

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño y optimización de canales de refrigeración de
conformación para moldes de inyección plástica utilizando
programas de diseño generativo**

Trabajo de graduación presentado por Javier Aguilar Parrilla para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala, 2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño y optimización de canales de refrigeración de
conformación para moldes de inyección plástica utilizando
programas de diseño generativo**

Trabajo de graduación presentado por Javier Aguilar Parrilla para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala, 2024

Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Rodrigo Aragón

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Gustavo Barrera

(f) 
Ing. Andrés Viau

(f) 
Ing. Rodrigo Aragón

Fecha de aprobación: Guatemala, 04 de diciembre de 2024.

Lista de figuras	IX
Lista de cuadros	XI
Resumen	XIII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Enfriamiento de conformación para inyección plástica	3
2.2. <i>Machine learning</i> y <i>software</i> generativo para los canales de enfriamiento de conformación	5
2.3. Ventajas de costos	7
3. Justificación	9
4. Objetivos	11
4.1. Objetivo general	11
4.2. Objetivos específicos	11
5. Marco teórico	13
5.1. Diseño de canales de enfriamiento para moldes de inyección fabricados con tecnologías aditivas de manufactura	13
5.2. Canales de enfriamiento autosustentables y estructuras porosas adaptadas	14
5.3. Mejora de la eficiencia de refrigeración	16
5.4. Aprendizaje automático para modelar y simular canales de enfriamiento para moldes de inyección	17
5.5. Optimización para el enfriamiento de conformación	19
6. Metodología	23
6.1. Definición de requisitos	23
6.2. Selección de programa	25
6.2.1. Diseño de pieza base y molde	25

6.3. Diseño de los canales de enfriamiento	29
6.3.1. Diseño de los canales de enfriamiento tradicionales	29
6.3.2. Diseño de los canales de enfriamiento de conformación generados	32
6.3.3. Simulación en ANSYS del canal de enfriamiento de conformación ge- nerado	40
6.3.4. Diseño de los canales de enfriamiento de conformación tradicional	45
6.4. Preparación para las simulaciones comparativas de enfriamiento con los di- versos canales	46
6.5. Validación de método con geometría alterna	51
7. Resultados	53
7.1. Cumplimiento de requisitos	53
7.2. Diseños finales	55
7.3. Resultados de las simulaciones para el vaso	59
7.4. Resultados de las simulaciones para el casco	71
7.5. Resultados graficados	83
7.6. Número de Reynolds	85
7.7. Análisis costo-beneficio para el casco	85
7.8. Análisis costo-beneficio para el vaso	88
7.9. Discusión de resultados	89
8. Conclusiones	93
9. Recomendaciones	95
10. Bibliografía	97
11. Anexos	99
11.1. Anexo 1: Protocolo de utilización de Fluid Path Study en Autodesk Fusion360	99

Lista de figuras

1. Colapso y deformación de canales de enfriamiento	14
2. Canal de enfriamiento de conformación tradicional 8 mm contra auto soportado	15
3. Canales de enfriamiento de conformación de forma cuadrada con ranura fre-	
sada (MGSS)	16
4. Cavidad de molde con estructura porosa	20
5. Vista isométrica y dimensiones generales en mm de la pieza	26
6. Dimensiones generales del vaso en mm	26
7. Vista isométrica cortada en el plano XY del molde de la pieza	27
8. Vista isométrica del núcleo de la pieza	28
9. Vista isométrica seccionada en 3/4 de la cavidad de la pieza	28
10. Canales de enfriamiento tradicionales: vista isométrica seccionada YZ del nú-	
cleo de la pieza 2	29
11. Deflector rectangular: vista isométrica seccionada YZ del núcleo de la pieza 2	30
12. Deflector de doble hélice: vista isométrica seccionada YZ del núcleo de la pieza 2	31
13. Representación de la entrada y salida de refrigerante a través del deflector de	
doble hélice en el núcleo de la pieza 2: vista lateral seccionada en YZ	31
14. Geometría del fluido a preservar	32
15. Geometría del fluido a preservar	33
16. Iteraciones A1 y A2	35
17. Iteraciones A3 - A5	36
18.	37
19. Iteraciones A6 - A8	37
20. Iteraciones A9 - A12	39
21. Iteración A13: versión final del canal	40
22. Asignación de secciones y mallado: canal de enfriamiento de conformación	
generado	41
23. Condiciones frontera: canal de enfriamiento de conformación generado	43
24. Contorno de velocidad: canal de enfriamiento de conformación generado	44
25. Contorno de velocidad en 3D: canal de enfriamiento de conformación generado	44
26. Proceso de diseño del canal de enfriamiento de conformación convencional	45
27. Canal de enfriamiento de conformación convencional, núcleo del molde con	
geometría del canal vaciada	46

28. Preparación de la geometría del vaso en Moldex3D	48
29. Continuación de la preparación de la geometría del vaso en Moldex3D	49
30. Ejemplo de la adición de los canales de enfriamiento y mallado en Moldex3D	50
31. Propiedades del plástico elegido para la simulación	50
32. Casco diseñado para la validación de método	52
33. Dimensiones generales del casco en mm	52
34. Molde base para el vaso, seccionado en YZ	55
35. Dimensiones generales del núcleo del vaso en mm	55
36. Molde base para el casco, seccionado en XY	56
37. Dimensiones generales del núcleo del casco en mm	56
38. Canales tradicionales, de conformación tradicionales y de conformación gene- rados, respectivamente, en el núcleo del vaso	57
39. Canales tradicionales, de conformación tradicionales y de conformación gene- rados, respectivamente, en el núcleo del casco	58
40. Temperatura promedio de enfriamiento en la parte: canal de enfriamiento tradicional para molde de vaso	59
41. Temperatura promedio de enfriamiento en la parte: canal de enfriamiento de conformación tradicional para molde de vaso	60
42. Temperatura promedio de enfriamiento en la parte: canal de enfriamiento de conformación generado para molde de vaso	61
43. Tiempo para que la pieza alcance su temperatura de eyección: canal de en- friamiento tradicional para molde de vaso	62
44. Tiempo para que la pieza alcance su temperatura de eyección: canal de en- friamiento de conformación tradicional para molde de vaso	63
45. Tiempo para que la pieza alcance su temperatura de eyección: canal de en- friamiento de conformación generado para molde de vaso	64
46. Flujo de calor por unidad de área de la superficie de la parte: canal de enfria- miento tradicional para molde de vaso	65
47. Flujo de calor por unidad de área de la superficie de la parte: canal de enfria- miento de conformación tradicional para molde de vaso	66
48. Flujo de calor por unidad de área de la superficie de la parte: canal de enfria- miento de conformación generado para molde de vaso	67
49. Eficiencia de enfriamiento del canal: canal de enfriamiento tradicional para molde de vaso	68
50. Eficiencia de enfriamiento del canal: canal de enfriamiento de conformación tradicional para molde de vaso	69
51. Eficiencia de enfriamiento del canal: canal de enfriamiento de conformación generado para molde de vaso	70
52. Temperatura promedio de enfriamiento en la parte: canal de enfriamiento tradicional para molde de casco	71
53. Temperatura promedio de enfriamiento en la parte: canal de enfriamiento de conformación tradicional para molde de casco	72
54. Temperatura promedio de enfriamiento en la parte: canal de enfriamiento de conformación generado para molde de casco	73
55. Tiempo para que la pieza alcance su temperatura de eyección: canal de en- friamiento tradicional para molde de casco	74

56. Tiempo para que la pieza alcance su temperatura de eyección: canal de enfriamiento de conformación tradicional para molde de casco	75
57. Tiempo para que la pieza alcance su temperatura de eyección: canal de enfriamiento de conformación generado para molde de casco	76
58. Flujo de calor por unidad de área de la superficie de la parte: canal de enfriamiento tradicional para molde de casco	77
59. Flujo de calor por unidad de área de la superficie de la parte: canal de enfriamiento de conformación tradicional para molde de casco	78
60. Flujo de calor por unidad de área de la superficie de la parte: canal de enfriamiento de conformación generado para molde de casco	79
61. Eficiencia de enfriamiento del canal: canal de enfriamiento tradicional para molde de casco	80
62. Eficiencia de enfriamiento del canal: canal de enfriamiento de conformación tradicional para molde de casco	81
63. Eficiencia de enfriamiento del canal: canal de enfriamiento de conformación generado para molde de casco	82
64.	83
65.	83
66.	84
67.	84
68. Modelo hecho en Fusión 360.	99
69. Creación de un estudio generativo.	100
70. Visualización de Preserve Geometry.	100
71. Visualización de Obstacle Geometry.	101
72. Visualización de Starting Shape.	101
73. Visualización de entradas y salidas del flujo.	101
74. Visualización del criterio de flujo.	102
75. Visualización de los objetivos.	102
76. Visualización del material del flujo.	103
77. Visualización de la resolución del resultado.	103
78. Visualización de la sección 'Explore'.	104
79. Visualización de la sección 'Design Preview'.	104
80. Visualización de las caídas de presión.	105
81. Visualización del movimiento del fluido y su velocidad.	105
82. Generación de resultados.	105

Lista de cuadros

1. Identificación de códigos	23
2. Identificación de códigos	24
3. Propiedades del agua	41
4. Parámetros de inyección y enfriamiento de la simulación	51
5. Propiedades del metal del molde	51
6. Requisitos y su cumplimiento	54
7. Factores relevantes para el análisis costo-beneficio para la implementación de un molde con canales de enfriamiento de conformación generados para el casco	86
8. Flujo de efectivo para la implementación de un molde con canales de enfriamiento de conformación generados para el casco	86
9. Inversión aproximada para la implementación de un molde con canales de enfriamiento de conformación generados para el casco	87
10. Comparación contra inversión segura en la implementación de un molde con canales de enfriamiento de conformación generados para el casco	87
11. Factores relevantes para el análisis costo-beneficio para la implementación de un molde con canales de enfriamiento de conformación generados para el vaso	88
12. Flujo de efectivo para la implementación de un molde con canales de enfriamiento de conformación generados para el vaso	88
13. Inversión aproximada para la implementación de un molde con canales de enfriamiento de conformación generados para el vaso	89
14. Comparación contra inversión segura en la implementación de un molde con canales de enfriamiento de conformación generados para el vaso	89

Se buscará mejorar el diseño del circuito de enfriamiento para moldes utilizados en el proceso de inyección plástica. Los canales de enfriamiento en los moldes tradicionales presentan limitaciones al ser rectos y con una sección transversal uniforme, lo que provoca un gradiente de calor y defectos en las piezas plásticas. También resulta en un ciclo de inyección plástica más largo, donde la fase de enfriamiento y solidificación puede consumir entre el 60 y 70 % del tiempo total. Se necesitará una solución que permita diseñar canales de enfriamiento adaptados a cavidades con geometría irregular para reducir el tiempo de enfriamiento y mejorar la calidad de los productos plásticos. El objetivo del presente trabajo de graduación será diseñar y simular canales de enfriamiento de conformación a través de diversos programas de diseño generativos para un molde preestablecido de inyección plástica. Se utilizarán las herramientas de diseño generativo y optimización y las simulaciones serán realizadas en programas como ANSYS y Autodesk Moldflow con el objetivo de comparar la eficiencia y el tiempo de ciclo entre un molde con canales tradicionales y otro con canales de enfriamiento de conformación. Se espera obtener resultados que mejoren el gradiente de temperatura, la transferencia de calor, la calidad de la pieza y el tiempo de ciclo de inyección plástica.

En la industria del moldeo por inyección de plástico, el enfriamiento del molde es una etapa crítica que influye directamente en la calidad de la pieza y la eficiencia del proceso de producción. Los canales de enfriamiento de conformación, que siguen de cerca la geometría de la cavidad del molde, representan una mejora significativa respecto a los canales rectos tradicionales al ofrecer un enfriamiento más eficiente y uniforme (Beard, 2014). Sin embargo, los desafíos tecnológicos, como las limitaciones geométricas de la sinterización directa por láser de metal (*DMLS*) y la necesidad de optimización térmica, continúan impulsando la investigación y el desarrollo de diseños avanzados de enfriamiento.

En este contexto, se han propuesto soluciones innovadoras, como los canales de enfriamiento autosustentables y las estructuras porosas adaptadas. Investigaciones como la de (Tan et al., 2020) han demostrado que el uso de canales de mayor diámetro con soportes internos puede mejorar significativamente la eficiencia de enfriamiento, reduciendo el tiempo de ciclo hasta en un 22.2%. Además, estos diseños aprovechan la complejidad de la fabricación aditiva para superar las limitaciones estructurales de los canales tradicionales, proporcionando mayor área de contacto y promoviendo flujos turbulentos que mejoran la transferencia de calor.

El uso de técnicas de aprendizaje automático (*machine learning, ML*) también ha ganado relevancia en el diseño de canales de enfriamiento de conformación. Estas técnicas permiten la modelación y simulación de los sistemas de enfriamiento para minimizar la variación de temperatura en la superficie de las piezas moldeadas, mejorando así la calidad del producto y reduciendo la deformación (Gao et al., 2021). Mediante el entrenamiento de modelos como las redes neuronales artificiales, se pueden predecir distribuciones de temperatura y optimizar los parámetros de diseño de los canales, contribuyendo a la creación de sistemas de enfriamiento más eficientes.

Asimismo, la optimización topológica termo-mecánica y termo-fluida ha sido utilizada para rediseñar los canales de enfriamiento y las estructuras porosas, generando moldes más ligeros y eficientes. Estudios previos, como los realizados por (Jahan et al., 2016), han demostrado que estos enfoques no solo mejoran la transferencia de calor, sino que también permiten un mejor control de la temperatura del molde y la calidad dimensional de las piezas, beneficiando la producción en términos de tiempos de ciclo y costos.

Este trabajo se enfoca en el diseño y simulación de canales de enfriamiento de conformación mediante programas de diseño generativo, con el objetivo de optimizar el ciclo de enfriamiento y la calidad de las piezas en el proceso de inyección plástica. El estudio busca integrar técnicas avanzadas de fabricación aditiva, optimización topológica y modelación asistida por *ML* para proponer soluciones innovadoras que respondan a las necesidades actuales de la industria del moldeo por inyección.

2.1. Enfriamiento de conformación para inyección plástica

1. Se realizó una investigación respecto al diseño de un sistema de enfriamiento envolvente en la inyección plástica. A partir de esta se encontró lo siguiente: el diseño del sistema de enfriamiento es uno de los factores más críticos para reducir el tiempo de un ciclo de inyección plástica, ya que, en un ciclo de inyección plástica, la fase de enfriamiento toma la mayor parte del tiempo. Sin embargo, la configuración de un sistema de enfriamiento está restringida por el método de moldeo tradicional. Una de las complicaciones del método tradicional es que, para cavidades con geometría irregular, la distancia entre los canales de enfriamiento y la cavidad varía a lo largo de la parte. Esto ocasiona una acumulación local de calor y algunos defectos en el producto como marcas de hundimiento o deformaciones. El potencial del enfriamiento de conformación yace en un tiempo de ciclo más corto y una mejor calidad de producto.

En base a esta investigación, se encontraron las siguientes recomendaciones. Existe una distancia óptima entre la cavidad y el canal de enfriamiento, esta distancia se basa en el algoritmo de diseño para los canales. Luego, en un experimento realizado en la investigación, se comparó la eficiencia de enfriamiento para el mismo molde de un canal tradicional y un diseño de conformación. Se encontró que el canal de enfriamiento de conformación absorbió un 53.7% más calor que el tradicional. Además, a partir de una simulación de dinámica de fluidos, se pueden utilizar vectores de velocidad de enfriamiento tridimensionales para validar que el fluido no tiene puntos muertos. Al revisar los resultados de velocidad, se pueden evitar diseños de enfriamiento ineficientes. También, se observa que el efecto de un aumento de temperatura en la salida de agua es más significativo a una baja tasa de flujo. Se concluye que una temperatura más baja de refrigerante es útil en la remoción de calor y evita deformaciones (Hsu et al., 2020).

2. El siguiente estudio es acerca de un procedimiento para optimizar el control de temperatura del molde utilizando la tecnología *direct metal laser sintering (DMLS)*. A partir de este, se encontraron las siguientes ventajas de utilizar enfriamiento de conformación con *DMLS*. Respecto a la geometría de enfriamiento, las posibles rutas para los canales de enfriamiento son prácticamente infinitas. La sección transversal de los canales de enfriamiento puede tomar casi cualquier forma. Esto presenta la ventaja de poder controlar activamente la turbulencia del refrigerante (el número de Reynolds deseado) a través de la variación de la sección transversal. Además, estos cambios de ruta en el canal de enfriamiento permiten aprovechar las ventajas del enfriamiento en áreas que no podrían ser alcanzadas con los métodos tradicionales.

En relación a la calidad de la pieza, un control de temperatura del molde más efectivo ahorra tanto tiempo como costos. La deformación y marcas de hundimiento son minimizadas al enfriar uniformemente el plástico, minimizando así los esfuerzos internos de la pieza plástica. Algunos tipos de geometría con estándares de calidad altos son únicamente posibles de manufacturar con enfriamiento de conformación. El costo se optimiza con los siguientes aspectos; se vuelve posible enfriar partes críticas dentro del molde. El uso de conductores de calor de cobre especiales y otras medidas complejas se vuelven obsoletos. La vida útil de las herramientas es mejorada debido al nivel de temperatura uniforme.

Ahora, las siguientes son desventajas del enfriamiento convencional: la distancia entre la cavidad y el canal de enfriamiento difiere, dado que únicamente canales rectos taladrados son posibles. Por lo tanto, la disipación de calor no puede ser uniforme, ocasionando un impacto negativo en la pieza (esfuerzos internos y deformaciones). En canales barrenados, se crean obstrucciones en los extremos que ocasionan áreas con una velocidad cero de flujo, facilitando la aglomeración de contaminantes. Otros riesgos incluyen el peligro de barrenar los agujeros de eyección o romper la broca, tornando inútil el molde.

El diámetro óptimo para un canal de enfriamiento puede ser de 4 a 12 mm, si este es muy pequeño (1 mm o menos), sería necesario utilizar fluidos con tratamientos especiales para prevenir atascamientos. Las áreas con ángulos sobresalientes deben estar inclinados por lo menos 40 grados sobre una horizontal. Una figura acanalada puede causar mayor turbulencia, mejorando el desempeño de enfriamiento. El área de la sección transversal del canal debe permanecer constante para prevenir un efecto de interrupción en el flujo. La técnica de *DMLS* construye los canales de enfriamiento a la vez que el resto del molde, sin afectar el tiempo de manufactura. Finalmente, se concluye que el verdadero desafío para la integración de un sistema eficiente de enfriamiento de conformación en los primeros pasos de un proyecto es encontrar el diseño adecuado de los canales (Mayer, [2009](#)).

Los canales de enfriamiento envolvente se emplean para mejorar la tasa de enfriamiento por su distancia equitativa de la superficie del molde. Estos juegan un papel clave en la productividad de la inyección plástica al mejorar la transferencia de calor entre los canales y la superficie, ocasionando un tiempo de enfriamiento menor. En esta investigación se revisan varios tipos significativos de canales de enfriamiento de conformación y se clasifican en cuatro grupos. Se proporciona una descripción general de los avances de estos canales de enfriamiento y los modelos térmicamente mejorados a partir de simulaciones, estudios numéricos y estudios experimentales. Se concluye que los parámetros principales para los canales de enfriamiento de conformación son la forma, distribución de temperatura y caídas de presión (Arman & Lazoglu, [2023](#)).

Con el propósito de mejorar las tasas de producción e incrementar la productividad de la industria de fundición a presión, se analiza la posibilidad de emplear canales de enfriamiento de conformación, para reducir los tiempos de solidificación. Este análisis se hizo a través de una revisión de resultados de solidificación de un diseño de enfriamiento tradicional vs uno con enfriamiento de conformación. A través de diversas pruebas de fundición, se utilizaron insertos para validar los resultados simulados. Para esta investigación se utilizó el *software* llamado *materialise magics*, los diámetros de los canales de enfriamiento fueron de 10 mm y el canal de conformación tuvo un perfil con forma de “M” (Dickens et al., 2003).

Este estudio propone un novedoso diseño longitudinal de canales de enfriamiento de conformación en una herramienta “*B-pillar*”, en el que se utilizan tres parámetros de diseño: el radio de los canales de enfriamiento, la distancia del centro del canal a la superficie de trabajo y la proporción de cada centro del canal. Para optimizar el diseño de dicho canal longitudinal, se propuso un proceso integrado establecido por múltiples plataformas de *software* basado en la metodología de superficie de respuesta y una optimización multi-objeto. La temperatura promedio del refrigerante y la desviación de temperatura de la superficie de trabajo se utilizan para evaluar el rendimiento del enfriamiento (Bin et al., 2016).

2.2. *Machine learning* y *software* generativo para los canales de enfriamiento de conformación

Esta investigación utiliza diseño asistido por *ML* para canales de enfriamiento de conformación en moldes de inyección plástica. En este se discute que, aunque el desarrollo de la tecnología de manufactura aditiva permite el diseño y fabricación de canales de conformación complejos, la varianza de temperatura causada por una distribución no uniforme del grosor de las partes aún no se ha resuelto. Los diseños existentes de enfriamiento de conformación no crean canales que se conforman a la distribución del espesor en la parte. La investigación propone un método asistido por *ML* para generar sistemas de enfriamiento que se conforman tanto a la superficie de la parte como a su valor de espesor. Se construyó un modelo suplementario que predice la temperatura superficial resultante con técnicas de *ML*.

Otros puntos discutidos en la investigación son los siguientes. Algunas topologías comúnmente usadas para el enfriamiento de conformación incluyen el espiral, *zigzag* y una configuración porosa. Aproximadamente, del 60 a 70 % del tiempo total de un ciclo de inyección plástica es requerido para la fase de enfriamiento y solidificación (Gao et al., 2021).

La siguiente investigación es una metodología que utiliza diseño generativo de canales de enfriamiento de conformación para herramientas de moldeo híbrido-manufacturadas. Esta metodología novedosa propone diseñar dichas herramientas automáticamente y así lograr reducir los siguientes factores: el tiempo de enfriamiento, deformaciones y la variabilidad espacial máxima en las temperaturas. Se discute que la efectividad de un sistema de enfriamiento con herramientas de moldeo por inyección es crítica para el costo y productividad del proceso de molde, ya que el tiempo de enfriamiento típicamente domina la duración de un ciclo de moldeo. Además de la minimización del tiempo de enfriamiento, un enfriamiento

espaciado uniformemente a lo largo del ciclo de manufactura es crítico para la calidad de cada parte moldeada.

El diseño de un enfriamiento de conformación para manufactura aditiva usualmente se hace de forma manual. Por lo que esta investigación propone una metodología personalizada de diseño generativo. El diseño generativo es un proceso iterativo utilizado para generar un rango de variantes de diseño factibles dentro de restricciones definidas por el usuario y métricas de calidad. Dentro de la metodología se recalca que existe la selección artificial y la natural de los diseños discutidos. La selección artificial se refiere a que los usuarios actúan como diseñadores guías, mientras que en la selección natural, el proceso es guiado a través de computadoras por medio de restricciones espaciales o matemáticas, con el objetivo de satisfacer algún esquema de evaluación (Wilson et al., 2023).

La siguiente investigación propone un procedimiento novedoso para los canales de enfriamiento de conformación, diseñados utilizando optimización topológica basada en cargas térmicas. A diferencia de otros métodos que se enfocan en optimizar la configuración de los canales o los parámetros geométricos, este estudio aplica optimización topológica multifísica en la totalidad del área. El objetivo de dicha investigación es obtener el diseño óptimo de los canales con una baja caída de presión y una tasa de transferencia de calor alta. Estos resultados optimizados planos se convierten en canales tridimensionales que se conforman a la figura específica siendo moldeada y se aplican al entorno de inyección plástica por medio de una simulación. Entre los resultados obtenidos, se logra una reducción de temperatura promedio de 0.53 y 2.20 Kelvin, además de que la caída de presión se reduce en un 25.4%. El estudio concluye que el procedimiento propuesto demuestra estabilidad, flexibilidad y validez. Se espera que el diseño conceptual de los canales de enfriamiento basados en carga térmica tenga más aplicaciones en campos térmicos de ingeniería (Wang et al., 2023).

El diseño generativo se desarrolla cada vez más, ayudando a compañías y empresas a tomar mejores decisiones en relación al diseño de las piezas, considerando el enlace diseño-manufactura. La última generación de avances para la tecnología del diseño generativo incluye nuevas maneras de diseñar fronteras y de restringir a los algoritmos para que sean más eficientes en identificar los requisitos predeterminados de manufactura. Estos avances expanden las posibilidades del diseño generativo y no lo limitan únicamente a la manufactura aditiva; recientemente Autodesk declaró que la mejor opción para manufacturar una geometría compleja puede llegar a ser el maquinado multieje. En general, el diseño generativo permite a los usuarios simultáneamente generar y explorar cientos o miles de soluciones listas para ser manufacturadas, basadas en los requisitos y restricciones del producto (Albert, 2019).

2.3. Ventajas de costos

Este artículo se enfoca en cómo conocer el verdadero valor de los moldes de inyección con enfriamiento de conformación. Responde a las siguientes preguntas: ¿cuál es el retorno en la inversión para un nuevo molde con enfriamiento envolvente? ¿se pagará solo? ¿en cuánto tiempo? Se reitera que muchas compañías se niegan a probar nuevas tecnologías como el enfriamiento de conformación o pagar un 20 % aproximado más en los costos de molde. Se presenta un análisis para medir el retorno de la inversión a lo largo de la vida útil de un molde de conformación como función del incremento en ventas y ganancias que este permite (Beard, 2022).

El diseño del sistema de enfriamiento para un molde es uno de los factores más críticos para reducir el tiempo en un ciclo de inyección plástica. En moldes tradicionales, los canales de enfriamiento están restringidos geoméricamente por el método de manufactura utilizado. Al ser taladrados a un molde prefabricado, estos únicamente pueden seguir la trayectoria recta de la broca al igual que una sección transversal uniforme. Para cavidades con geometría irregular, esto representa una limitación porque la distancia entre los canales de enfriamiento y la cavidad varía a lo largo de la parte. Los canales tradicionales no se conforman a la parte y esto ocasiona acumulaciones locales de calor y defectos como marcas de hundimiento y deformaciones, como consecuencia, en el ciclo de inyección plástica, la fase de enfriamiento y solidificación toma del 60 al 70 % del tiempo (Gao et al., [2021](#)).

Para un proceso de inyección plástica, es crucial optimizar el ciclo de enfriamiento, no sólo para acortar el tiempo que toma un ciclo típico, si no para evitar deformaciones y marcas de hundimiento en la parte. Para obtener dichas mejoras, se puede acudir a canales de enfriamiento de conformación debido a varias razones fundamentales. El potencial del enfriamiento de conformación radica en un tiempo de ciclo más corto, mayor transferencia de calor y una mejor calidad del producto. Un control más efectivo de la temperatura del molde se traduce en ahorro de tiempo y costos. En primer lugar, la flexibilidad en la geometría de los canales de enfriamiento permite controlar activamente la turbulencia del refrigerante, ajustando el Número de Reynolds deseado mediante la variación de la sección transversal. Al utilizar manufactura aditiva, las posibles rutas para los canales de enfriamiento, así como las formas de las secciones transversales son prácticamente infinitas. Esta versatilidad en las rutas de enfriamiento también introduce la posibilidad de aprovechar el enfriamiento en áreas que antes no podían ser alcanzadas con métodos convencionales, mejorando el intercambio de calor entre el plástico en estas zonas y el refrigerante utilizado (Mayer, [2009](#)). La uniformidad en el enfriamiento del plástico contribuye también a la reducción de los esfuerzos internos de la pieza. Emplear canales de enfriamiento de conformación conlleva un proceso de producción más eficiente y con una calidad superior de las piezas plásticas resultantes, beneficios que podrían ser aprovechados por la industria de inyección plástica guatemalteca.

El propósito de esta investigación es diseñar y simular canales de enfriamiento de conformación a través de distintos programas de diseño generativo para un molde preestablecido de inyección plástica. Los canales se diseñarán utilizando herramientas de diseño generativo y optimización topológica integradas. Las simulaciones de transferencia de calor y dinámica de fluidos se realizarán en ANSYS y Autodesk Moldflow con el propósito de comparar la eficiencia y tiempo de ciclo entre un molde con canales tradicionales y otro con canales de enfriamiento de conformación. Se espera obtener un conjunto de canales de enfriamiento optimizado a través de las simulaciones que represente una mejora en el gradiente de temperatura, en la tasa de transferencia de calor, en la calidad de la geometría y en el tiempo del ciclo de inyección plástica. Se espera que la mejora sea factible, dada una previa investigación donde diversos experimentos hechos por otras entidades han demostrado resultados prometedores (Hsu et al., [2020](#)).

4.1. Objetivo general

Diseñar y simular canales de enfriamiento de conformación a través de programas de diseño generativo para un molde de inyección plástica con el fin de optimizar el ciclo de enfriamiento y la calidad de la pieza.

4.2. Objetivos específicos

1. Seleccionar el programa a utilizar en base a la disponibilidad, costo y el procedimiento que cada uno requiere para el diseño generativo.
2. Diseñar un molde para inyección plástica en Autodesk Inventor que servirá como base alrededor de la cual se probarán distintos canales de enfriamiento.
3. Diseñar un conjunto de canales de enfriamiento tradicionales para el molde en Autodesk Inventor y otro conjunto de canales de enfriamiento de conformación con cada *software* generativo.
4. Comparar el tiempo del ciclo de enfriado, la tasa de transferencia de calor y el número de Reynolds de los moldes con canales convencionales y de conformación por medio de simulaciones de transferencia de calor y dinámica de fluidos en el *software* ANSYS y Autodesk Moldflow.
5. Realizar un análisis costo-beneficio de la implementación del molde con canales de conformación contra un canal tradicional para una producción teórica de inyección plástica.

5.1. Diseño de canales de enfriamiento para moldes de inyección fabricados con tecnologías aditivas de manufactura

El uso de la tecnología de impresión 3D en la industria de la inyección de moldes permite la creación de diseños de enfriamiento complejos que pueden mejorar la calidad de las piezas y reducir el tiempo de ciclo. La tecnología de impresión 3D, específicamente las técnicas de fabricación aditiva como la *DMLS*, habilita la creación de diseños de enfriamiento complejos en la industria de la inyección de moldes. Con *DMLS*, casi cualquier diseño de circuito de enfriamiento imaginable se puede imprimir, siempre y cuando esté dentro de las limitaciones de la plataforma de impresión y el ángulo de impresión. Esto permite la creación de canales de enfriamiento intrincados que se pueden colocar cerca de la superficie de la pieza y en áreas de difícil acceso (Vang, [2018](#)).

La fabricación aditiva permite la creación de circuitos de enfriamiento intrincados que se ajustan a la superficie de la pieza y se pueden construir más rápido que mediante el mecanizado tradicional. Esta tecnología elimina la necesidad de múltiples pasos de mecanizado y reduce el tiempo de producción en general. La combinación de capacidades de diseño complejas, la producción simultánea de múltiples piezas y una mayor eficiencia en la transferencia de calor permite que los circuitos de enfriamiento construidos mediante fabricación aditiva sean más rápidos que los métodos de mecanizado tradicionales (Vang, [2018](#)).

Los diversos *software* de simulación de plásticos se pueden utilizar para determinar los beneficios del enfriamiento de conformación. Permiten su análisis y validación, simulando el perfil de temperatura y la eficiencia de enfriamiento de los canales de enfriamiento, así como la distribución de temperatura y la contracción diferencial en la pieza. También puede compararse la eficiencia y uniformidad de enfriamiento entre diseños de enfriamiento convencionales y diseños de enfriamiento de conformación. Esto facilita la determinación del retorno de la inversión (ROI) potencial al implementar el enfriamiento de conformación, al ofrecer información sobre la reducción del tiempo de ciclo y las mejoras en la calidad de las piezas, lo

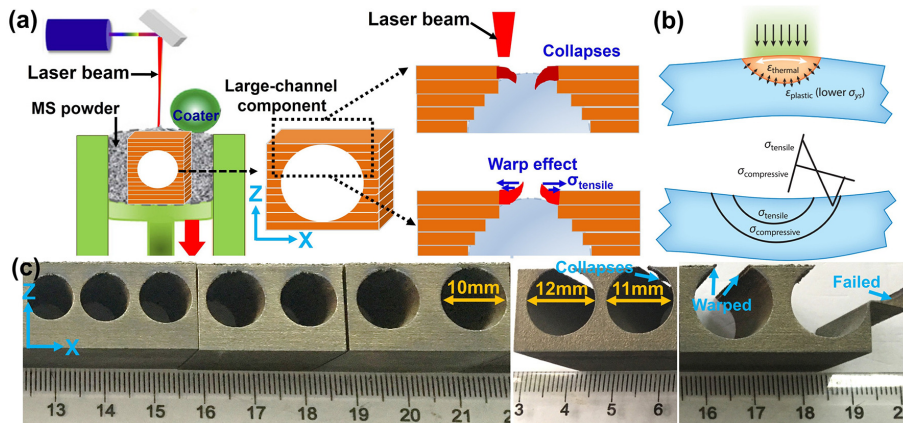
que ayuda a justificar la adopción de la tecnología de enfriamiento de conformación (Vang, 2018).

5.2. Canales de enfriamiento autosustentables y estructuras porosas adaptadas

Tan et. al (2020) diseñaron un molde de inyección novedoso con un canal de enfriamiento de conformación auto soportable de 13 mm de diámetro, aumentando significativamente el tamaño nominal sin soportes de 8 mm. Esta mejora tiene el objetivo de aumentar la eficiencia de enfriamiento y superar las limitaciones geométricas del *DMLS*.

Los soportes internos optimizados, previenen el colapso y deformación de canales de enfriamiento tradicionales con diámetros mayores a 10 mm. Como se puede observar en la figura 1 a), la *DMLS* se encuentra susceptible a colapso o deformación cuando está formando agujeros, canales internos o estructuras sobresalientes. El mecanismo subyacente del colapso y deformación se debe a los esfuerzos residuales ocasionados por un gradiente de temperatura en los ciclos de enfriamiento y calentamiento, el esfuerzo inducido por encogimiento en la solidificación y esfuerzos de tensión residuales en capas solidificadas, tal y como se observa en la figura 1 b). En el estudio se encontró que los canales de enfriamiento de conformación tradicionales deben tener un máximo de 8 mm de diámetro para mantener un rango de tolerancia segura (figura 1 c) (Tan et al., 2020).

Figura 1: Colapso y deformación de canales de enfriamiento

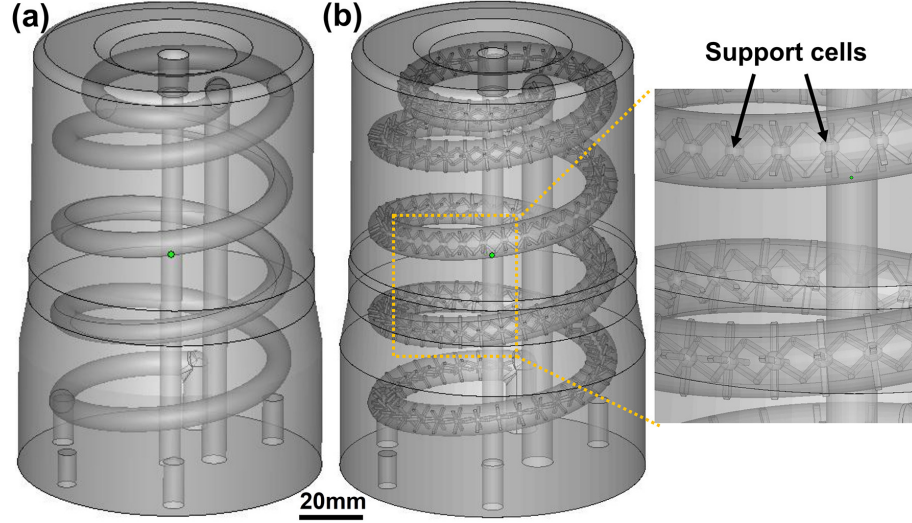


Fuente: Tan (2020). *Additive manufacturing of conformal cooling molds with self-supporting channels and tailored porous structures*

Se iteró y optimizó el diseño de celdas unitarias internas de soporte para los canales de enfriamiento, dichas estructuras son capaces de soportar las fuerzas normales aplicadas a la armadura, distribuyéndolas en pilares inclinados a 45 grados. Cabe recalcar que dicho ángulo no representa una limitación para la *DMLS*. Tras pruebas de manufactura, se encontró que, si se incrementa el tamaño de las estructuras de soporte, el volumen relativo del soporte se decrementa, por lo tanto, en términos de manufacturabilidad y espacio efectivo en los canales, las celdas unitarias más grandes son más ventajosas (Tan et al., 2020).

Se comparó un molde con un canal de enfriamiento de conformación de 8 mm (figura 2 a), y otro de 13 mm con soportes internos (figura 2 b). La comparación del tiempo de enfriamiento hecha en el *software* Moldex 3D indicó una reducción en el tiempo de enfriamiento de 22.2 % (Tan et al., 2020).

Figura 2: Canal de enfriamiento de conformación tradicional 8 mm contra auto soportado



Fuente: Tan (2020). *Additive manufacturing of conformal cooling molds with self-supporting channels and tailored porous structures*

El incremento en la eficiencia de enfriamiento de los canales auto soportados se atribuye a un incremento en el área superficial, expresada en la ecuación 1.

$$Q_W = hA * \Delta T \quad (1)$$

Además, los soportes incrementan la rugosidad del canal, alterando el flujo y ocasionando flujos secundarios caóticos y turbulentos que mejoran la mezcla de fluido frío y caliente. Este fenómeno se puede cuantificar al comparar el flujo turbulento y laminar en un canal de enfriamiento. Con flujo laminar, el fluido fluye en capas a lo largo de la pared superficial, sin movimiento macroscópico en la dirección del flujo de calor. Por lo tanto, se incrementa el gradiente de temperatura y la resistencia térmica de transferencia de calor por convección es mejorada. Por el otro lado, cuanto más fuerte es el flujo turbulento, más delgado es el espesor de la capa interna del flujo laminar y, como resultado, la resistencia térmica de transferencia de calor por convección es disminuida (Tan et al., 2020).

Generalmente, los patrones de flujo laminar y turbulento se rigen por el número de Reynolds (Re), que se expresa en la ecuación 2. En donde ρ , μ y v son la densidad, la viscosidad y el caudal promedio de refrigerante en el canal, y d es el diámetro del canal de enfriamiento.

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (2)$$

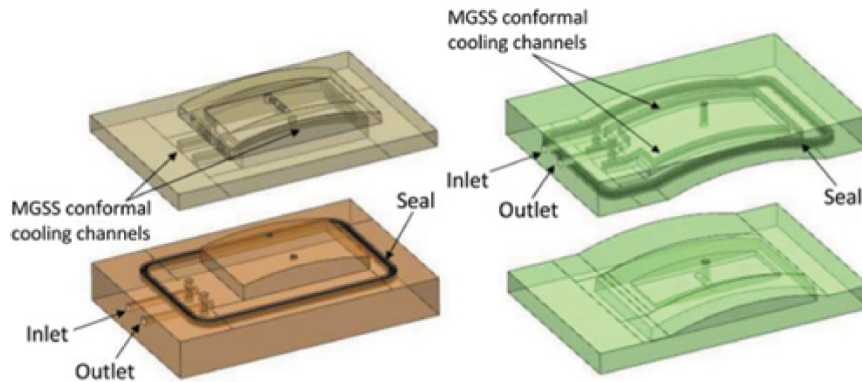
5.3. Mejora de la eficiencia de refrigeración

El enfriamiento de conformación es una técnica de diseño que utiliza líneas de enfriamiento en un molde de inyección que siguen de cerca la geometría de la pieza que se está produciendo. Este puede resultar en una reducción en el tiempo de ciclo del molde de inyección, lo que lleva a un aumento en la rentabilidad. Consecuentemente, se logra un enfriamiento más eficiente y uniforme del molde, reduciendo el tiempo necesario para que la pieza se solidifique y sea expulsada del molde (Beard, 2014).

El uso del enfriamiento de conformación puede disminuir los productos rechazados y mejorar la calidad de la pieza, reduciendo el riesgo de costosos retiros del mercado. Este puede aumentar la productividad y liberar capacidad adicional en las prensas, lo que permite un crecimiento potencial en las ventas o ahorros de costos. En general, el enfriamiento de conformación representa un cambio significativo en la industria del moldeo y puede beneficiar en gran medida a los fabricantes (Beard, 2014).

Shayfull et al. (2013) discuten el uso de canales de enfriamiento de conformación de forma cuadrada con ranura fresada (*MGSS*) en la inyección de plástico, dichos canales pueden ser observados en la figura 3. *MGSS* se refiere a un tipo de diseño de canal de enfriamiento de conformación que implica fresar ranuras directamente en los insertos del molde en forma cuadrada.

Figura 3: Canales de enfriamiento de conformación de forma cuadrada con ranura fresada (*MGSS*)



Fuente: Z. Shayfull (2013). *Milled Groove Square Shape Conformal Cooling Channels in Injection Molding Process*

Al comparar el rendimiento de los canales de enfriamiento de conformación *MGSS* con los canales de enfriamiento rectos perforados en cuanto a la distribución térmica y el tiempo de enfriamiento. Los canales de enfriamiento de conformación *MGSS* ofrecen una distribución térmica más uniforme y reducen el tiempo de enfriamiento en comparación con los canales de enfriamiento rectos perforados. Las variaciones en las distribuciones térmicas mejoraron en un rango del 12 al 50 %, y el tiempo de enfriamiento se redujo dentro del 6 al 8 % con el uso de los canales de enfriamiento de conformación *MGSS* (Shayfull et al., 2013).

Algunos posibles beneficios de utilizar canales de enfriamiento de conformación *MGSS* en procesos de moldeo por inyección incluyen:

- Distribución térmica más uniforme: esto ayuda a reducir los puntos calientes y las variaciones de temperatura en las piezas moldeadas, lo que se traduce en una mejor calidad de las piezas y una mayor estabilidad dimensional.
- Tiempo de enfriamiento en el ciclo de inyección reducido: esto conduce a una mayor productividad y tiempos de ciclo más cortos, lo que permite tasas de producción más rápidas y un mayor rendimiento.
- Mejora en la calidad de las piezas: una reducción en la deformación, un mejor acabado superficial y una mayor precisión dimensional de las piezas moldeadas.
- Ahorro de costos: el tiempo de enfriamiento reducido y la mejora en la calidad de las piezas pueden dar como resultado un menor consumo de energía, tasas de desecho reducidas y costos de producción disminuidos.
- Mayor flexibilidad en el diseño: pueden diseñarse, fabricarse y ensamblarse fácilmente, lo que permite diseños de canales de enfriamiento más complejos y elaborados que se ajustan a la forma de la cavidad del molde (Shayfull et al., 2013).

5.4. Aprendizaje automático para modelar y simular canales de enfriamiento para moldes de inyección

El problema de la variación de la temperatura en la superficie de las piezas en el proceso de moldeo por inyección se refiere a la distribución desigual de la temperatura en la superficie de las piezas moldeadas durante el proceso de enfriamiento y solidificación. Esta variación puede tener un impacto significativo en la calidad de la pieza y en la deformación (Au & Yu, 2007).

La calidad de la pieza puede verse comprometida debido a variaciones en las velocidades de enfriamiento, lo que lleva a propiedades del material inconsistentes y a una precisión dimensional irregular. La deformación o distorsión de la pieza después de ser moldeada y enfriada, conocida como deformación (*warpage* en inglés), también se ve influenciada por la variación de la temperatura. Un enfriamiento desigual puede resultar en una contracción diferencial y una distribución de tensiones, lo que lleva a problemas de deformación en la pieza final (Au & Yu, 2007).

El potencial del aprendizaje automático *ML* en ayudar al diseño de canales de enfriamiento de conformación para minimizar la variación de la temperatura en la superficie de las piezas radica en su capacidad para predecir la distribución de la temperatura y optimizar los diseños de los canales de enfriamiento. El *ML* puede manejar la complejidad y las variaciones en los sistemas de enfriamiento, lo que lo hace adecuado para abordar los desafíos en la predicción de la temperatura y el diseño de enfriamiento de conformación (Au & Yu, 2007).

Técnicas de *ML*, como las redes neuronales artificiales (*ANN*, por sus siglas en inglés), se han aplicado en la industria de moldeo por inyección para optimizar los parámetros del

proceso y reducir la deformación de las piezas. Sin embargo, existe la necesidad de explorar más a fondo cómo el ML puede mejorar los diseños de canales de enfriamiento para piezas con geometría libre y minimizar la deformación. La construcción de un modelo que pueda predecir la distribución de la temperatura en procesos de enfriamiento de conformación es crucial para lograr este objetivo (Au & Yu, 2007).

Mediante el uso del *ML*, se puede desarrollar un modelo sustituto para predecir la temperatura en la superficie de la pieza en función de los parámetros de diseño de los canales de enfriamiento y el espesor de la pieza. Este modelo sustituto se puede aplicar a diferentes diseños de canales de enfriamiento, lo que reduce el costo computacional en comparación con los enfoques de simulación. *ML* tiene el potencial de mejorar el diseño de canales de enfriamiento de conformación al proporcionar predicciones precisas de la temperatura y optimizar los parámetros del sistema de enfriamiento, lo que conduce a una reducción en la variación de la temperatura en la superficie de la pieza y a una mejor calidad de esta (Gao et al., 2021).

El procedimiento propuesto de predicción de la temperatura en la superficie de la pieza asistido por aprendizaje automático (*ML*) consta de tres pasos:

1. Selección de datos de entrenamiento: En este paso, se selecciona una gama de parámetros de diseño, como la mitad del grosor de la pieza, el ancho de la distancia entre canales, la distancia entre canales y la superficie del molde y la porosidad. Estos parámetros se eligen en función de su capacidad para afectar la eficiencia del sistema de enfriamiento y su practicidad en el proceso de minimización de la variación de la temperatura (*TVM*, por sus siglas en inglés). El rango seleccionado de parámetros se utiliza para construir los conjuntos de datos de entrenamiento para el proceso de *ML* (Gao et al., 2021).

2. Entrenamiento del modelo de *ML*: En este paso, se aplica el método supervisado *ANN*, para entrenar un modelo de predicción de temperatura. Los datos de entrenamiento seleccionados, que consisten en los parámetros de diseño y los valores correspondientes de la temperatura en la superficie de la pieza, se utilizan para entrenar el modelo de *ML*. Se define la estructura de la *ANN* y se establecen los parámetros de entrenamiento para optimizar el rendimiento del modelo. El modelo de *ML* aprende los patrones y las relaciones entre los parámetros de diseño y la temperatura en la superficie de la pieza, lo que le permite realizar predicciones precisas (Gao et al., 2021).

3. Predicción de la temperatura en la superficie de la pieza: Una vez que el modelo de *ML* está entrenado, se puede utilizar para predecir la temperatura en la superficie de la pieza para nuevos diseños de canales de enfriamiento. El modelo de *ML* entrenado sirve como una herramienta rápida de predicción de temperatura, proporcionando valores de temperatura siempre que se actualicen los diseños de los canales de enfriamiento. El modelo de *ML* toma los parámetros de diseño de los canales de enfriamiento como entrada y genera la temperatura en la superficie de la pieza predicha como salida (Gao et al., 2021).

5.5. Optimización para el enfriamiento de conformación

Jahan et al. (2016) proponen la implementación de análisis numéricos y técnicas de optimización topológica para rediseñar herramientas tradicionales de moldeo por inyección. Los canales de enfriamiento de conformación y las estructuras porosas en moldes de acero inoxidable impresos en 3D mejoran el tiempo de enfriamiento y la calidad de las piezas de plástico en el moldeo por inyección al proporcionar un mejor control de la temperatura del molde y las dimensiones de la pieza. El diseño de los canales de enfriamiento de conformación, con parámetros como el diámetro del canal, la distancia entre canales y la distancia del centro del canal desde la pared del molde, se optimiza para lograr un rendimiento óptimo en términos de tiempo de enfriamiento y enfriamiento uniforme.

Se implementa una optimización topológica termo-mecánica para generar diseños de cavidades y núcleos de moldes livianos, pero altamente efectivos con estructuras porosas. La implementación de la optimización topológica termo mecánica involucra dos escalas de longitud: la macro escala y la meso escala. La macro escala incluye la estructura general del molde, que comprende la cavidad del molde, el núcleo y los canales de enfriamiento de conformación. La meso escala está formada por las células unitarias dentro del molde, diseñadas como estructuras porosas. El problema de optimización tiene como objetivo encontrar la distribución óptima de las fases porosas a escala mesoscópica dentro del dominio de diseño a escala macroscópica. El objetivo es minimizar la masa del molde al tiempo que se cumplen las restricciones de energía de deformación y disipación de calor. Esto se logra mediante el uso de análisis numéricos y técnicas de optimización para determinar el diseño óptimo del molde, los resultados de dicho molde se pueden observar en la figura 4 (Jahan et al., 2016).

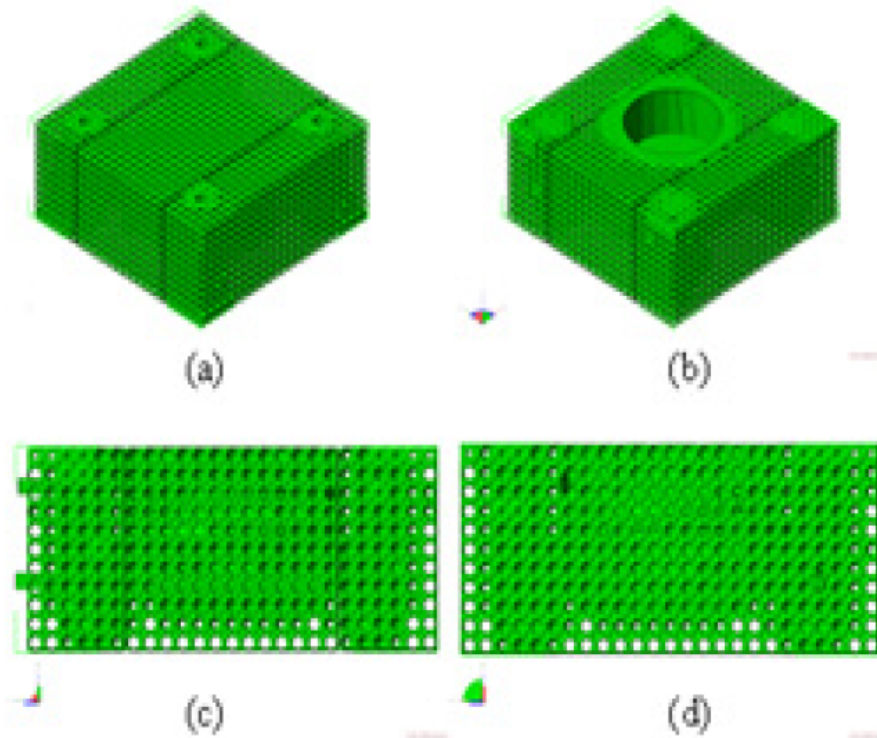
La reducción de peso lograda mediante el diseño de moldes con estructuras porosas facilita la adopción de la fabricación aditiva en la fabricación de moldes por parte de la industria de herramientas. Al incorporar estructuras porosas en el diseño de los moldes, su peso total puede reducirse significativamente sin comprometer su integridad estructural. Esta reducción de peso es ventajosa para los procesos de fabricación aditiva, ya que permite una producción más rápida y rentable de los moldes (Jahan et al., 2016).

Wu et al (2018) proponen una metodología que tiene como objetivo diseñar un sistema de enfriamiento de conformación óptimo para moldes de inyección utilizando la optimización topológica termo fluida. La metodología implica darles a los canales de enfriamiento discretos la misma forma que algunas isoterms ubicadas en la zona estacionaria, y garantizar una tasa de flujo suficiente para el fluido refrigerante. Este enfoque se basa en la idea de que, al alinear los canales de enfriamiento con las isoterms, se puede lograr una mejor uniformidad del campo de temperatura en el molde. Al posicionar los canales de enfriamiento de esta manera, la distribución de temperatura puede controlarse de manera más efectiva, lo que conduce a una mejor transferencia de calor y una reducción del encogimiento volumétrico.

Para garantizar una tasa de flujo suficiente para el fluido refrigerante, el diseño tiene en cuenta la resistencia al flujo, la conducción de calor y la convección natural y forzada dentro de los canales de enfriamiento (Brooks & Bridgen, 2016).

El objetivo es optimizar el rendimiento de transferencia de calor de todo el dominio de diseño, considerando tanto la efectividad del enfriamiento como las características del flujo. Al equilibrar estos factores, la metodología busca lograr un sistema de enfriamiento óptimo

Figura 4: Cavity de molde con estructura porosa



Fuente: Jahan (2016). *Implementation of Conformal Cooling Topology Optimization in 3D Printed Stainless Steel Porous Structure Injection Molds*

que elimine eficazmente el calor del molde (Wu & Tovar, 2018).

La efectividad de las estructuras *Lattice* de enfriamiento en la mejora de la transferencia de calor ha sido demostrada en estudios previos. Una estructura *lattice* es una disposición repetida de microestructuras tridimensionales. Por ejemplo, Au y Yu implementaron simulaciones térmicas y mecánicas para demostrar la efectividad de las estructuras *lattice* en el enfriamiento de moldes de inyección (Au & Yu, 2016). Hardley y Kevin diseñaron y probaron enfriamiento con estructuras de soporte fáciles de construir para una transferencia de calor eficiente y equilibrada (Brooks & Bridgen, 2016). Además, Wu *et al.* propusieron desviar la distribución de porosidad de las celdas de la estructura *Lattice* para obtener una estructura óptima de enfriamiento (Wu & Tovar, 2018).

La aplicabilidad de las estructuras de enfriamiento tipo *lattice* en la industria de la inyección de plástico está limitada debido a las dificultades para limpiar los atascos en el interior de la estructura de rejilla después de un breve periodo de servicio. Este problema plantea un desafío para mantener la efectividad y eficiencia del sistema de enfriamiento con el tiempo. El método propuesto implica la optimización topológica de fluidos, térmica y termo-fluida acoplada, así como análisis de sensibilidad y post procesamiento del diseño conceptual (Rannar *et al.*, 2016).

En la optimización topológica de fluidos, el problema se formula en función del acoplamiento de las ecuaciones de *Navier-Stokes* y la ecuación de convección-difusión. La distri-

bución del material se ve directamente afectada por la resistencia al flujo, la conducción de calor y la convección natural y forzada. El objetivo es optimizar el rendimiento integral de transferencia de calor de todo el dominio de diseño, considerando tanto la efectividad del enfriamiento como las características del flujo (Rannar et al., 2016).

En la optimización topológica térmica, se considera el modelo de transferencia de calor para determinar la distribución óptima de los canales de enfriamiento. Se realiza un análisis de sensibilidad utilizando el método adjunto para calcular los gradientes de la función objetivo con respecto a las variables de diseño. Esto permite que el algoritmo de optimización actualice iterativamente el diseño en función de la información de sensibilidad (Rannar et al., 2016).

En la optimización topológica termo-fluida acoplada, se consideran simultáneamente los modelos de fluidos y térmicos para lograr un diseño óptimo del sistema de enfriamiento de conformación. El flujo de fluido y la transferencia de calor están acoplados a través de la distribución del material, que se ve influenciada por la resistencia al flujo y la conducción de calor. El análisis de sensibilidad y el proceso de optimización se realizan para encontrar la distribución óptima de los canales de enfriamiento que equilibra la transferencia de calor y las características del flujo (Rannar et al., 2016).

Después del proceso de optimización, el diseño conceptual se postprocesa para convertirlo en un diseño tridimensional. El diseño se mapea en una superficie morfológica que se ajusta a la parte inyectada. La viabilidad de los diseños finales se verifica mediante simulaciones, y los diseños se pueden exportar en formatos *CAD* gráficos tridimensionales y de malla de superficie para mayor comodidad en la fabricación (Rannar et al., 2016).

El método evalúa y optimiza el rendimiento integral de transferencia de calor de todo el dominio de diseño teniendo en cuenta la resistencia al flujo, la conducción de calor y la convección natural y forzada. La distribución del material en el dominio de diseño se ve directamente afectada por estos factores, que se consideran en la formulación del problema (Rannar et al., 2016).

El modelo de flujo de fluido considera la resistencia al flujo y los efectos de convección, mientras que el modelo de transferencia de calor tiene en cuenta la conducción de calor y la convección natural y forzada. Estos modelos se acoplan para representar con precisión el comportamiento termo-fluido y optimizar el rendimiento de transferencia de calor del diseño (Rannar et al., 2016).

6.1. Definición de requisitos

Cuadro 1: Identificación de códigos

ID	Significado
PR	Programa
DS	Diseño
SM	Simulación

Fuente: elaboración propia

Cuadro 2: Identificación de códigos

Código	Descripción
PR-01	La computadora del investigador debe tener un sistema operativo <i>Windows</i> 10 u 11, 4 GB de <i>RAM</i> , 8.5 GB de almacenamiento, una resolución de pantalla mínima de 1366 x 768 y un <i>CPU</i> de tipo x-86 con procesador de 64 bits.
PR-02	En caso de ser un programa pagado, el costo del programa (por un mínimo de 2 meses de suscripción), es menor de USD 500.00 al mes.
PR03	¬
PR04	El protocolo de utilización de cada programa muestra un proceso detallado con la totalidad de los pasos requeridos para un diseño generativo u optimización topológica.
DS01	La geometría de la pieza a moldear debe asemejarse a un objeto fabricado por alguna industria de inyección plástica guatemalteca.
DS02	El área transversal del molde no debe superar los 12 cm cuadrados, y su altura no debe superar los 20 cm.
DS04	Se debe garantizar que no hay interferencias geométricas al sacar la pieza del molde.
DS05	Los canales de enfriamiento convencional en el prototipo de comparación únicamente tienen trayectorias rectas y área transversal constante.
DS06	Los canales de enfriamiento de conformación diseñados deben coincidir geométricamente con la entrada y salida de los canales de enfriamiento convencional del prototipo de comparación.
SM01	Las condiciones (material, soportes, etc.) de las simulaciones de comparación entre los moldes con canales convencionales y los moldes con canales de enfriamiento de conformación deben ser exactamente las mismas.
SM02	Se debe comparar el gradiente de temperatura, tiempo de enfriamiento, transferencia de calor y eficiencia de enfriamiento por medio de las simulaciones.

Fuente: elaboración propia

6.2. Selección de programa

Se estudió el uso de la herramienta *Fluid Path Study* del *software* Autodesk Fusion 360 y se diseñó un molde preliminar con el objetivo de aprender a utilizar dicha herramienta. El protocolo de utilización del programa se presenta en el Anexo 1 de este trabajo de graduación.

Fluid Path Study es una herramienta incluida en las capacidades de diseño generativo de Autodesk Fusion 360, y tiene el potencial para la generación de canales de conformación en moldes de inyección plástica. El programa permite lo siguiente (Autodesk, 2023):

- Empezar con un modelo *CAD* 3D, preferiblemente en formato .ipt o .step.
- Seleccionar la geometría que deseo preservar.
- Seleccionar la geometría sólida que deseo evitar.
- Seleccionar una figura inicial de la cual puede partir la generación.
- Especificar condiciones de fluido, condiciones de diseño, fuentes de flujo, aperturas al flujo, presiones del flujo.
- Especificar criterios del fluido, objetivos de diseño, el volumen objetivo como límite a la caída mínima de presión objetivo (como porcentaje).

Como resultado, se obtiene un sólido geométrico que representa el canal que el fluido debe seguir para minimizar la caída de presión dentro del volumen especificado. Este modelo puede ser exportado en formatos .step o .ipt, lo que permite examinar cada resultado generado en el mismo programa o en Autodesk Inventor y utilizarlo como base para crear un diseño editable.

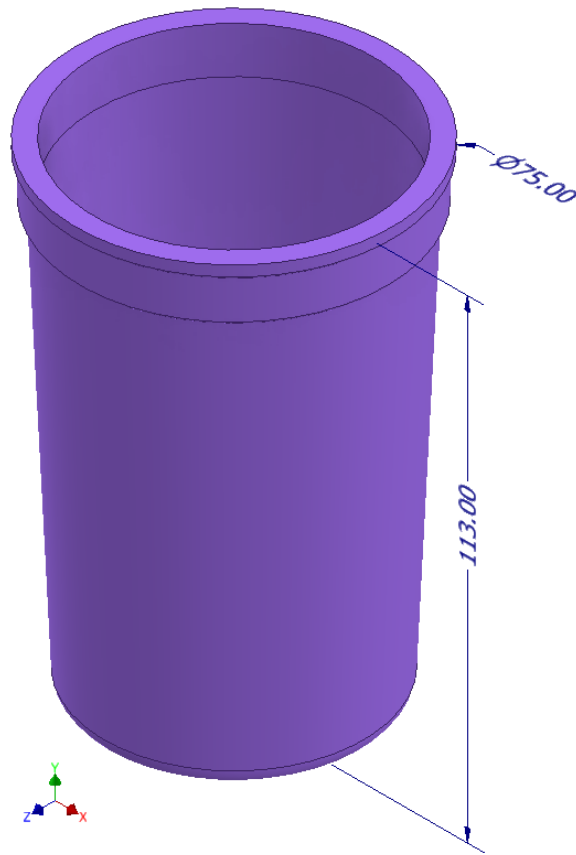
6.2.1. Diseño de pieza base y molde

Se comenzó creando una pieza plástica que serviría como base para el molde. Esta pieza, diseñada para simular un producto típico de inyección plástica, presenta un cambio de diámetro a lo largo de su sección transversal.

El objetivo principal fue diseñar un vaso plástico promocional con una capacidad aproximada de 350 mL. Este vaso se destacó por sus variaciones geométricas en la sección transversal y su facilidad de moldeo mediante un núcleo y una cavidad. El diseño se consideró relevante debido a su importancia en la industria de inyección plástica en Guatemala.

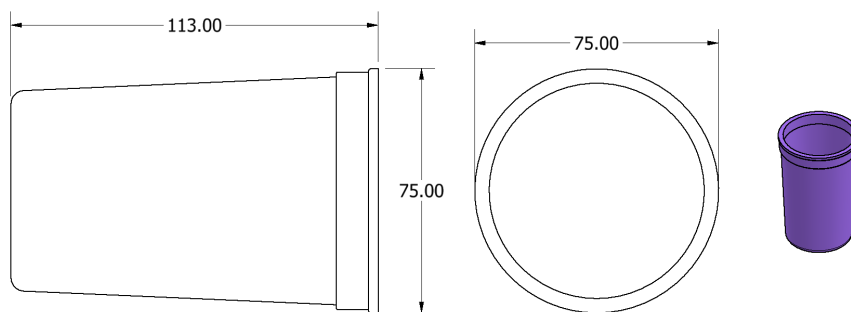
A partir de dimensiones estándar asociadas con un vaso convencional, se procedió al modelado tridimensional utilizando el *software* Autodesk Inventor.

Figura 5: Vista isométrica y dimensiones generales en mm de la pieza



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

Figura 6: Dimensiones generales del vaso en mm



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

El siguiente paso consistió en el diseño del núcleo y la cavidad para la pieza base. Se inició creando un nuevo sólido rectangular que cubría completamente la pieza base, actuando como material *stock*.

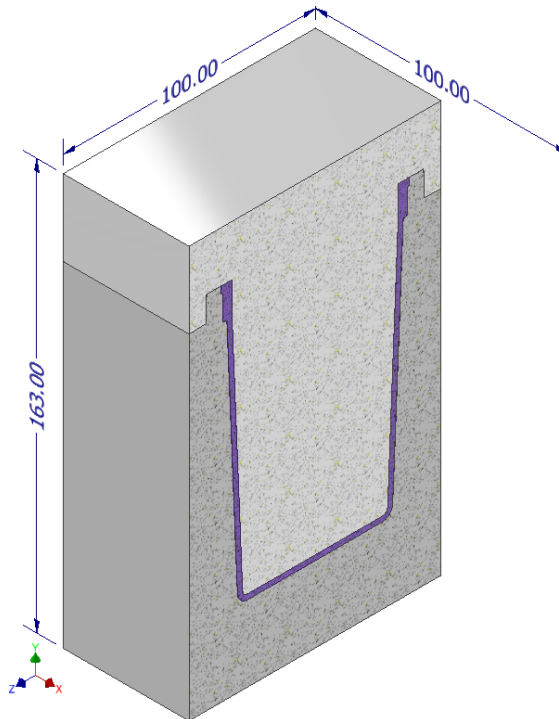
La elección del sólido rectangular se basó en el hecho de que el método de manufactura considerado en este estudio es el *DMLS*. Dado que se trata de un proceso de manufactura

aditiva, se eliminan las restricciones geométricas asociadas con la maquinación en torno, como la necesidad de que la pieza sea circular.

Utilizando superficies regladas, cortes y cosidos de superficies, se procedió a dividir este material *stock* en un núcleo y una cavidad.

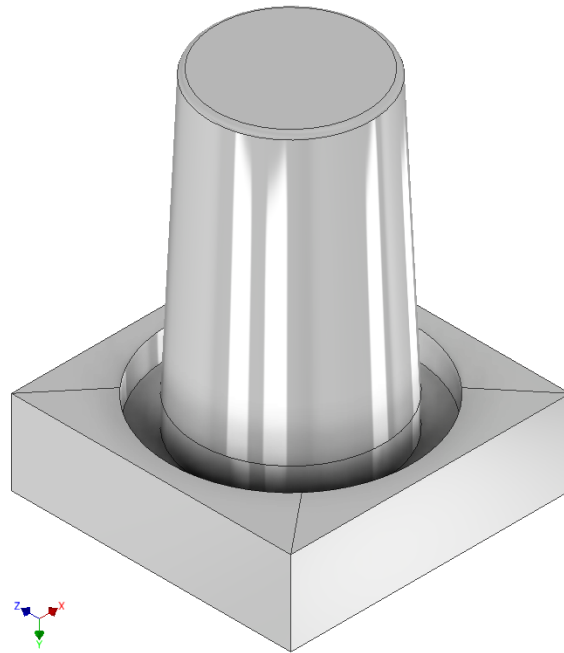
Se realizaron ajustes en la geometría de los extremos horizontales del molde para evitar el desplazamiento en el plano XZ de la cavidad respecto al núcleo. Este ajuste se diseñó para garantizar una alineación precisa entre el núcleo y la cavidad durante el proceso de moldeo.

Figura 7: Vista isométrica cortada en el plano XY del molde de la pieza



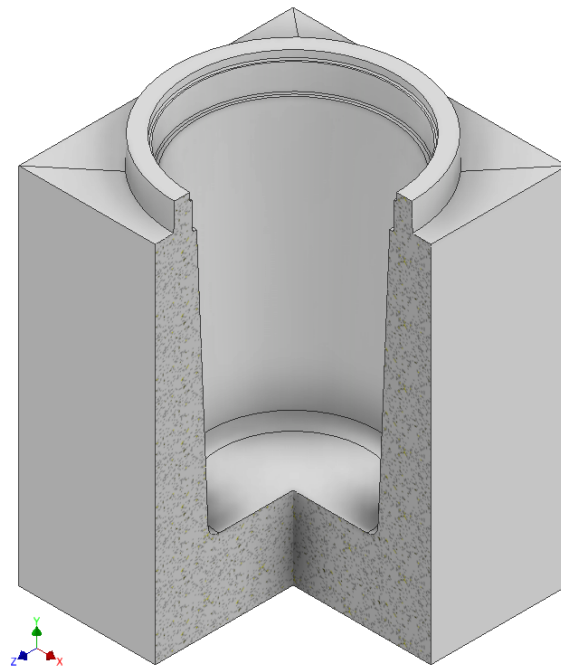
Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

Figura 8: Vista isométrica del núcleo de la pieza



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

Figura 9: Vista isométrica seccionada en 3/4 de la cavidad de la pieza



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

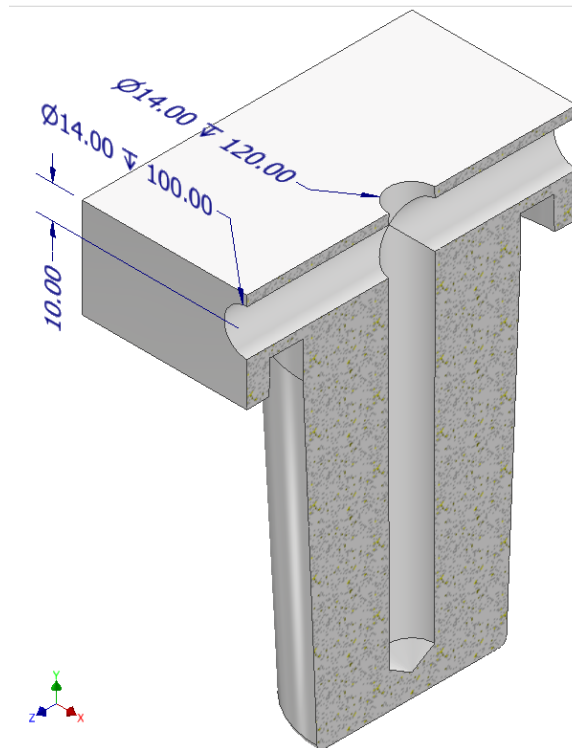
6.3. Diseño de los canales de enfriamiento

6.3.1. Diseño de los canales de enfriamiento tradicionales

En la tercera fase del proceso, se diseñaron los canales de enfriamiento convencionales para el núcleo de la pieza 2 utilizando operaciones 3D en Autodesk Inventor. Estos canales fueron diseñados exclusivamente con trayectorias rectas, dado que su método de manufactura suele implicar taladrado.

Se realizaron dos operaciones de taladrado: una en el centro geométrico de la cara XZ del núcleo y otra perpendicular a la primera, ubicada en el centro del eje X y a una distancia de 10 mm del borde superior de la cara XY del núcleo. Se eligió un diámetro de 14 mm para los canales de enfriamiento, en línea con la recomendación estándar de un diámetro entre 10 y 14 mm (PAInternational, 2018).

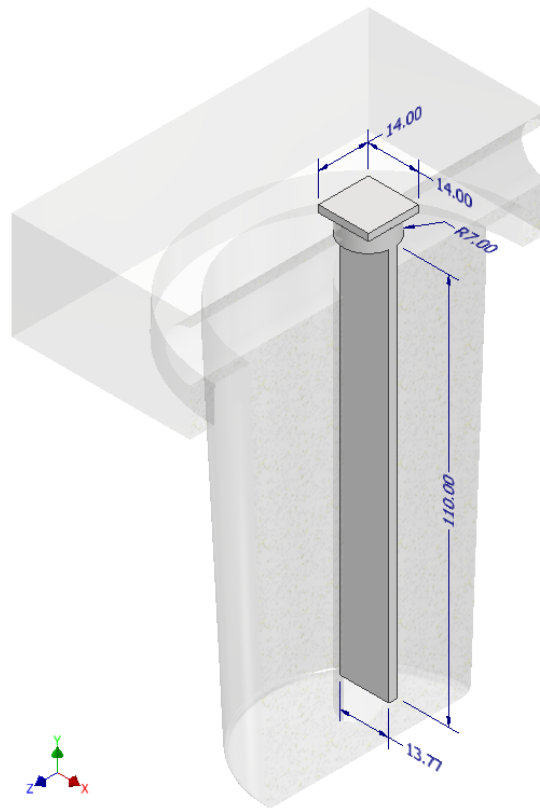
Figura 10: Canales de enfriamiento tradicionales: vista isométrica seccionada YZ del núcleo de la pieza 2



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

Para asegurar que el flujo de refrigerante llegue a la parte más profunda del núcleo, es crucial incorporar un deflector. Este deflector no solo dirige el flujo de manera efectiva, sino que también cubre el agujero alineado en el eje Y. En la primera iteración del diseño, se opta por un deflector rectangular.

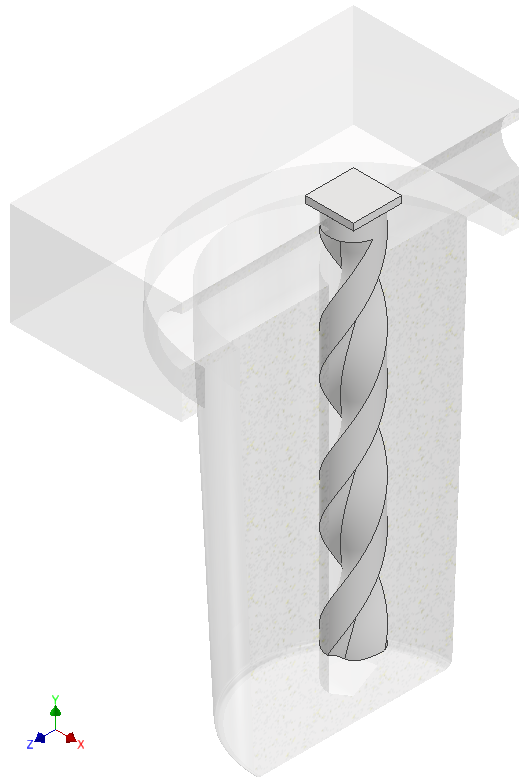
Figura 11: Deflector rectangular: vista isométrica seccionada YZ del núcleo de la pieza 2



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

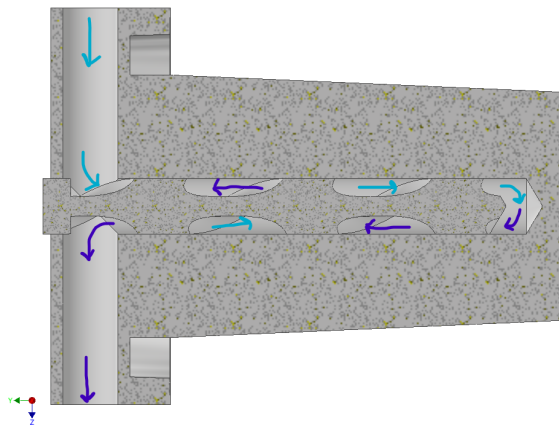
El deflector rectangular presenta una desventaja considerable, ya que puede provocar diferencias en el efecto de enfriamiento y en la distribución de la temperatura entre los lados opuestos del núcleo. Esto puede afectar la uniformidad del enfriamiento, comprometiendo la calidad de la pieza final (Upmold, 2017). Para mejorar este aspecto en la segunda iteración, se decidió modificar el deflector rectangular, cambiándolo a un perfil de doble hélice. Este perfil es óptimo para lograr una distribución más uniforme de la temperatura en diámetros que oscilan entre 12 y 50 mm (Upmold, 2017). Este perfil específico forzará al flujo de refrigerante a moverse de manera rotacional, promoviendo la formación de un flujo turbulento que ayuda a lograr una distribución más homogénea de la temperatura.

Figura 12: Deflector de doble hélice: vista isométrica seccionada YZ del núcleo de la pieza 2



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

Figura 13: Representación de la entrada y salida de refrigerante a través del deflector de doble hélice en el núcleo de la pieza 2: vista lateral seccionada en YZ



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

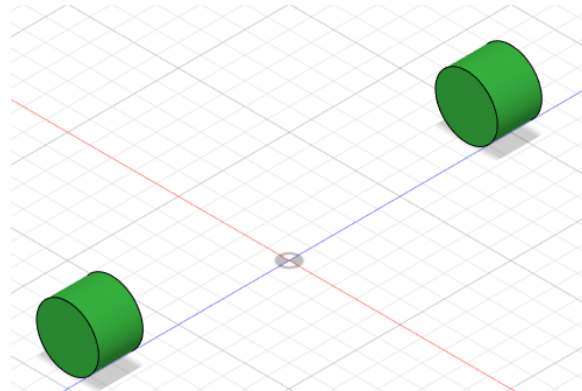
6.3.2. Diseño de los canales de enfriamiento de conformación generados

El siguiente paso consistió en iniciar el proceso de diseño de los canales de enfriamiento de conformación utilizando el *software* Autodesk Fusion 360. Esta herramienta de generación de fluidos permite configurar un estudio y generar una trayectoria de flujo optimizada en términos de caída de presión, basándose en los requisitos geométricos y de rendimiento previamente establecidos. La ruta del fluido representa el trayecto que sigue el fluido mientras circula por el sólido.

Los requisitos se ingresaron al *software* como parámetros que definían la geometría del fluido a conservar, los obstáculos sólidos a evitar, la forma inicial del fluido, los objetivos del estudio y las condiciones del fluido. El proceso se llevó a cabo de forma iterativa, con un enfoque en la variación del obstáculo sólido que el fluido debía sortear. En total, se realizaron 14 iteraciones.

A lo largo de todas las iteraciones, la geometría del fluido a conservar se mantuvo constante. Esta consistía en una tapa cilíndrica tanto en la entrada como en la salida, ambas con un diámetro de 14 mm y una profundidad de 10 mm.

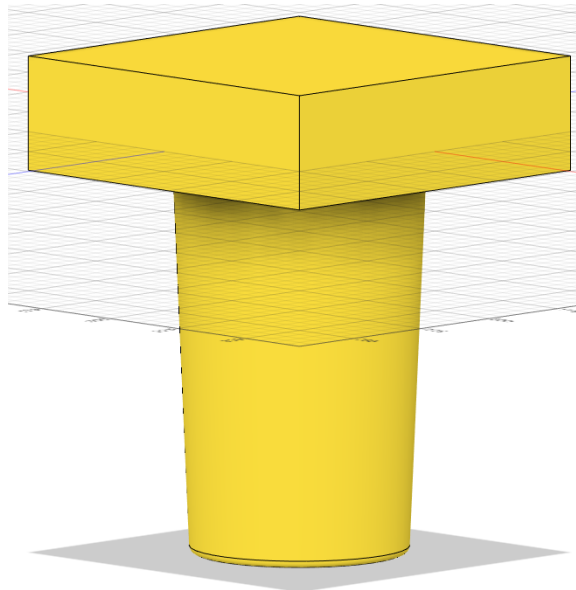
Figura 14: Geometría del fluido a preservar



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

La forma geométrica inicial del fluido corresponde a todo el núcleo del molde de inyección del vaso diseñado. Esta geometría se mantuvo constante durante todas las iteraciones del proceso de diseño de los canales de enfriamiento de conformación.

Figura 15: Geometría del fluido a preservar



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

El flujo turbulento (Reynolds mayor a 3,000) es fundamental para un enfriamiento eficiente, ya que, a diferencia del flujo laminar (Reynolds menor a 2,000), que transfiere calor solo por conducción, el flujo turbulento lo hace tanto por conducción como por convección, aumentando significativamente la eficiencia del proceso.

Se considera que el límite crítico para la turbulencia se alcanza con un número de Reynolds que no supere los 10,000. Una vez que se alcanza este nivel de turbulencia, el aumento en la transferencia de calor disminuye a medida que el flujo del refrigerante se incrementa, por lo que no es necesario gastar más energía para superarlo. En otras palabras, cualquier pequeña mejora en la transferencia de calor se verá contrarrestada por una mayor caída de presión a lo largo de los canales de enfriamiento, junto con un aumento en los costos de bombeo. (Autodesk, 2023).

La siguiente es la ecuación simplificada es utilizada para determinar el número de Reynolds (R) en un sistema de agua:

$$R = \frac{7740 \cdot V \cdot D}{n}$$

o

$$R = \frac{3160 \cdot Q}{D \cdot n}$$

El cálculo toma en cuenta la velocidad del fluido (V) en pies por segundo, multiplicada por el diámetro del canal de enfriamiento (D) en pulgadas, y luego por una constante de 7,740. El resultado se divide entre la viscosidad del agua (n) en centistokes. Esta puede simplificarse para utilizar el flujo de agua (Q) en galones por minuto (Rosato & Rosato, 2012).

De acuerdo con la investigación realizada, se requiere un flujo de 2.35 GPM para alcanzar un número de Reynolds en el rango adecuado (3,000 a 10,000) en un diámetro dentro del rango de 9 a 14 mm (Autodesk, 2023).

Para validar este valor, se emplea el siguiente cálculo:

$$R = \frac{3160 \cdot 2.35(GPM)}{0.5512(in) \cdot 1.55(cSt)} = 8692$$

En donde se utiliza el diámetro utilizado de 14 mm (0.5512 in) y 1.55 cSt como la viscosidad del agua, este valor fue interpolado linealmente para una temperatura de 4.85 C.

Efectivamente, el flujo de 2.35 GPM es suficiente para estar dentro del rango aceptable de número de Reynolds, por lo tanto, se estableció este valor como una fuente de flujo válida para la primera iteración en las condiciones del fluido.

En la geometría de salida del flujo, se configuró un flujo de 0 GPM, un ajuste predeterminado del *software*. Esto indica que al inicio de la simulación no hay flujo en el área de salida, sino únicamente en la entrada. Además, en las primeras iteraciones se establece que el volumen objetivo del diseño final debe corresponder al 25 % del volumen de la geometría del fluido que se debe conservar.

Finalmente, el objetivo del estudio en todas las iteraciones es minimizar la caída de presión, este es un valor predeterminado del *software*. Una caída de presión optimizada generalmente conduce a diseños más eficientes en términos energéticos y con un mejor rendimiento. Es fundamental que la presión dentro de las líneas de enfriamiento se mantenga lo más uniforme posible, la literatura del programa recomienda una máxima caída de presión de 5 psi a lo largo del molde. Una presión uniforme permite que el refrigerante fluya de manera turbulenta, lo cual es crucial para un enfriamiento eficiente. Si la presión cae fuera de este rango, el número de Reynolds podría disminuir por debajo del nivel deseado, lo que podría generar puntos calientes y comprometer el balance térmico (Autodesk, 2023).

A continuación, se describen las dos primeras versiones de los canales de enfriamiento de conformación, en las que se mantienen los parámetros mencionados, pero se introduce una variación en el obstáculo sólido. Para cada versión, la herramienta genera un promedio de 17 iteraciones, hasta encontrar el diseño óptimo de acuerdo con los objetivos y parámetros establecidos.

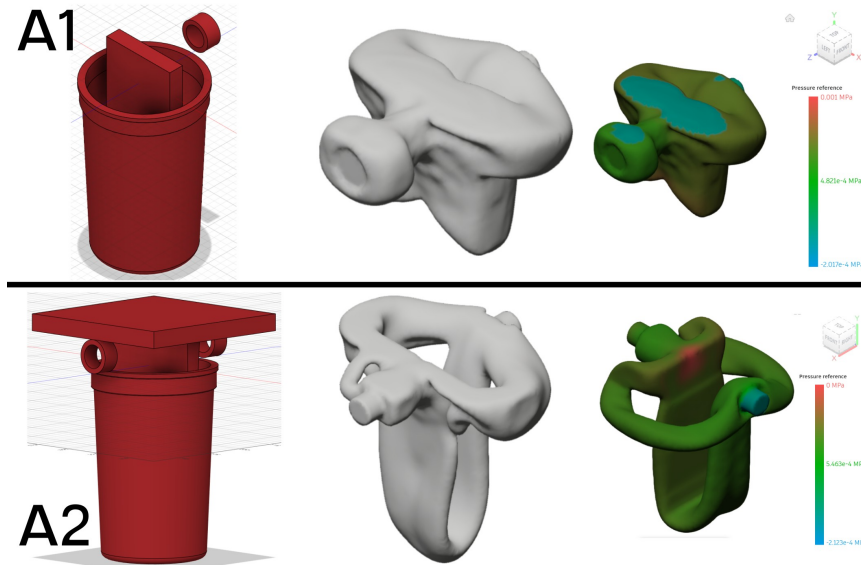
En la versión A1, el obstáculo sólido está constituido por la geometría del vaso, que es la pieza a producir, asegurándose de que el canal de enfriamiento no entre en contacto con ella. Además, se incorpora un anillo exterior para restringir la entrada del flujo, con dimensiones de 20 mm de diámetro externo, 14 mm de diámetro interno y 10 mm de profundidad. Finalmente, se emplea un divisor en forma de prisma rectangular para desviar el flujo hacia la base del vaso, evitando que el *software* genere únicamente un canal recto de extremo a extremo.

Como se muestra en la figura siguiente, la generación ocurre alrededor de la entrada del flujo, sin descender lo suficiente y sobresaliendo en la parte superior. Por esta razón, en la versión A2 se agregó un segundo anillo exterior, se incorporaron chaffanes en la parte inferior

del divisor y se añadió un límite superior en forma de prisma rectangular.

Los resultados de las distintas versiones incluyen un análisis de la presión en todos los puntos del diseño generado, el cual confirma que el diferencial de presión no supera los 5 psi (0.035 MPa).

Figura 16: Iteraciones A1 y A2



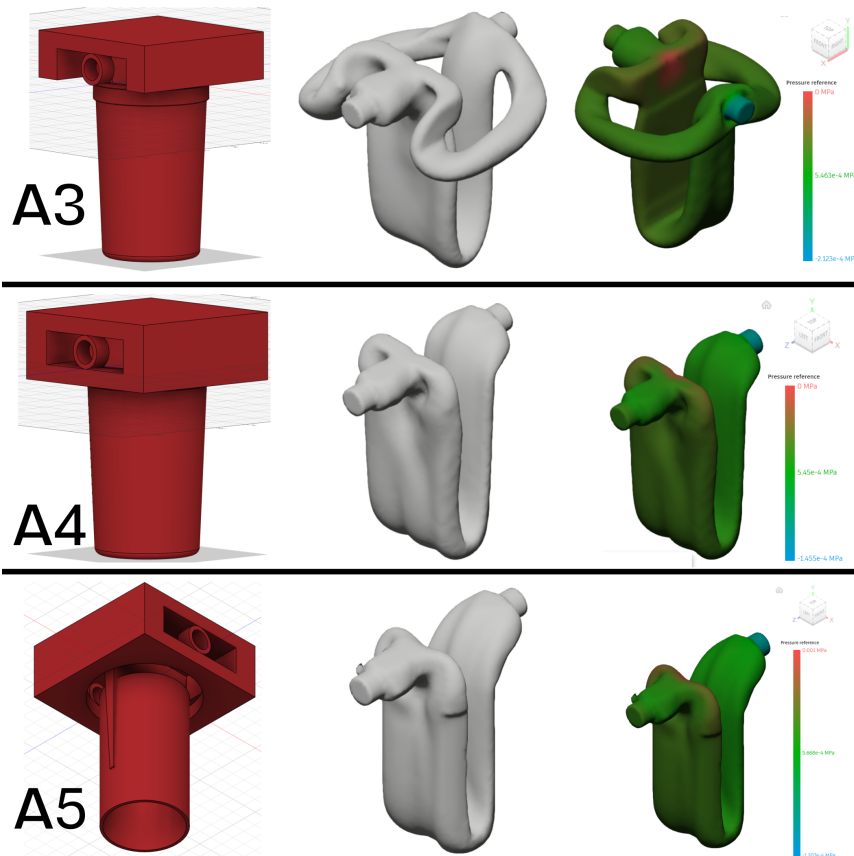
Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

Para las siguientes tres versiones, se requirió modificar la geometría del obstáculo sólido de la siguiente manera:

En la versión A3, con el objetivo de redirigir el flujo hacia abajo, se agregaron pestañas laterales al tope rectangular. Sin embargo, al observar que esto no producía el resultado deseado, se completó el obstáculo con un tope inferior en la versión A4, impidiendo por completo que el flujo recorriera los lados del molde.

Posteriormente, para reducir el ancho del canal, se modificó la geometría del vaso convirtiéndolo en un cilindro con el diámetro exterior de su base. Esta modificación permitió el estrechamiento del canal, como se observa en la versión A5, manteniendo su caída de presión dentro del rango aceptable.

Figura 17: Iteraciones A3 - A5

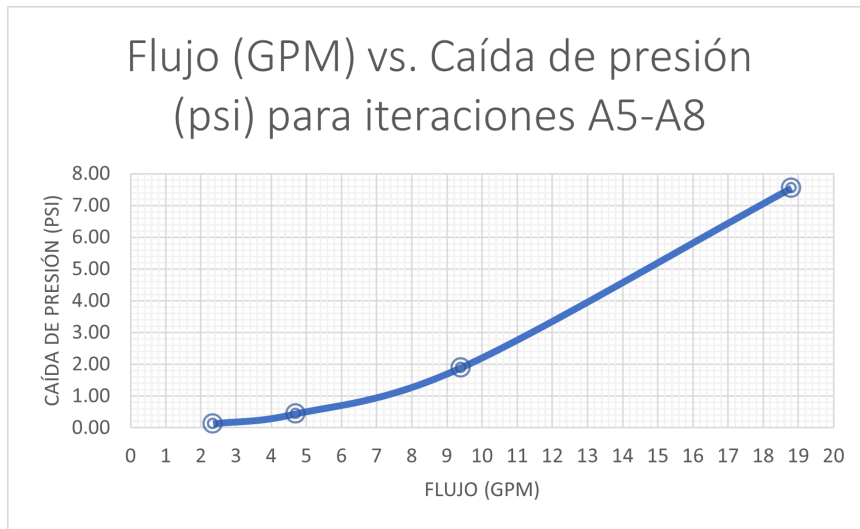


Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

En el siguiente conjunto de versiones (A6 - A8), se optó por cambiar la variable en los parámetros de entrada. Esta vez, se mantuvo constante la geometría del obstáculo sólido y se varió el valor de la fuente de flujo, duplicando su magnitud en cada iteración. Los valores probados para A6, A7 y A8 fueron 4.7 GPM, 9.4 GPM y 18.8 GPM, respectivamente.

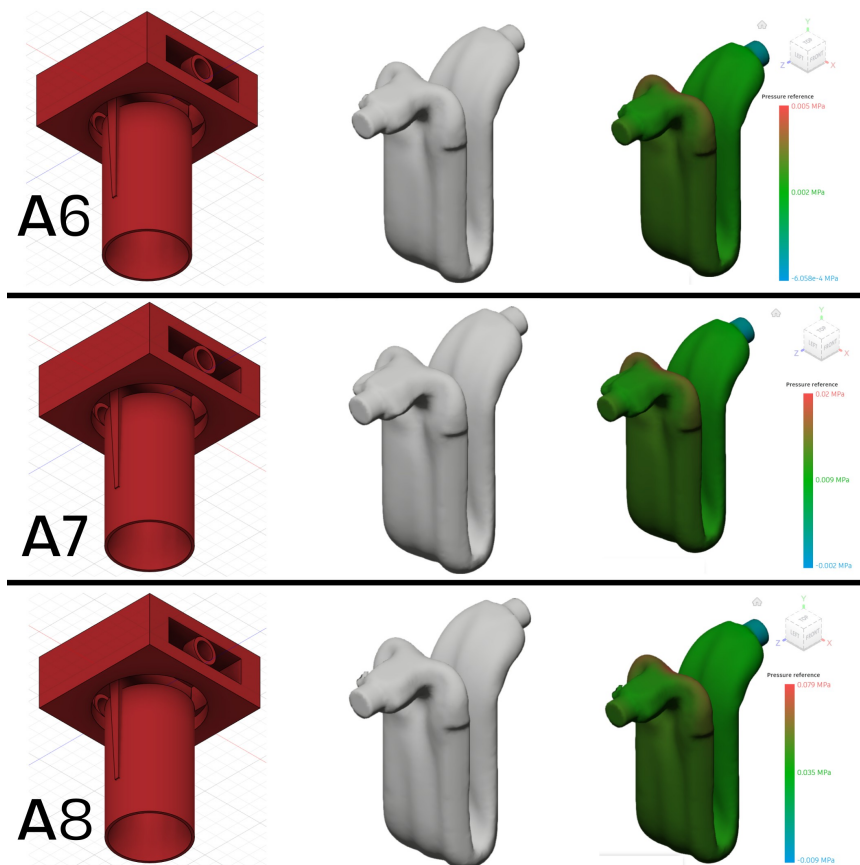
Como consecuencia de estas variaciones, la geometría generada no experimentó un cambio visual significativo; sin embargo, la caída de presión aumentó con cada versión. En particular, la versión A8 alcanzó una caída de presión equivalente a 7.5 psi, excediendo el límite recomendado.

Figura 18



Fuente: elaboración propia.

Figura 19: Iteraciones A6 - A8



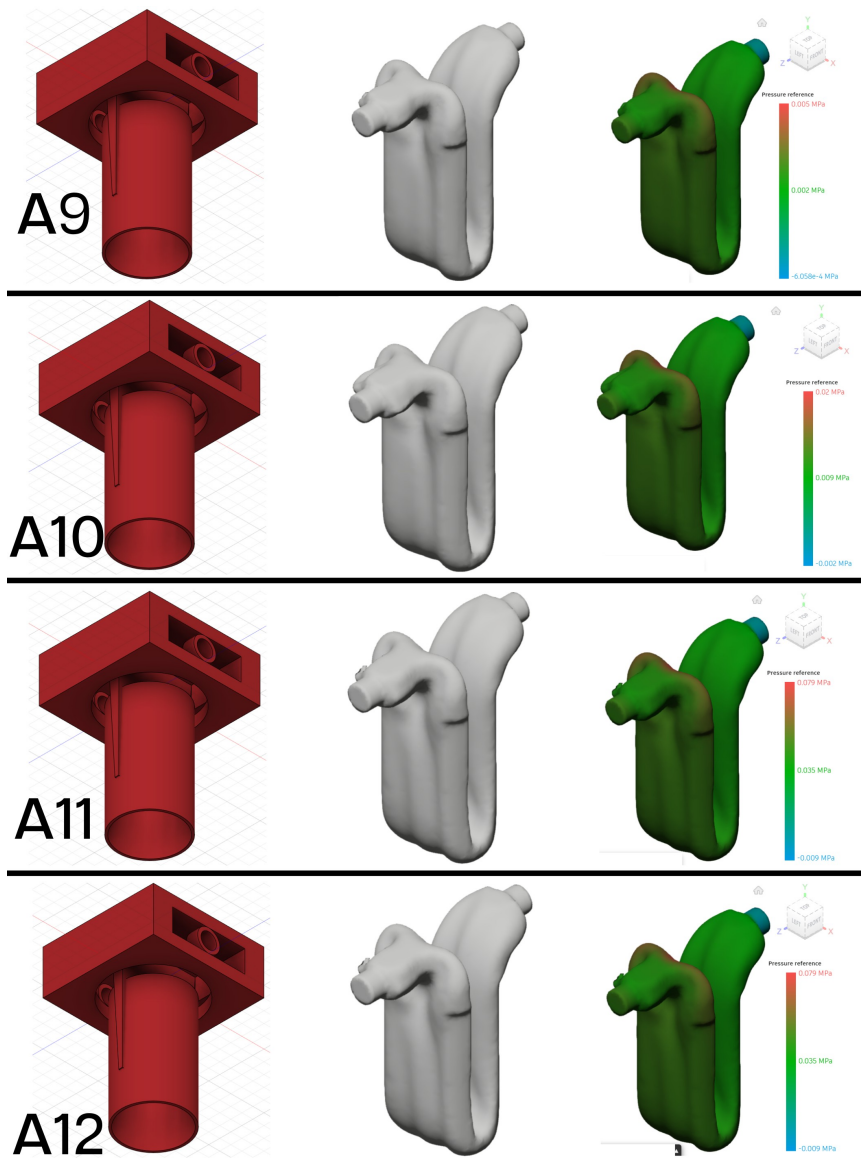
Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

Dada la insatisfacción con la variable anterior, se decidió regresar a un valor de fuente de flujo de 2.35 GPM y variar el volumen objetivo del estudio. En la versión A9, este volumen objetivo se duplicó con el objetivo de experimentar con el resultado, pasando a representar el 50 % del volumen de diseño.

En la versión A10, el volumen objetivo se redujo a la mitad del objetivo original, representando el 12.5 % del volumen de diseño. Posteriormente, en la versión A11, este volumen objetivo se redujo aún más, representando únicamente el 6.25 % del volumen de diseño.

Manteniendo exactamente los mismos parámetros de entrada, se duplicó el estudio de la versión A11 en la versión A12, con el objetivo de realizar un experimento con el programa. Los resultados obtenidos fueron geoméricamente similares, con una variación en el volumen de la pieza final de únicamente 4.4 mm^3 y una diferencia en su caída de presión de 0.15 psi. Este resultado demuestra que el programa no proporciona dos resultados idénticos; cada geometría generada es única.

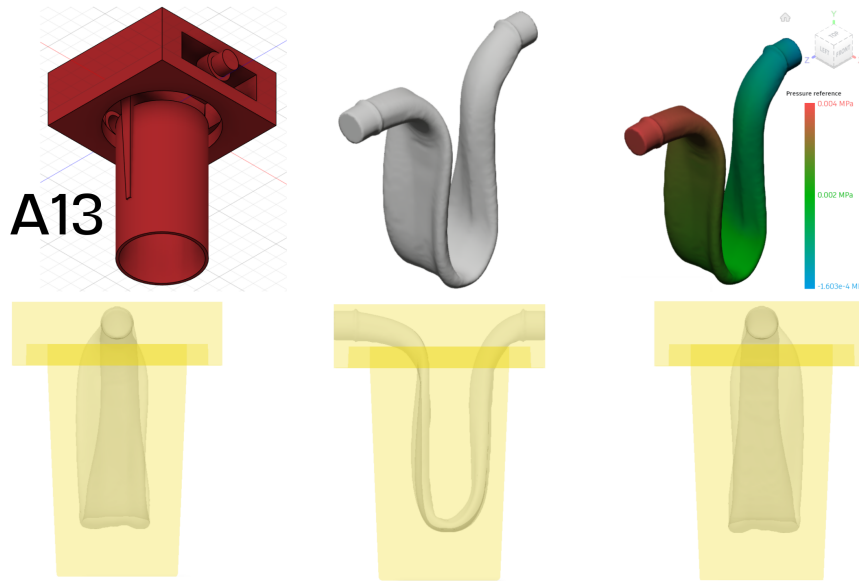
Figura 20: Iteraciones A9 - A12



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

Finalmente, para completar el diseño del canal de enfriamiento de conformación, se agregaron tapas de entrada y salida a la geometría del obstáculo sólido. Esto condujo a la versión final (A13) del canal de enfriamiento generado. Con esta última iteración, se logró obtener un diseño de canal que cumple con la caída de presión óptima requerida y que no excede los límites geométricos establecidos.

Figura 21: Iteración A13: versión final del canal



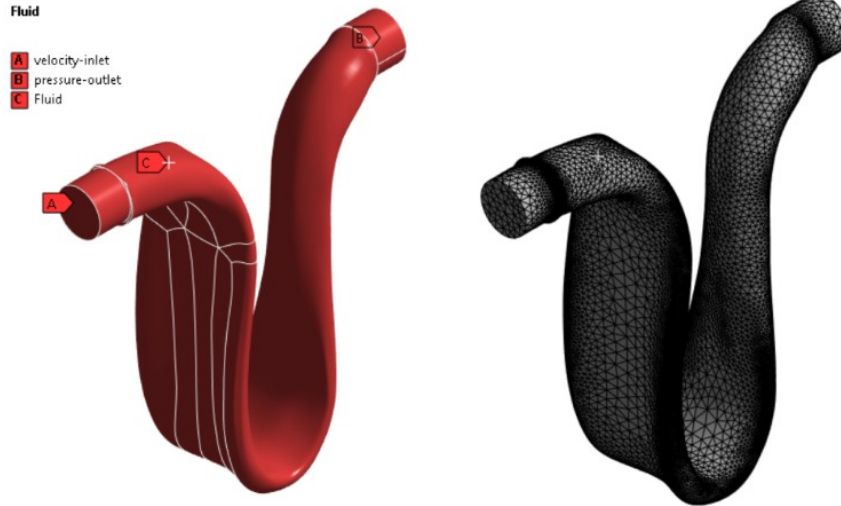
Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

6.3.3. Simulación en ANSYS del canal de enfriamiento de conformación generado

ANSYS Fluent es una herramienta de dinámica de fluidos computacional (*CFD*) que permite simular con precisión el comportamiento de los fluidos. Esta herramienta es ampliamente utilizada para analizar el flujo de fluidos, la transferencia de calor y los procesos relacionados en una variedad de aplicaciones industriales y científicas (Autodesk, 2023). En este caso, el modelo físico del canal de enfriamiento de conformación generado en Autodesk Fusion 360 se importó al *design modeler* de ANSYS en formato *.step* para su análisis en el módulo *fluid flow fluent*. Se asignó al modelo el estado de fluido, ya que el *software* debe interpretar el sólido como el trayecto del fluido, no como el material del molde.

Como siguiente paso, se crearon y nombraron las secciones del modelo que actuarán como la entrada de velocidad, la salida de presión y el cuerpo del fluido. En la figura siguiente, se puede observar la cara circular correspondiente a la entrada y la salida. Una vez configuradas estas secciones, se generó un mallado básico. Al revisar la calidad del mallado utilizando el parámetro de skewness, se encontró que el valor promedio era de 0.24, un valor aceptable al ser menor de 0.90. Por lo tanto, no fue necesario aplicar métodos adicionales ni realizar ajustes en el mallado.

Figura 22: Asignación de secciones y mallado: canal de enfriamiento de conformación generado



Fuente: imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Para configurar la simulación, se inicia el *software Fluent* y se realiza un chequeo automático del mallado para verificar que *Fluent* pueda identificar todos sus elementos. Se habilita la opción de energía para permitir el cálculo de la transferencia de calor. Se eligió el modelo viscoso *k-Epsilon* de 2 ecuaciones porque el interés del estudio está en el régimen de flujo turbulento. Este modelo resolverá dos ecuaciones adicionales: una para la energía cinética turbulenta y otra para su disipación, las cuales son nulas en flujos puramente laminares. Se selecciona un tratamiento de pared adecuado para problemas generales de fluidos en una sola fase.

Dado que se utiliza agua como refrigerante para el canal de enfriamiento estudiado, es necesario crear un material con las propiedades especificadas en el siguiente cuadro y asignarlo al fluido.

Cuadro 3: Propiedades del agua

Propiedades Mecánicas	Valor
Densidad	1000 kg/m ³
Calor específico	4216 J/kg-K
Conductividad térmica	0.667 w/m-K
Viscosidad	0.0008 kg/m-s

Fuente: elaboración propia

El siguiente paso en el proceso es definir las condiciones de frontera para las siguientes áreas del modelo: entrada de velocidad, salida de presión y pared del flujo (ver figura 28).

Para calcular la magnitud de la velocidad en la sección de entrada (área A), se utiliza la ecuación de continuidad, que establece que el flujo de entrada es igual al flujo de salida. Dado que se conoce el flujo volumétrico en la entrada, el cual es igual al flujo volumétrico en la salida, y se conoce el diámetro inicial del canal, podemos calcular la velocidad del flujo

en la entrada.

Fuente de flujo (Q):

$$Q = 2.35 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \times \frac{0.133681 \text{ft}^3}{1 \text{gal}} \times \frac{1 \text{min}}{60 \text{s}} = 5.2358 \times 10^{-3} \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}$$

Diámetro inicial del canal (D):

$$D = 0.551181 \text{in} \times \frac{1 \text{ft}}{12 \text{in}} = 0.04593175 \text{ft} \text{ (14mm)}$$

Velocidad (v):

$$Q = vA$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{5.2358 \times 10^{-3} \text{ft}^3/\text{s}}{\frac{\pi(0.04593175 \text{ft})^2}{2}} = 3.1599 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

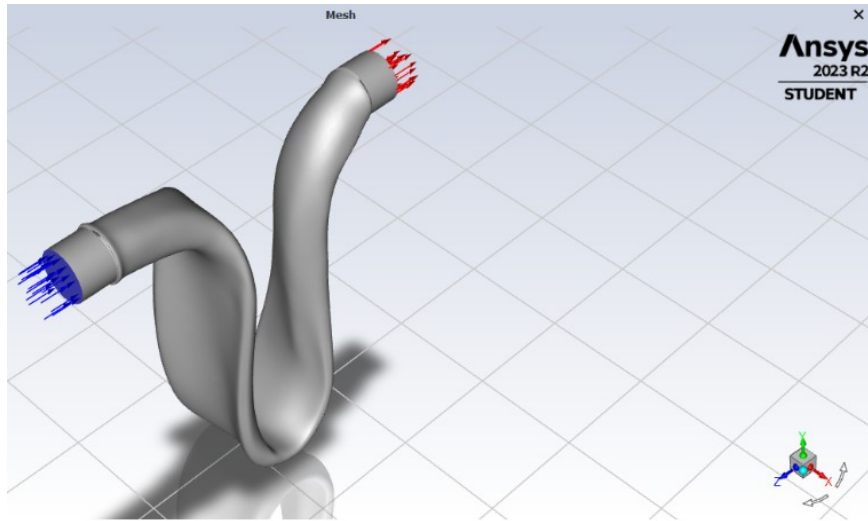
$$\left(0.9632 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$$

La intensidad turbulenta requerida por el programa se mantiene en el valor predeterminado del 5 %, que es el estándar para los fluidos en *Fluent*. El diámetro hidráulico se calcula de la siguiente manera:

$$D_h = \frac{4A}{P_w} = \frac{4\pi \left(\frac{0.04593 \text{ft}}{2}\right)^2}{2\pi \left(\frac{0.04593 \text{ft}}{2}\right)} = 0.04593 \text{ft}$$

Se define A como el área transversal y Pw como el perímetro mojado. Además, se establece la temperatura del fluido en la entrada como 278 K (4.85 °C). El proceso se repite para la salida de presión, especificando que el método de referencia para la presión es absoluto y que la presión manométrica es de 0 Pa.

Figura 23: Condiciones frontera: canal de enfriamiento de conformación generado

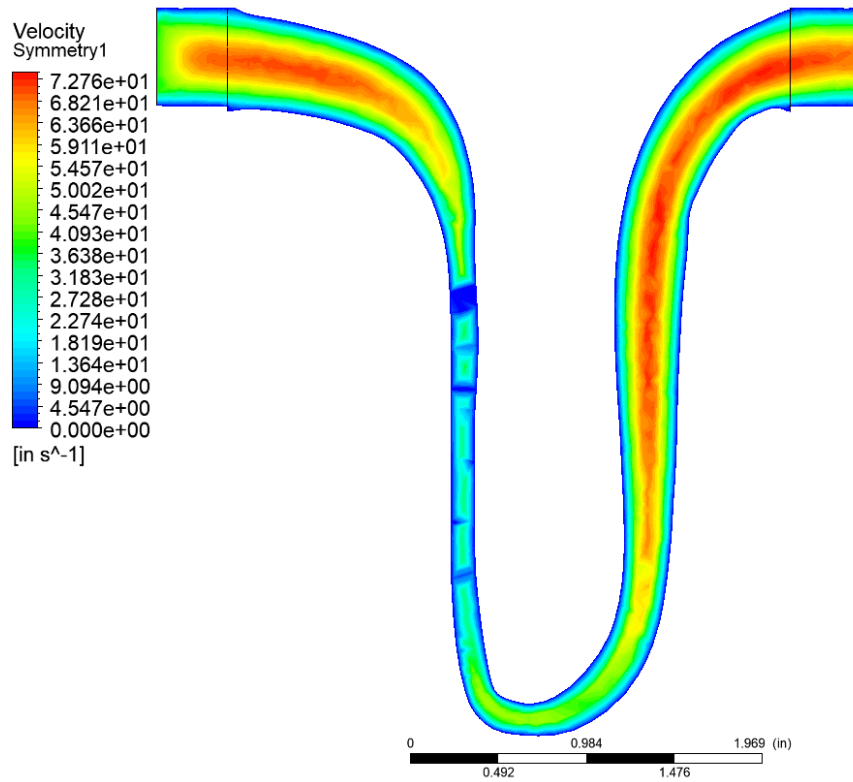


Fuente: imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Para configurar la solución, se empleó el método con esquema simple utilizando un gradiente *Green Gauss Node Based*, recomendado por ANSYS para un mallado tetraédrico. Se inició el cálculo indicando que se realizaran 300 iteraciones.

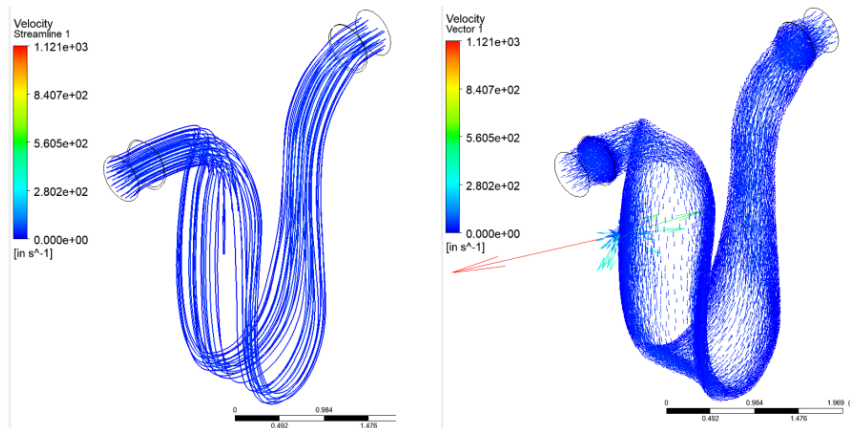
La simulación calculó la siguiente solución:

Figura 24: Contorno de velocidad: canal de enfriamiento de conformación generado



Fuente: imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

Figura 25: Contorno de velocidad en 3D: canal de enfriamiento de conformación generado



Fuente: imagen utilizada por cortesía de ANSYS, Inc.

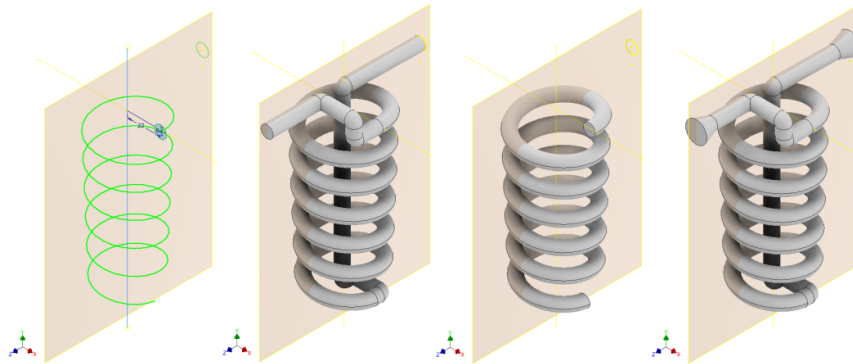
Las figuras anteriores muestran el perfil de velocidad en todos los puntos de la sección transversal del canal de enfriamiento. Esta representación gráfica facilita la visualización de la variación de la velocidad del refrigerante en diferentes partes del canal, permitiendo identificar áreas con velocidades bajas donde podría ocurrir un estancamiento. Además, se verifica la continuidad del canal de enfriamiento y la capacidad del refrigerante para fluir sin obstrucciones a lo largo de él. Estos hallazgos indican que el canal está listo para ser simulado y comparado con otros canales de enfriamiento.

6.3.4. Diseño de los canales de enfriamiento de conformación tradicional

Antes de comparar los canales de enfriamiento de conformación generados con los canales de enfriamiento convencionales, se diseñó un tercer canal en forma de espiral cónica con el fin de contextualizar la potencial mejora que pueden ofrecer los canales obtenidos por procesos generativos en comparación con canales obtenidos por procesos *CAD* convencionales.

Utilizando el programa Autodesk Inventor, se creó el canal a partir de las mismas ubicaciones geométricas en el molde de entrada y salida. Se empleó la herramienta de bobina para configurar la forma de un resorte helicoidal con un diámetro de 8 mm, 6 revoluciones, una altura de 99 mm, un ángulo de inclinación de -2 grados y una rotación antihoraria. Esta bobina se muestra en el primer paso de la imagen siguiente. Se diseñó para acercarse lo más posible a la orilla del núcleo, tanto radial como longitudinalmente, a una distancia similar (de 6 a 7 mm) a la del canal de enfriamiento convencional. Posteriormente, utilizando bosquejos en 3D y la herramienta de barrido, se conectaron los extremos de la bobina a la entrada y salida geométrica del canal. Finalmente, se ajustaron los diámetros de entrada y salida del canal (14 mm) al diámetro de la bobina (8 mm) mediante la herramienta de barrido.

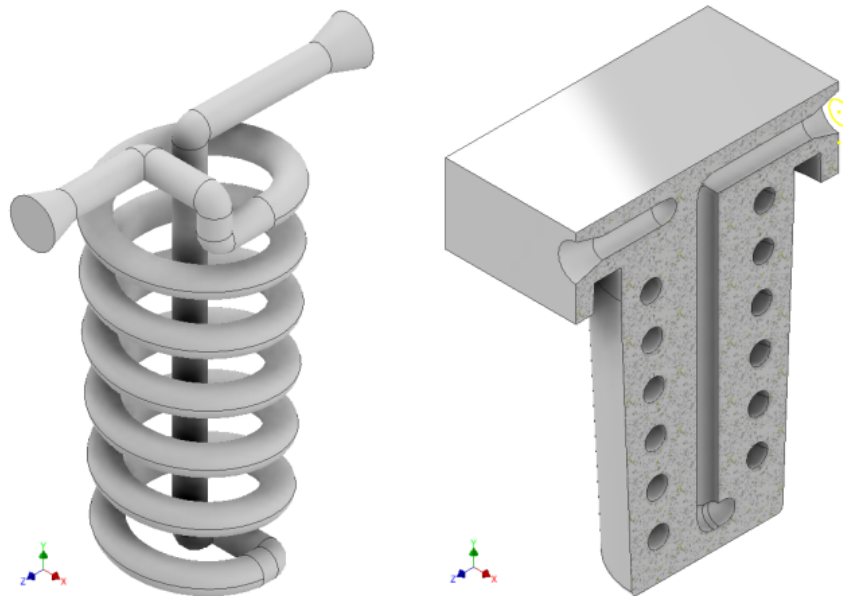
Figura 26: Proceso de diseño del canal de enfriamiento de conformación convencional



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

En la siguiente figura se presenta el canal de enfriamiento de conformación convencional, junto con una vista en sección del núcleo en el plano YZ, donde se muestra la geometría del canal vaciada.

Figura 27: Canal de enfriamiento de conformación convencional, núcleo del molde con geometría del canal vaciada



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

6.4. Preparación para las simulaciones comparativas de enfriamiento con los diversos canales

Moldex 3D es un *software* especializado en la simulación del proceso de moldeo por inyección de piezas plásticas. Su funcionalidad principal es crear un modelo virtual que represente cómo el plástico fundido fluirá y solidificará dentro del molde. Sin embargo, en este proyecto, el enfoque se centra en la capacidad del programa para simular el proceso de enfriamiento del molde.

Moldex 3D utiliza un método de análisis de elementos finitos para modelar con precisión la transferencia de calor dentro del molde. El objetivo de las simulaciones es comparar diferentes configuraciones de enfriamiento: canales de enfriamiento convencionales, canales de enfriamiento de conformación convencionales y canales de enfriamiento de conformación generados. Se busca obtener resultados detallados que permitan evaluar la eficacia y eficiencia de cada configuración en términos de enfriamiento del molde.

La temperatura promedio de enfriamiento en la parte. Esta es la distribución 3D de temperatura a lo largo del tiempo. Esta visualización es útil para analizar la acumulación de calor en la pieza, evaluar el desempeño del enfriamiento y identificar los puntos de temperatura mínima y máxima en la superficie.

El tiempo para alcanzar la temperatura de eyección. Este es el tiempo estimado desde el final del ciclo de empaquetamiento hasta que la temperatura de la superficie de la cavidad esté lo suficientemente baja como para permitir la eyección. Es útil como indicador para identificar posibles puntos calientes en la pieza.

Flujo de calor por unidad de área de la superficie de la parte. Esta es la tasa de disipación de calor por unidad de área. Es importante destacar que una mayor tasa de flujo de calor por unidad de área indica una mejor eficiencia de enfriamiento.

Eficiencia de enfriamiento del canal. Esta representa el porcentaje de calor retirado por el canal de enfriamiento. Se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Eficiencia de enfriamiento} = \left(\frac{Q_i}{Q_a + Q_{ma}} \right) \times 100$$

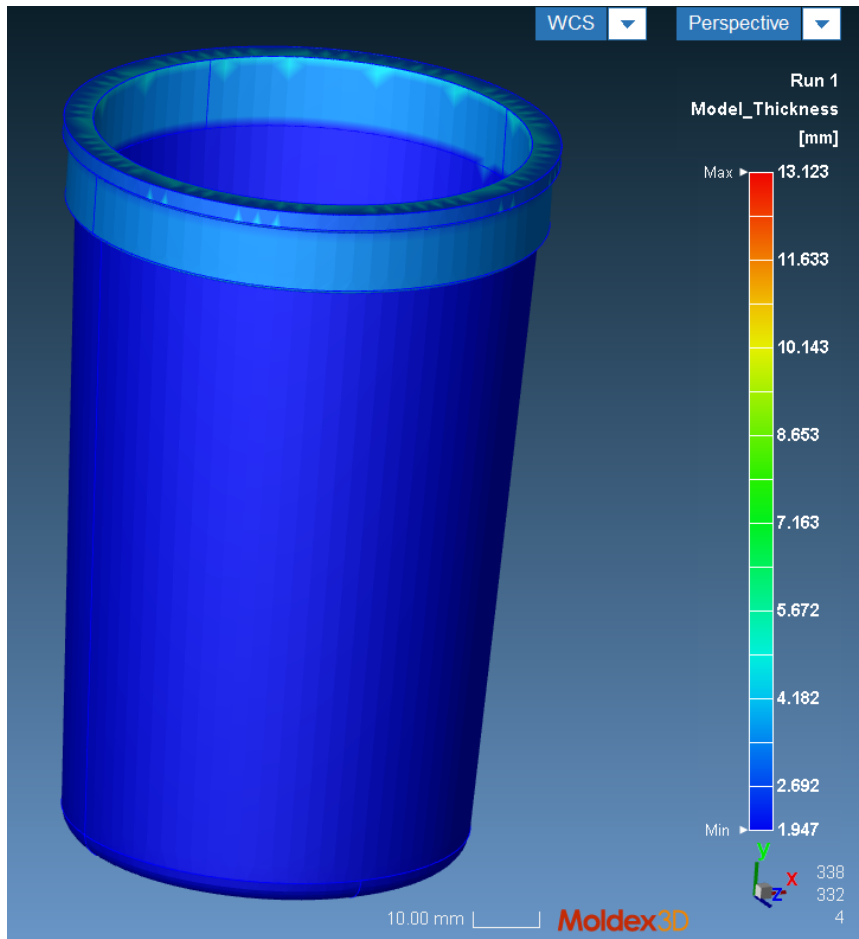
En donde:

- Q_i = Flujo de calor total hacia la superficie del canal de enfriamiento.
- Q_a = Calor total absorbido a través de la superficie del canal de enfriamiento.
- Q_{ma} = Calor total absorbido a través de la superficie del molde vía el entorno.

La eficiencia de enfriamiento deseada en un canal de enfriamiento es superior al 85 %.

Para preparar la simulación, es necesario importar la geometría del vaso a ser moldeado en formato .step y asignarle el atributo de "modelo", lo que indica que representa la pieza a ser moldeada. A continuación, el programa detecta automáticamente el grosor de la pieza en todos sus puntos, asegurándose de que en ningún punto el valor sea cero.

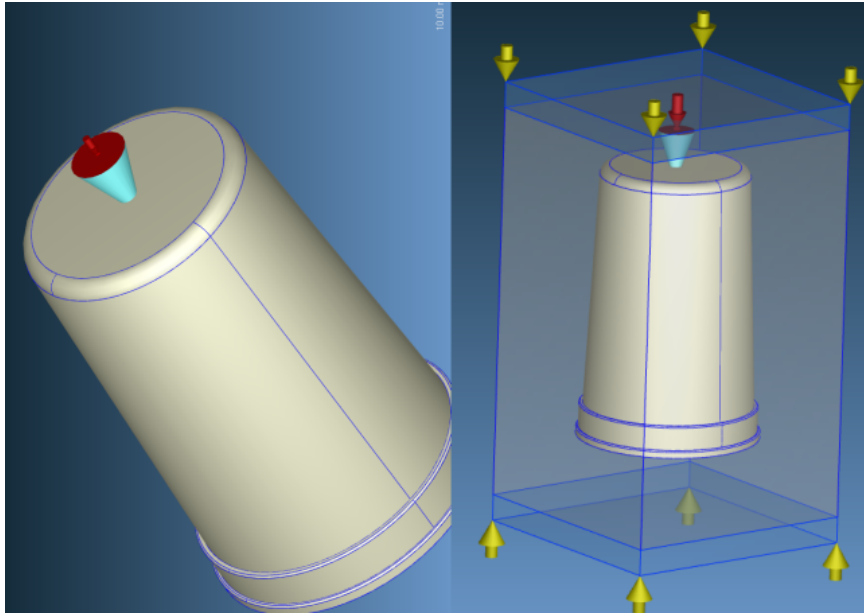
Figura 28: Preparación de la geometría del vaso en Moldex3D



Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Posteriormente, se procede a ubicar la compuerta de inyección en la geometría del vaso, eligiendo el centro geométrico de la base del vaso, como se muestra en la figura siguiente. Al mismo tiempo, se define la geometría límite del molde con las dimensiones indicadas en la figura 16: 100 mm x 100 mm x 163 mm.

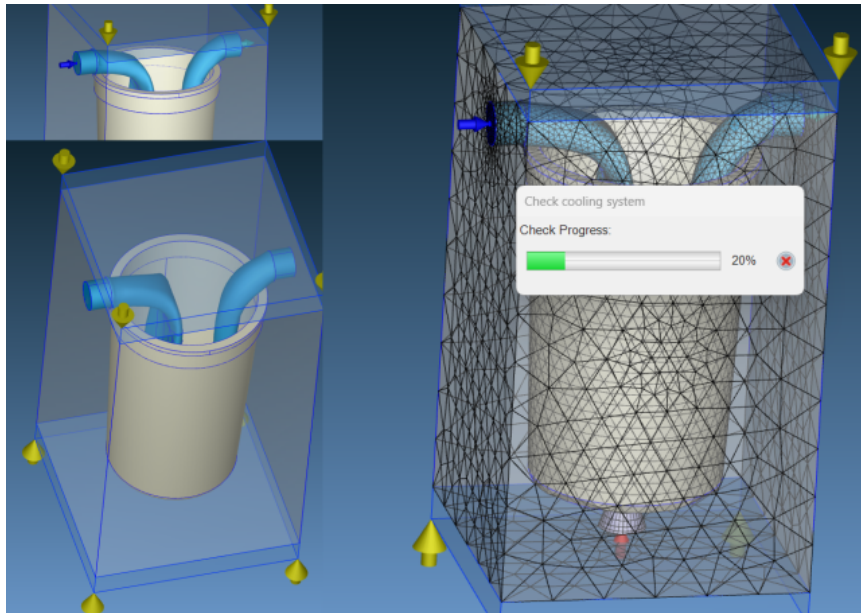
Figura 29: Continuación de la preparación de la geometría del vaso en Moldex3D



Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Después, se importan los diferentes canales de enfriamiento en formato .step y se define el atributo de la geometría como un canal de enfriamiento. A continuación, se ubica geoméricamente la cara de entrada y salida del canal y se realiza un chequeo del sistema de enfriamiento. El programa verifica automáticamente que exista continuidad desde la entrada hasta la salida del canal y que no haya interferencias. Una vez aprobado el chequeo de los canales, se procede a crear y verificar el mallado del modelo. Un ejemplo de estos pasos se puede observar en la siguiente figura.

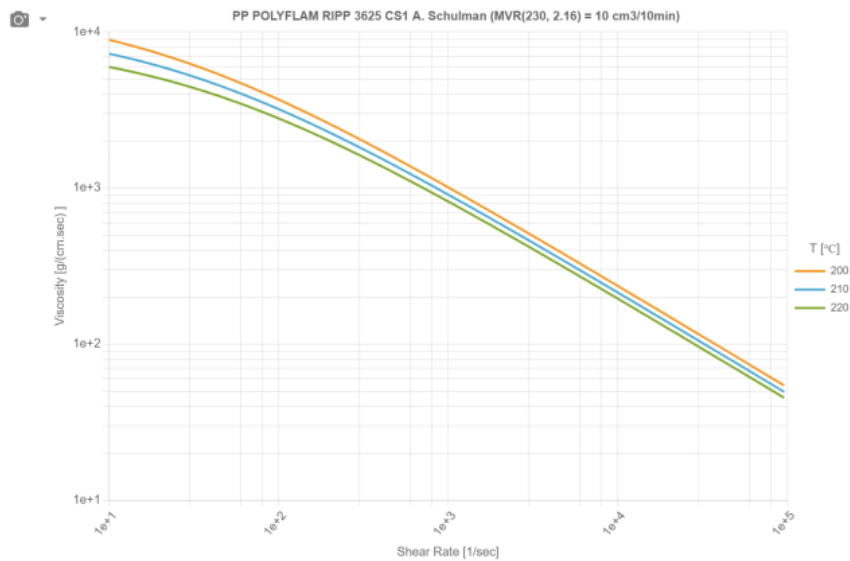
Figura 30: Ejemplo de la adición de los canales de enfriamiento y mallado en Moldex3D



Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Seguidamente, se define el material del plástico que será inyectado. Este paso es esencial para que el programa pueda calcular parámetros ingenieriles importantes, como la viscosidad y la resistencia al corte, entre otros, del plástico. Para este estudio, se selecciona el propileno de la librería de materiales del programa, tal como se muestra en la figura siguiente.

Figura 31: Propiedades del plástico elegido para la simulación



Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Siguiendo con la configuración de la simulación en el programa, se mantienen la mayoría de los parámetros estándar, los cuales se detallan en los cuadros siguientes.

Cuadro 4: Parámetros de inyección y enfriamiento de la simulación

Propiedades Mecánicas	Valor
Máxima presión de inyección	140 MPa
Temperatura inicial del molde	60 C
Temperatura del aire	25 C
Temperatura de eyección	101 C
Tiempo de enfriamiento	14.6 segundos
Tiempo de apertura del molde	5 segundos
Tiempo de llenado	1.44 segundos
Tiempo de embalaje	6.17 segundos
Temperatura de fusión	210 C
Flujo (Q)	2.35 GPM

Fuente: Moldex3D

Cuadro 5: Propiedades del metal del molde

Propiedades Mecánicas	Valor
Densidad	7.75 g/cm ³
Capacidad calorífica	4.62e06 erg/g·K
Conductividad térmica	2.90e06 erg/s·cm·K
Módulo de elasticidad	2.07e12 dyne/cm ²
Razón de Poisson	0.3

Fuente: Moldex3D

Una vez ingresados los parámetros mencionados anteriormente, se procede a iniciar las simulaciones.

6.5. Validación de método con geometría alterna

Se diseñó en *CAD* una geometría alternativa al vaso para replicar el proceso descrito anteriormente. Se eligió la forma de un casco de seguridad, ya que presenta una mayor complejidad que la del vaso y cumple con el requisito DS01.

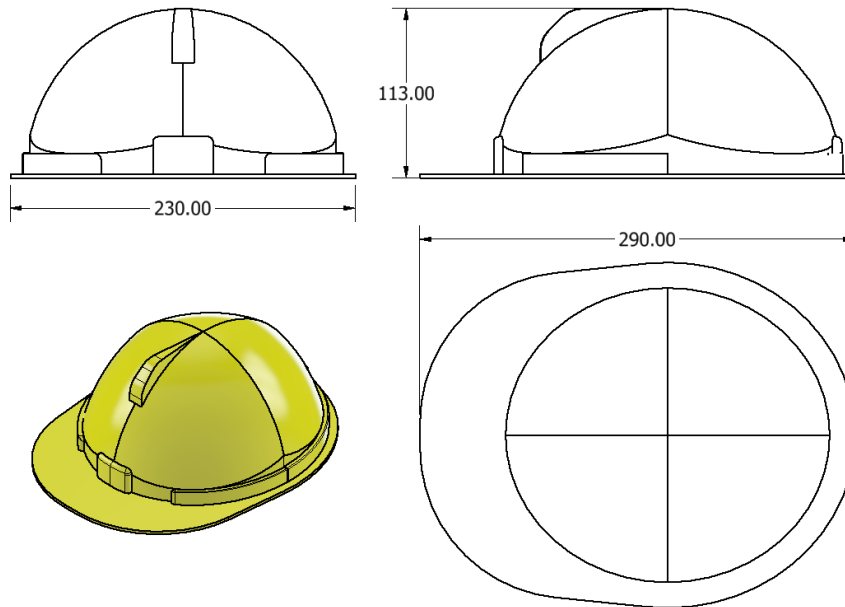
El proceso se replicó de manera idéntica, siguiendo los pasos detallados en el protocolo de pruebas (Anexo 2). Este protocolo actúa como una guía paso a paso que permite replicar el procedimiento con cualquier geometría.

Figura 32: Casco diseñado para la validación de método



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

Figura 33: Dimensiones generales del casco en mm



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

7.1. Cumplimiento de requisitos

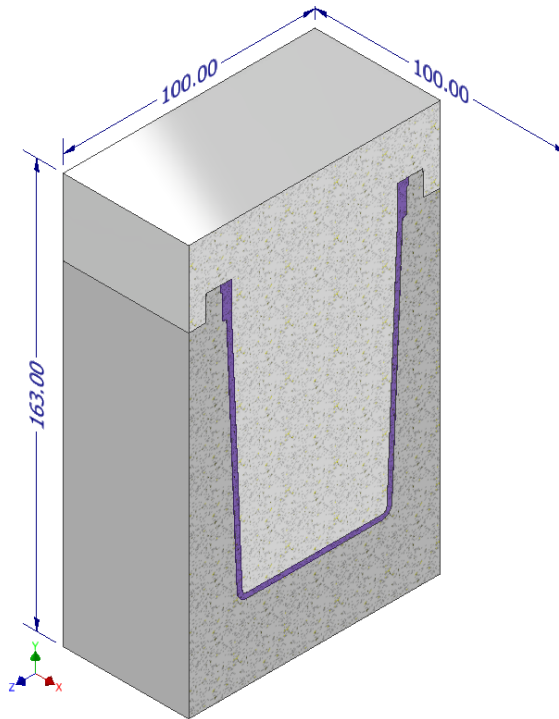
Cuadro 6: Requisitos y su cumplimiento

Código	Descripción	Cumplido
PR-01	La computadora del investigador debe tener un sistema operativo Windows 10 u 11, 4 GB de RAM, 8.5 GB de almacenamiento, una resolución de pantalla mínima de 1366 x 768 y un CPU de tipo x-86 con procesador de 64 bits.	SÍ
PR-02	En caso de ser un programa pagado, el costo del programa (por un mínimo de 2 meses de suscripción), es menor de USD 500.00 al mes.	SÍ
PR03	El programa seleccionado debe contar con la herramienta de la creación de diseños generativos.	SÍ
PR04	El protocolo de utilización de cada programa muestra un proceso detallado con la totalidad de los pasos requeridos para un diseño generativo u optimización topológica.	SÍ
DS01	La geometría de la pieza a moldear debe asemejarse a un objeto fabricado por alguna industria de inyección plástica guatemalteca.	SÍ
DS02	El área transversal del molde no debe superar los 12 cm cuadrados, y su altura no debe superar los 20 cm.	SÍ
DS04	Se debe garantizar que no hay interferencias geométricas al sacar la pieza del molde.	SÍ
DS05	Los canales de enfriamiento convencional en el prototipo de comparación únicamente tienen trayectorias rectas y área transversal constante.	SÍ
DS06	Los canales de enfriamiento de conformación diseñados deben coincidir geoméricamente con la entrada y salida de los canales de enfriamiento convencional del prototipo de comparación.	SÍ
SM01	Las condiciones (material, soportes, etc.) de las simulaciones de comparación entre los moldes con canales convencionales y los moldes con canales de enfriamiento de conformación deben ser exactamente las mismas.	SÍ
SM02	Se debe comparar el gradiente de temperatura, tiempo de enfriamiento, transferencia de calor y eficiencia de enfriamiento por medio de las simulaciones.	SÍ

Fuente: elaboración Propia

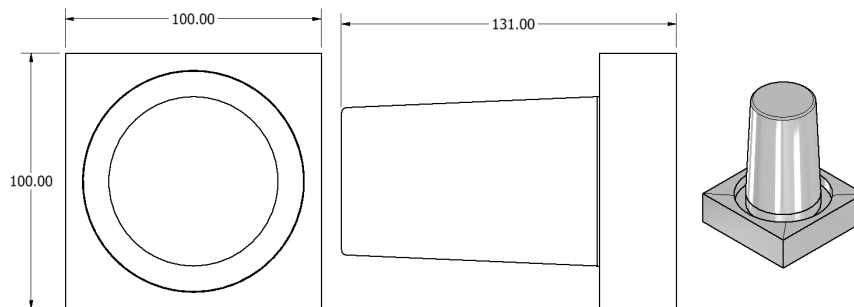
7.2. Diseños finales

Figura 34: Molde base para el vaso, seccionado en YZ



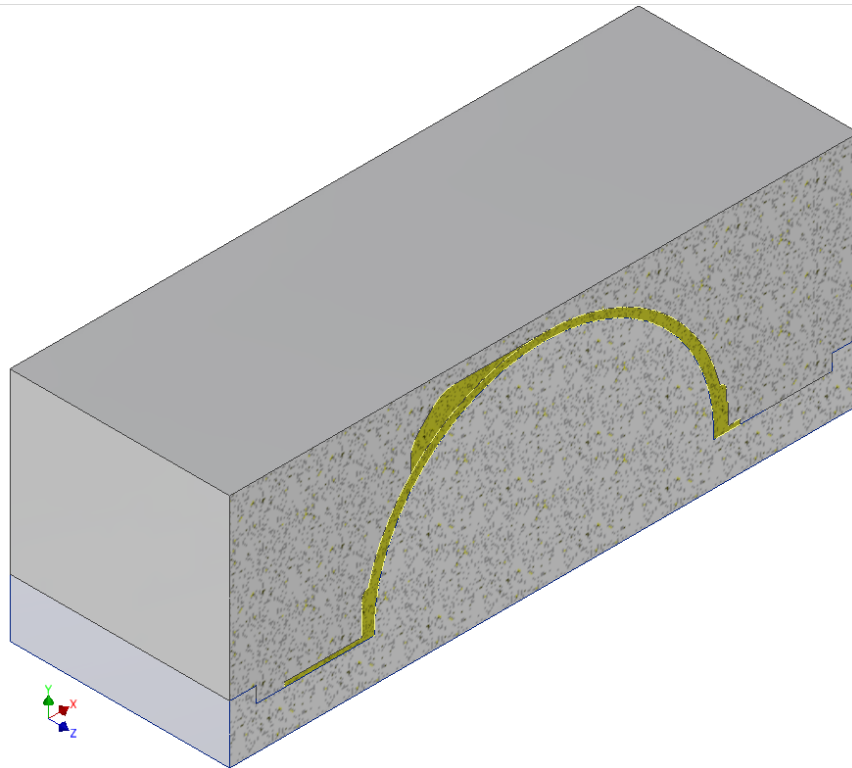
Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

Figura 35: Dimensiones generales del núcleo del vaso en mm



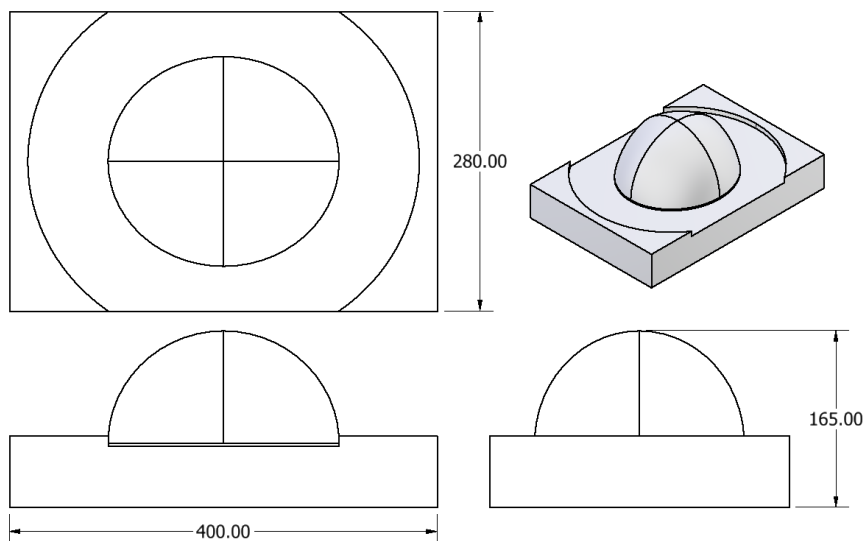
Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

Figura 36: Molde base para el casco, seccionado en XY



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

Figura 37: Dimensiones generales del núcleo del casco en mm



Fuente: captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

Figura 38: Canales tradicionales, de conformación tradicionales y de conformación generados, respectivamente, en el núcleo del vaso

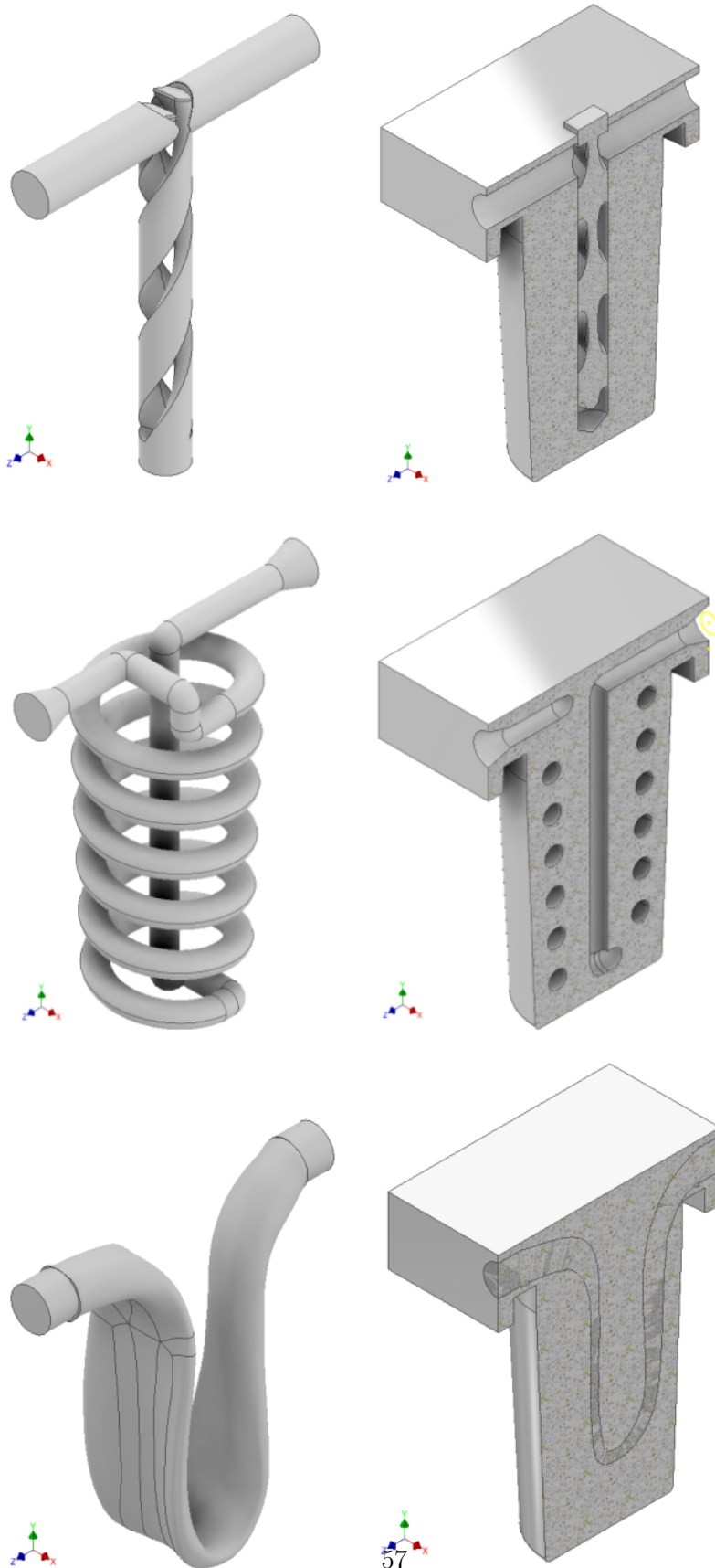
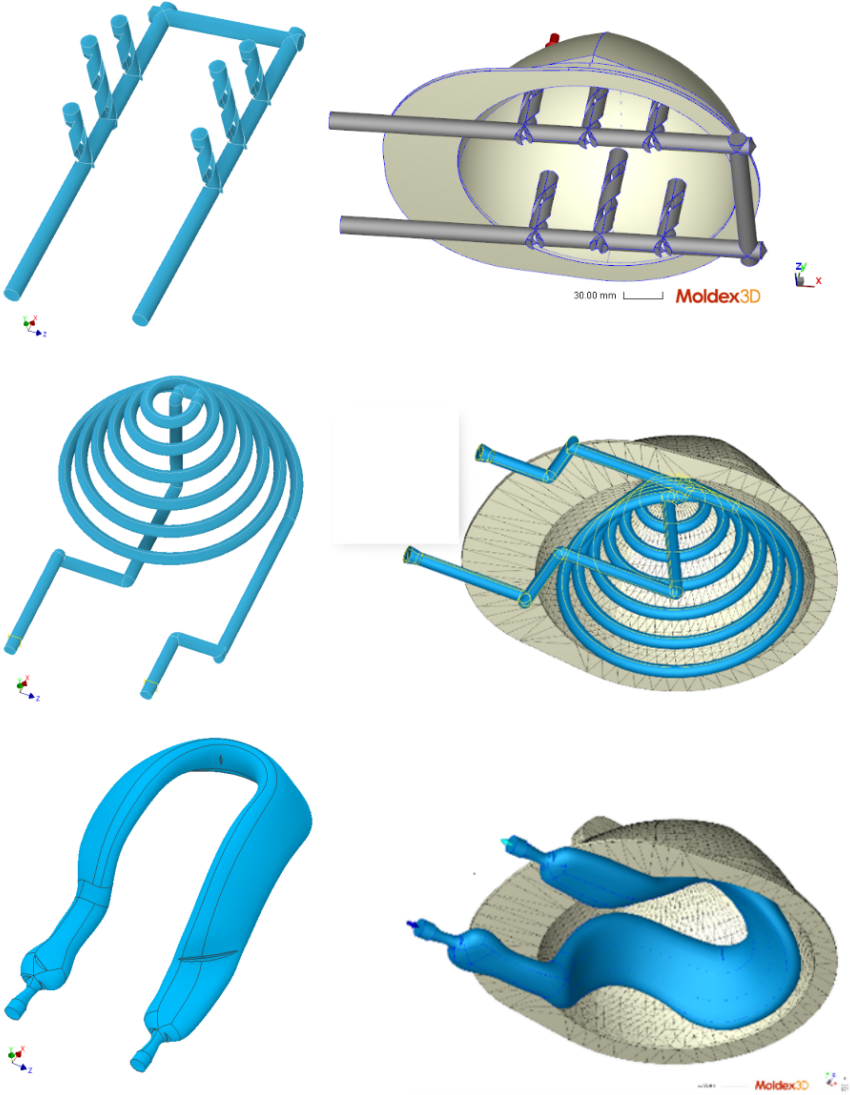


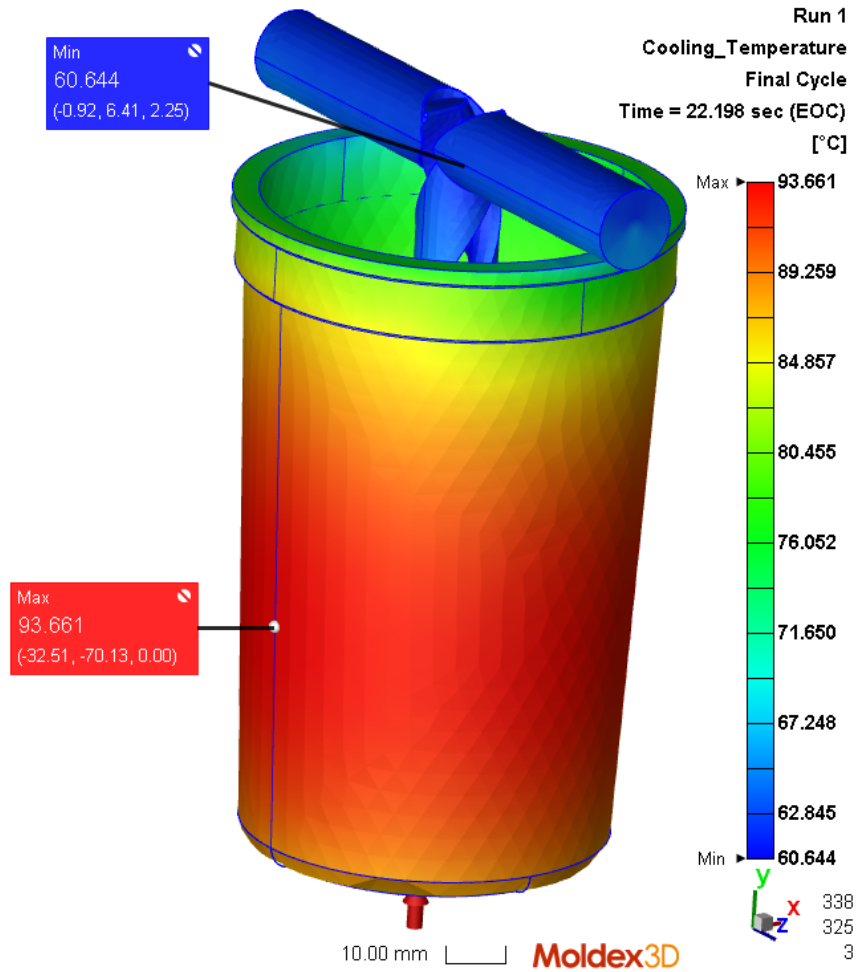
Figura 39: Canales tradicionales, de conformación tradicionales y de conformación generados, respectivamente, en el núcleo del casco



Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

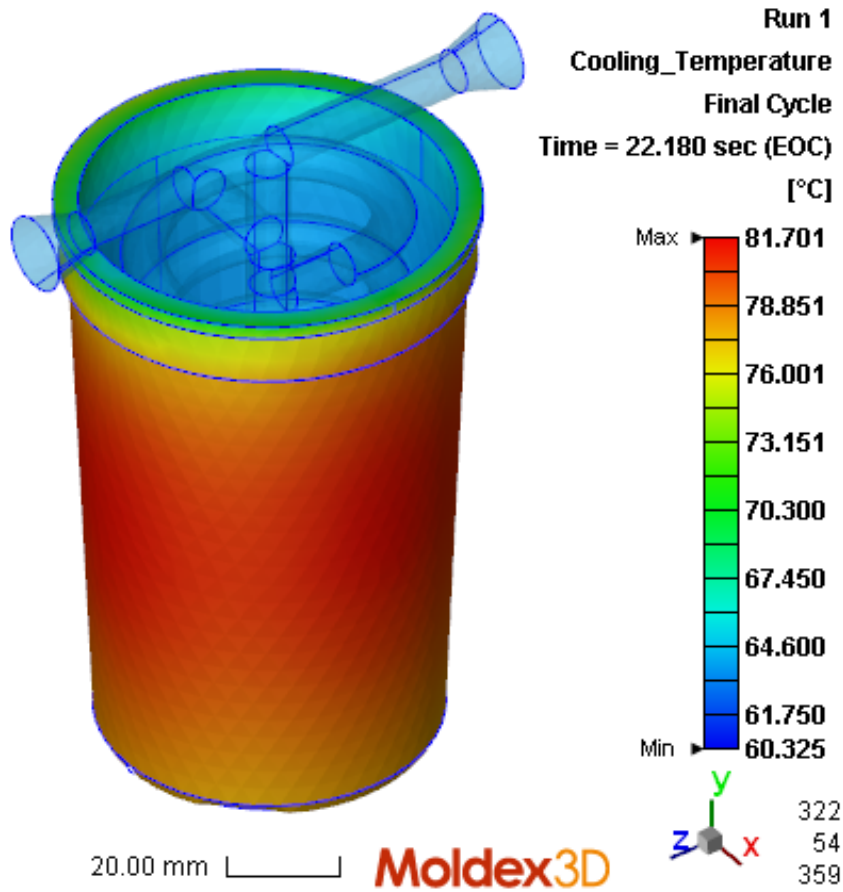
7.3. Resultados de las simulaciones para el vaso

Figura 40: Temperatura promedio de enfriamiento en la parte: canal de enfriamiento tradicional para molde de vaso



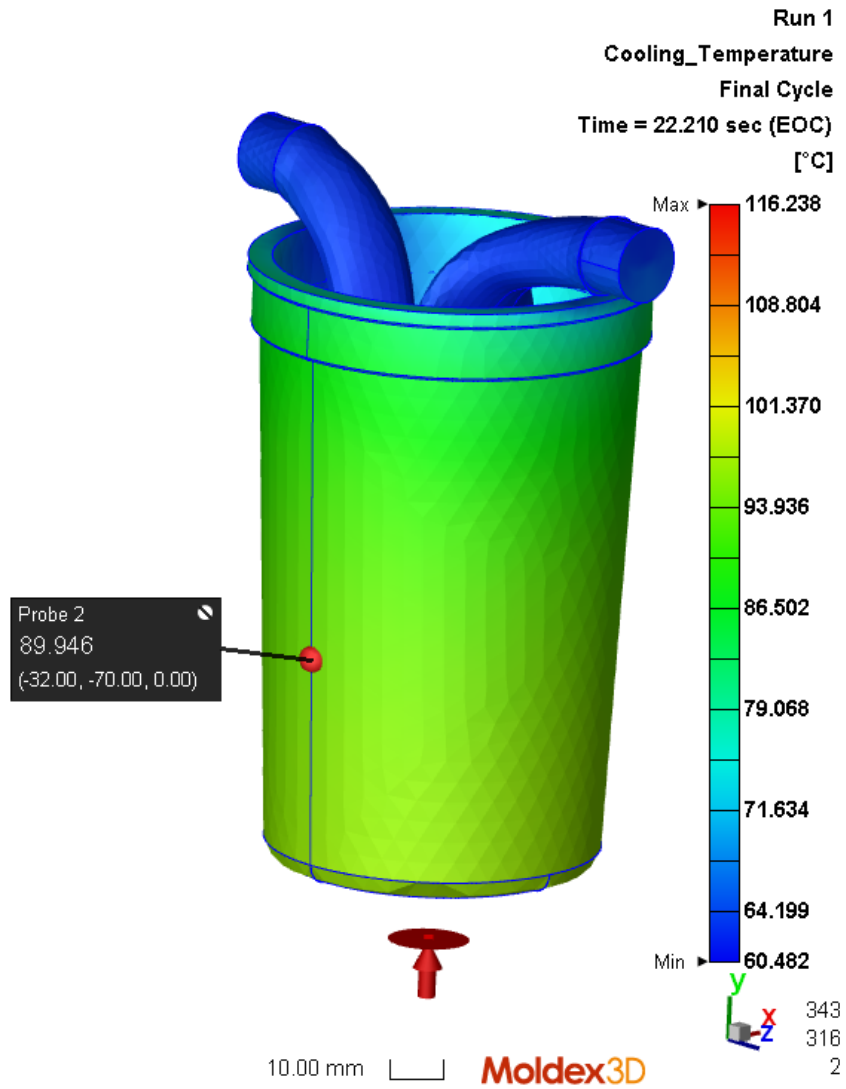
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 41: Temperatura promedio de enfriamiento en la parte: canal de enfriamiento de conformación tradicional para molde de vaso



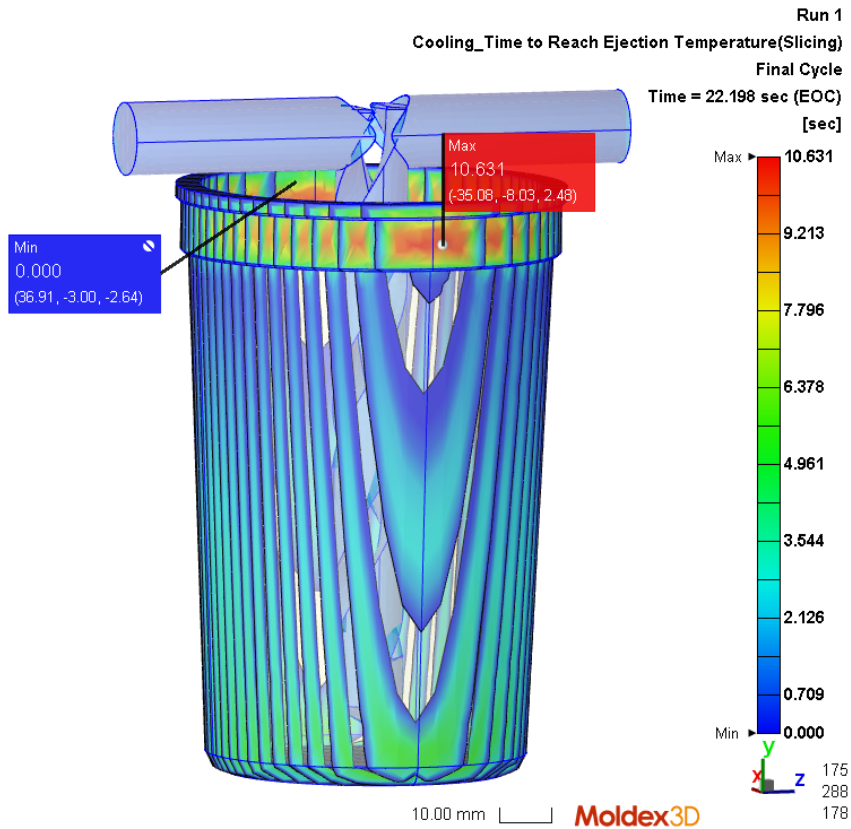
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 42: Temperatura promedio de enfriamiento en la parte: canal de enfriamiento de conformación generado para molde de vaso



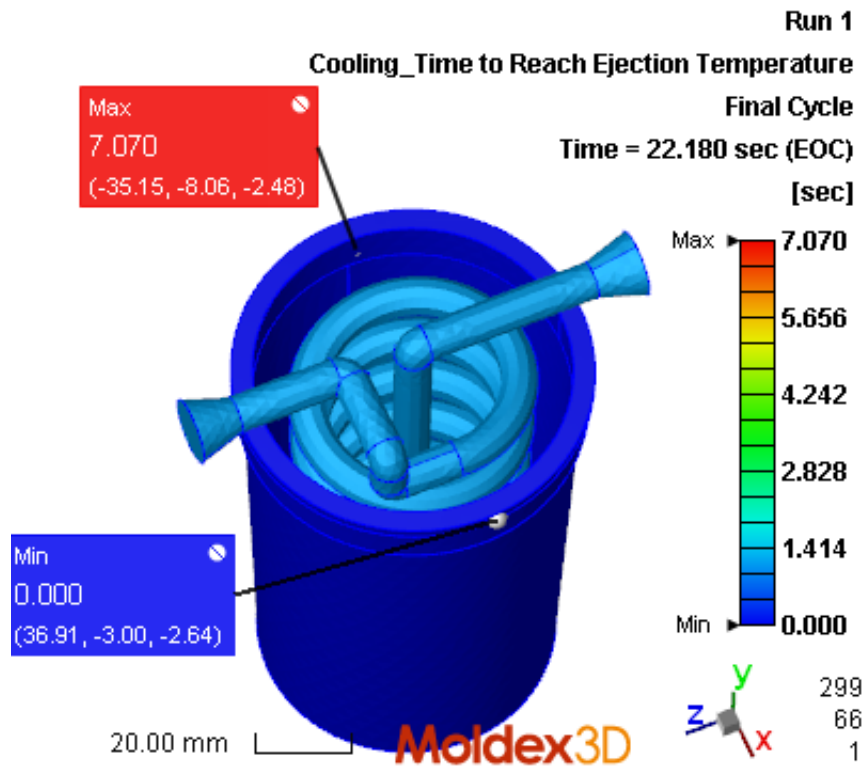
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 43: Tiempo para que la pieza alcance su temperatura de eyección: canal de enfriamiento tradicional para molde de vaso



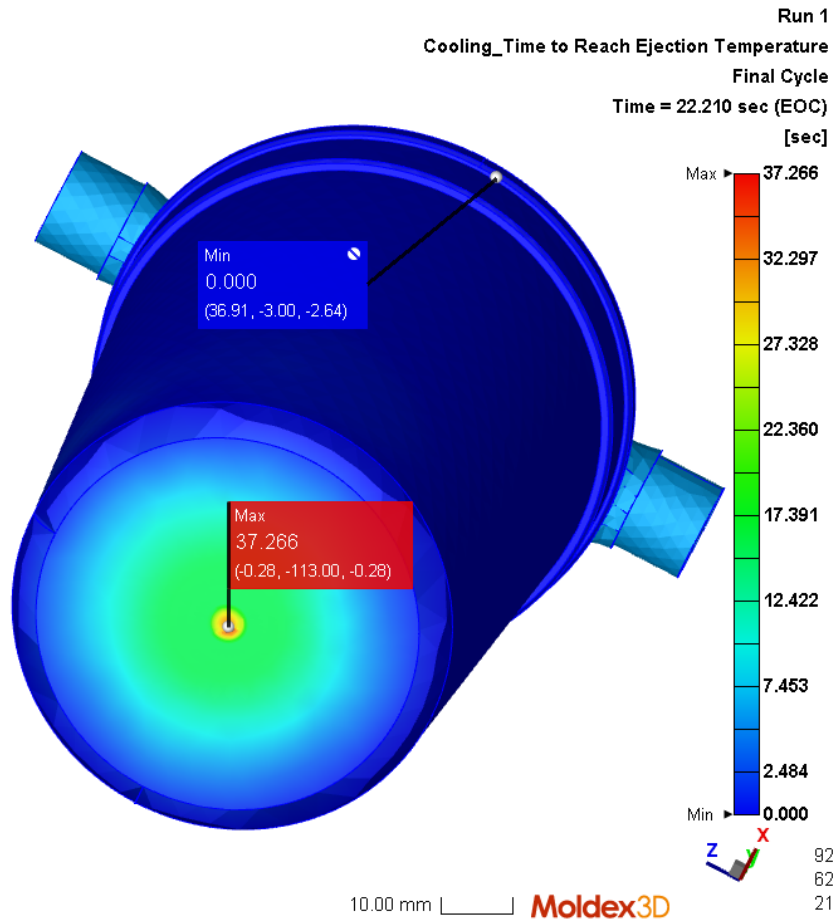
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 44: Tiempo para que la pieza alcance su temperatura de eyección: canal de enfriamiento de conformación tradicional para molde de vaso



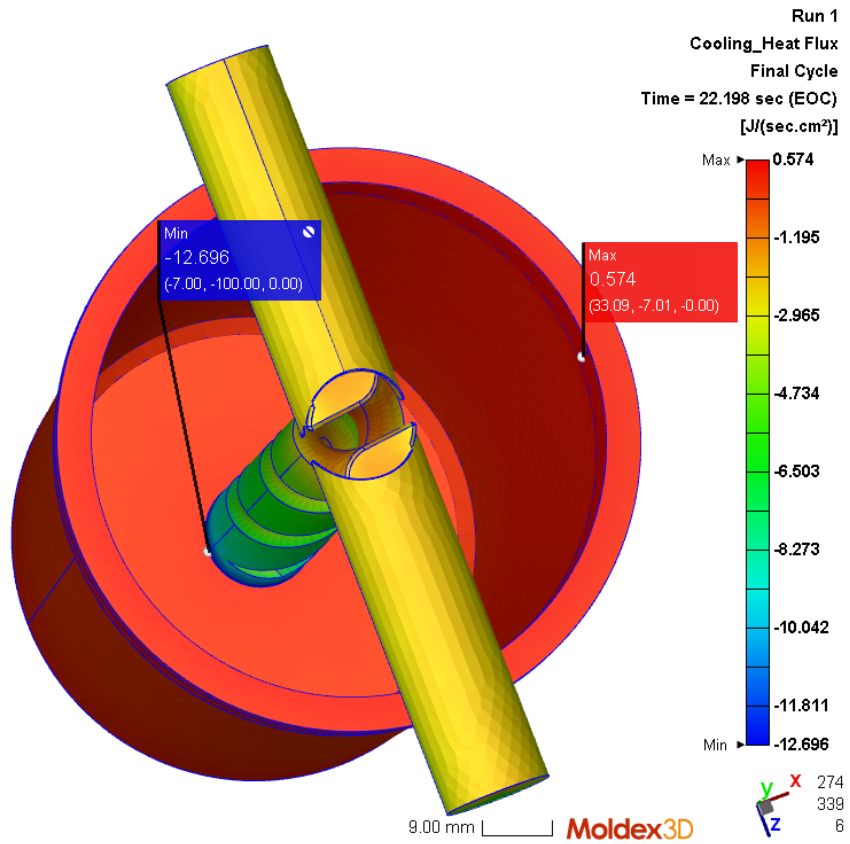
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 45: Tiempo para que la pieza alcance su temperatura de eyección: canal de enfriamiento de conformación generado para molde de vaso



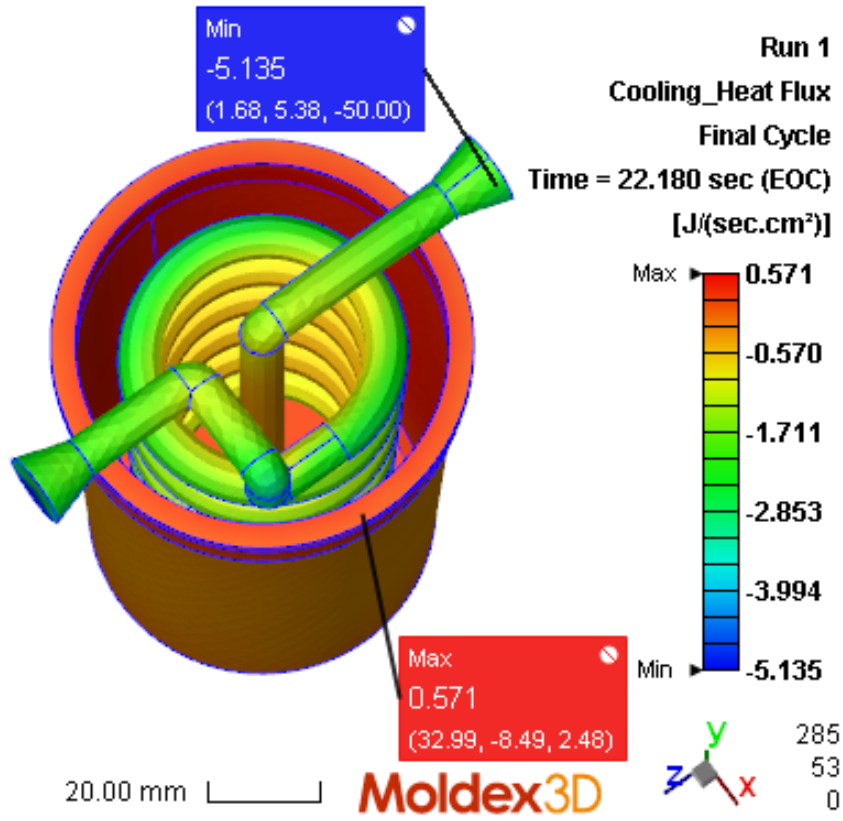
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 46: Flujo de calor por unidad de área de la superficie de la parte: canal de enfriamiento tradicional para molde de vaso



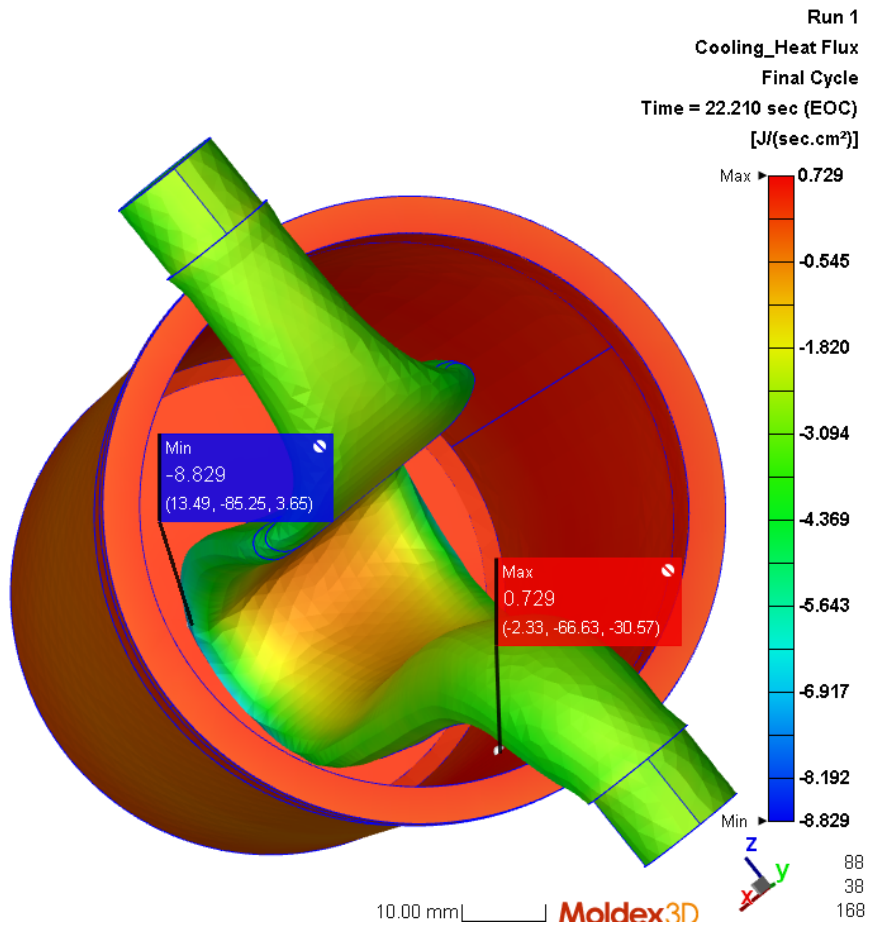
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 47: Flujo de calor por unidad de área de la superficie de la parte: canal de enfriamiento de conformación tradicional para molde de vaso



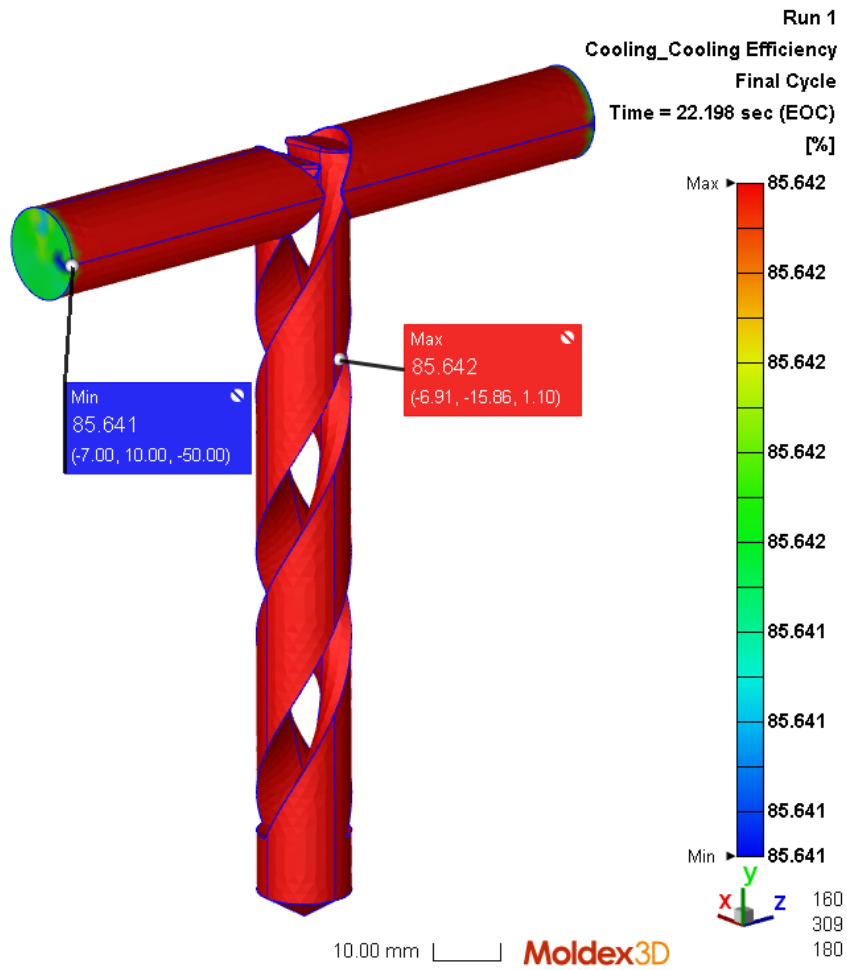
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 48: Flujo de calor por unidad de área de la superficie de la parte: canal de enfriamiento de conformación generado para molde de vaso



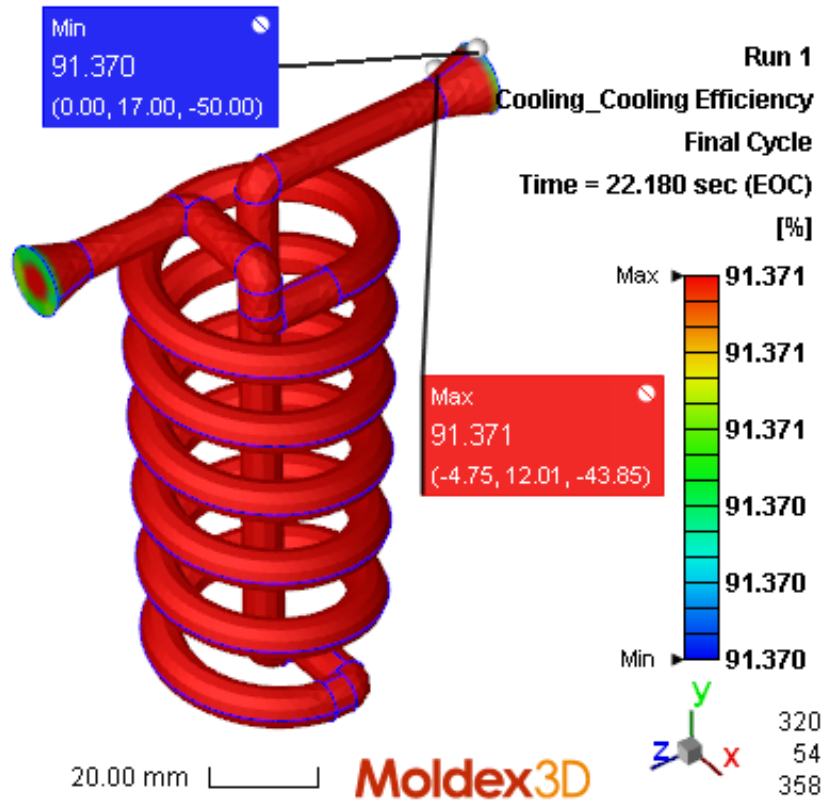
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 49: Eficiencia de enfriamiento del canal: canal de enfriamiento tradicional para molde de vaso



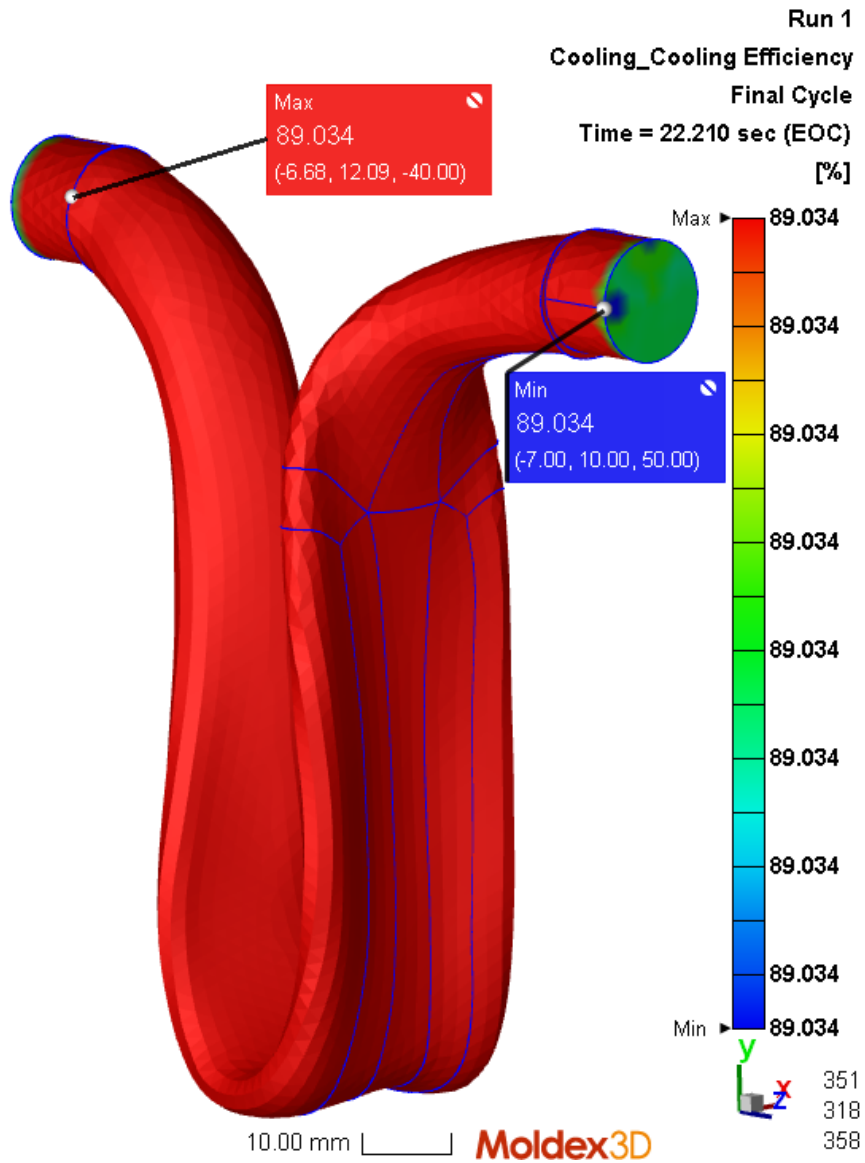
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 50: Eficiencia de enfriamiento del canal: canal de enfriamiento de conformación tradicional para molde de vaso



Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

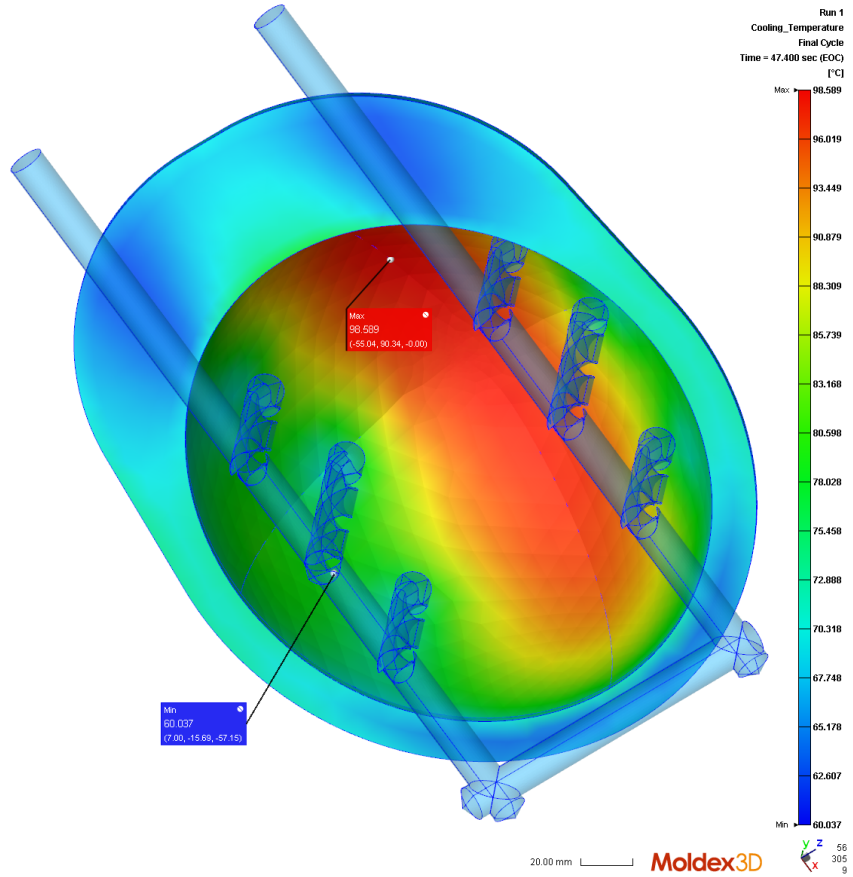
Figura 51: Eficiencia de enfriamiento del canal: canal de enfriamiento de conformación generado para molde de vaso



Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

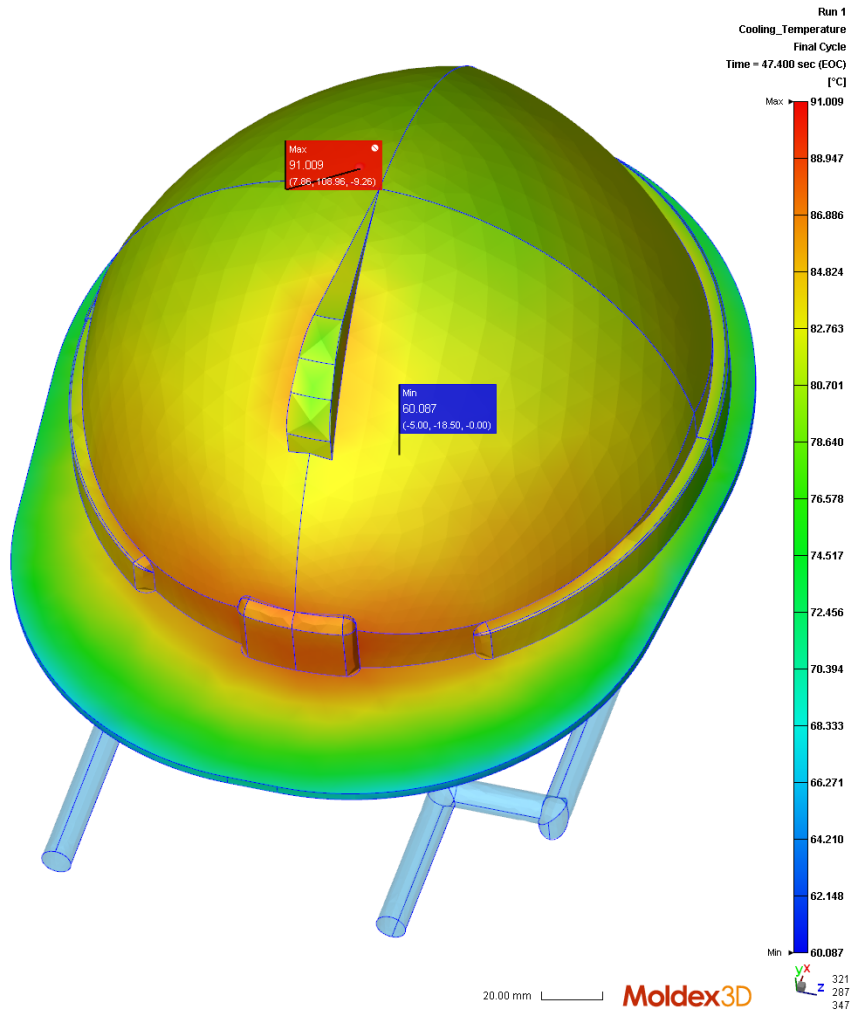
7.4. Resultados de las simulaciones para el casco

Figura 52: Temperatura promedio de enfriamiento en la parte: canal de enfriamiento tradicional para molde de casco



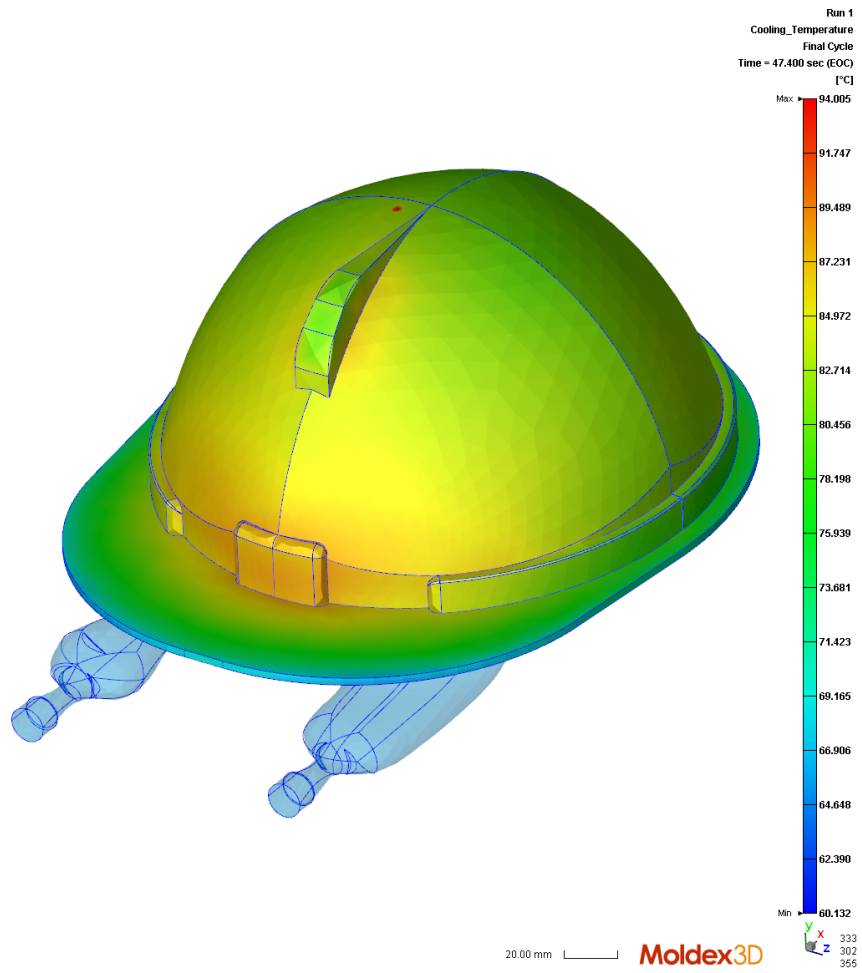
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 53: Temperatura promedio de enfriamiento en la parte: canal de enfriamiento de conformación tradicional para molde de casco



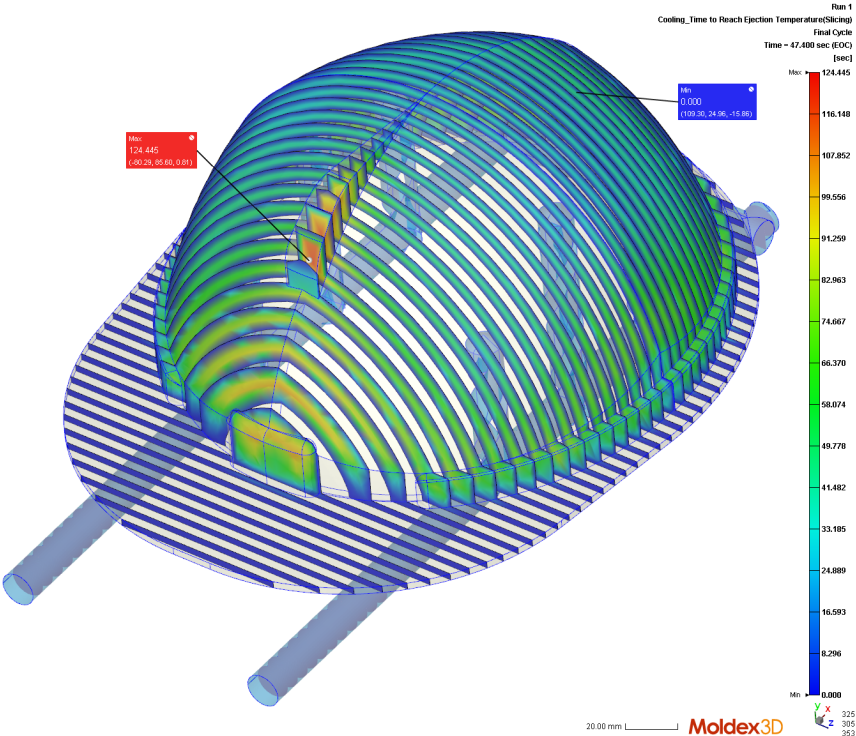
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 54: Temperatura promedio de enfriamiento en la parte: canal de enfriamiento de conformación generado para molde de casco



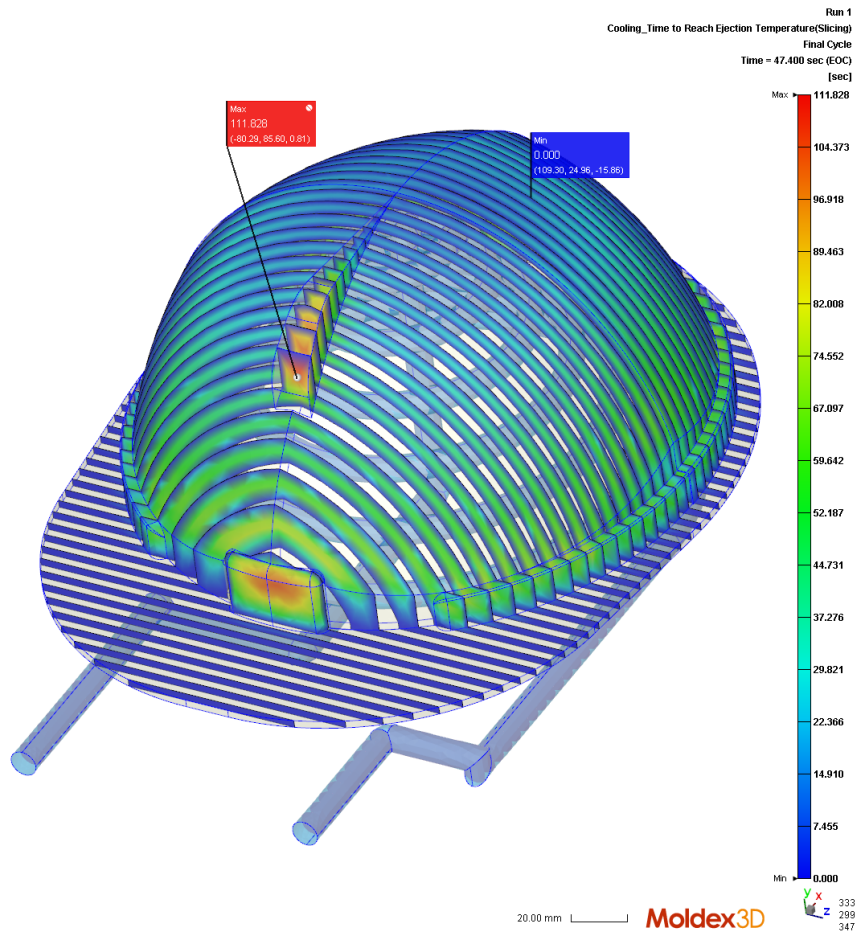
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 55: Tiempo para que la pieza alcance su temperatura de eyección: canal de enfriamiento tradicional para molde de casco



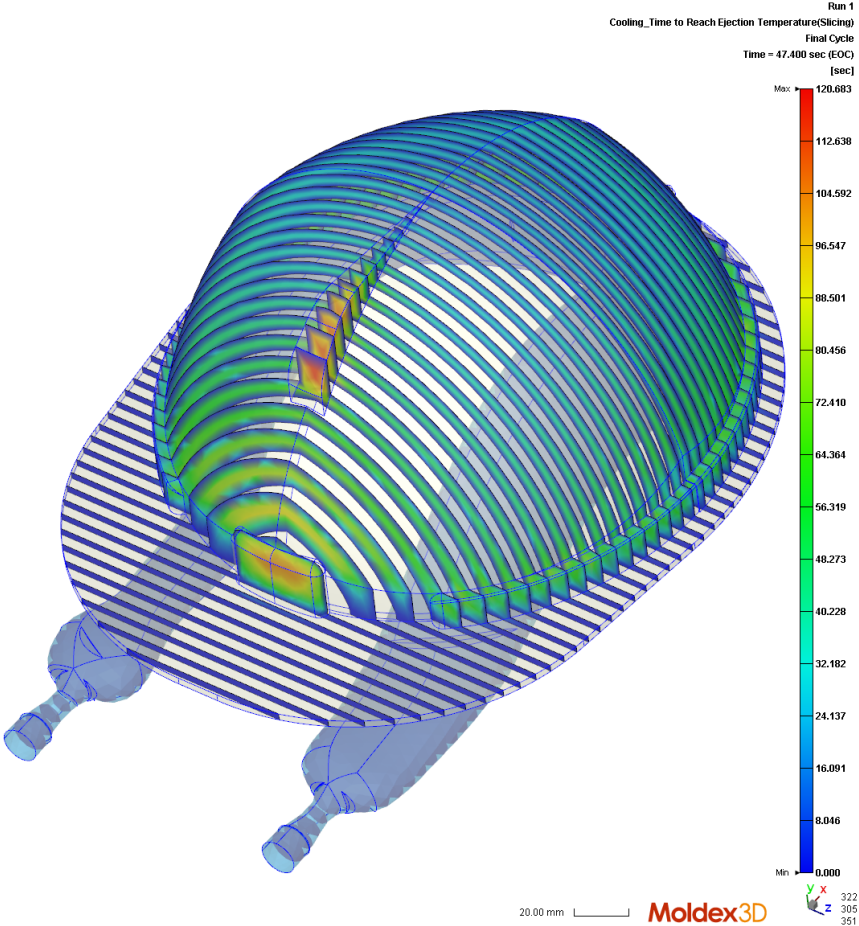
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 56: Tiempo para que la pieza alcance su temperatura de eyección: canal de enfriamiento de conformación tradicional para molde de casco



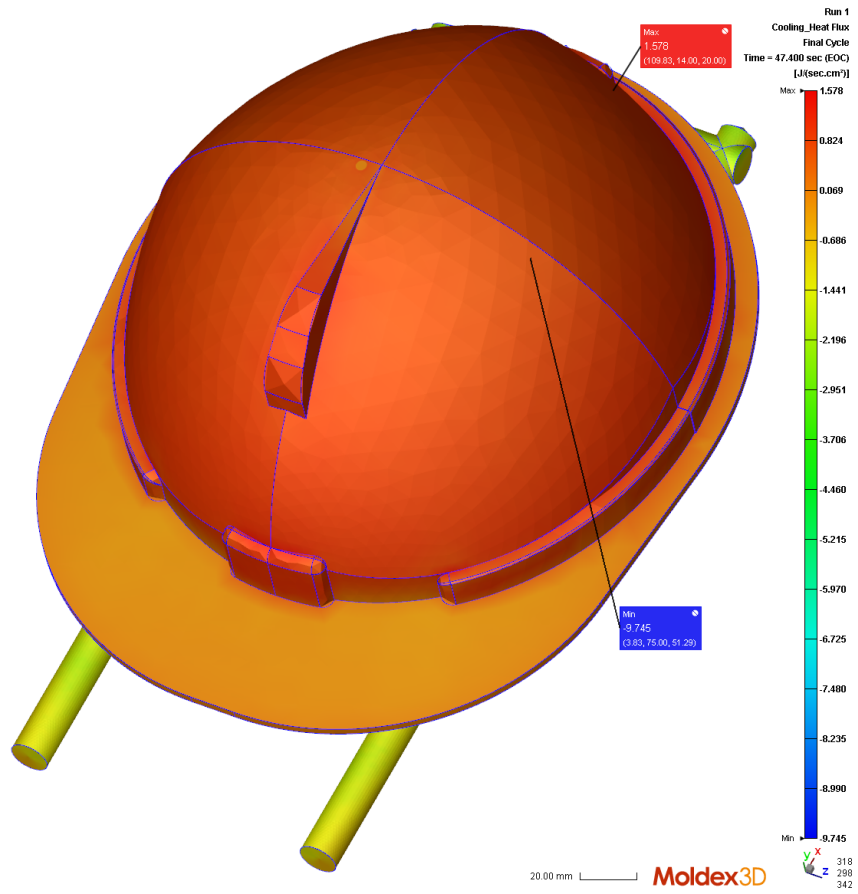
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 57: Tiempo para que la pieza alcance su temperatura de eyección: canal de enfriamiento de conformación generado para molde de casco



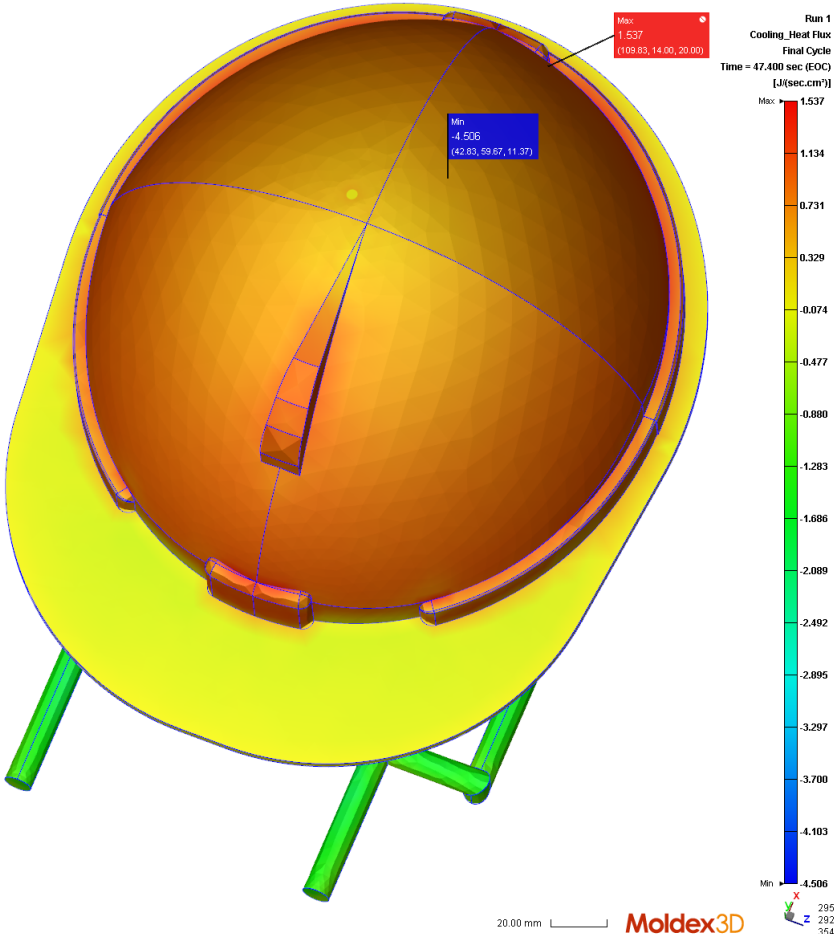
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 58: Flujo de calor por unidad de área de la superficie de la parte: canal de enfriamiento tradicional para molde de casco



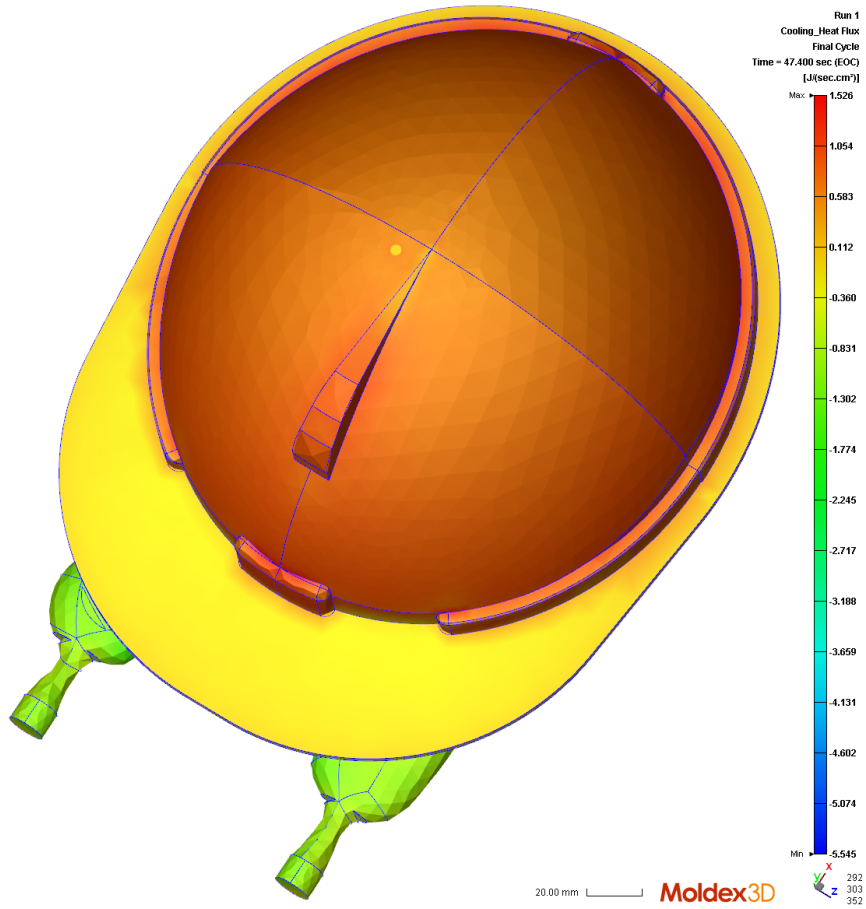
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 59: Flujo de calor por unidad de área de la superficie de la parte: canal de enfriamiento de conformación tradicional para molde de casco



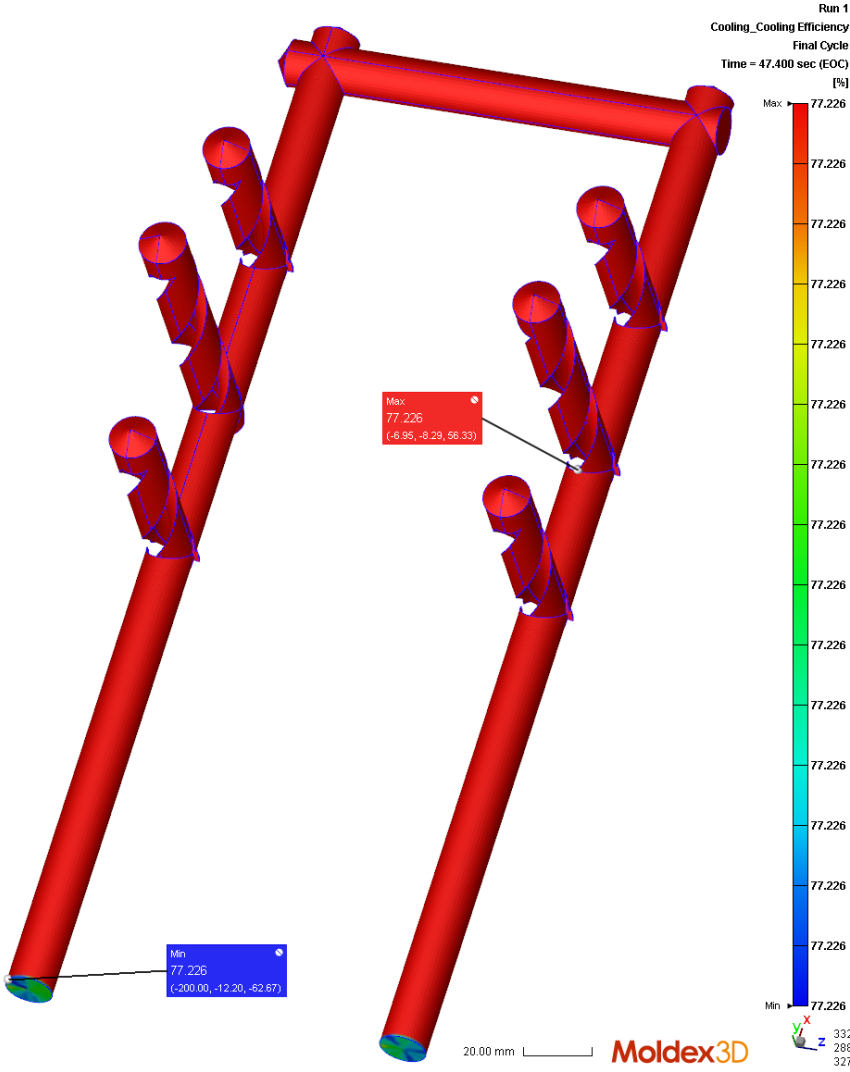
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 60: Flujo de calor por unidad de área de la superficie de la parte: canal de enfriamiento de conformación generado para molde de casco



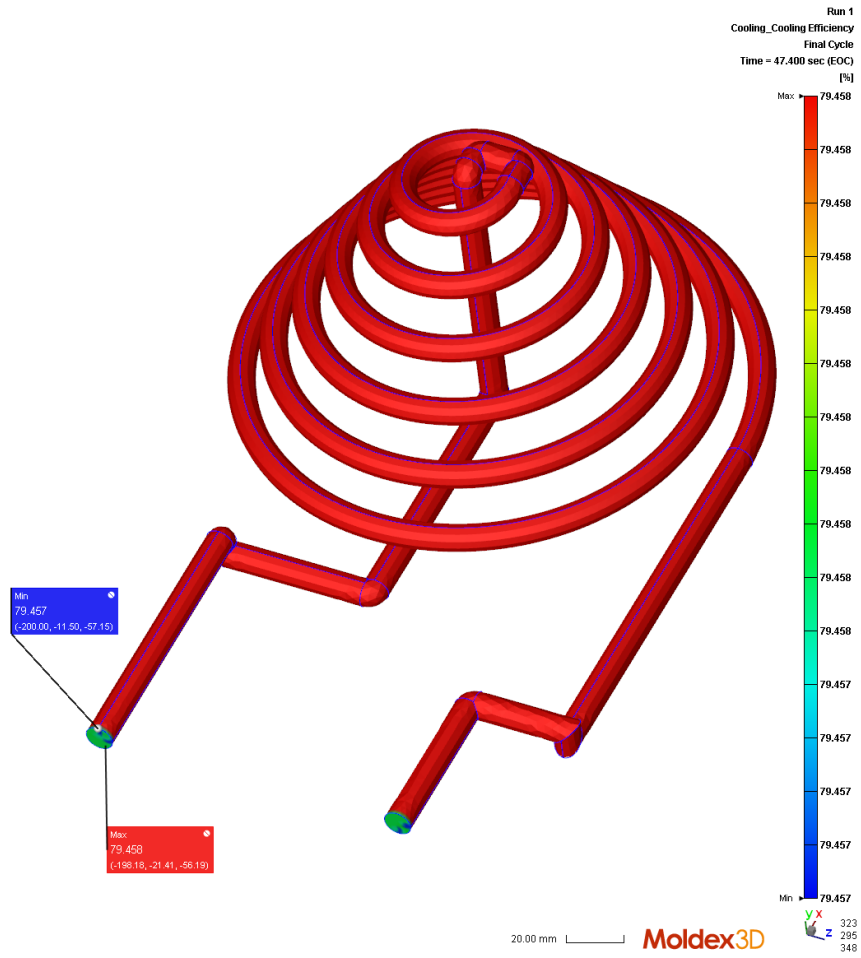
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 61: Eficiencia de enfriamiento del canal: canal de enfriamiento tradicional para molde de casco



Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

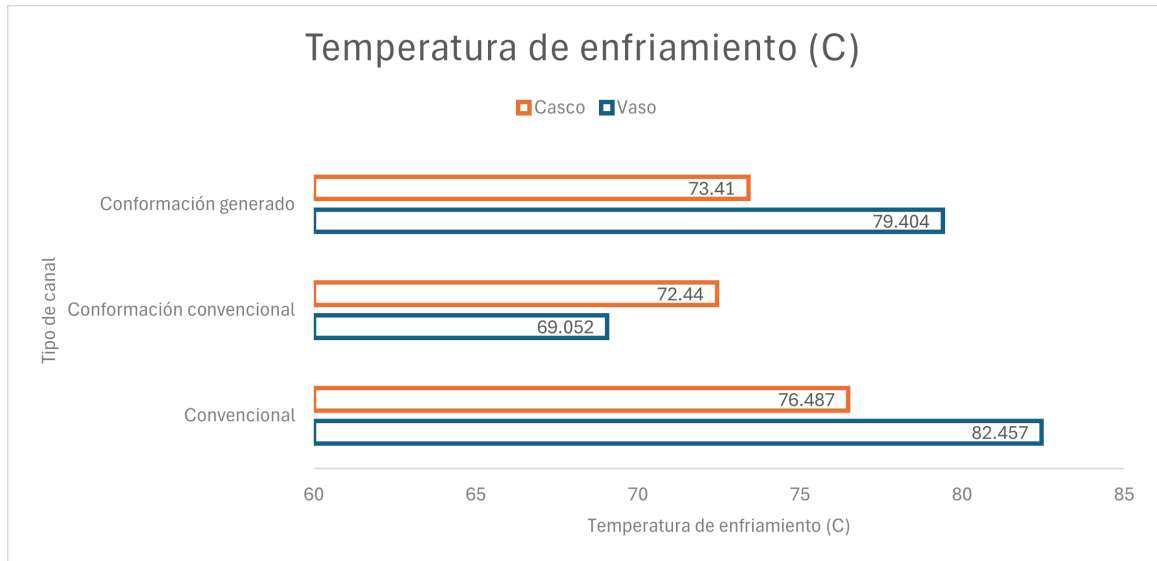
Figura 62: Eficiencia de enfriamiento del canal: canal de enfriamiento de conformación tradicional para molde de casco



Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

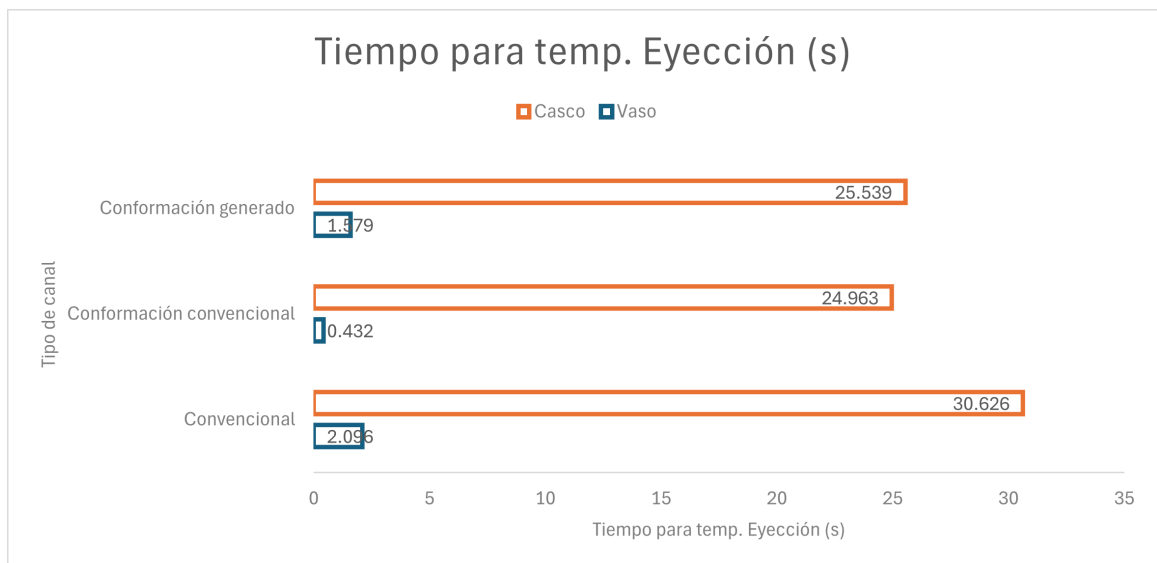
7.5. Resultados graficados

Figura 64



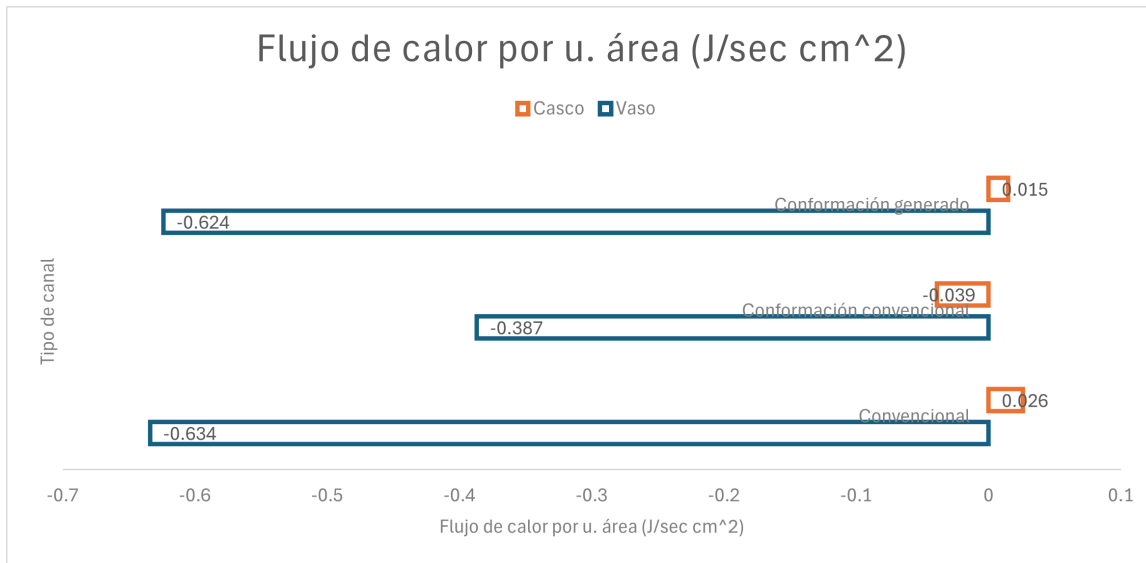
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 65



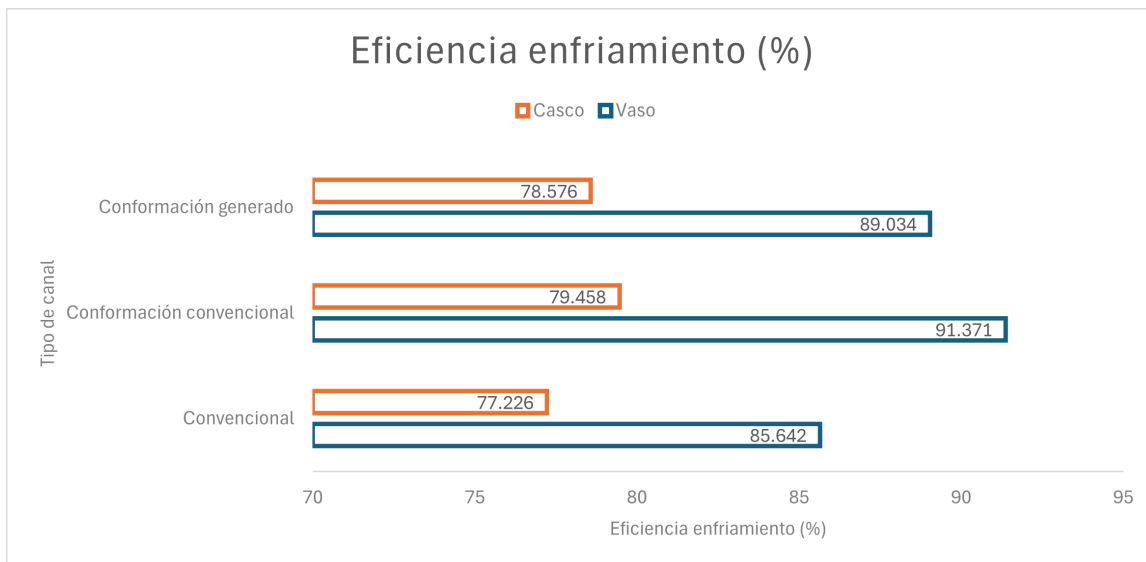
Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 66



Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

Figura 67



Fuente: imagen utilizada por cortesía de Moldex3D.

7.6. Número de Reynolds

Según la siguiente ecuación, el número de Reynolds (R), es directamente proporcional a la velocidad del fluido (V).

$$R = \frac{\rho V D}{\mu}$$

A partir de los perfiles de velocidad simulados en ANSYS, se observa lo siguiente: considerando los valores investigados previamente de densidad y viscosidad del agua, así como el diámetro de entrada de los canales mostrados en el cuadro 3, el rango de velocidades que corresponde con el número de Reynolds aceptable (3,000 - 10,000), es de 0.17 m/s a 0.57 m/s.

$$V = \frac{R\mu}{\rho D}$$

$$V_{min} = \frac{R\mu}{\rho D} = \frac{(3,000)(0.008 \frac{kg}{ms})}{(100 \frac{kg}{m^3})(0.14m)} = 0.17 \frac{m}{s}$$

$$V_{max} = \frac{R\mu}{\rho D} = \frac{(10,000)(0.008 \frac{kg}{ms})}{(100 \frac{kg}{m^3})(0.14m)} = 0.57 \frac{m}{s}$$

El perfil de velocidad del vaso indica que no supera el límite superior; sin embargo, el límite inferior se aproxima a cero, según se muestra en las figuras 23 y 24. En cuanto al casco, como se observa en el paso 58 del protocolo de pruebas adjunto, hay puntos en la entrada y salida del canal donde se excede el límite superior de velocidad. Al igual que en el caso del vaso, el límite inferior también se aproxima a cero.

7.7. Análisis costo-beneficio para el casco

Como se menciona en el quinto objetivo de esta investigación, se llevó a cabo un análisis costo-beneficio de la implementación del molde del casco con canales de conformación generados en comparación con un canal tradicional, para una producción teórica de inyección plástica.

Primero, se analizó el costo teórico de la producción anual del casco, considerando diversos factores. Se determinó el tiempo necesario para que una máquina con canales de enfriamiento convencional y de conformación completara un ciclo de enfriamiento del casco, utilizando los resultados obtenidos de las simulaciones. En un ciclo típico de inyección plástica, la etapa de enfriamiento representa el 50 % del ciclo total (TruCool, 2017), por lo que se duplicó el tiempo mencionado.

Cuadro 7: Factores relevantes para el análisis costo-beneficio para la implementación de un molde con canales de enfriamiento de conformación generados para el casco

Descripción	Canales Con- vencionales	Canales de conformación generados
Tiempo del ciclo teórico para el casco	61.252 s	51.078 s
Porcentaje del tiempo en operación del año	85 %	85 %
Segundos en operación anual	26,805,600 s	26,805,600 s
Producción anual teórica 1 máquina	437,629 piezas	524,798 piezas
Utilidad de cada pieza	\$1.35	\$1.35

Fuente: elaboración propia

Posteriormente, se asumió que la máquina, la cual produce una pieza por molde, opera el 85 % del tiempo, dejando un 15 % para mantenimiento, paradas y otros factores. Con el tiempo de ciclo y el porcentaje de operación, se calculó la cantidad anual de ciclos por máquina. La utilidad del casco se basa en un margen de ganancia del 35 % sobre su precio en el mercado, que es aproximadamente GTQ 30.00 o USD \$ 3.85.

Cuadro 8: Flujo de efectivo para la implementación de un molde con canales de enfriamiento de conformación generados para el casco

Flujo de efectivo	Canales Con- vencionales	Canales de confor- mación generados	Utilidad Extra	Valor Presente
1 año	\$590,799.15	\$708,477.30	\$117,678.15	\$102,328.83
2 años	\$590,799.15	\$708,477.30	\$117,678.15	\$88,981.59
3 años	\$590,799.15	\$708,477.30	\$117,678.15	\$77,375.29
			Total:	\$268,685.71

Fuente: elaboración propia

A continuación, se elaboró un flujo de efectivo para tres años de operación, en el cual se representa en la segunda y tercera columna la utilidad anual de cada tipo de molde, de acuerdo con la utilidad por pieza y su producción anual teórica. En la tercera columna, se muestra la diferencia entre estos totales, lo que refleja la utilidad adicional anual para la empresa al implementar la solución de canales de enfriamiento de conformación generados. Finalmente, estos valores futuros se ajustaron al presente considerando el valor del dinero en el tiempo. Para este cálculo, se empleó una tasa de rentabilidad del 15 %, con el objetivo de superar la tasa de retorno del 5.25 % (Continental, 2024) que ofrece una inversión segura, como un certificado de depósito a plazo fijo en Guatemala.

Cuadro 9: Inversión aproximada para la implementación de un molde con canales de enfriamiento de conformación generados para el casco

Descripción	Valor
Costo molde	\$42,000.00
Costo detener operación 1 mes	\$49,233.26
Costos varios molde	\$17,500.00
Total de Inversión redondeado hacia arriba	\$109,000.00

Fuente: elaboración propia

Para estimar el total de la inversión al implementar canales de enfriamiento de conformación generados, se partió de un valor aproximado para un molde con las dimensiones y complejidad de un casco, que puede variar, pero se estima en alrededor de USD \$35,000.00 (RexPlastics, 2013). Tomando en cuenta que el método de manufactura del molde es el sinterizado directo de metales por láser, se estima un 20 % adicional a este costo (Beard, 2022). Tras realizar varios experimentos, se determinó que el costo del molde podría alcanzar hasta USD \$80,000.00, con el objetivo de asegurar la recuperación del capital en menos de 2 años y que el proyecto tenga más rentabilidad que un depósito con certificado de depósito a plazo fijo. Además, se consideró que la máquina detendría su operación durante 1 mes para instalar y configurar el nuevo molde, y este costo de oportunidad fue calculado con base en su producción anual. Finalmente, se añadieron costos variables equivalentes a la mitad del costo del molde, lo que llevó a un total de inversión aproximado de USD \$109,000.00. Según el flujo de efectivo proyectado, la recuperación del capital invertido se logrará en menos de 2 años.

Cuadro 10: Comparación contra inversión segura en la implementación de un molde con canales de enfriamiento de conformación generados para el casco

Descripción	Valor
Capital a invertir	\$109,000.00
Tasa anual certificado de depósito a plazo fijo	5.25 %
Valor futuro a 3 años plazo fijo	\$127,084.57
Valor futuro a 3 años canales	\$159,685.71
Diferencia	\$32,601.14

Fuente: elaboración propia

Para una empresa, esta inversión es favorable, ya que al cabo de 3 años, con una tasa de interés del 5.25 % anual en un certificado de depósito a plazo fijo, una inversión de USD \$109,000.00 generaría USD \$127,084.57. En cambio, el valor presente neto del flujo de efectivo proyectado después de 3 años, menos la inversión inicial, es de USD \$159,685.71, lo que representa una diferencia de USD \$32,601.14 a favor de los canales de enfriamiento de conformación generados.

7.8. Análisis costo-beneficio para el vaso

Se realizó un procedimiento similar, variando los resultados de la diferencia de tiempo y de utilidad por pieza, para calcular la rentabilidad del vaso, obteniéndose los siguientes resultados.

Cuadro 11: Factores relevantes para el análisis costo-beneficio para la implementación de un molde con canales de enfriamiento de conformación generados para el vaso

Descripción	Canales Con- vencionales	Canales de conformación generados
Tiempo del ciclo teórico para el vaso	4.192 s	3.158 s
Porcentaje del tiempo en operación del año	85 %	85 %
Segundos en operación anual	26,805,600 s	26,805,600 s
Producción anual teórica 1 máquina	6,394,466 piezas	8,488,158 piezas
Utilidad de cada pieza	\$0.11	\$0.11

Fuente: elaboración propia

El tiempo del ciclo teórico para el vaso, es dos veces el tiempo del ciclo de enfriamiento. Se asume que la máquina opera un 85 % del tiempo. La utilidad del vaso se basa en un margen de ganancia del 35 % sobre su precio en el mercado, que es aproximadamente GTQ 2.50 o USD \$0.32.

Cuadro 12: Flujo de efectivo para la implementación de un molde con canales de enfriamiento de conformación generados para el vaso

Flujo de efectivo	Canales Con- vencionales	Canales de confor- mación generados	Utilidad Extra	Valor Presente
1 año	\$703,391.26	\$933,697.38	\$230,306.12	\$200,266.19
2 años	\$703,391.26	\$933,697.38	\$230,306.12	\$174,144.51
3 años	\$703,391.26	\$933,697.38	\$230,306.12	\$151,430.01
			Total:	\$525,840.72

Fuente: elaboración propia

Para el flujo efectivo de 3 años de operación, se ajustó la utilidad extra al valor presente con una tasa de rentabilidad del 15 %.

El costo del molde, fue estimado a un 20 % más que su costo aproximado. Se consideró un paro de operaciones de 1 mes para su instalación y la mitad de su costo en costos varios. El valor total fue redondeado hacia arriba para un análisis menos conservador.

Según el flujo de efectivo, se proyecta una recuperación del capital en el primer semestre del primer año. En un plazo de 3 años superando el valor futuro de un plazo fijo.

Cuadro 13: Inversión aproximada para la implementación de un molde con canales de enfriamiento de conformación generados para el vaso

Descripción	Valor
Costo molde	\$12,000.00
Costo detener operación 1 mes	\$58,615.94
Costos varios molde	\$6,000.00
Total de Inversión redondeado hacia arriba	\$77,000.00

Fuente: elaboración propia

Cuadro 14: Comparación contra inversión segura en la implementación de un molde con canales de enfriamiento de conformación generados para el vaso

Descripción	Valor
Capital a invertir	\$77,000.00
Tasa anual certificado de depósito a plazo fijo	5.25 %
Valor futuro a 3 años plazo fijo	\$89,775.34
Valor futuro a 3 años canales	\$448,840.72
Diferencia	\$359,065.38

Fuente: elaboración propia

7.9. Discusión de resultados

Inicialmente, se planificó utilizar Autodesk Moldflow para analizar la temperatura de enfriamiento, eficiencia y otros factores clave en los canales de enfriamiento. Sin embargo, durante la fase de experimentación, se identificó que Autodesk Moldflow se divide en dos versiones: Moldflow Advisor y Moldflow Insight. La versión disponible para el investigador fue Moldflow Advisor, la cual carece de funcionalidades avanzadas, incluyendo la capacidad de analizar detalladamente el enfriamiento de los canales, lo que limitó su uso para los fines específicos de este estudio.

Por otro lado, Moldflow Insight, que sí posee estas capacidades avanzadas, estaba fuera del presupuesto asignado para la investigación, lo que llevó a la necesidad de explorar alternativas. Tras una revisión de opciones, se seleccionó Moldex3D, un *software* que ofreció las herramientas necesarias para realizar simulaciones detalladas del enfriamiento y la eficiencia de los canales. Esta decisión permitió continuar con los análisis previstos y obtener datos relevantes para la evaluación comparativa de los canales de enfriamiento, asegurando así la validez y solidez de los resultados obtenidos en la investigación.

Los resultados obtenidos en Moldex3D demuestran que los canales de enfriamiento de conformación generados presentan un tiempo de enfriamiento menor en comparación con los canales de enfriamiento convencionales. En el caso del vaso, se observó una disminución aproximada de 3.077 grados Celsius en la temperatura, mientras que en la geometría del casco se evidenció una reducción de 3.053 grados Celsius. Estos resultados confirman que los canales de conformación mejoran el proceso de enfriamiento, como se anticipó en el marco teórico de este estudio.

Los resultados muestran que los canales de enfriamiento de conformación generados fueron responsables de una reducción significativa en los tiempos de enfriamiento comparados con los canales convencionales. En el caso del vaso, se logró una disminución de 0.517 segundos, mientras que en el casco la reducción fue de 5.087 segundos. En los procesos de inyección plástica, incluso una reducción mínima en el tiempo de enfriamiento se traduce en mejoras acumulativas que incrementan la eficiencia de la producción, permitiendo un mayor número de ciclos en un período determinado y, por ende, un aumento en la productividad.

La marcada diferencia en la mejora del tiempo de enfriamiento, de apenas medio segundo en el vaso a más de cinco segundos en el casco, subraya el impacto crítico que tiene la geometría del molde en la efectividad del canal de enfriamiento. Esta observación confirma que no todas las geometrías responden de la misma manera a los canales de conformación, y que la forma y complejidad del molde son determinantes en la magnitud de las mejoras en el ciclo de inyección.

La eficiencia de enfriamiento de los canales de conformación en comparación con los tradicionales mostró un incremento notable para ambas piezas evaluadas. En el caso del vaso, la eficiencia aumentó en un 3.392 %, mientras que para el casco, la mejora fue del 1.35 %. Estos resultados indican que los canales de conformación generados no solo contribuyen a una reducción en los tiempos de enfriamiento, sino que también optimizan la transferencia de calor de manera significativa.

Sin embargo, al comparar los canales de conformación generados con los canales de conformación tradicionales en forma de espiral, no se logró una reducción adicional en la temperatura, en el tiempo ni una mejora en la eficiencia. Estas observaciones sugieren que, aunque los canales de conformación generados son efectivos en comparación con los canales convencionales, su rendimiento no supera al de los canales de conformación convencionales en todos los casos.

La comparación contra los canales de enfriamiento convencionales subraya la efectividad de conformar los canales de enfriamiento a la geometría de la pieza moldeada, destacando los beneficios teóricos investigados en este trabajo. Sin embargo, la falta de mejora frente a los canales de conformación tradicionales en espiral revela aspectos importantes a considerar:

La eficiencia del canal de enfriamiento está fuertemente determinada por la geometría de la pieza moldeada:

- Para geometrías con cavidades, como vasos, cascos o guacales, los canales de enfriamiento en espiral demuestran ser más eficientes debido a su capacidad de cubrir de manera más uniforme y cercana la superficie del molde.
- Los canales espirales se adaptan mejor a las formas amplias y permiten un control más preciso del enfriamiento sobre la superficie del molde, lo que maximiza la transferencia de calor.
- En geometrías más complejas, irregulares o asimétricas, donde no predominan las cavidades grandes, los canales de conformación tradicionales en espiral pueden ser menos efectivos. En estos casos, los canales de conformación generados por *software* tienen mayor potencial para adaptarse, ya que permiten configuraciones geométricas más complejas que no serían posibles con métodos tradicionales. Este tipo de canal

justifica el uso de la sinterización 3D como el método de fabricación preferido, debido a su capacidad para producir diseños no convencionales con alta precisión.

La herramienta generativa de Autodesk Fusion 360 empleó el criterio de minimizar la caída de presión entre los puntos de entrada y salida del flujo como uno de los objetivos de diseño para los canales de enfriamiento de conformación. Sin embargo, este es solo uno de varios criterios que podrían emplearse para optimizar el diseño de los canales. En el futuro, es probable que aparezcan nuevas herramientas y programas en el mercado con capacidades más específicas y avanzadas, orientadas a mejorar la eficiencia de los canales de enfriamiento de conformación.

Es importante destacar lo siguiente en el proceso de generación de canales de enfriamiento en el *software* Autodesk Fusion 360: es necesario aplicar múltiples restricciones geométricas para delimitar la creación del diseño. Esto significa que, con suficientes limitaciones, el canal generado estaría más influenciado por las decisiones del diseñador que por el propio *software*. De ahí la importancia de explorar diversas alternativas de programas.

Las diferentes iteraciones revelaron lo siguiente: al incrementar la fuente de flujo en las iteraciones A5 a A8, se observó un aumento en la caída de presión. En las iteraciones A8 a A11 se exploraron distintas proporciones del volumen objetivo: 50 %, 25 %, 12.5 % y 6.25 %. Se recomienda experimentar con reducir el volumen al mínimo posible, siempre que se mantenga dentro de los límites de caída de presión aceptables. Además, al comparar dos iteraciones idénticas, A11 y A12, se evidenció que el programa no genera dos resultados con propiedades idénticas, lo que refleja una característica interesante de la inteligencia artificial generativa.

Los resultados de la comparación del número de Reynolds resultaron inconclusos para cumplir con el objetivo 4, que consistía en comparar el número de Reynolds de los moldes con canales de conformación mediante simulaciones.

Es esencial explorar estas nuevas opciones de *software*, ya que podrían ofrecer resultados más satisfactorios y alineados con las necesidades específicas de cada geometría moldeada. La evolución de la tecnología y el desarrollo de nuevos algoritmos de diseño generativo permitirán optimizar aún más los canales de enfriamiento, superando las limitaciones actuales y logrando un mayor rendimiento térmico en aplicaciones industriales.

Finalmente, el análisis costo-beneficio permite evaluar cómo un canal de enfriamiento de conformación puede influir positivamente en la rentabilidad de un proceso de inyección plástica. Aunque se utilizan varios datos aproximados, su validez radica en que, al reducir el tiempo del ciclo, se incrementa el número de ciclos posibles en un periodo determinado, lo que conlleva una reducción de costos.

Conclusiones

1. Autodesk Fusion 360 fue elegido por su disponibilidad, costo y facilidad de uso en el diseño generativo de canales de enfriamiento, demostrando su efectividad inicial.
2. El molde diseñado en Autodesk Inventor cumplió su función para las pruebas de enfriamiento, pero es necesario evaluar moldes con geometrías más complejas y asimétricas para validar el impacto de la geometría en la eficiencia de los canales de enfriamiento.
3. Se diseñaron exitosamente canales de enfriamiento convencionales y de conformación generados para los moldes, añadiendo un tercer punto de comparación con canales de conformación tradicionales en forma de espiral.
4. Las simulaciones en Moldex3D permitieron comparar la temperatura de enfriamiento, tiempo hasta la temperatura de eyección, flujo de calor por unidad de área y la eficiencia de los canales de enfriamiento en moldes con canales convencionales, de conformación generados y de conformación convencionales en espiral.
5. Una reducción de 5.087 segundos en el tiempo del ciclo de enfriamiento de 30.626 segundos conduce a un incremento de USD \$159,685.71 en la rentabilidad de la producción del casco en un plazo de 3 años.

Recomendaciones

1. Se recomienda explorar otras opciones de software generativo con el objetivo de mejorar la eficiencia de los canales de conformación generados contra los de conformación en espiral.
2. Es necesario evaluar moldes con geometrías más complejas y asimétricas para analizar el impacto de la geometría en la eficiencia de los canales de enfriamiento.
3. Se sugiere diseñar piezas con un espesor de pared constante, ya que la ausencia de variaciones minimiza el gradiente de tiempo de enfriamiento.
4. Es recomendable comparar en las simulaciones un canal de enfriamiento de conformación generado por *software* con uno más común, como el de conformación espiral.
5. Se sugiere adquirir la licencia de Autodesk Moldflow para realizar las simulaciones correspondientes en dicho software, el cual presenta más opciones que Moldex3D.
6. Se recomienda utilizar *software* adicional para generar curvas tiempo-temperatura y analizar las variaciones de temperatura en piezas con espesores constantes. Esto permitirá enfocarse en esas áreas, en lugar de centrarse únicamente en el tiempo total de enfriamiento, que suele estar influenciado por las zonas de mayor espesor.
7. Para futuros usos del *software* Fusion 360, se recomienda validar la suposición del programa que indica que una caída de presión superior a 5 psi podría hacer que el número de Reynolds disminuya por debajo del rango deseado (3,000 a 10,000).
8. Se recomienda realizar una simulación específica para analizar el número de Reynolds a lo largo de la trayectoria del flujo en los canales, utilizando una licencia extendida del software Moldex3D o explorando el uso de otro software similar.

- Albert. (2019). Generating Designs for Manufacturability. *Modern Machine Shop*.
- Arman & Lazoglu. (2023). A comprehensive review of injection mold cooling by using conformal cooling channels and thermally enhanced molds. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- Au & Yu. (2007). A scaffolding architecture for conformal cooling design in rapid plastic injection moulding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34(5), 496-515.
- Au & Yu. (2016). Modeling of multi-connected porous passageway for mould cooling. *Computer Aided Design*, 43(8), 989-1000.
- Autodesk. (2023). Fusion 360 Help. *Autodesk.com*.
- Beard. (2014). Why Conformal Cooling Makes Senses. *Plastics Technology*, 34-37.
- Beard. (2022). How to Know the True Value of Conformally Cooled Injection Molds. *Plastics Technology*.
- Bin, Liang, Xianda & Ping. (2016). Optimal design of longitudinal conformal cooling channels in hot stamping tools. *Applied Thermal Engineering*.
- Brooks & Bridgen. (2016). Design of conformal cooling layers with self-supporting lattices for additively manufactured tooling. *Additive Manufacturing*, 11, 16-22.
- Continental, G. (2024). Certificado de Depósito a plazo. *GT Continental*.
- Dickens, Norwood, Soar, Harris, Gibbons & Hansell. (2003). Analysis of cooling channels performance. *Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 0, 0.
- Gao, Dong & Tang. (2021). Machine Learning Aided Design of Conformal Cooling Channels for Injection Molding. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 34(3), 1183-1201.
- Hsu, Huang & Chang. (2020). Investigation on conformal cooling system design in injection molding. *Advances in Production Engineering Management*, 8(2), 107-115.
- Jahan, Wu & Zhang. (2016). Implementation of Conformal Cooling Topology Optimization in 3D Printed Stainless Steel Porous Structure Injection Molds. *Procedia Manufacturing*, 48, 901-908.

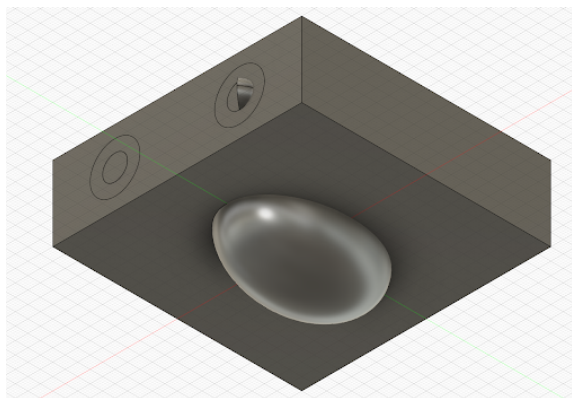
- Mayer. (2009). Optimised mould temperature control procedure using DMLS. *e-Manufacturing Solutions*.
- PAInternational. (2018). Plastic Mold Part Design Guideline. *www.pa-international.com*.
- Rannar, Glad & Gustafson. (2016). Efficient Cooling with Tool Inserts manufactured by electron beam melting. *Additive Manufacturing*, 11, 16-22.
- RexPlastics. (2013). How Much Does Plastic Injection Molding Cost? *Plastic Injection Molds*.
- Rosato & Rosato. (2012). *Injection Molding Handbook*. Springer Science Business Media.
- Shayfull, Sharif & Zain. (2013). Milled Groove Square Shape Conformal Cooling Channels in Injection Molding Process. *Materials Manufacturing Processes*, 28(8), 884-891.
- Tan, Wang & Ma. (2020). Additive manufacturing of conformal cooling molds with self-supporting channels and tailored porous structures. *Materials and Design*, 196, 109-147.
- TruCool. (2017). Conformal Cooling Inserts. *DME Milacron*.
- Up mold. (2017). Injection Mold Cooling Design guideline for Core Core Pin. *Up mold Technology Limited*.
- Vang. (2018). Conformal cooling vs Standard cooling. *Popular Plastics Packaging*, 31-32.
- Wang, Zheng, Bae & Kang. (2023). Comprehensive performance enhancement of conformal cooling process using thermal-load-based topology optimization. *Applied Thermal Engineering*.
- Wilson, Gupta, Patel, Mazur, Nguyen, Gulzia & Cole. (2023). Generative Design of Conformal Cooling Channels for Hybrid-Manufactured Injection Moulding Tools. *The International Journal for Advanced Manufacturing Technology*.
- Wu & Tovar. (2018). Design for additive manufacturing of conformal cooling channels using thermal-fluid topology optimization and application in injection molds. *In Proceedings of the ASME 2018 International Design Engineering Technical Conferences Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2018*, 11, 1.

11.1. Anexo 1: Protocolo de utilización de Fluid Path Study en Autodesk Fusion360

Para realizar el proceso de Fluid Path Study, se deben seguir los siguientes pasos.

1. Abrir un modelo existente. O alternativamente, modelarlo dentro de Fusion 360.

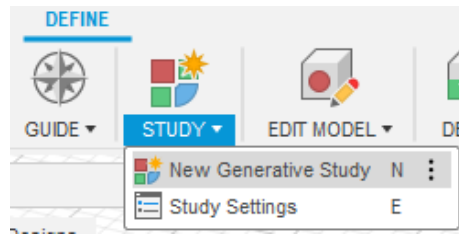
Figura 68: Modelo hecho en Fusion 360.



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

2. En el ajuste de "Workspace", abrir "Generative Design Workspace".
3. Crear un nuevo "Generative study".

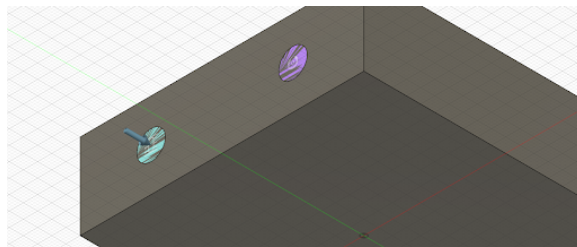
Figura 69: Creación de un estudio generativo.



Fuente: Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

4. Seleccionar 'Fluid Path' como el tipo de estudio a crear.
5. Seleccionar 'Create Study'.
6. Entrar al ambiente contextual 'Edit Model'.
7. Crear la geometría obstáculo, de preservación y de forma inicial.
8. Seleccionar "Finish Edit Model".
9. Definir un "Design Space", seleccionar los cuerpos previamente diseñados.
- 9.1 Preserve Geometry: la entrada y la salida del flujo.

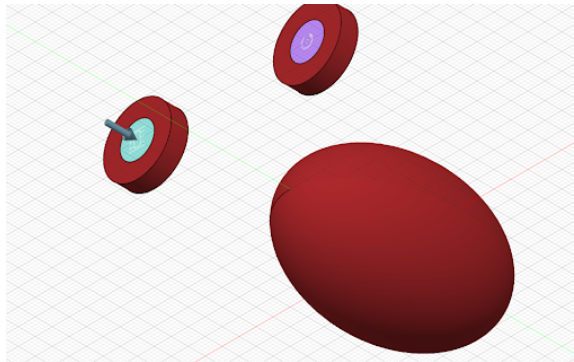
Figura 70: Visualización de Preserve Geometry.



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

- 9.2 Obstacle Geometry: cuerpos que deseamos evitar en el camino del flujo.

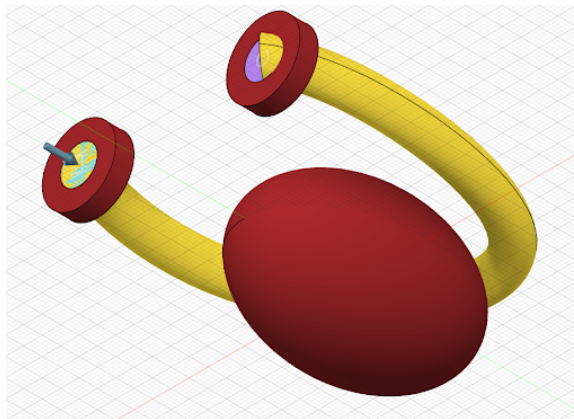
Figura 71: Visualización de Obstacle Geometry.



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

9.3 Starting Shape: guía para el diseño generativo.

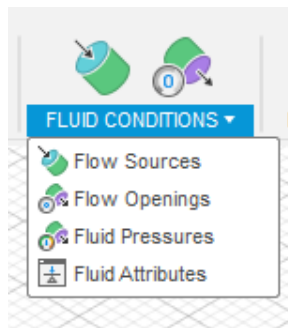
Figura 72: Visualización de Starting Shape.



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

10. Definir las entradas y salidas del flujo.

Figura 73: Visualización de entradas y salidas del flujo.



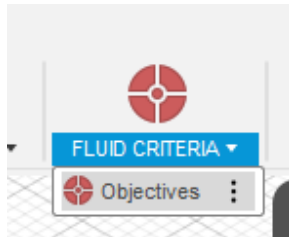
Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

10.1 Para el Flow Source: seleccionar Flow Rate, y seleccionar la cara plana del cuerpo de la geometría seleccionada. Asignar una magnitud de flujo volumétrico.

10.2 Para el Flow Opening: seleccionar otra cara plana de la geometría seleccionada, y seleccionar presión 0 Gauge Pressure. Con el objetivo de descartar la presión atmosférica, para ver claramente las caídas de presión.

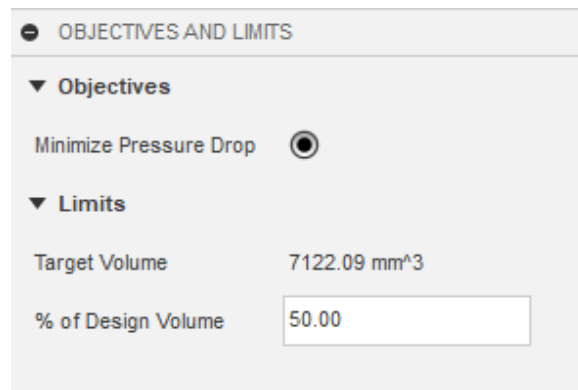
11. Seleccionar el criterio del flujo y los objetivos.

Figura 74: Visualización del criterio de flujo.



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

Figura 75: Visualización de los objetivos.



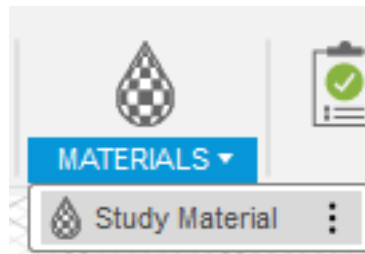
Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

12. Se autoselecciona el "Minimize Pressure Drop".

13. El porcentaje de volumen de diseño es un porcentaje del volumen inicial de la figura de inicio.

14. Especificar el material del flujo.

Figura 76: Visualización del material del flujo.

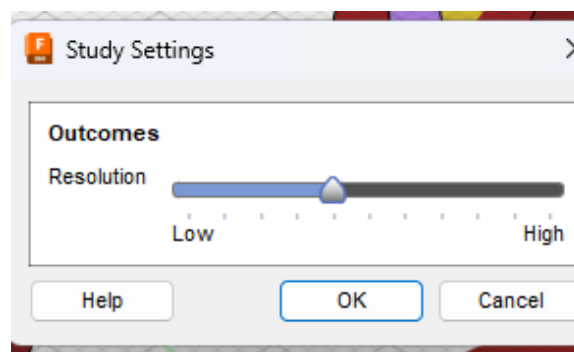


Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

14.1 Puede ser agua, aire u otro material personalizado por viscosidad.

15. Especificar la resolución del resultado, dependiendo del porcentaje de calidad deseada y el poder de cómputo disponible (se recomienda utilizar un 50% para no sobrecargar al programa).

Figura 77: Visualización de la resolución del resultado.

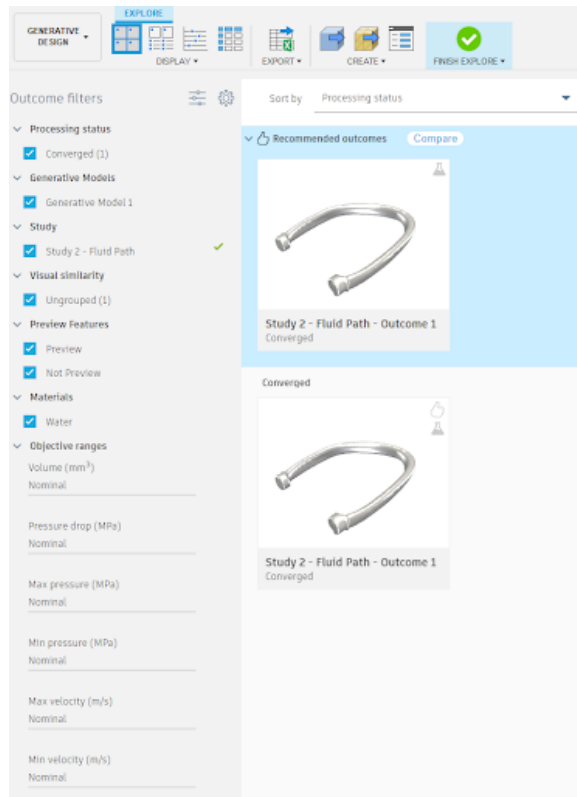


Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

16. En la barra de herramientas, seleccionar el estudio y generarlo.

17. Ver el resultado en 'Explore'.

Figura 78: Visualización de la sección 'Explore'.



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

18. Ver el resultado en "Design Preview".

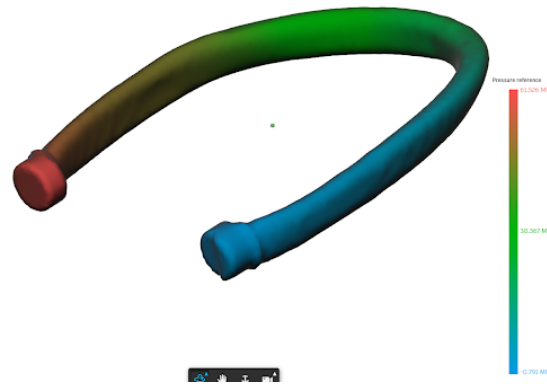
Figura 79: Visualización de la sección 'Design Preview'.



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

19. Observar las caídas de presión con "Pressure View".

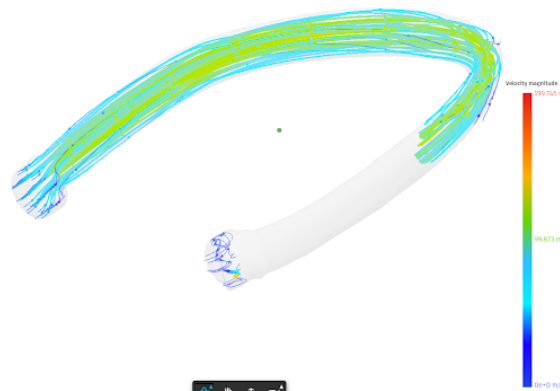
Figura 80: Visualización de las caídas de presión.



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

20. Observar el movimiento del fluido y su velocidad a través de "Fluid Line View".

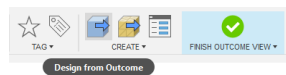
Figura 81: Visualización del movimiento del fluido y su velocidad.



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.

21. Si el resultado es deseable, generar un diseño a partir de él.

Figura 82: Generación de resultados.



Fuente: Captura de pantalla de Autodesk reimpressa por cortesía de Autodesk, Inc.