabo dado el pequeño grosor de la pieza. También es importante el tamaño. Si las piezas que se quiere simular son demasiado pequeñas, *Moldflow* puede mostrar resultados no del todo correctos, con aumentos de presión puntuales que no van acompañados de un aumento proporcional de las fuerzas de cierre. Esta situación se encuentra en sintonía con el trabajo de M.Azuddin et al.[4] en el que los resultados de la simulación de la fabricación de micro piezas de plástico se alejan de los obtenidos mediante pruebas experimentales. Por otro lado, si la pieza tiene un tamaño más grande y, además, su grosor es igual o mayor a los 3 mm, los resultados sí que parecen acordes con la realidad.

Por todo lo anterior, se puede atacar al objetivo principal de la tesina concluyendo que, efectivamente, *Moldflow* puede ser utilizado como simulador de inyecciones de metal líquido teniendo siempre en cuenta las limitaciones impuestas por el software, las que puedan aparecer por falta de información a la hora de modelar los comportamientos de viscosidad y pVT del material y las restricciones geométricas de la propia pieza.



7. Líneas de trabajo futuras

La tesina deja abierta la posibilidad de ampliar el trabajo realizado. Se puede continuar con el estudio experimental sobre piezas reales con tal de obtener datos con los cuales llegar a modelos mucho más precisos.

Esta línea de trabajo es realmente interesante, ya que puede permitir la creación de una base de datos de materiales que, estando bien modelados, se puedan utilizar para llevar a cabo simulaciones con *Moldflow*, convirtiéndolo así en una herramienta multimaterial, permitiendo trabajar con un único software.

También es interesante el uso docente que puede darse. Con el material bien modelado se puede incluir, tanto en el máster CAD CAM CIM como en cualquier estudio, contenidos didácticos sobre inyección de metales utilizando una sola licencia de software, con el consiguiente ahorro que ello supone.



8. Referencias

1. Zhang Wen-jiang and Z. Qi, *The Application of Moldflow in Injection Mold design of Mobile Phone Cover*. 2011.
2. Farshi Behrooz, Siavash Gheshmi, and E. Miandoabchi, *Optimization of injection molding process parameters using sequential simplex algorithm*. 2011.
3. Wen-Hsiang Hsieh and K.-M. Shu, *On the Warpage in the Lower Case of Lead-Acid Batteries*. 2010.
4. M. Azuddin, Z. Taha, and I.A. Choudhury, *Micro Plastic Part Fabrication Using Custom Made Vertical Injection Molding Machine*. 2011.
5. Wiech, R.E., *Manufacture of Parts for Particulate material*. 1980: US.
6. Lucas Castro, et al., *Moldeo por inyección de metales. Estado actual*. 2005.
7. Berginc, et al., *A numerical simulation of metal injection moulding* 2008.
8. Zheng-xing, W.-x., Zhao-yao, Quan-li, *Numerical simulation of tungsten alloy in powder injection molding process*. 2008.
9. N.H. Mohamad, et al., *Flow Behaviour to determine the defects of green part in metal injection molding*. 2009.
10. Min Yi Li, K.A. Khalil, and H. Huang, *Rheological, mechanical and corrosive properties of injection molded 17-4PH stainless steel*. 2004.
11. Th. Barriere, B. Liu, and J.C. Gelin, *Determination of the optimal process parameters in metal injection molding from experiments and numerical modeling*. 2003.
12. Hiroyuki Fukuyana and Y. Waseda, *High-Temperature Measurements of Materials*. 2009.
13. J.H Hildebrand and H. Lamoreaux, *Viscosity of liquid metals: An interpretation*. 1976.
14. Kaptay, G., *A unified equation for the viscosity of pure liquid metals*. 2004.
15. Hildebrand, J.H., *Viscosity and Diffusivity: A Predictive Treatment* 1977.
16. M.H. Cohen and D. Turnbull, *J. Chem. Phys.* 1959.
17. Yue Qi, et al., *Viscosities of Liquid Metal Alloys from Nonequilibrium Molecular Dynamics*. 1998.
18. Navarro, T.C., *Mecánica Clásica*. 2009.
19. N Yu Konstantinova and P.S. Popel, *Kinematic viscosity of liquid Al-Cu alloys*. 2008.
20. V.M.B. Nunes, et al., *Viscosity of Industrially Important Al-Zn Alloys. I-Quasi-eutectic Alloys* 2010.
21. E.A. Eyvazof, et al., *Phenomenological approach to viscosity of liquid metals*. 2010.
22. G. Siwec and J. Labaj, *Viscosity of Cu-Zn Alloys*. 2010.
23. Pjotr Popel, et al., *Physical properties of heavy liquid-metal coolants in a wide temperature range*. 2011.
24. Merton C. Flemings and D.V. Ragone, *Puddling: A New Look at an Old Process*. 2009.
25. M.A. Peydró, et al., *Study of Rheological Behavior During the Recovery Process of High Impact Polystyrene Using Cross-WLF Model* 2010.



26. Reig, M.J., *Estudio y modelización de las condiciones de proceso en el moldeo por inyección de blends ABS/PC procedentes de materiales reciclados* 2005.
27. Miguel J. Reig, V.J. Segui, and J.D. Zamanillo, *Rheological behavior modeling of recycled ABS/PC blends applied to injection molding process*. 2005.
28. Chau, S.-W., *Three-dimensional simulation of primary and secondary penetration in a clip-shaped square tube during a gas-assisted injection molding process*. 2008.
29. Wan Aizan Wan Abdul Rahman, Lee Tin Sin, and A.R. Rahmat, *Injection moulding simulation analysis of natural fiber composite window frame*. 2008.
30. Sung Yong Kang, Seung Mo Kim, and W.I. Lee, *Finite element analysis for wavelike flow marks in injection molding*. 2007.
31. Vitoria, T.B., *Estudio y modelización de la procesabilidad mediante moldeo por inyección de materiales termoplásticos reciclados*. 2009.
32. Hamdy Hassan, et al., *Modeling the effect of cooling system on the shrinkage and temperature of the polymer by injection molding*. 2010.
33. Yin Jianguo, et al., *Compressed liquid density measurements of dimethyl ether with a vibrating tube densimeter* 2011.
34. Lee Reis, William Archambault, and R. Sommer, *Impact Resistance of Shear Thickening Fluids*. 2009.