

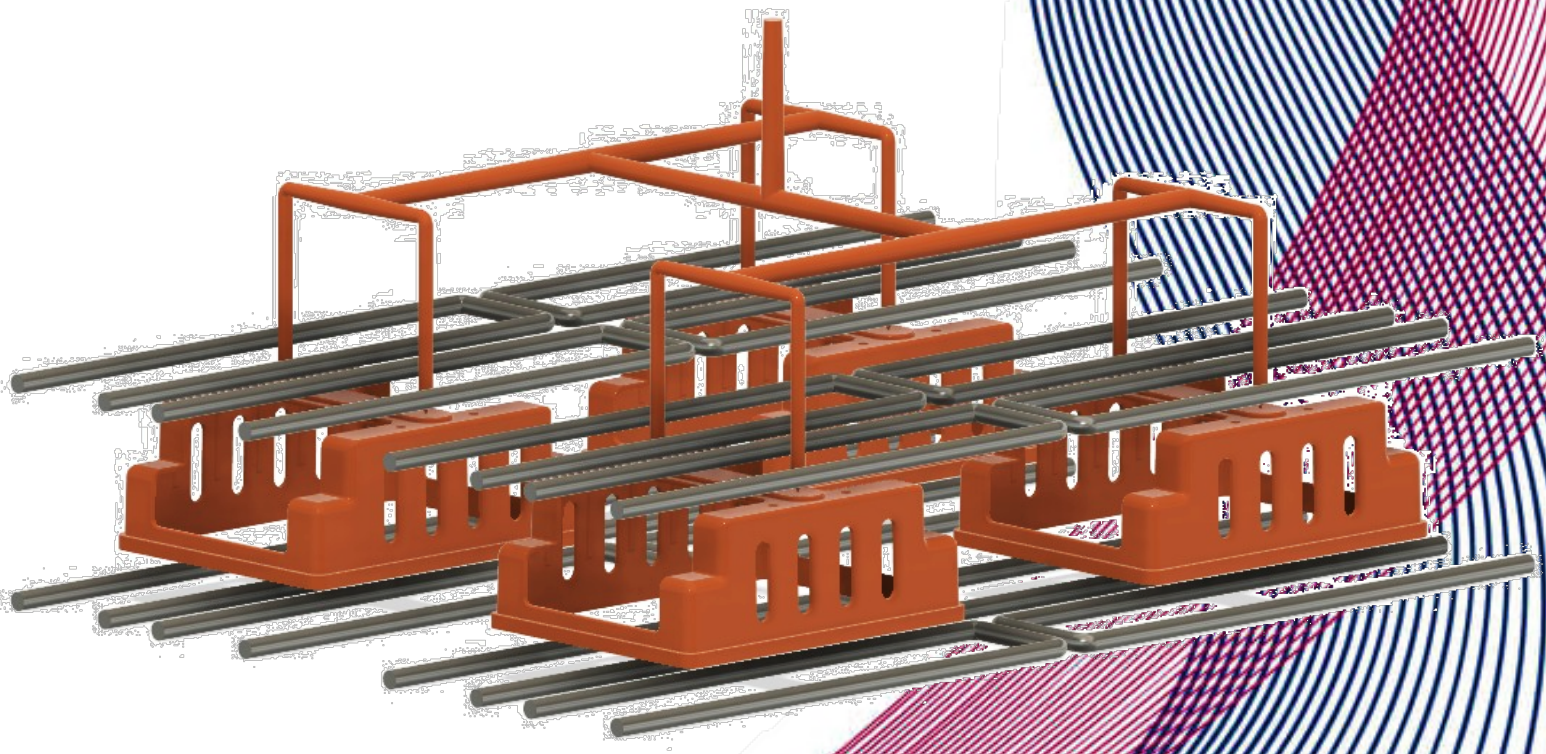
DISEÑO, MODELADO Y SIMULACIÓN DE MOLDES PARA MATERIALES POLIMÉRICOS MEDIANTE HERRAMIENTAS DIGITALES 3D

TRABAJO DE FIN DE GRADO EN INGENIERÍA
MECÁNICA

LUCIA BEZANILLA CEREZAL

UNIVERSIDAD DE VALLADOOLID

2024-2025





Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica
DISEÑO, MODELADO Y SIMULACIÓN DE MOLDES
PARA MATERIALES POLIMÉRICOS MEDIANTE
HERRAMIENTAS DIGITALES 3D**

Autor:

Bezanilla Cerezal, Lucía

Tutor:

Dr. Luis Eduardo Alonso Pastor

Tutor Externo:

Lorena Rivas Hernández

**CMelM/Área de Ingeniería de los
Procesos de Fabricación**

Valladolid, Septiembre de 2025

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo el diseño, modelado y validación de un molde de inyección para la fabricación de una caja de fusibles en el sector de la automoción, utilizando las herramientas digitales 3D Autodesk Fusion 360 y Autodesk Moldflow Adviser. Se construyó un modelo 3D conforme a los requisitos técnicos de la pieza y se analizaron distintas configuraciones del proceso mediante simulaciones. Se evaluaron tres materiales poliméricos, polipropileno, poliestireno y ABS, descartándose el primero por su bajo rendimiento dimensional y el segundo por sus tiempos de ciclo elevados. A partir del análisis de múltiples configuraciones se seleccionó un sistema de alimentación en H por ser el único que garantizó un llenado uniforme entre cavidades. Asimismo, se validaron dos sistemas de refrigeración, con y sin baffles, resultando ambos viables, aunque se optó por la versión sin baffles por su simplicidad y coste de fabricación reducido. Finalmente, se determinaron las condiciones óptimas de procesamiento para garantizar un flujo equilibrado, buena calidad térmica y ausencia de defectos críticos. El diseño final adoptado integra el layout en bloque, refrigeración sin baffles y ABS como material, asegurando la viabilidad del molde y la estabilidad dimensional de la pieza inyectada.

PALABRAS CLAVE

Simulación, Diseño para Manufactura (DFM), Autodesk Moldflow, Polímeros termoplásticos y Moldeo por inyección.

ABSTRACT

This project aims to design, model, and validate an injection mold for the manufacturing of a fuse box used in the automotive sector, employing 3D digital tools such as Autodesk Fusion 360 and Autodesk Moldflow Adviser. A 3D model was developed based on the technical specifications of the part, and various process configurations were analyzed through simulations. Three thermoplastic materials (polypropylene, polystyrene, and ABS) were evaluated; the former was discarded due to poor dimensional performance, and the latter due to longer cycle times. Among the tested alternatives, an H-type runner layout was selected as it provided the most balanced filling across cavities. Two cooling systems were validated—one with baffles and one without—both of which were viable; however, the simpler and more cost-effective baffle-free system was chosen. Optimal processing conditions were defined to ensure balanced flow, thermal quality, and avoidance of critical defects. The final mold design combines the H-type runner layout, baffle-free cooling system, and ABS material, ensuring process feasibility and dimensional stability of the injected part.

KEYWORDS

Simulation, Design for manufacturing (DFM), Injection molding, Autodesk Moldflow and Thermoplastic polymers

AGRADECIMIENTOS

“Quiero agradecerles a mi madre y a mis hermanos por estar a mi lado durante esta etapa, que no siempre ha sido sencilla. Gracias por vuestra paciencia y por intentar entenderme en momentos complicados.

En especial a Rubén y Andrea, gracias por ser guías, consejeros y ejemplos.

Y a mi padre, porque de algún modo siento que también me ha acompañado en este camino. Estoy segura de que, donde esté, se sentirá orgulloso.”

ÍNDICE

LISTA DE ABREVIATURAS	17
LISTA DE ILUSTRACIONES:	19
LISTA DE TABLAS:	23
1. Introducción, Objetivos y Estructura.....	27
1.1. Introducción	27
1.2. Objetivos.....	30
1.2.1. Objetivo General	30
1.2.2. Objetivos Específicos.....	30
1.3. Estructura.....	31
2. Marco teórico	33
2.1. Materiales poliméricos	34
2.1.1 Estructura de los polímeros	34
2.1.2 Tipos de estructura polimérica	37
2.1.3 Tipos de polímeros	38
2.2. Procesos de transformación	40
2.3 Moldeo por inyección.....	41
2.3.1. Etapas del ciclo de moldeo	42
2.3.2. Parámetros de operación.....	44
2.4 Moldes para inyección.....	45
2.4.2 Materiales para la fabricación de moldes	52
2.4.3. Tipos de moldes.....	54
2.4.4 Distribución de cavidades: layouts y tipos de sistema de alimentación	56
2.5 Defectos en inyección de piezas plásticas	58
2.6. Diseño para Manufactura o DFM	68

2.6.1.	Criterios generales de diseño - Validación del diseño	68
2.6.2.	Ubicación de puntos de inyección	69
2.6.3.	Evaluación del diseño de la pieza sin molde	70
2.6.4.	Evaluación de la calidad de enfriamiento y análisis de defectos mediante simulación	70
2.6.5.	Sistema de alimentación y cavidades múltiples	71
2.6.6.	Sistema de refrigeración	73
2.6.7.	Evaluación de deformaciones	74
3.	Materiales y Métodos	77
3.1.	Materiales considerados para la pieza	77
3.2.	Molde	79
3.2.1.	Elección del material	79
3.2.2.	Elección de la colada	79
3.2.3.	Elección del tipo de molde	79
3.3.	Software empleado	79
3.3.1.	Autodesk Fusion 360	79
3.3.2.	Autodesk Moldflow Adviser	80
4.	Resultados y discusión	81
4.1.	Validación de Diseño	84
4.1.1.	Análisis de la variación de los espesores.	84
4.1.2.	Análisis de la extracción de la pieza	85
4.1.3.	Análisis de los ángulos de desmoldeo	86
4.1.4.	Modificación y validación del nuevo modelo	87
4.2.	Estudio Ubicación de las entradas	89
4.2.1	Escenario A, 1 entrada	90
4.2.2	Escenario B, 2 entradas	91
4.2.3	Escenario C, 3 entradas	92

4.2.4	Escenario D, 4 entradas.....	93
4.3	Selección de las condiciones de inyección.....	95
4.3.1	Determinación de las condiciones de inyección: Escenarios A, 1 entrada	95
4.3.2	Determinación de las condiciones de inyección: Escenarios B, 2 entradas	96
4.4	Simulación del proceso de llenado	97
	Evaluación de la simulación de llenado con parámetros óptimos	98
	Caída de presión / Presión Max.	99
	Confiabilidad y Calidad.....	100
	Evaluación de llenado con parámetros tras iteración	101
4.5.	Análisis de la Calidad de Refrigeración y de los Rechupes	108
4.6.	Diseño del sistema de alimentación y de las cavidades múltiples..	113
	Sistema de alimentación	114
	Prueba de diferente LAYOUTS	115
	Caída de Presión.....	117
	Confiabilidad y calidad del llenado y calidad de enfriamiento	118
	Temperatura del frente de flujo.....	118
	Tiempo de llenado y tiempo de ciclo	119
4.7.	Refrigeración.....	124
	Tiempo de eyección y tiempo de ciclo.....	129
	Número de Reynols	129
	Variación de la temperatura en el circuito.....	129
	Calidad de Refrigeración.....	130
4.8.	Simulación Completa	131
5.	Presupuesto Detallado de las Actividades	137
	Términos y Condiciones	139

6.	CONCLUSIONES	141
6.1.	Conclusiones técnicas	141
	Validación del diseño	141
	Análisis de la ubicación de las entradas.....	141
	Determinación de las condiciones óptimas de procesamiento	142
	Estudio del llenado	142
	Evaluación de la calidad térmica y rechupes	143
	Diseño del sistema de alimentación y cavidades múltiples.....	143
	Análisis de configuraciones de refrigeración.....	144
	Evaluación global del proceso de inyección	144
6.2.	Conclusiones Personales	145
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	147
	ANEXOS	151
	A1. Anexo del Marco Teórico -Defectos	152
	A2. Anexo de indicaciones de Moldflow.....	154
	A3. SIMULACIONES ADICIONALES de la Etapa de llenado - iteración de los parámetros de inyección.....	156
	A4. Etapa del diseño del sistema de alimentación	160
	PS-Bloque.....	165
	A5. Etapa de diseño de sistemas de refrigeración	166
	Diseño Con Baffles	166
	Diseño Sin Baffles	166
	A6. Etapa de simulación completa con tiempo de empaquetamiento.....	167
	Con Baffle PP	167
	Sin Baffle PP	167
	Con Baffle ABS.....	167
	Sin Baffle ABS	168

A7. ANEXO PLANOS DE LA PIEZA Y DEL MOLDE	169
--	-----

LISTA DE ABREVIATURAS

ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
CAD	Diseño asistido por ordenador
cm³	centímetro cúbico
CNC	Control Numérico por Computadora
D, Ø	Diámetro
DFM	Diseño para Manufactura
DP	Grado de Polimerización
e.g	<i>example given</i> , ejemplo dado
g	gramos
h	hora
kg	kilogramo
mm³	milímetro cúbico
Nº	Número
OERER	Shrinkage, Orientation and Warpage
PA	Poliamida
PE	Polietileno
PET	Tereftalato de polietileno
PMMA	Polimetilmetacrilato
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
Pto	Punto
PvT	Presión, Volumen y Temperatura
PVC	Policloruro de Vinilo
Re	Reynolds
Ref	Referencia
RESIS	Resistencia
T^a	Temperatura
Tg	Temperatura de transición vítrea
Tm	Temperatura de fusión
v	Velocidad del Fluido
μ	Viscosidad del Fluido
°C	Celsius
ρ	Densidad
€	Euro

LISTA DE ILUSTRACIONES:

Ilustración 1.1 Gráfico que muestra la evolución del uso de los plásticos desde 1950 hasta 2010[10].....	29
Ilustración 1.2 Modelo 3D (CAD) de la pieza de estudio.	29
Ilustración 2.1 Tipos de estructuras poliméricas [12]	36
Ilustración 2.2 Estructura semicristalina donde se ven las diferentes zonas amorfas y cristalinas[13]	37
Ilustración 2.3 Máquina Convencional de Inyección	42
Ilustración 2.4 Distribución aproximada de tiempos por etapa en un ciclo de moldeo por inyección[15]	44
Ilustración 2.5 Esquema de un molde de inyección.[19]	46
Ilustración 2.6 Estructura básica de la base del molde de inyección[19]	47
Ilustración 2.7 Tipos de sistema de refrigeración y elementos que lo componen.[18]	50
Ilustración 2.8 Esquema de un molde de dos placas. [32].....	55
Ilustración 2.9 Esquema de un molde de tres placas[24]	56
Ilustración 2.10 Representación de los distintos Layouts: Árbol, Bloque(H) y Radial.....	57
Ilustración 2.11 Representación esquemática de (a) Puntos negros y; (b) Vetas negras [26].....	58
Ilustración 2.12 La parte degradada tiende a ser quebradiza y a romperse fácilmente [26]	59
Ilustración 2.13 Burn Marks [26].....	59
Ilustración 2.14 Representación esquemática de la delaminación, que provoca desprendimiento por capas en la superficie de una pieza moldeada. [26].....	61
Ilustración 2.15 Usar una puerta de solapamiento para evitar el chorro [26] ..	61
Ilustración 2.16 La variación dimensional es un cambio inesperado en las dimensiones de la pieza. [26]	62
Ilustración 2.17 Representación esquemática de los ojos de pez. Los materiales no fundidos en el flujo de fusión causan ojos de pez. [26].....	63
Ilustración 2.18 Rebaba [26]	63
Ilustración 2.19 Representación de las líneas de soldadura, unión de dos flujos de diferentes direcciones. Viene delimitado por el ángulo, la escala de colores	64
Ilustración 2.20 Weld and Meld Line representación de cómo se forman y como se difiere diferencian.....	64
Ilustración 2.21-Flow Marks [26]	65
Ilustración 2.22-Silver Streaks [26]	66
Ilustración 2.23 Las marcas de hundimiento y los vacíos se crean por la contracción del material sin suficiente compensación. [26]	66
Ilustración 2.24-Ripples	67
Ilustración 2.25-(a) Llenado normal sin ondas (b) Generación de ondas con pared de molde fría y baja velocidad del frente de flujo [26]	67
Ilustración 4.1 Diagrama de Flujo del Proceso	83
Ilustración 4.2 Vista superior del resultado de la simulación del análisis de variación de espesores.	84

Ilustración 4.3 Vista inferior del resultado de la simulación del análisis de variación de espesores.	84
Ilustración 4.4 Resultado del análisis de la extracción de la pieza del molde.	86
Ilustración 4.5 Vista superior e inferior de los resultados del análisis del draft Angle de la pieza del molde.	86
Ilustración 4.6- Zonas Conflictivas Zero Draft que hay que modificar.....	87
Ilustración 4.7 Ajustes realizados en el modelo para incorporar ángulos de desmoldeo.....	88
Ilustración 4.8 Comparación de la pieza tras la modificación geométrica, donde se ve ese cambio en los ángulos de desmoldeo y en el redondeo de aristas vivas.	89
Ilustración 4.9 Resultado del análisis de ubicación de entrada para el escenario de 1 entrada.	91
Ilustración 4.10 Vista en planta del resultado del escenario A. Se puede observar que el flujo es simétrico y balanceado.....	91
Ilustración 4.11 Resultado del análisis de ubicación de entrada para el escenario de 2 entradas.....	91
Ilustración 4.12 Restricciones aplicadas. En rojo se encuentran las zonas prohibidas y en verde las zonas donde pueden ubicarse las entradas.	92
Ilustración 4.13 Resultado del análisis de ubicación de entrada para el modelo restringido del escenario de 2 entradas.	92
Ilustración 4.14 Vista en planta del resultado del escenario B para el modelo restringido. Se puede observar que el flujo es simétrico y balanceado.	92
Ilustración 4.15 Resultado del análisis de ubicación de entrada para el escenario de 3 entradas.....	93
Ilustración 4.16 Vista en planta del resultado del escenario C para el modelo restringido. Se puede observar que el flujo no es simétrico ni está balanceado.	93
Ilustración 4.17 Resultado del análisis de ubicación de entrada para el modelo restringido del escenario de 3 entradas.....	93
Ilustración 4.18 Vista en planta del resultado del escenario A. Se puede observar que el flujo no es simétrico y está desbalanceado.	94
Ilustración 4.19 Resultado del análisis de ubicación de entrada para el escenario de 3 entradas.....	94
Ilustración 4.20 Localización exacta del punto de entrada para el escenario con una única entrada.	96
Ilustración 4.21 Localización exacta de los puntos de entrada para el escenario con 2 entradas.....	97
Ilustración 4.22 Ventana de proceso de los escenarios con 1 entrada.....	102
Ilustración 4.23 Ventana de proceso de los escenarios con 2 entradas.....	102
Ilustración 4.24 Mapa de distribución térmica en la superficie de la pieza al finalizar el llenado. Las zonas en tonos cálidos (rojos y naranjas) indican áreas con mayor concentración de temperatura, principalmente localizadas en las esquinas y regiones más alejadas del punto de inyección. Las áreas en tonos fríos (azules y verdes) representan zonas con menor temperatura.	110
Ilustración 4.25 Predicción de zonas con riesgo de marcas de rechupe en la superficie de la pieza.	111
Ilustración 4.26 Curva PVT del polipropileno: evolución del volumen específico frente a temperatura.....	111

Ilustración 4.27 Curva PVT del Poliestireno: evolución del volumen específico frente a Temperatura y la presión Curva PVT del Poliestireno: evolución del volumen específico frente a Temperatura y la presión.....	112
Ilustración 4.28 Curva PVT del ABS: evolución del volumen específico frente a Temperatura y la Presión	113
Ilustración 4.29 Imagen del modelo del sistema de alimentación.....	115
Ilustración 4.30 Representación de las diferentes configuraciones de distribución de cavidades (o layouts) consideradas.	115
Ilustración 4.31 Gráfica de Plot Viscosity del PS	120
Ilustración 4.32 Gráfica de Plot Viscosity del PP.....	121
Ilustración 4.33 Gráfica de Plot Viscosity del ABS	121
Ilustración 4.34 Vista Isométrica del Layout en bloque o H, el cual se ha visto que es el más viable y se usará en las simulaciones posteriores. Se señalan los distintos elementos y su dimensionado.	123
Ilustración 4.35 Vista en Planta del Layout en bloque o H, el cual se ha visto que es el más viable y se usará en las simulaciones posteriores. Se muestra la disposición de las cavidades	123
Ilustración 4.36 Representación de los elementos del sistema de refrigeración Con baffles, el de sin baffles sería idéntico, pero sin este elemento marcado de amarillo verdoso.	126
Ilustración 4.37 Esquema detallado del modelo del sistema de refrigeración superior.	127
Ilustración 4.38 Esquema detallado del modelo del sistema de refrigeración inferior.	127
Ilustración 4.39 Esquema detallado del modelo del sistema de refrigeración que cuenta con la incorporación de un deflector (baffle).....	128
Ilustración 4.40 Sistema de Refrigeración CON Baffles.....	130
Ilustración 4.41 Sistema de refrigeración SIN Baffles.....	131
Ilustración 4.42 Modelo 3D del molde.	135
Ilustración 4.43 Modelo 3D del sistema de alimentación, refrigeración y distribución del Layout definitiva.....	136

LISTA DE TABLAS:

Tabla 1.1 Comparativa de Propiedades de Materiales [3,4]	28
Tabla 2.1 Propiedades de los polímeros amorfos y semicristalino donde se ve una diferencia en el comportamiento de cada uno [10,11].....	38
Tabla 2.2 Comparación de procesos de transformación de polímeros.[12].....	41
Tabla 2.3 Ventajas y desventajas de los principales materiales utilizados en la fabricación de moldes para moldeo por inyección. [19,20].....	54
Tabla 2.4 Diferencia entre defectos similares[24]	65
Tabla 3.1-Características de los materiales considerados en el trabajo[3,9,12]	77
Tabla 3.2-Parámetros de los Materiales Plásticos[9,12]	78
Tabla 4.1 Escenarios considerados para el estudio de las ubicaciones de entrada.....	90
Tabla 4.2 Escenarios viables (en verde) y descartados (en rojo) según los criterios de obtener un patrón de flujo balanceado, unidireccional y simétrico, y evitar zonas comprometidas que dificulten el llenado o generen defectos.....	94
Tabla 4.3 Resumen de los escenarios analizados para la selección de las condiciones de inyección.....	95
Tabla 4.4 Resultados del análisis de las condiciones de inyección de los escenarios A.....	96
Tabla 4.5 Resultados del análisis de las condiciones de inyección de los escenarios B.	97
Tabla 4.6 Condiciones iniciales determinadas por el software para la simulación del proceso de llenado.....	98
Tabla 4.7 Resultados de la simulación de llenado según las condiciones óptimas determinadas por el software.....	98
Tabla 4.8 Resumen de los resultados referentes a la presión en la simulación de llenado. El color verde indica que el escenario es viable, mientras que el rojo señala los escenarios no viables (> 180 MPa).	99
Tabla 4.9 Resumen de los resultados referentes a la confiabilidad y calidad en la simulación de llenado. El color verde indica que el escenario es viable, mientras que el rojo señala los escenarios no viables.....	100
Tabla 4.10 Nuevas condiciones de inyección tras la iteración para la simulación del proceso de llenado.....	103
Tabla 4.11 Resultados de la simulación de llenado según las nuevas condiciones.....	103
Tabla 4.12 Resumen de los resultados referentes a la presión en la simulación de llenado tras modificación de los parámetros. El color verde indica que el escenario es viable, mientras que el rojo señala los escenarios no viables (> 180 MPa).	104
Tabla 4.13 Resumen de los resultados referentes a la confiabilidad y calidad en la simulación de llenado tras modificación de los parámetros. El color verde indica que el escenario es viable, el rojo señala los escenarios no viables y el amarillo aquellos que se encuentran en un margen de tolerancia aceptable.....	105

Tabla 4.14 Resumen de los resultados referentes a la temperatura del frente del flujo en la simulación con las nuevas condiciones. El color verde indica que el escenario es viable, mientras que el rojo señala los escenarios no viables...	106
Tabla 4.15 Resumen de los resultados referentes al tiempo de ciclo estimado en la simulación de llenado. El color verde indica los escenarios con menor tiempo de ciclo, mientras que el rojo señala aquellos con el tiempo más elevados y en amarillo aquellos que se encuentran en un margen de tolerancia aceptable.	107
Tabla 4.16 Tabla resumen con las conclusiones de la simulación realizada con las nuevas condiciones de inyección. El color verde indica los escenarios viables, el rojo señala aquellos que no lo son y en amarillo aquellos que se encuentran en un margen de tolerancia aceptable.	108
Tabla 4.17 Resultados de calidad de enfriamiento y marcas de rechupe.....	109
Tabla 4.18 Comparación de variación de volumen de los diferentes materiales.	112
Tabla 4.19 Dimensionado del Sistema de Alimentación aplicado a todos los escenarios.	114
Tabla 4.20 Resultados de los diferentes diseños tras la simulación de llenado y refrigeración. Se compara de rojo los layouts que no reparten el flujo de manera homogénea y de verde los que si lo hacen.	116
Tabla 4.21 Resumen de los resultados referentes a la presión en la simulación de llenado de cavidades múltiples. El color verde indica que el escenario es viable (presión max. requerida < 180 MPa).	117
Tabla 4.22 Comparativa entre la presión demandada para el llenado de una única cavidad y para 4 cavidades, también se indica el incremento de dicha presión respecto.	118
Tabla 4.23 Resumen de Resultados tras las simulaciones, de los valores de Temperatura alcanzados en cada escenario en comparación con a la máxima de cada material para analizar si hay degradación. El verde indica que no supera dicho limite.	119
Tabla 4.24 Resumen de resultados de tiempo, calidad de llenado y refrigeración y confiabilidad. Siendo verde los buenos resultados y rojo aquellos que no lo son tanto.	119
Tabla 4.25 Comparación Aproximada de las viscosidades durante el proceso de llenado.	121
Tabla 4.26 Dimensionado del Sistema de refrigeración aplicado a los diseños, con y sin de refrigeración	125
Tabla 4.27-Temperatura del caudal de Refrigeración empleada de acuerdo con la teórica.	126
Tabla 4.28 Representación de las diferentes configuraciones de sistema de alimentación.	128
Tabla 4.29 Resumen de Resultados de los diseños de CON y SIN Baffles. Verde quiere decir que los valores están por encima del límite. Rojo que están por debajo.	129
Tabla 4.30 Resumen de la calidad de refrigeración de las distintas configuraciones. Verde marca que estan por encima del umbral siendo aceptables.	130
Tabla 4.31 Resultados de los diferentes diseños tras la simulación completa de llenado, refrigeración, empaquetamiento y contracción	132

Tabla 4.32 Resumen de los resultados de warpage y defflection, causa de los efectos de contracción, orinetación, empaquetamineto y enfriamientos. Comparando los rojos aquellos que sobrepasan considerablemente el umbral, amarillo los que se mantienen próximos y verdes los que se encuentran por encima.....	132
Tabla A3.1 Resultados de cada iteración en el escenario PP con 2 entradas	156
Tabla A3.2 Resultados de cada iteración en el escenario PS con 2 entradas	157
Tabla A3.3 Resultados de cada iteración en el escenario ABS con 2 entradas	157
Tabla A3.4 Resultados de cada iteración en el escenario PP con 1 entrada .	158
Tabla A3.5 Resultados de cada iteración en el escenario ABS con 1 entrada	158
Tabla A3.6 Resultados de cada iteración en el escenario PS con 1 entrada .	159

1. Introducción, Objetivos y Estructura

1.1.	Introducción	27
1.2.	Objetivos.....	30
1.2.1.	Objetivo General	30
1.2.2.	Objetivos Específicos.....	30
1.3.	Estructura.....	31

1.1. Introducción

El moldeo por inyección es, en la actualidad, uno de los procesos de transformación de plásticos más utilizados a nivel industrial.[1] Su importancia radica en la capacidad de producir piezas con geometrías complejas, alta precisión dimensional y excelentes acabados superficiales, todo ello con tiempos de ciclo reducidos y un aprovechamiento eficiente del material. Esto ha convertido al moldeo por inyección en una tecnología clave para la fabricación en masa de componentes plásticos en sectores como la electrónica, el embalaje, la medicina, los bienes de consumo y, de forma destacada, la industria automotriz.

Históricamente, este proceso tiene su origen en el año 1872, cuando los hermanos John Wesley e Isaiah Hyatt patentaron la primera máquina de inyección destinada al procesamiento de celuloide, uno de los primeros materiales termoplásticos. En 1919, Arthur Eichengrün desarrolló la primera prensa de moldeo por inyección de acetato de celulosa plastificado. Posteriormente, durante la Segunda Guerra Mundial, la necesidad de materiales ligeros, económicos y de fácil transformación impulsó la creación de polímeros sintéticos como el poliestireno y el polietileno, lo que aceleró la adopción industrial del moldeo por inyección. A partir de mediados del siglo XX, los avances en materiales, automatización, sistemas de control y diseño asistido por ordenador (CAD) consolidaron este proceso como una de las soluciones más versátiles y eficientes de la manufactura moderna.[2,3]

Actualmente, más del 70 % de los componentes plásticos industriales se producen mediante moldeo por inyección, especialmente cuando se requiere alta repetibilidad y geometrías complejas. Este crecimiento está estrechamente vinculado a las ventajas que presentan los polímeros frente a materiales tradicionales como los metales o los cerámicos. [4] La Tabla 1.1 resume las diferencias generales entre estos materiales en términos de propiedades físicas, coste y facilidad de procesamiento:

Tabla 1.1 Comparativa de Propiedades de Materiales [5,6]

Propiedad	Polímeros (ej. PE)	Metales (ej. Al, Acero)	Cerámicos (ej. Alúmina)
Densidad (kg/dm ³)	0.9 – 1.4	2.7 – 7.8	3.5 – 6.0
Módulo de Young (GPa)	0.5 – 3	70 – 210	150 – 400
Temperatura uso (°C)	50 – 200	300 – 600	>1000
Coste aproximado (€/kg)	1 – 5	0.5 – 2.5	>10
Facilidad de moldeo	Alta	Media	Baja
Reciclabilidad	Alta (termoplásticos)	Alta	Baja

Tal y como puede observarse, los plásticos destacan por su baja densidad, coste relativamente bajo y alta moldeabilidad. Estas características, combinadas con su capacidad para adaptarse a diseños complejos, explican su integración masiva en aplicaciones industriales, Ilustración 1.1. En sectores como la automoción, estas ventajas se traducen en soluciones más ligeras, económicas y funcionales.[7,8]

La industria automotriz ha sido uno de los principales impulsores del uso de polímeros en ingeniería, buscando constantemente reducir el peso de los vehículos, mejorar la eficiencia energética y mantener, o incluso mejorar la resistencia mecánica de sus componentes. Mientras que los primeros automóviles estaban compuestos casi íntegramente por materiales metálicos, hoy en día existe una clara transición hacia el uso de plásticos, particularmente en piezas no estructurales[9]. Esta evolución se refleja en el aumento progresivo del contenido de plástico por vehículo, que ha pasado de aproximadamente 50 kg en los años 80 a más de 200 kg en la actualidad, donde todavía se observa una tendencia en aumento. En la Ilustración 1.1 se muestra esta progresión en los últimos 60 años.

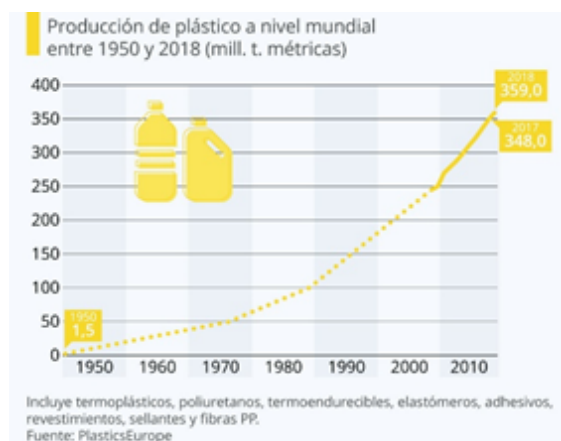


Ilustración 1.1 Gráfico que muestra la evolución del uso de los plásticos desde 1950 hasta 2010[10]

El uso de polímeros no solo permite reducir peso y consumo de combustible, sino también integrar múltiples funciones en una misma pieza, mejorar el aislamiento acústico y térmico, ampliar la libertad de diseño y facilitar el reciclaje. Actualmente, se estima que entre el 15 % y el 20 % del peso de un vehículo moderno corresponde a piezas plásticas, como carcasas de faros, paneles interiores, soportes, conductos de aire, depósitos, elementos de fijación, entre otros. Este protagonismo creciente no se debe únicamente a la ligereza o eficiencia de los materiales, sino también a las posibilidades que ofrece el moldeo por inyección en términos de diseño, integración funcional y reducción de costes.[7,8]

En este contexto se enmarca el presente proyecto, centrado en el análisis de una caja de fusibles, Ilustración 1.2, situada en el capó de un vehículo. Dado que se trata de una pieza con geometría compleja, la cual requiere de una alta reproducibilidad, su fabricación se ha planteado mediante moldeo por inyección de plástico.

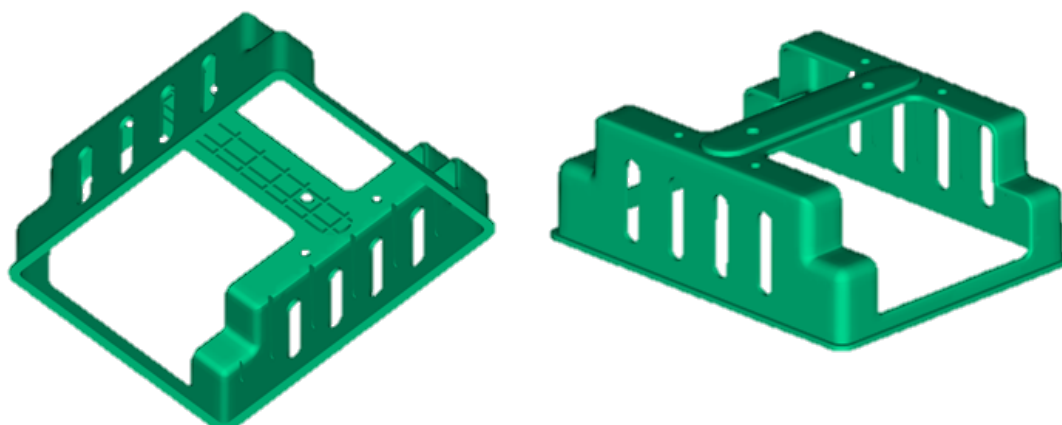


Ilustración 1.2 Modelo 3D (CAD) de la pieza de estudio.

La importancia de este trabajo radica por tanto en su contribución a la optimización del diseño de moldes mediante herramientas de simulación, lo que

permite reducir significativamente los costes y tiempos asociados a la fabricación tradicional basada en ensayo y error. Dado que la construcción de un molde puede suponer una inversión de entre 50.000 y 100.000 dólares, resulta fundamental anticipar problemas potenciales y validar las decisiones de diseño antes de iniciar la producción.[8,11]

En este contexto, el presente proyecto busca simular digitalmente el proceso de inyección de una caja de fusibles automotriz utilizando el software *Autodesk Moldflow Adviser*. Esta herramienta especializada permite prever el comportamiento del flujo del material, optimizar el diseño del sistema de moldeo e identificar posibles defectos como rechupes, alabeos o llenado incompleto. Además, se emplea un enfoque de Diseño para Manufactura (*Design for Manufacturing, DFM*), orientado a adaptar la geometría de la pieza desde fases tempranas del desarrollo, con el fin de facilitar su producción, minimizar los residuos y reducir los tiempos de ciclo. Así, el uso de tecnologías de simulación y estrategias de diseño integrado se presenta como una solución técnica y económicamente viable, alineada con las demandas actuales de la industria.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es diseñar, modelar y validar un molde para la fabricación por inyección de una caja de fusibles de un automóvil, utilizando un polímero termoplástico.

Para alcanzar este objetivo, **se construirá un modelo tridimensional** conforme a las especificaciones del proyecto **y se determinarán las potenciales condiciones de manufactura**. Además, **se analizará el comportamiento del molde con diversos tipos de plásticos**, prestando especial atención a aspectos como el flujo del material, la calidad y el proceso de llenado y refrigeración. **Todo el análisis se llevará a cabo mediante herramientas digitales 3D como Autodesk Fusion 360 y Autodesk Moldflow Adviser.**

1.2.2. Objetivos Específicos

Para la consecución del objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- OE-1. Validar el diseño.** Obtener un diseño que presente una mínima variación de espesor, ángulos de desmoldeo adecuados y una correcta orientación de la pieza en el molde. Asimismo, se busca optimizar las aperturas del molde con el objetivo de reducir al máximo la cantidad de movimientos y componentes móviles.

- OE-2. Analizar la ubicación de las entradas.** Estudiar la configuración que favorezca un mejor balance de llenado, analizar cómo varía el patrón de flujo al incrementar el número de entradas y evaluar las implicaciones que esto tiene sobre el diseño final del molde, seleccionando las configuraciones cuyo flujo sea mejor.
- OE-3. Determinar las condiciones óptimas de procesamiento.** Evaluar la influencia según los distintos puntos de inyección y el tipo de material en las condiciones de moldeo, Con el fin de identificar cuál de los tres materiales seleccionados proporciona una ventana de proceso más amplia y cuál de ellos resulta más exigente en términos de procesabilidad.
- OE-4. Estudiar la etapa de llenado.** Analizar distintos escenarios de llenado de material en la cavidad, tomando en cuenta los materiales y condiciones de proceso previamente seleccionados. Comparar los resultados con cada configuración seleccionada y definir el material (o los materiales) que presenta los mejores resultados de llenado.
- OE-5. Evaluar de la calidad de refrigeración y aparición de rechupes.** Ampliar el análisis de llenado incorporando un estudio de predicción de marcas de rechupes, identificación de zonas críticas y evaluación de la calidad térmica del enfriamiento.
- OE-6. Modelar el sistema de alimentación y diseñar las cavidades múltiples.** Aplicando los principios de Diseño para Manufactura (DFM), seleccionar el sistema de alimentación y la configuración de cavidades más adecuadas para el caso de estudio.
- OE-7. Diseñar, modelar y analizar diferentes configuraciones de refrigeración.** Diseñar diferentes configuraciones de refrigeración sobre el sistema de alimentación elegido previamente, y compararlas para determinar cuál ofrece mejor eficiencia térmica, enfriamiento uniforme y menor tiempo de ciclo.
- OE-8. Evaluar globalmente el proceso de inyección.** Analizar el comportamiento de los dos materiales finales utilizando las configuraciones seleccionadas de refrigeración y el sistema de alimentación elegido. Se busca identificar la simulación que presente el menor tiempo de llenado, mejores acabados superficiales, mejor comportamiento y mayor ajuste a las tolerancias definidas.

1.3. Estructura

El documento se ha estructurado en diferentes capítulos con el fin de facilitar la comprensión del trabajo desarrollado. Tras esta introducción, en el Capítulo 1 se ha visto cómo se han definido los objetivos generales y específicos del proyecto,

así como el contexto y la motivación que justifican el proyecto, incluyendo una breve reseña del auge del moldeo por inyección en las últimas décadas. En el Capítulo 2, Marco Teórico, se exponen los fundamentos del proceso de inyección, las propiedades de los materiales poliméricos y los principales criterios de diseño empleados. En Materiales y métodos, capítulo 3, se recogen los materiales y la metodología seguida, detallando el modelado de la pieza, la configuración del molde y las herramientas de simulación utilizadas. En el capítulo 4: Resultados y discusión, se exponen los resultados obtenidos y su análisis, organizados según las distintas fases del estudio. Esta parte se desarrolla bajo una dinámica de *simulación-análisis-decisión*, lo que permitió comparar configuraciones, descartar opciones no viables y, en algunos casos, volver a modificar el diseño hasta alcanzar la solución más adecuada. El capítulo 5, el presupuesto, incluye una estimación de los costes, mientras que en el capítulo 6 se presentan las conclusiones técnicas y personales del trabajo. Finalmente, se aporta la bibliografía utilizada y una serie de anexos con información de soporte, como simulaciones adicionales y planos tanto de la pieza como del molde.

2. Marco teórico

2.1. Materiales poliméricos	34
2.1.1 Estructura de los polímeros	34
2.1.2 Tipos de estructura polimérica	37
2.1.3 Tipos de polímeros	38
2.2. Procesos de transformación	40
2.3 Moldeo por inyección.....	41
2.3.1. Etapas del ciclo de moldeo	42
2.3.2. Parámetros de operación.....	44
2.4 Moldes para inyección.....	45
2.4.2 Materiales para la fabricación de moldes	52
2.4.3. Tipos de moldes.....	54
2.4.4 Distribución de cavidades: layouts y tipos de sistema de alimentación	56
2.5 Defectos en inyección de piezas plásticas	58
2.6. Diseño para Manufactura o DFM	68
2.6.1. Criterios generales de diseño - Validación del diseño	68
2.6.2. Ubicación de puntos de inyección	69
2.6.3. Evaluación del diseño de la pieza sin molde.....	70
2.6.4. Evaluación de la calidad de enfriamiento y análisis de defectos mediante simulación	70
2.6.5. Sistema de alimentación y cavidades múltiples	71
2.6.6. Sistema de refrigeración	73
2.6.7. Evaluación de deformaciones	74

2.1. Materiales poliméricos

Según la norma UNE-EN ISO 472:2013, un polímero se define como una sustancia compuesta por macromoléculas formadas por la repetición de unidades estructurales derivadas de monómeros. Estas macromoléculas se generan a través de reacciones de polimerización, y pueden alcanzar pesos moleculares elevados, lo que otorga a los polímeros sus propiedades físicas y mecánicas características. En términos generales, un polímero está formado por una o varias unidades químicas repetidas, unidas mediante enlaces covalentes para formar largas cadenas moleculares. La mayoría de los polímeros utilizados en ingeniería moderna se derivan de compuestos orgánicos, en los que los átomos de carbono forman la columna vertebral de la cadena.

Hoy en día, los polímeros reemplazan cada vez con mayor frecuencia a componentes metálicos en aplicaciones como automóviles, aviones civiles y militares, artículos deportivos, juguetes, electrodomésticos y equipos de oficina. Esta sustitución refleja las ventajas competitivas de los polímeros:[6]

- Bajo coste relativo
- Resistencia a la corrosión y resistencia a los productos químicos
- Aislamiento eléctrico y térmico
- Baja densidad
- Alta relación resistencia-peso (especialmente si están reforzados)
- Reducción de ruido y vibraciones
- Amplio rango de colores, transparencias, posibilidades de diseños complejos y facilidad de manufactura

Otras características que pueden ser deseables o no (dependiendo de la aplicación) son su baja resistencia y rigidez, alto coeficiente de dilatación térmica, bajo rango de temperatura útil y poca estabilidad dimensional en el servicio durante cierto periodo. Además, muchos polímeros permiten obtener piezas finales con acabados superficiales óptimos sin necesidad de operaciones de mecanizado o postprocesado, lo que reduce los costes de producción en comparación con los metales.[6]

Los materiales poliméricos son fundamentales en la ingeniería moderna por su versatilidad, facilidad de procesamiento y capacidad de adaptación a múltiples formas y funciones. En aplicaciones como el moldeo por inyección, permiten fabricar componentes con alta precisión, bajos costes y menor peso, siendo clave en sectores como la automoción, la electrónica o la medicina.

2.1.1 Estructura de los polímeros

Las propiedades de los polímeros están estrechamente relacionadas con su estructura molecular, la cual depende de factores como la longitud de la cadena, la disposición espacial de los átomos, el grado de ramificación y la presencia o no de enlaces entre cadenas (reticulación). Estas características influyen en

aspectos clave como la resistencia mecánica, la flexibilidad, la viscosidad del fundido y la estabilidad térmica del material.

Desde el punto de vista químico, tal y como se ha introducido previamente, los polímeros se obtienen mediante reacciones de polimerización, que consisten en la unión repetida de moléculas pequeñas llamadas monómeros, formando macromoléculas de alto peso molecular. Existen dos grandes mecanismos de polimerización:

- Polimerización por adición o por crecimiento en cadena. En este mecanismo de polimerización, los monómeros se unen sucesivamente, sin que tenga lugar una pérdida de átomos, mediante la apertura de dobles enlaces. Este proceso es típico de polímeros como el polietileno (PE), polipropileno (PP) o poliestireno (PS).[12]
- Polimerización por condensación o de crecimiento por etapas. En este caso, las moléculas de polímero crecen paso a paso hasta que se consumen y los productos de reacción se condensan, lo que implica la eliminación de moléculas pequeñas, como agua o metanol. Este mecanismo es característico de polímeros como las poliamidas (PA) o los poliésteres (PET).[12]

Una magnitud fundamental para describir las macromoléculas poliméricas es el grado de polimerización (DP), definido como el número promedio de unidades repetidas por cadena. A mayor grado de polimerización, mayor es el peso molecular, lo que generalmente conlleva un aumento en la resistencia mecánica y la viscosidad del fundido. No obstante, se ha de tener en cuenta que una alta viscosidad puede afectar negativamente al proceso de formado y, por lo tanto, aumenta el costo de procesamiento.

Durante la formación del polímero, los monómeros se enlazan a través de enlaces covalentes (primarios), que confieren estabilidad a la cadena. Las interacciones entre cadenas poliméricas están determinadas por fuerzas secundarias como los enlaces de Van der Waals, puentes de hidrógeno o interacciones dipolo-dipolo. Aunque más débiles que los enlaces covalentes, estos enlaces secundarios son responsables de propiedades como la cristalinidad, la resistencia térmica o la rigidez del material. [12]

Desde una perspectiva estructural, las cadenas poliméricas pueden organizarse de diferentes maneras Ilustración 2.1, lo cual afectará significativamente las propiedades finales del material.

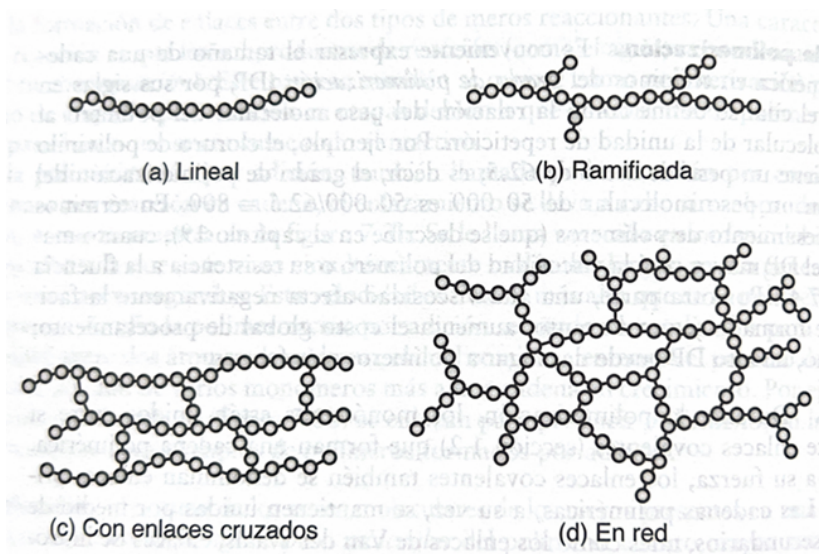


Ilustración 2.1 Tipos de estructuras poliméricas [12]

- Estructura lineal: los polímeros lineales están formados por cadenas largas en las que los monómeros se enlazan en una secuencia continua sin ramificaciones. Aunque el término "lineal" sugiere una forma recta, en realidad las cadenas pueden adoptar conformaciones en zigzag o enrolladas debido a la rotación alrededor de los enlaces. Estos polímeros suelen tener una alta capacidad de empaquetamiento, lo que favorece su cristalización y densidad. [12]
- Estructura Ramificada: en este tipo de polímero, la cadena principal presenta ramificaciones laterales formadas durante la polimerización. Estas ramas interfieren con la capacidad de las cadenas para ordenarse y compactarse, lo que reduce la densidad y el grado de cristalinidad. La presencia de ramificaciones también afecta la viscosidad del fundido y puede mejorar ciertas propiedades como la resistencia al impacto. [12]
- Estructura Reticulada (*cross-linked*): las cadenas poliméricas están conectadas entre sí mediante enlaces covalentes que forman un entramado tridimensional. Esta estructura impide el reblandecimiento al calentar el material, confiriendo una alta rigidez, estabilidad térmica y resistencia química. Es característica de los polímeros termoestables. [12]
- Estructura en red: en este caso, las macromoléculas forman una malla altamente entrelazada con múltiples puntos de unión covalente. Los polímeros con esta estructura presentan gran rigidez y baja deformabilidad, siendo empleados en aplicaciones que requieren alta resistencia mecánica y térmica. [12]

La disposición de las cadenas poliméricas a nivel molecular no solo determina la morfología del material, sino que también condiciona su capacidad para ordenarse en estructuras cristalinas o amorfas. Esta organización supramolecular es clave para entender su comportamiento térmico, mecánico y de procesabilidad, por lo que será analizada en la siguiente sección. [12]

2.1.2 Tipos de estructura polimérica

La cristalinidad en polímeros hace referencia al grado de orden molecular que presentan sus cadenas en estado sólido. A diferencia de los metales o los cerámicos, los polímeros no suelen cristalizar completamente, por lo que la mayoría se consideran materiales semicristalinos o amorfos, dependiendo de la disposición de sus cadenas macromoleculares.

En estado sólido, algunos polímeros son completamente amorfos mientras que otros son semicristalinos, aunque con frecuencia se utiliza el término cristalino en lugar de semicristalino pese a que ningún polímero es completamente cristalino. Características donde se ven las diferencias de uno a otro, Tabla 2.1.

Los polímeros amorfos presentan una estructura desordenada, Ilustración 2.2, en la que las cadenas se entrelazan sin formar patrones regulares. Esta morfología se describe habitualmente como una red enmarañada y se caracteriza por una alta tenacidad, buena transparencia y ausencia de un punto de fusión definido. Su comportamiento térmico está dominado por la temperatura de transición vítrea (T_g), por debajo de la cual el material se vuelve rígido y quebradizo. Ejemplos típicos de polímeros amorfos son el policarbonato (PC), el poliestireno (PS) o el PMMA. [12]



Ilustración 2.2 Estructura semicristalina donde se ven las diferentes zonas amorfas y cristalinas[13]

En los polímeros semicristalinos, Ilustración 2.2, parte de las cadenas logran alinearse en regiones ordenadas llamadas cristalitas. Estas zonas coexisten con regiones amorfas, generando una estructura bifásica. Los materiales semicristalinos tienen tanto una T_g como un punto de fusión (T_m) claramente definidos, y suelen presentar mayor rigidez, resistencia térmica y opacidad en

comparación con los amorfos. Ejemplos representativos incluyen el polietileno (PE), el polipropileno (PP) y las poliamidas (PA).

Tabla 2.1 Propiedades de los polímeros amorfos y semicristalino donde se ve una diferencia en el comportamiento de cada uno [12,13]

POLÍMERO	AMORFO	SEMICRISTALINO
CARACTERÍSTICAS	- Estabilidad dimensional - isotropía - posibilidad de transparencia - baja influencia en frío - viscosos - poca deformación post moldeo y más uniforme - tendencia a tensiones internas - menor concentración de moldeo y más uniforme - baja resistencia química: stress cracking	- resistencia química y por lo tanto baja tendencia a la rotura por ataque químico bajo tensión - resistencia a la fatiga - menor presencia de tensiones internas - anisotropía - contracciones de moldeo diferenciadas - menor estabilidad dimensional - mayor fluidez

La capacidad de un polímero para cristalizar depende principalmente de la regularidad estructural de sus cadenas, tanto química como geométrica, así como de las condiciones de enfriamiento durante el procesamiento. Estructuras con ramificaciones, grupos laterales voluminosos o copolimerización aleatoria tienden a dificultar la alineación molecular, reduciendo el grado de cristalinidad alcanzable.

A nivel práctico, el grado de cristalinidad afecta propiedades clave del material como:

- Densidad y rigidez: mayor en polímeros más cristalinos.
- Transparencia óptica: los polímeros amorfos tienden a ser más transparentes.
- Resistencia térmica y estabilidad dimensional.
- Contracción durante el enfriamiento en procesos como el moldeo por inyección.

Por tanto, entender y controlar la cristalinidad resulta esencial en procesos como el moldeo por inyección, donde influye en el comportamiento térmico, la contracción post-moldeo y la estabilidad dimensional de la pieza final. [12]

2.1.3 Tipos de polímeros

Los polímeros, entendidos como materiales poliméricos procesables, se clasifican en tres grandes grupos en función de su comportamiento térmico y estructura química: termoplásticos, termoestables y elastómeros. Esta clasificación resulta fundamental, ya que define su modo de procesado, su capacidad de reciclaje y su idoneidad para aplicaciones específicas, como el moldeo por inyección.

Termoplásticos

Los termoplásticos son polímeros que pueden fundirse al ser calentados y solidificarse al enfriarse sin sufrir cambios químicos significativos. Este comportamiento reversible se debe a que sus cadenas macromoleculares están unidas únicamente por fuerzas secundarias, sin enlaces covalentes entre ellas.

Se trata de un tipo de polímero lineal el cual pueden estar ramificado o no y que dado que no se encuentra entrecruzado presenta solubilidad en algunos disolventes orgánicos. Para que un polímero tenga aplicación como termoplástico debe tener una temperatura de transición vítrea (T_g) o una temperatura de fusión (T_m) superior a la temperatura ambiente.

Por lo general, los termoplásticos presentan un buen conjunto de propiedades mecánicas, son fáciles de procesar y bastante económicos. Entre sus ventajas destacan su facilidad de moldeo, soldadura y reciclaje, así como su capacidad para ser reprocesados múltiples veces sin sufrir degradación. No obstante, su principal desventaja deriva del hecho de que son materiales que funden, por lo que no pueden implementarse en aplicaciones a altas temperaturas. Algunos ejemplos de termoplásticos son el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el cloruro de polivinilo (PVC) y el tereftalato de polietileno (PET). [12]

Termoestables

Los polímeros termoestables se caracterizan por su estructura fuertemente reticulada. Durante su curado o procesado, desarrollan enlaces covalentes entre cadenas que forman una red tridimensional permanente. Esta estructura impide su reblandecimiento al calor, ya que el calentamiento posterior rompe la estructura antes que permitir su reflujo.

Los termoestables son materiales que adquieren un estado final reticulado (entrecruzado), que los hace insolubles e incapaces de fundir. Presentan por tanto una alta resistencia térmica, buena resistencia química, elevada rigidez y estabilidad dimensional. Sin embargo, requieren tiempos de procesado mayores y no son reciclables lo que puede suponer una desventaja en su aplicabilidad en la industria.

Gracias a su elevada rigidez, estabilidad térmica y resistencia química, los plásticos termoestables se emplean en aplicaciones eléctricas, automoción, adhesivos y recubrimientos. Algunos ejemplos representativos son la baquelita, un tipo de resina fenólica, las resinas epoxi, las resinas de poliéster insaturado y los poliuretanos termoestables. [12]

Elastómeros

Los elastómeros o cauchos son polímeros que pueden sufrir grandes deformaciones elásticas reversibles, recuperando su forma original una vez que cesa la carga. Esta propiedad se debe a su estructura molecular flexible, normalmente reticulada de forma ligera, que permite un estiramiento considerable sin ruptura de enlaces primarios.

Este tipo de materiales presentan dobles enlaces en la cadena principal, lo que les confiere gran flexibilidad. Son capaces de soportar grandes deformaciones y recuperar su forma inicial al cesar el esfuerzo. Requieren procesos de curado similares a los termoestables, y tienen aplicaciones donde se necesita alta tenacidad y resiliencia. Sus aplicaciones incluyen neumáticos, juntas, aislantes, amortiguadores y productos médicos.

En general, la elección entre un termoplástico, un termoestable o un elastómero dependerá del tipo de esfuerzo al que se someta la pieza, de las condiciones térmicas y químicas del entorno y del método de fabricación. En el caso del moldeo por inyección, los termoplásticos son los más utilizados por su facilidad de fusión y fluidez, lo que permite ciclos de producción rápidos, alta repetibilidad y geometrías complejas. [12]

2.2. Procesos de transformación

Los polímeros pueden ser transformados en productos útiles mediante una gran variedad de procesos industriales, que implican cambios físicos, principalmente térmicos y mecánicos, sin alterar sustancialmente la estructura química del material.

El proceso de transformación de un polímero tiene como objetivo darle una forma final específica, ya sea sólida o hueca, rígida o flexible, utilizando calor, presión y herramientas mecánicas. La elección del proceso adecuado depende del tipo de polímero (termoplástico o termoestable), de la geometría de la pieza, del volumen de producción y de las propiedades requeridas en el producto final.[6] Existen múltiples tecnologías de conformado de plásticos, entre las cuales destacan:

- Moldeo por inyección. Es el método más utilizado para termoplásticos y consiste en fundir el material e inyectarlo a presión dentro de un molde cerrado donde se enfría y solidifica. Permite producir piezas complejas con alta precisión y en grandes volúmenes.
- Extrusión. En esta técnica el polímero fundido se hace pasar a través de una boquilla o matriz para producir perfiles continuos, como tubos, láminas, películas o cables. Es ideal para grandes producciones de geometría constante.
- Soplado. Se trata de la técnica utilizada en la fabricación de envases huecos como las botellas. Para ello se infla un tubo extruido o una preforma inyectada dentro de un molde.

- Moldeo por compresión. Este tipo de proceso es especialmente empleado en polímeros termoestables, donde el material se introduce en un molde caliente y se comprime hasta su curado.
- Rotomoldeo. Se basa en introducir un polímero en polvo dentro de un molde que rota en dos ejes mientras se calienta, lo que permite crear piezas huecas de gran tamaño con paredes uniformes.

Cada técnica presenta ventajas y limitaciones específicas en cuanto a coste, tiempo de ciclo, tolerancias y tipos de geometría que se pueden conseguir. La siguiente Tabla 2.2 muestra una comparativa general entre algunos de los procesos más utilizados:

Tabla 2.2 Comparación de procesos de transformación de polímeros.[14]

PROCESO	APLICACIONES	VENTAJAS	LIMITACIONES
INYECCIÓN	Piezas técnicas, componentes automotrices, carcasas	Alta precisión, ciclos rápidos, automatización	Moldes costosos, no apto para piezas muy grandes
EXTRUSIÓN	Tubos, perfiles, láminas, películas	Producción continua, bajo coste por unidad	Geometría constante, acabado limitado
SOPLADO	Botellas, depósitos, envases	Buena uniformidad de paredes, bajo coste	Limitado a formas huecas
COMPRESIÓN	Tapas, componentes eléctricos, juntas	Buen control dimensional, bajo desperdicio	Tiempos largos, no apto para geometrías complejas
ROTOMOLDEO	Depósitos grandes, juguetes, mobiliario urbano	Bajo coste de molde, piezas grandes y sin tensiones	Tiempos largos, menor precisión

En este trabajo, el enfoque se centra en el moldeo por inyección de termoplásticos, dado que representa el proceso más adecuado para la producción de componentes complejos como la caja de fusibles objeto de estudio.

2.3 Moldeo por inyección

El moldeo por inyección es el proceso de fabricación de piezas de plástico más utilizado actualmente a nivel industrial, y representa una de las técnicas más

avanzadas para la producción en masa de componentes con formas complejas. Su versatilidad, precisión y capacidad de automatización lo han convertido en la principal tecnología para piezas plásticas técnicas en sectores como la automoción, la electrónica o los bienes de consumo.

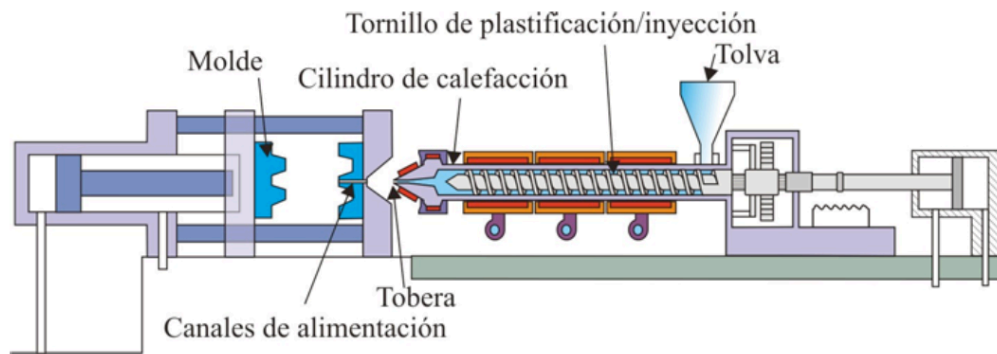


Ilustración 2.3 Máquina Convencional de Inyección

Este proceso, Ilustración 2.3, se basa en la inyección de material termoplástico previamente fundido a alta presión dentro de un molde metálico cerrado, el cual define la geometría final de la pieza. Una vez inyectado, el material se enfría hasta solidificarse y, finalmente, la pieza se expulsa del molde para iniciar un nuevo ciclo. Tal y como se explicó en el apartado anterior, en el caso de materiales termoplásticos, la capacidad de fundirse y solidificarse repetidamente sin reacciones químicas facilita su procesado en equipos automatizados como.

Como cualquier proceso industrial cíclico, el moldeo por inyección se compone de una serie de etapas claramente definidas que se repiten de forma secuencial. Cada una de estas fases desempeña un papel fundamental en la calidad final del producto y en la eficiencia global del proceso. A continuación, se describen en detalle las principales etapas que conforman el ciclo de moldeo por inyección.

2.3.1. Etapas del ciclo de moldeo

El ciclo de moldeo por inyección comprende una secuencia de operaciones técnicas que permiten transformar el polímero fundido en una pieza sólida con la geometría deseada. Cada etapa del ciclo de moldeo debe estar cuidadosamente controlada para garantizar la calidad dimensional, evitar defectos y optimizar el tiempo de producción.[15,16]

A continuación, se describen las fases más representativas del proceso:

1. Cierre del molde: Antes de la inyección, las dos mitades del molde (la cavidad y el núcleo) deben cerrarse con suficiente fuerza para resistir la presión interna sin que se produzcan fugas de material. Este cierre se realiza mediante sistemas de platinas accionados por mecanismos hidráulicos, eléctricos o híbridos.

2. Avance de la unidad de inyección: Una vez el molde está cerrado, la unidad de inyección se desplaza hacia adelante para acoplar la boquilla con el canal de entrada del molde, asegurando un sellado térmico y mecánico adecuado.
3. Inyección del material: El polímero previamente plastificado es introducido a alta presión en la cavidad del molde a través del sistema de alimentación, que incluye la boquilla, los canales de colada y las compuertas. Esta etapa debe asegurar un llenado completo y uniforme en el menor tiempo posible, minimizando turbulencias o atrapamientos de aire.
4. Presión de compactación: Una vez completado el llenado, se aplica una presión adicional para compensar la contracción del polímero durante el enfriamiento. Esta presión de mantenimiento ayuda a eliminar posibles vacíos internos, rechupes o deformaciones superficiales.
5. Retroceso del husillo: Una vez completada la fase de compactación, el husillo retrocede mientras se alimenta de nuevo con material granulado. Durante esta etapa se prepara la siguiente dosis de polímero fundido.
6. Enfriamiento: Durante esta fase, el material se solidifica dentro del molde mediante la transferencia de calor a través del sistema de refrigeración. El tiempo de enfriamiento suele ser el más prolongado del ciclo, y su optimización tiene un impacto directo sobre la productividad.
7. Apertura del molde. Tras confirmar la solidificación adecuada, el molde se abre para permitir la liberación de la pieza. Este movimiento debe realizarse de forma controlada para evitar deformaciones o roturas.
8. Expulsión de la pieza. La pieza moldeada se separa de los machos o cavidades mediante pasadores de expulsión, placas móviles o sistemas neumáticos. En moldes multicavidad, esta etapa puede repetirse en paralelo para varias piezas.
9. Tiempo con el molde abierto: Este periodo incluye el tiempo necesario para completar la expulsión y reiniciar el ciclo con el cierre del molde. Aunque es técnicamente una pausa, forma parte del ciclo total y puede optimizarse para reducir tiempos muertos.

Desde el punto de vista funcional, el proceso puede dividirse en dos grandes fases: la plastificación del material y su posterior inyección en el molde. En una máquina de inyección convencional, el polímero se introduce en forma de gránulos a través de una tolva situada en la parte posterior del cilindro calefactor. A medida que los gránulos avanzan, son fundidos mediante resistencias eléctricas y por el efecto de cizalladura generado por el husillo giratorio.

Durante esta fase, el husillo gira y retrocede simultáneamente, acumulando material fundido en su parte frontal. Cuando se alcanza la cantidad necesaria, el husillo se detiene y se desplaza axialmente hacia adelante, actuando como émbolo, e inyecta el fundido en la cavidad del molde. Una vez finalizada esta etapa, el husillo permanece en posición para evitar el retroceso del material, mientras que el molde mediante el sistema de refrigeración asegura el enfriamiento del polímero. Finalmente, el ciclo se reinicia con la plastificación del siguiente lote.

El tiempo total de ciclo está determinado por la duración de todas estas fases, especialmente el llenado, la compactación y el enfriamiento. La Ilustración 2.4 muestra un ejemplo de la distribución aproximada de tiempos por etapa en un ciclo de moldeo. Reducir estos tiempos sin comprometer la calidad del producto final es uno de los objetivos clave en el diseño de procesos de inyección. Para lograr ese equilibrio entre calidad y eficiencia, resulta imprescindible ajustar de forma precisa una serie de parámetros operativos, los cuales se analizan en el siguiente apartado.[15]

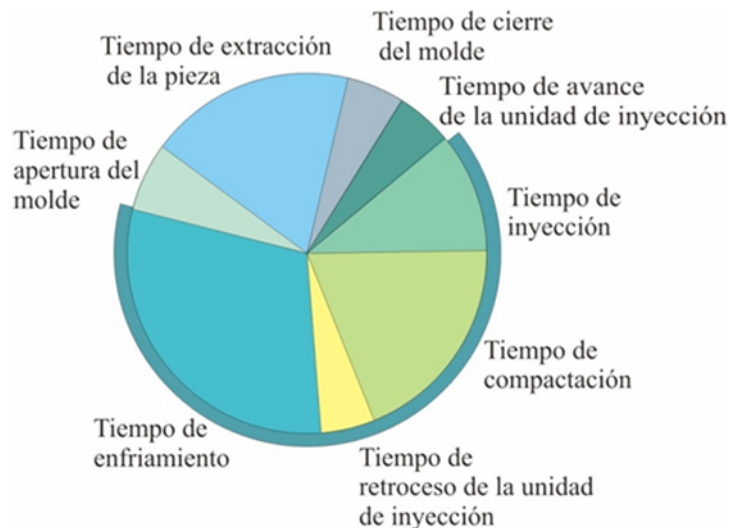


Ilustración 2.4 Distribución aproximada de tiempos por etapa en un ciclo de moldeo por inyección[15]

2.3.2. Parámetros de operación

Los parámetros de operación influyen de manera directa en el proceso de llenado, la calidad final de la pieza, la productividad del sistema y la aparición o no de defectos típicos como rebabas, alabeos o rechupes; convirtiéndolos en un punto clave del proceso de moldeo por inyección.[17] Los principales parámetros que se deben controlar en una máquina de inyección se describen brevemente a continuación: [15,18]

- Temperatura del cilindro de plastificación. Este parámetro controla la fusión del material termoplástico. Se regula en zonas específicas del cilindro (boquilla, zona frontal, media y trasera) y debe adaptarse a las características térmicas del polímero procesado. Una temperatura demasiado baja puede provocar un flujo deficiente, mientras que una excesiva puede degradar el material.
- Temperatura del molde. Determina el gradiente térmico entre el polímero fundido y las superficies del molde. Influye en la fluidez del material durante el llenado, en el desarrollo de tensiones internas y en el tiempo necesario para el enfriamiento.

- Velocidad de inyección. Controla la rapidez con la que el polímero es inyectado en la cavidad. Una velocidad demasiado baja puede provocar solidificaciones no deseadas; una velocidad excesiva puede generar turbulencias, atrapamiento de aire o quemaduras.
- Presión de inyección. Está relacionada con la capacidad del material para llenar completamente la cavidad. Una presión insuficiente puede producir llenados incompletos; un exceso puede generar rebabas o dañar el molde.[15,18]
- Presión de mantenimiento. Se aplica después del llenado para compensar la contracción volumétrica del polímero y evitar defectos como rechupes o vacíos.
- Tiempo de mantenimiento. Define cuánto tiempo se mantiene la presión después del llenado, asegurando que el material no retroceda mientras la compuerta solidifica.
- Tiempo de enfriamiento. Uno de los parámetros más determinantes en el tiempo de ciclo. Su optimización depende del tipo de polímero, espesor de pieza, temperatura del molde y eficacia del sistema de refrigeración.

El ajuste óptimo de estos parámetros requiere un compromiso entre calidad de la pieza, estabilidad del proceso y eficiencia energética. Además, estos valores varían en función del tipo de material, geometría de la pieza, diseño del molde y configuración del sistema de alimentación.

Por ello, cada vez es más habitual recurrir a herramientas de simulación como Autodesk Moldflow, que permiten anticipar el comportamiento del material y optimizar estos parámetros desde la fase de diseño, minimizando así los ensayos físicos, los costes de validación y los riesgos de defectos en producción.

2.4 Moldes para inyección

El molde constituye el elemento central del proceso de inyección, ya que define la forma final de la pieza, determina la calidad superficial y afecta directamente a la productividad del ciclo. Es, además, el componente más costoso de la línea de fabricación, motivo por el cual su diseño debe ser optimizado desde el punto de vista funcional, térmico y estructural.

Un molde de inyección está compuesto por distintos elementos mecánicos Ilustración 2.5, que cumplen funciones específicas: formar la cavidad de la pieza, permitir la inyección del polímero fundido, controlar el enfriamiento y garantizar la expulsión de la pieza sin daños.

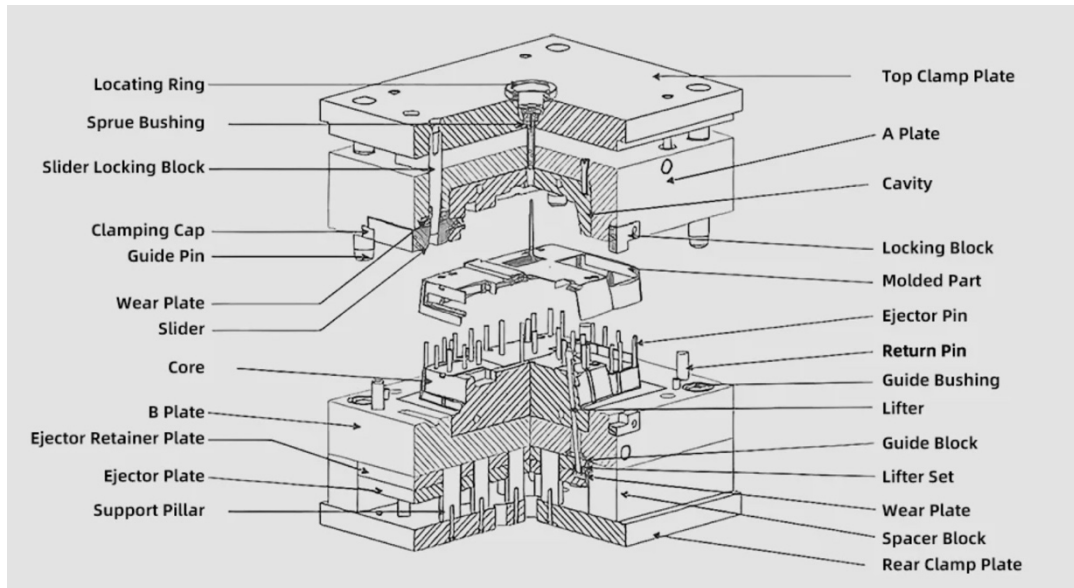


Ilustración 2.5 Esquema de un molde de inyección.[19]

Las dos partes principales de un molde de inyección son la mitad fija (cavidad), que permanece unida a la boquilla de la máquina, y la mitad móvil (núcleo), que se desplaza durante la apertura y contiene el sistema de expulsión. Ambas mitades están guiadas por columnas y casquillos que aseguran el cierre preciso. A su vez, se estructuran en subsistemas funcionales que se describen a continuación:

Base del molde

La base del molde constituye la estructura principal sobre la que se montan todos los componentes funcionales. Suele estar compuesta por placas metálicas estandarizadas, que requieren mecanizados específicos según el diseño del molde final. Dado que sus requisitos de fabricación difieren de los del resto del molde, es habitual que se encargue a fabricantes especializados para optimizar calidad y eficiencia. Actualmente, existen bases estándar disponibles de forma inmediata o personalizadas según las necesidades del molde, lo que aporta flexibilidad al proceso de diseño y producción.[20]

Una base típica Ilustración 2.6, incluye:

- Placa A (cavidad): aloja la cavidad del molde.
- Placa B (núcleo): fija el núcleo y puede extender la corredera.
- Placa C o espaciadora: da soporte y define el espacio para el sistema de expulsión.
- Placa de sujeción superior: conectada a la máquina de inyección, fija la placa A.
- Placa de retención del eyector y placa eyectora: fundamentales en la fase de expulsión.
- Placa trasera de sujeción: conecta la placa B con la máquina de inyección.



Ilustración 2.6 Estructura básica de la base del molde de inyección[19]

Sistema de moldeo: cavidad y núcleo

Es el espacio donde se moldea la pieza. Esta debe cumplir numerosos criterios de diseño para garantizar la calidad final. Puede contener una o varias cavidades, dependiendo del número de piezas por ciclo. La precisión y acabado superficial en esta zona son determinantes para la calidad del producto final.

- Cavidad del molde: es el elemento fijo del sistema de moldeo, define la forma exterior de la pieza. Soporta la presión de inyección y debe resistir el desgaste mecánico y térmico.
- Núcleo del molde: es el elemento móvil del sistema de moldeo, determina la forma interior de la pieza. Suele tener geometría más compleja y alojar insertos o canales internos.

Ambos trabajan juntos para definir la geometría total de la pieza, asegurar la distribución uniforme del flujo y evitar concentraciones de tensiones. [19]

Elementos móviles: correderas, elevadores e insertos

- Correderas (slides): permiten liberar socavados laterales en piezas. Se desplazan lateralmente antes de la apertura del molde.
- Elevadores: ayudan al desmoldeo interno de la pieza, permitiendo extraer geometrías internas o negativas mediante movimiento oblicuo controlado.
- Insertos: elementos metálicos o plásticos integrados en el molde mediante orificios o pasadores para permitir reparaciones, reducir el material en el núcleo, mejorar la ventilación o facilitar el mecanizado de

la pieza. Deben colocarse con precisión mediante pasadores o alojamientos.

Sistema de alimentación

El sistema de alimentación de un molde de inyección transporta principalmente la masa fundida de plástico desde la boquilla de la máquina de moldeo por inyección hasta cada cavidad. Incluye desde el canal principal de alimentación, que conecta la boquilla de la máquina con el molde o los bebederos, que distribuyen el material fundido a cada cavidad pasando por otros elementos como la compuerta, que regula el flujo y presión del polímero hacia la pieza. Por tanto, un sistema de alimentación suele estar constituido por los siguientes elementos:

- Bebedero: canal desde la boquilla hasta el distribuidor. el canal principal que conduce directamente a la compuerta de la pieza se denomina compuerta directa.
- Canales o corredores: tras pasar por el bebedero, el termoplástico fundido entra en el canal y se dispersa a través de estos conductos, permitiendo el moldeo simultáneo de varias piezas.
- Canales secundarios: en moldes con múltiples cavidades (e.g. 2×4), se dividen los corredores para balancear el flujo.
- Compuerta (entrada): regula el paso final del plástico hacia la cavidad. Su forma y tamaño influyen en la presión de llenado, las tensiones internas y el acabado superficial.
- Pozo frío: almacena el fundido inicial enfriado para evitar su entrada en la cavidad, mejorando así la calidad de la pieza. Suelen colocarse al final del bebedero o de los subcanales si estos son muy largos, con el fin de capturar el material y evitar así atascos.
- Colector: distribuye el plástico fundido desde la boquilla principal hacia cada punto de inyección, asegurando un llenado uniforme y un flujo equilibrado especialmente en colada caliente. También ayuda a mantener el equilibrio térmico mediante resistencias o anillos calefactores ya sea desde el interior de los canales o desde el exterior.

Es fundamental que el sistema esté balanceado para asegurar un llenado uniforme y simétrico en todas las cavidades del molde. Un mal diseño puede derivar en sobrellenado de unas piezas y falta de material en otras. [19]

Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración del molde es responsable de extraer el calor del material fundido para que éste solidifique de forma uniforme y en el menor tiempo posible. Su eficiencia afecta directamente al tiempo de ciclo, la calidad dimensional de la pieza y la vida útil del molde. Las funciones clave del sistema de refrigeración incluyen: bajar la temperatura del molde entre ciclos, minimizar deformaciones o alabeos causados por gradientes térmicos y mejorar la eficacia de producción acelerando la solidificación de la pieza.

El circuito de refrigeración, comúnmente denominado “línea de agua”, constituye el núcleo del sistema térmico del molde. A través de él circula agua de refrigeración desde la unidad térmica de la máquina de inyección hacia el interior del molde, con el objetivo de controlar su temperatura durante el ciclo de producción. El molde incorpora una red de canales internos por los que fluye el agua de forma continua. Durante el funcionamiento, tanto el caudal como la temperatura del fluido pueden regularse mediante dispositivos de control externos, lo que permite adaptar la refrigeración a las condiciones específicas del proceso o del material moldeado.

Para que el sistema de refrigeración sea eficiente, deben cumplirse ciertas condiciones de diseño térmico. Es fundamental que el flujo del refrigerante se mantenga en régimen turbulento, lo cual se logra cuando el número de Reynolds supera los 10.000; esta condición favorece una mayor transferencia de calor por convección. Asimismo, se recomienda que la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del circuito no supere los 2–3 °C, ya que un gradiente mayor puede indicar un enfriamiento desigual. Los canales de refrigeración deben ubicarse lo más cerca posible de las zonas críticas de la pieza, evitando áreas con escaso intercambio térmico para garantizar una disipación uniforme del calor.

Los diferentes elementos que podemos encontrar en un sistema de refrigeración son los siguientes Ilustración 2.7:

- Canales: El fluido de refrigeración fluye a través de espacios huecos perforados en la parte superior e inferior del molde por donde circula agua u otro refrigerante.
- Mangueras y acoplamientos: conectan la máquina con el molde.
- Deflectores (“baffles”): láminas metálicas insertadas en canales que redirigen el flujo hacia zonas calientes internas. Proporciona secciones transversales máximas para el refrigerante. No obstante, presenta limitaciones a la hora de colocar el divisor exactamente en el centro del molde por lo que el efecto de enfriamiento y la distribución de la temperatura en un lado del núcleo pueden diferir de los del lado contrario.
- Bubblers: tubos huecos que canalizan el agua hacia zonas profundas o núcleos delgados para enfriar la zona cóncava de la pieza.
- Pasadores térmicos (“thermal pins”): elementos que utilizan fluidos de cambio de fase para extraer calor por evaporación-condensación.
- Refrigeración conformada: canales diseñados para seguir el contorno 3D de la pieza, normalmente mediante fabricación aditiva. Se trata de un elemento muy eficiente pero costoso.

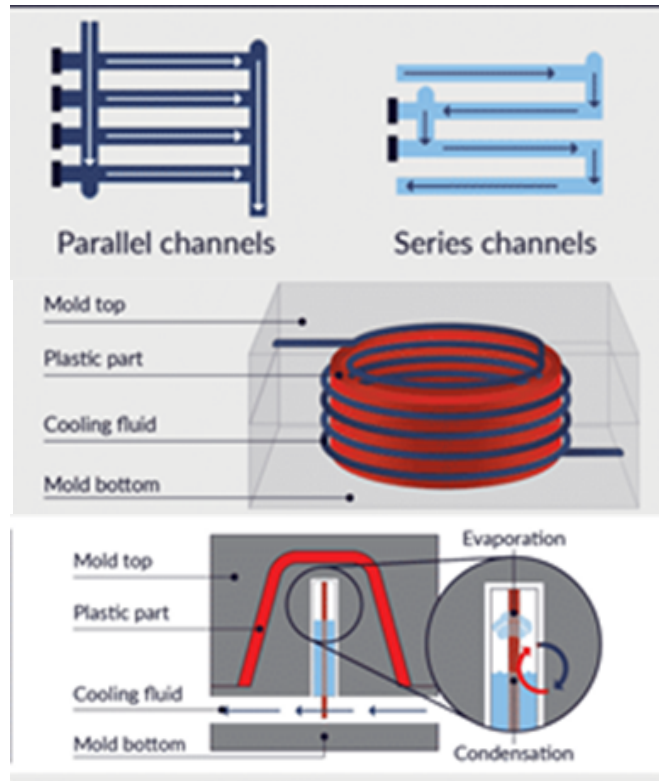


Ilustración 2.7 Tipos de sistema de refrigeración y elementos que lo componen.[18]

Sistema de expulsión

El sistema de expulsión, también denominado sistema de eyección es una parte esencial del molde de inyección. Su función principal es extraer la pieza una vez solidificada de la cavidad del molde sin dañarla, deformarla o comprometer su calidad superficial. Su diseño influye de forma directa en la calidad dimensional y superficial del producto moldeado, y debe adaptarse a las características geométricas, mecánicas y funcionales de la pieza. Un sistema mal diseñado puede provocar marcas visibles, fisuras, rebabas, deformaciones o incluso roturas de la pieza durante la extracción.

Los componentes más habituales que conforman este sistema son:

- Placa eyectora: fija los pasadores eyectores y transmite el movimiento del conjunto.
- Placa de retención del eyector: limita y guía el recorrido de expulsión, asegurando un movimiento uniforme.
- Pasadores eyectores: son el mecanismo más común. Se trata de cilindros metálicos que empujan la pieza por puntos concretos. Aunque económicos y sencillos, pueden provocar marcas o perforaciones si no se colocan correctamente.

- Manguitos eyectores: utilizados para piezas cilíndricas o con orificios centrales. Aplican fuerza uniforme en todo el perímetro, mejorando la concentricidad y evitando marcas visibles. No son recomendables para piezas con paredes finas.
- Pernos de retorno: aseguran que la placa eyectora regrese a su posición inicial después de cada ciclo. Intervienen también en el control del movimiento de apertura y cierre entre las placas A y B.

Para piezas con geometrías complejas, el sistema de expulsión puede complementarse con soluciones específicas como correderas, elevadores e insertos extraíbles. Las correderas permiten liberar salientes laterales o zonas con contrasalidas mediante un desplazamiento horizontal previo a la apertura del molde. Los elevadores, por su parte, actúan sobre detalles inclinados o internos, transformando el movimiento vertical en oblicuo gracias a planos inclinados. Los insertos extraíbles se emplean en zonas delicadas del molde, permitiendo la expulsión sin comprometer la integridad de la pieza, y además facilitan el mantenimiento o la reposición puntual. El diseño de cualquier sistema de expulsión debe contemplar factores como la distribución uniforme de fuerzas para evitar tensiones internas, la rigidez o fragilidad del material, el tipo de acabado superficial requerido y la facilidad de acceso para limpieza y mantenimiento. [19]

Una extracción desequilibrada o forzada puede generar variaciones dimensionales entre ciclos, especialmente en piezas grandes o con geometría irregular. Por ello, en el Diseño para Manufactura (DFM) se recomienda simular la fase de expulsión y validar con prototipos o análisis estructurales el comportamiento de la pieza bajo fuerzas de expulsión.

Sistema de Orientación

El sistema de orientación del molde garantiza el alineamiento preciso entre las dos mitades (cavidad y núcleo) durante cada ciclo de cierre y apertura. Su función es evitar desalineaciones que puedan generar rebabas, desgaste prematuro o defectos geométricos en la pieza moldeada.

Este sistema se compone de los siguientes elementos:

- Pilares guía (o pasadores guía): son elementos cilíndricos fijados a una de las mitades del molde, que actúan como ejes de deslizamiento durante el cierre.
- Bujes guía: Son estructuras en forma de orificio en el molde que alojan los pilares guía. Ubicados en la parte opuesta a los pilares, permiten que estos encajen de forma precisa evitando desviaciones entre ambas mitades. Su ajuste debe ser holgado pero preciso para no comprometer la alineación.

El correcto diseño de este sistema es esencial para el buen funcionamiento del molde. Se deben considerar aspectos como la longitud de guiado, el tipo de

ajuste (holgura), el tipo de material empleado y su resistencia al desgaste, especialmente en moldes de alta producción.

Sistema de Ventilación

El sistema de ventilación cumple una doble función clave en el proceso de moldeo por inyección: evacuar el aire de la cavidad durante el llenado del molde y permitir su reentrada al abrir el molde, evitando la formación de vacío. Una ventilación inadecuada puede generar defectos como quemaduras, burbujas, llenado incompleto o decoloraciones. Existen múltiples métodos para implementar la ventilación:

- Venteos en línea de partición: pequeñas ranuras colocadas entre cavidad y núcleo, que permiten la salida del aire sin que el material fundido se escape.
- Ranuras de venteo: mecanizadas en los extremos de la cavidad o zonas críticas.
- Venteos por pasador o inserción: incorporan canales internos que expulsan aire desde zonas profundas.
- Pasadores de venteo: similares a los eyectores, pero perforados para dejar salir gases.
- Venteo por metal sinterizado: se utilizan insertos porosos que permiten el paso del aire, pero no del fundido.
- Tapones de venteo: piezas intercambiables que permiten modificar el diseño de ventilación sin alterar el molde principal.

Un diseño eficaz debe situar los respiraderos cerca de los extremos del flujo, zonas ciegas y puntos donde los frentes de material se encuentran. Además, deben evitarse ranuras demasiado profundas que puedan permitir el escape del material fundido, así como superficies mal mecanizadas que impidan un buen sellado. [19]

En conjunto, todos los sistemas que conforman un molde de inyección deben funcionar de forma sincronizada para garantizar la precisión, repetibilidad y eficiencia del proceso. Desde la orientación y ventilación hasta la expulsión y refrigeración, cada componente contribuye a la calidad final de la pieza moldeada y a la durabilidad del utillaje. No obstante, el rendimiento del molde no solo depende de su diseño funcional, sino también de los materiales empleados en su construcción.

2.4.2 Materiales para la fabricación de moldes

La elección del material con el que se fabrica un molde de inyección es un factor determinante tanto para su vida útil como para la calidad del proceso de moldeo. El material debe ser capaz de soportar esfuerzos mecánicos, ciclos térmicos repetidos, abrasión y, en muchos casos, contacto con polímeros corrosivos. Además, debe presentar buena capacidad de mecanizado, resistencia al desgaste y estabilidad dimensional. En esta sección se detallan los materiales más utilizados en la industria del moldeo por inyección.[21,22]

A continuación, se presentan los materiales metálicos utilizados más comúnmente.

Acero P20

El acero P20 es un acero para herramientas de baja aleación con un alto contenido en cromo. Presenta buena resistencia al desgaste y a la corrosión, siendo fácil de mecanizar y pulir. Su bajo coste lo convierte en una de las opciones más empleadas para moldes de producción media. Es especialmente adecuado para moldes donde no se requiera una resistencia extrema ni una vida útil muy prolongada. [21,22]

Acero H13

Se trata de un acero para trabajo en caliente, altamente resistente al desgaste, la abrasión y los ciclos térmicos. Es ideal para moldes de alta producción o donde se procesan materiales agresivos. Ofrece excelente capacidad de pulido y buena resistencia a la corrosión. Su coste es más elevado que el P20, pero se justifica por su durabilidad en ambientes exigentes. [21,22]

Acero NAK80

Este acero pre-endurecido destaca por su excelente estabilidad dimensional, lo que asegura la estabilidad de las dimensiones del molde incluso a altas temperaturas, buena resistencia al desgaste y gran facilidad de mecanizado. Además, tiene una alta capacidad de pulido, lo que lo hace idóneo para piezas con acabado superficial estético. Su coste es intermedio, superior al P20 pero inferior al S136. [21,22]

Acero S136

El acero S136 es un acero inoxidable de alta calidad, especialmente valorado por su resistencia a la corrosión. Se utiliza en moldes que deben procesar materiales corrosivos o en entornos con alta humedad. Además, presenta buena resistencia al desgaste, excelente pulido y facilidad de mecanizado. Aunque su precio es elevado, se compensa con su durabilidad y bajo mantenimiento. [21,22]

Aluminio

Los moldes de aluminio son una alternativa ligera y económica frente al acero, especialmente utilizados para prototipos o producciones de bajo volumen. Su principal ventaja radica en su alta conductividad térmica, lo que permite ciclos de inyección más rápidos. No obstante, presenta baja resistencia al desgaste, lo que limita su uso en moldes para largas series productivas o con materiales abrasivos.[22]

En la Tabla 2.3, se evalúan las ventajas y desventajas de los distintos materiales presentados en este apartado.

Tabla 2.3 Ventajas y desventajas de los principales materiales utilizados en la fabricación de moldes para moldeo por inyección. [21,22]

MATERIAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Acero P20	Bajo coste, fácil de mecanizar, buena capacidad de pulido	Menor resistencia al desgaste y a la corrosión que aceros más avanzados
Acero H13	Alta resistencia al desgaste y la abrasión, buena pulibilidad, resistente	Coste más elevado
Acero NAK80	Excelente pulibilidad, buena estabilidad térmica, fácil mecanizado	Precio superior al P20
Acero S136	Máxima resistencia a la corrosión, excelente acabado superficial	Menor resistencia térmica relativa, alto coste
Aluminio	Ligero, económico, buena conductividad térmica, rápido enfriamiento	Baja resistencia mecánica y al desgaste, no apto para producción masiva

La selección del material debe considerar el tipo de polímero a procesar, el volumen de producción, el acabado superficial requerido y el presupuesto disponible. Aunque los aceros como el H13 o el S136 ofrecen mejor rendimiento a largo plazo, los moldes de aluminio pueden ser preferibles en fases de desarrollo o fabricación de prototipos, donde se busca rapidez y bajo coste inicial.

2.4.3. Tipos de moldes

El tipo de molde utilizado en el proceso de inyección depende de diversos factores, como la complejidad de la pieza, la cantidad de cavidades, la distribución de entradas y los requisitos de acabado superficial. La selección adecuada del molde es fundamental para garantizar la calidad del producto final y la eficiencia del proceso productivo. En términos generales, se pueden distinguir dos configuraciones principales: moldes de dos placas y moldes de tres placas.[11,15,23]

Molde de dos placas

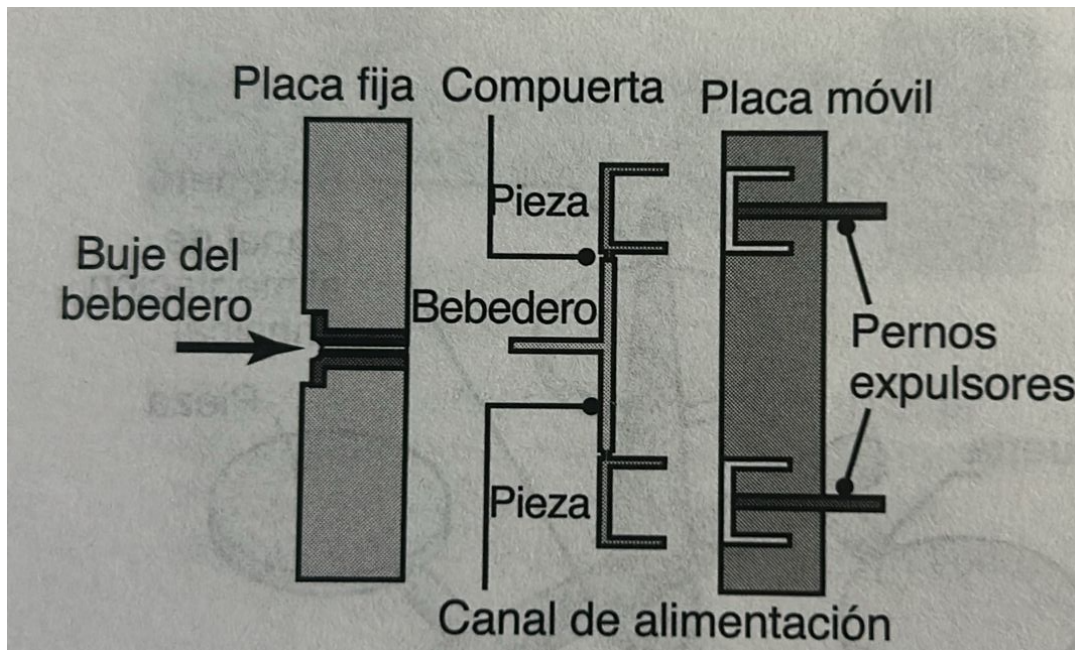


Ilustración 2.8 Esquema de un molde de dos placas. [32]

El molde de dos placas es el más sencillo y comúnmente utilizado en la industria. Ilustración 2.8. Está compuesto por una mitad fija y una móvil. Tanto la cavidad como el sistema de colada se encuentran en el mismo plano, lo cual simplifica su construcción y reduce los costes de fabricación y mantenimiento. Sin embargo, presenta limitaciones en cuanto a la ubicación de las compuertas, que deben situarse en el borde de la pieza, lo que puede generar marcas visibles o problemas de llenado en piezas complejas. Además, su diseño es menos flexible para piezas con múltiples cavidades distribuidas en formas complejas. Este tipo de molde es adecuado para producciones de volumen medio y piezas con geometría relativamente sencilla. [11,15,23]

Molde de tres placas

Este tipo de molde incluye una placa intermedia entre la fija y la móvil, lo que permite separar el sistema de colada de las cavidades. Ilustración 2.9. Gracias a esta configuración, es posible ubicar las compuertas en zonas más centrales o discretas de la pieza, mejorando tanto el llenado como el acabado superficial. A pesar de su mayor complejidad y coste de fabricación, los moldes de tres placas ofrecen mayor versatilidad en el diseño y una mejor distribución del flujo, especialmente en moldes con múltiples cavidades. Son ideales para aplicaciones que requieren alta calidad estética y funcional.

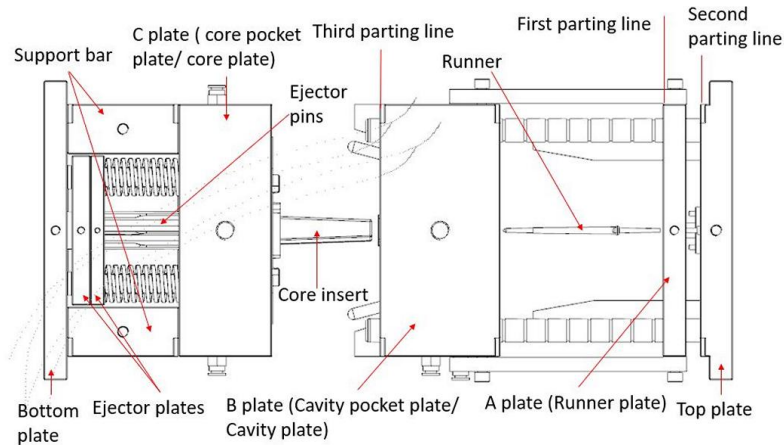


Ilustración 2.9 Esquema de un molde de tres placas[24]

La elección entre estos tipos de molde depende de múltiples factores, como el volumen de producción, el número de cavidades, la geometría de la pieza, el tipo de polímero utilizado y las exigencias estéticas del producto. Aunque el molde de dos placas es más económico, en aplicaciones complejas o exigentes puede resultar más adecuado optar por un molde de tres placas. [11,15,23]

2.4.4 Distribución de cavidades: layouts y tipos de sistema de alimentación

Además del diseño geométrico del molde, otro aspecto clave en su rendimiento es la forma en que se distribuyen las cavidades y se gestiona el flujo del material fundido hacia ellas. Una disposición adecuada de las cavidades —combinada con un sistema de alimentación correctamente dimensionado— permite garantizar un llenado equilibrado, reducir defectos de moldeo y optimizar tanto el tiempo de ciclo como el aprovechamiento del material. Este equilibrio depende del tipo de layout seleccionado y del sistema de colada empleado, los cuales deben adaptarse al tipo de pieza, al volumen de producción y a las propiedades del polímero utilizado.

Los layouts más habituales en moldes de inyección incluyen configuraciones en línea, en árbol y radiales, véase Ilustración 2.10:[14]

- En un layout en línea, las cavidades están dispuestas una tras otra siguiendo un canal principal recto, lo que facilita el diseño, pero puede generar desequilibrios en el llenado debido a la longitud variable del canal.[14] Por eso, este tipo es más adecuado para pocas cavidades y piezas simples.
- Layout en árbol es más complejo y busca distribuir el material fundido de manera equilibrada mediante ramas que se bifurcan y alimentan simétricamente las cavidades. Esta configuración mejora la uniformidad del flujo y reduce las diferencias de presión

entre cavidades, aumentando la calidad y la consistencia de las piezas producidas.

- Layout radial dispone las cavidades en forma circular alrededor de un punto central de alimentación, logrando distancias y longitudes de canal más homogéneas. Esta simetría es ideal para moldes con múltiples cavidades y piezas con geometrías que se benefician de un llenado balanceado.

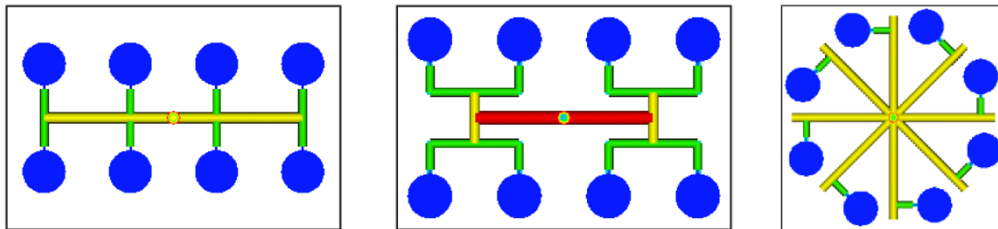


Ilustración 2.10 Representación de los distintos Layouts: Árbol, Bloque(H) y Radial

El diseño del layout influye de manera significativa en la calidad y eficiencia del proceso de moldeo por inyección. Una distribución no equilibrada o asimétrica puede provocar variaciones en la presión y temperatura del material fundido en las distintas cavidades, lo que repercute en la uniformidad de las piezas producidas y en la estabilidad del ciclo de producción. Estos efectos pueden derivar en problemas de calidad que serán analizados con detalle en el apartado correspondiente dedicado a los defectos del moldeo por inyección.

Por ello, se recomienda seguir buenas prácticas de diseño como la simetría geométrica y el balance hidráulico, mediante canales de alimentación con longitudes y secciones equivalentes, para asegurar un llenado homogéneo y un proceso eficiente.[14]

El sistema de alimentación conduce el material fundido desde la boquilla de la máquina hasta las cavidades del molde, incluyendo el canal principal, los bebederos y las compuertas. Su correcta configuración asegura un flujo balanceado que optimiza la calidad y el tiempo de ciclo.

Existen dos tipos principales de colada: fría y caliente.[14,25] En la colada fría, los canales se enfrían junto con la pieza, lo que genera residuos sólidos que deben reciclarse. Este sistema es sencillo y económico, adecuado para piezas simples y producciones cortas, aunque provoca ciclos más largos y mayor fuerza de expulsión.

La colada caliente, por su parte, mantiene el material fundido dentro de canales calefactados, eliminando residuos sólidos y reduciendo significativamente los tiempos de ciclo.[14] A pesar de su mayor coste inicial y necesidad de mantenimiento especializado, es preferida para producciones masivas o piezas de alto valor, ya que mejora la eficiencia material y la estética de la pieza.[18,26]

2.5 Defectos en inyección de piezas plásticas

Como en todo proceso de fabricación, el resultado final de la pieza puede presentar numerosos tipos de defectos. Ya sea por las condiciones del proceso o el comportamiento del material. Existe la posibilidad de predecir gracias a un software de simulación, algunos de los defectos de moldeo por inyección de plástico más comunes.[26]

- Trampas de aire/Burbujas (Air Traps)

Estos se deben a la acumulación de aire en zonas donde los frentes de flujo convergen sin ventilación suficiente, especialmente en extremos del llenado. Se debe a diseño inadecuado del molde sin respiraderos o por efecto racetracking (el flujo preferente del polímero por secciones de mayor tamaño) en geometrías gruesas.

Entre las posibles soluciones se encuentran añadir respiraderos en zonas críticas, ubicar compuertas cerca de zonas gruesas, mejorar el balance de flujo y reducir velocidad de inyección para facilitar la expulsión del aire. En muchas ocasiones, una buena solución es el uso de Venteos en el diseño, [26] que son pequeñas aberturas o canales situados estratégicamente dentro del molde, para permitir la salida del aire y gases generados durante el llenado de la cavidad con plástico fundido. Permitiendo la salida de estos, pero siendo de dimensiones tan pequeñas, que el material se filtraría por ahí.

- Puntos negros y vetas negras (Black Specks and Streaks)

Se trata de marcas o rayas, Ilustración 2.11 de color oscuro que surgen en la superficie o en el interior de la pieza creada, por contaminación o degradación del material. Si fueran marrones en lugar de negras sería causa de una quemadura o decoloración menos grave.

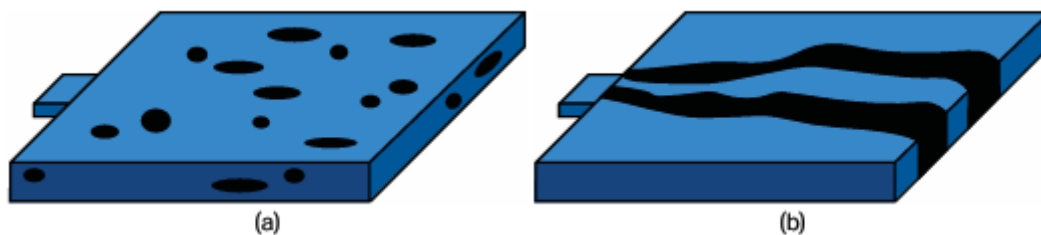


Ilustración 2.11 Representación esquemática de (a) Puntos negros y; (b) Vetan negras [26]

Se suele deber a residuos en el molde, grasas o lubricante en componentes, o falta de limpieza en canales y eyectores. Puede acabar dando como resultado otros defectos como fragilidad, quemaduras o descoloramiento.

Solución, limpiar molde y sistema de alimentación, pulir zonas dañadas, mejorar ventilación en extremos del flujo y evitar acumulación de residuos en compuertas y canales. [26]

- Fragilidad (Brittleness)

Una pieza moldeada quebradiza tiende a romperse o agrietarse debido a la degradación del material, se reduce la longitud de las cadenas moleculares y, por lo tanto, disminuye el peso molecular y resistencia. Como consecuencia, la integridad física de la pieza es considerablemente inferior a las especificaciones, Ilustración 2.12.



Ilustración 2.12 La parte degradada tiende a ser quebradiza y a romperse fácilmente [26]

Se produce por fricción térmica excesiva en compuertas y canales estrechos, y por mala fusión en zonas críticas.

Puede acabar derivando en otros defectos tales como quemaduras, descoloramiento o puntos y vetas negras.

Entre las posibles soluciones se encuentran aumentar tamaño de compuertas y canales, mejorar el flujo para evitar sobrecalentamiento, y controlar la temperatura del molde para favorecer la unión entre capas. [26]

- Burn Marks/Quemaduras:

Las marcas de quemado son manchas oscuras, normalmente negras o marrones, que aparecen al final del recorrido del flujo del plástico o en zonas ciegas del molde. Se asocian visualmente con defectos por degradación térmica localizada del material, véase Ilustración 2.13.



Ilustración 2.13 Burn Marks [26]

Este defecto se produce cuando el aire atrapado en el molde no se ventila adecuadamente. Si la presión o la velocidad de inyección es muy alta, el aire comprimido genera temperaturas elevadas que degradan el polímero en zonas mal ventiladas. También puede agravarse si existen zonas de paso estrechas que generan fricción adicional.

Para evitar este defecto, la solución desde el punto de vista del diseño del molde es fundamental incorporar un sistema de ventilación adecuado, especialmente cerca del final del flujo y en zonas ciegas. Se recomienda un tamaño de ventilación de 0,025 mm para polímeros semicristalinos y de 0,038 mm para amorfos. Además, se debe redimensionar el canal de colada, distribuidores y compuertas si resultan demasiado restrictivos, ya que estos pueden inducir sobrecalentamiento por cizalladura. [26]

- Decoloración (Discoloration)

La decoloración es un defecto en el que la pieza moldeada presenta un color distinto al del material original. Puede tratarse de cambios sutiles o más visibles que afectan la calidad estética de la pieza.

Este defecto se debe principalmente a la degradación térmica del material o a la contaminación, como, por ejemplo: material permaneciendo demasiado tiempo en el cilindro, temperaturas excesivas en el barril, o mezcla con material de otro color o con contaminantes sólidos.

Desde el punto de vista del diseño del molde, es fundamental garantizar una ventilación adecuada para evitar trampas de aire que contribuyen a la decoloración. Se recomienda dimensionar los respiraderos correctamente: 0,025 mm para polímeros cristalinos y 0,038 mm para amorfos. Además, se debe limpiar el sistema de alimentación (tolva) antes de la inyección y purgar el cilindro al cambiar de material. También es clave reducir la temperatura del cilindro y la boquilla para evitar la degradación térmica. [26]

- Delaminación (Delamination)

La delaminación es un defecto superficial que se manifiesta cuando la pieza moldeada presenta capas que pueden separarse o desprenderse fácilmente, como si fueran láminas superpuestas Ilustración 2.14.

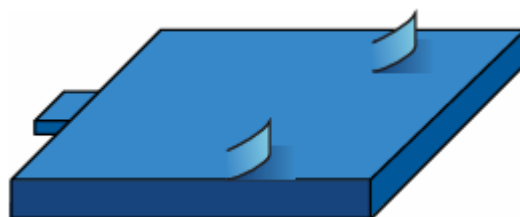


Ilustración 2.14 Representación esquemática de la delaminación, que provoca desprendimiento por capas en la superficie de una pieza moldeada. [26]

Este problema puede originarse por esquinas afiladas en el diseño del canal o de la compuerta, que interrumpen el flujo homogéneo del material fundido, favoreciendo que se formen capas sin buena adhesión entre sí. También se ve favorecido por temperaturas de fusión demasiado bajas, que impiden una correcta unión entre capas durante el llenado del molde.

Para evitar la delaminación desde el diseño del molde, se deben redondear todas las esquinas en la zona de la compuerta y del canal. Además, conviene asegurar que la temperatura del molde y del fundido sean suficientemente altas como para permitir la fusión completa entre capas durante el llenado. [26]

- Hesitation

Es un defecto superficial que surge de la estancación del flujo de fusión del polímero en un área de sección estrecha, en zonas donde se manifiesta una rápida alteración en el espesor. La hesitation se puede eliminar cambiando el grosor de la pieza o moviendo la ubicación de la compuerta

Como posible solución a este tipo de problemas sería, cambiar el grosor de la pieza o mover la ubicación de la compuerta. [26]

- Jetting:

Ocurre cuando el polímero fundido es inyectado a alta velocidad a través de zonas restrictivas, como el inyector, el canal o la compuerta, hacia regiones más abiertas y de mayor espesor, sin entrar en contacto con las paredes del molde. Este flujo de inyección, que se presenta en forma de zigzag o curvado, Ilustración 2.15 genera puntos de contacto entre los pliegues del fundido en el chorro, dando lugar a la formación de pequeñas "soldaduras". Además, genera debilidad en la pieza, marcas en la superficie y uniones internas débiles entre capas del material.

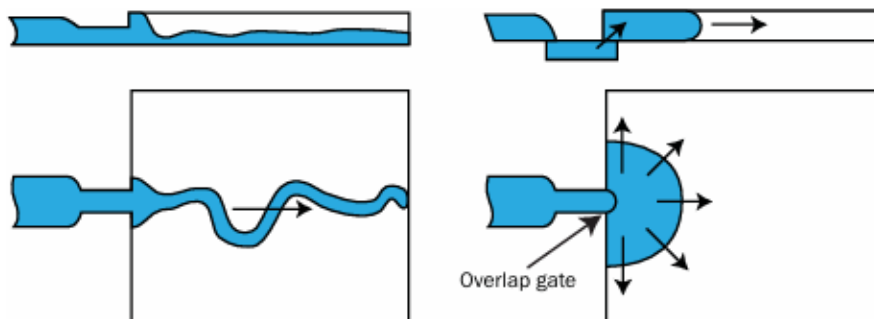


Ilustración 2.15 Usar una puerta de solapamiento para evitar el chorro [26]

Posibles soluciones para el diseño, rediseñar la compuerta para dirigir el flujo contra una superficie metálica, usar compuertas tipo solapada o submarina, ampliar canal y compuerta, y usar compuertas abanico o de lengüeta para ralentizar y distribuir el flujo. [26]

- Variaciones dimensionales (Dimensional Variation)

La variación dimensional es un defecto que se presenta cuando las dimensiones de la pieza moldeada cambian de un ciclo a otro, aunque las condiciones de máquina permanezcan constantes. Este defecto afecta directamente a la repetibilidad y calidad de las piezas producidas, véase Ilustración 2.16.



Ilustración 2.16 La variación dimensional es un cambio inesperado en las dimensiones de la pieza. [26]

Las causas pueden incluir una ventana de moldeo demasiado estrecha, condiciones de moldeo incorrectas o un diseño inadecuado del sistema de expulsión. En algunos casos, una geometría mal optimizada de canales y compuertas puede inducir flujos inestables y variaciones en el llenado.

Desde el punto de vista del diseño del molde, es fundamental optimizar el sistema de canales y compuertas para asegurar un flujo de material estable hacia la cavidad. También se recomienda revisar y ajustar el sistema de expulsión, ya que una expulsión desigual o forzada puede provocar distorsiones dimensionales en la pieza final. [26]

- Ojos de pez (Fish Eyes)

Este es un defecto superficial que se origina cuando el material no se ha fundido por completo y es arrastrado por el flujo de fusión hacia la cavidad del molde, manifestándose en la superficie de la pieza moldeada, Ilustración 2.17. Se debe a una baja temperatura del cilindro, velocidad del husillo y contrapresión insuficiente, exceso de regrind o contaminación de material.

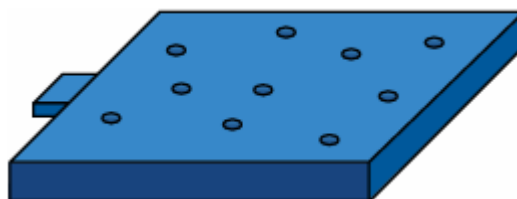


Ilustración 2.17 Representación esquemática de los ojos de pez. Los materiales no fundidos en el flujo de fusión causan ojos de pez. [26]

Como soluciones, se plantea, aumentar el barrel T^a , la presión de retención para mezclar materiales y la velocidad de rotación del tornillo, para generar más calor por fricción. [26]

- Rebabas (Flash):

El defecto de rebaba se produce cuando el material fundido se escapa a través de la línea de cierre del molde, formando una rebaba delgada en zonas como la superficie de separación, núcleos móviles, salidas de aire o pasadores eyector, véase Ilustración 2.18.



Ilustración 2.18 Rebaba [26]

Este defecto suele estar causado por una fuerza de cierre insuficiente, deformaciones en las placas del molde o mal contacto entre placas del molde, y sistemas de ventilación mal diseñado o excesivamente profundo.

Desde el diseño del molde, se recomienda asegurar un buen sellado entre cavidad y núcleo, reforzando las placas con pilares o placas más gruesas. Es importante también respetar las dimensiones adecuadas de los respiraderos: 0,025 mm para polímeros cristalinos y 0,038 mm para amorfos. Además, la superficie de cierre debe estar limpia y mecanizada correctamente para garantizar presión de sellado. [26]

- Líneas de soldadura (Weld Lines) and Meld Lines

Las Weld Lines (también llamadas líneas de soldadura o knit lines) se forman cuando dos frentes de flujo de material fundido se encuentran después de haberse enfriado parcialmente, generando una unión débil y visible. Se produce desde direcciones opuestas, véase Ilustración 2.19.

Provocan pérdida de resistencia mecánica y estética deficiente, especialmente en materiales reforzados.

Como posibles soluciones, se plantean, mover la compuerta, aumentar temperatura del molde y presión de inyección, y mejorar ventilación en zonas donde se unen los flujos. [26]

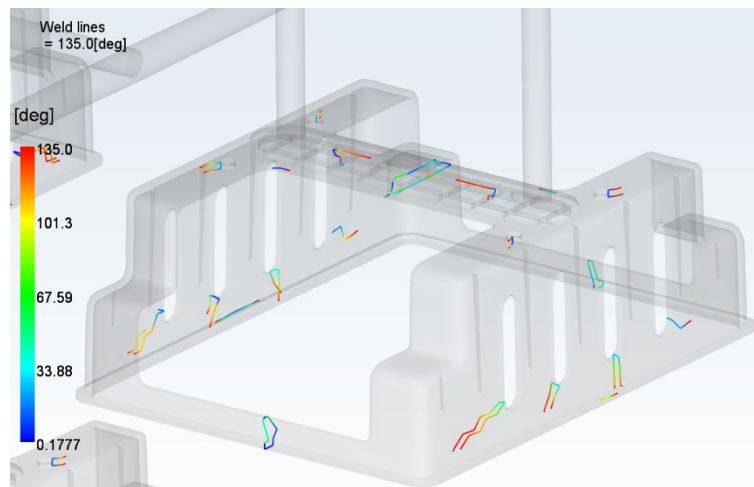


Ilustración 2.19 Representación de las líneas de soldadura, unión de dos flujos de diferentes direcciones. Viene delimitado por el ángulo, la escala de colores

Las Meld Lines se forman cuando dos frentes de flujo se encuentran en la misma dirección y están lo suficientemente calientes como para fundirse correctamente, véase

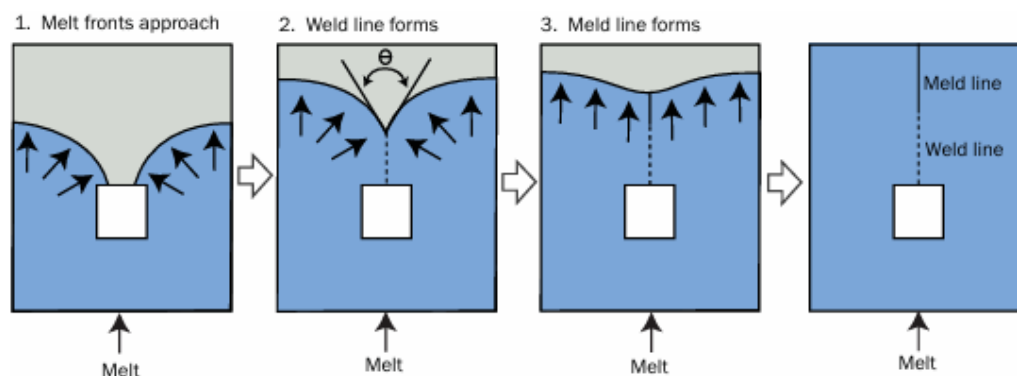


Ilustración 2.20 Weld and Meld Line representación de cómo se forman y como se diferencian

Aparecen visualmente igual que las weld lines, pero su unión es más sólida y menos problemática estructuralmente.

Se pueden plantear diferentes soluciones, para minimizar este defecto. Como favorecer encuentros de flujo con ángulos $>135^\circ$, mantener buena temperatura

en el molde, y ajustar ubicación y diseño de compuertas para guiar correctamente los frentes. [4,26]

- Marcas/Ondas de flujo (Flow Marks)

Son defectos visuales en forma de ondulaciones o anillos concéntricos cerca de la compuerta, que afectan la estética de la pieza, véase Ilustración 2.21.

Se producen por material fundido demasiado frío, baja velocidad de inyección, o por compuertas y canales muy estrechos que impiden una buena compensación del material.

Soluciones: aumentar tamaño de canales/compuertas, usar canal caliente en lugar de frío, elevar temperatura del molde y del fundido, y colocar el cold well para atrapar material frío antes de que entre a la cavidad.

Las flow marks, también conocidas como halos, son defectos superficiales caracterizados por la aparición de ondulaciones circulares o marcas en forma de ondas cerca de la compuerta. Afectan principalmente el aspecto estético de la pieza moldeada. [26]



Ilustración 2.21-Flow Marks [26]

Es fácil confundir las líneas de soldadura, con las ondas de flujo o las meld lines. Pero tienen características diferente, Tabla 2.4

Tabla 2.4 Diferencia entre defectos similares[26]

DEFECTO	DIFERENCIAS	
MARCA DE FLUJO	Defecto superficial en forma de ondulaciones circulares o pequeñas olas cerca de la compuerta	-
MELD LINES	Se produce cuando dos frentes de material fundido fluyen en paralelo y crean una unión entre ellos.	El ángulo de encuentro se utiliza para diferenciar entre línea de soldadura y línea de mezcla. Si el ángulo es menor a 135°, se forma una weld line; si es mayor, una meld line.
LÍNEAS DE SOLDADURA	Se forma cuando dos frentes de flujo de material fundido que viajan en direcciones opuestas se encuentran.	

- Marcas plateadas (Silver Streaks)

Las rayas plateadas, Ilustración 2.22, son marcas superficiales que aparecen como salpicaduras brillantes alineadas en la dirección del flujo del material



Ilustración 2.22-Silver Streaks [26]

desde la compuerta. Se producen por humedad, aire atrapado o partículas de plástico degradado en el interior del fundido. También pueden ser causadas por una falta de ventilación, geometría de los canales, inadecuada o por una fricción térmica excesiva (cizalladura).

Soluciones: mejorar ventilación en extremos del flujo, aumentar sección de canales/compuertas y controlar el sobrecalentamiento por cizalladura. [26]

- Short Shots (llenado incompleto)

El short shot ocurre cuando el material no llena completamente la cavidad del molde, dejando la pieza incompleta.

Se debe a canales y compuertas mal dimensionados, falta de ventilación, zonas delgadas difíciles de llenar o baja temperatura del molde/fundido.

Para evitarlo, se recomienda aumentar el número/tamaño de compuertas, mejorar los canales de alimentación, añadir respiraderos y ajustar presión, velocidad y temperatura del molde. [26]

- Hundimientos (Sink Marks) y Vacíos (Voids)

Los sink marks son depresiones localizadas en la superficie, generalmente sobre zonas con geometrías gruesas, como nervaduras, refuerzos o jefes. Los voids son burbujas de vacío en el núcleo de la pieza, que aparecen cuando el material interno se contrae sin suficiente compensación. Véase Ilustración 2.23

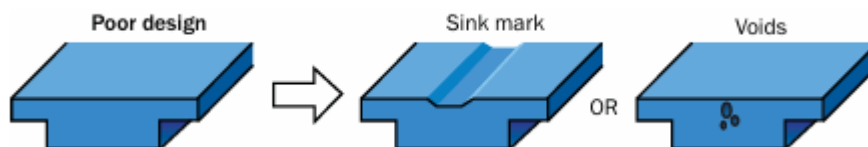


Ilustración 2.23 Las marcas de hundimiento y los vacíos se crean por la contracción del material sin suficiente compensación. [26]

Ambos defectos se producen por contracción localizada del material al enfriarse, especialmente en secciones gruesas. Si el material fundido no es adecuadamente empacado antes de que se solidifique la compuerta, no se compensa la contracción volumétrica. En resinas de ingeniería, donde la piel ya es rígida, la contracción interna puede derivar en vacíos en lugar de hundimientos.

Desde el diseño del molde, es recomendable aumentar el tamaño de compuertas y canales para retrasar el sellado y permitir un mayor packing. También se deben añadir o agrandar los respiraderos para evacuar el aire atrapado, y colocar las compuertas cerca de las zonas gruesas, lo que permite empacarlas antes de que se congelen las zonas delgadas. [26]

- Ripples (Ondas Superficiales)



Ilustración 2.24-Ripples

Las ondas superficiales, son pequeñas ondas similares a huellas dactilares cerca del borde o final del flujo del polímero. Ilustración 2.24

Se originan cuando el frente de flujo se enfría sobre la pared del molde y se ve superado por el material posterior, generando un patrón repetitivo, véase

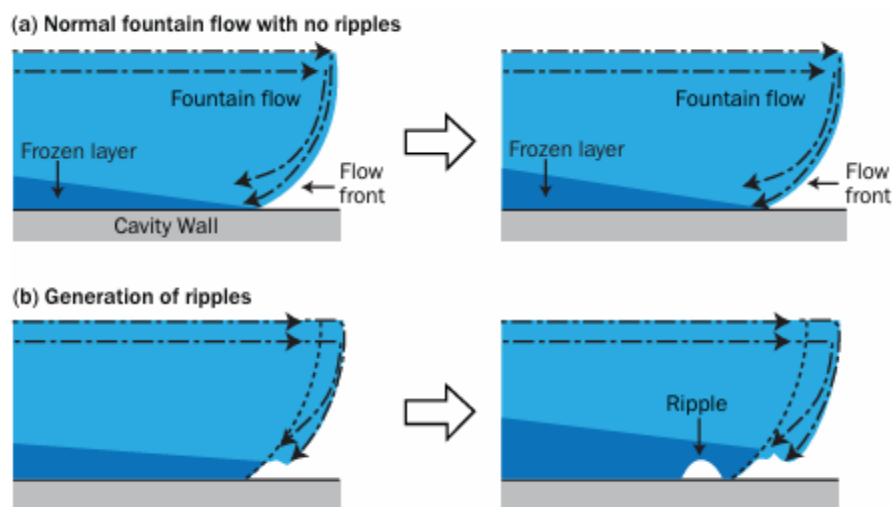


Ilustración 2.25-(a) Llenado normal sin ondas (b) Generación de ondas con pared

Ilustración 2.25. Esto ocurre más por baja velocidad del frente de flujo o molde frío, que por diseño de compuertas. [26]

Soluciones: aumentar velocidad del frente de flujo, elevar la temperatura del molde, verificar que el sistema de canales y compuertas sea adecuado, y colocar ventilaciones en el extremo del flujo (0,025 mm para polímeros cristalinos, 0,038 mm para amorfos).

Existen otros defectos que pueden ser evaluados haciendo una comparación de los resultados de la simulación, de las condiciones de proceso y resultados de pruebas físicas.

Suele ser un proceso que requiere inversión de tiempo y dinero, pero a posteriori, puede funcionar para predecir potenciales problemas, como rugosidad superficial, rebabas, flujo tipo chorro, etc...en otras piezas. [26]

2.6. Diseño para Manufactura o DFM

El Diseño para Manufactura (DFM, por sus siglas en inglés *Design for Manufacturing*) aplicado al moldeo por inyección, tiene como propósito garantizar que la geometría de un componente sea apropiada para el proceso de inyección, asegurando una producción eficaz, de alta calidad y minimizando la posibilidad de errores. Durante el proceso de creación del molde y validación del componente, se han implementado varios criterios de DFM, los cuales se enumeran a continuación, ordenados según los distintos aspectos que influyen en el diseño.[27]

2.6.1. Criterios generales de diseño - Validación del diseño

El DFM en piezas plásticas se basa en una serie de principios que buscan facilitar y optimizar la producción. Entre ellos se encuentra la simplificación del diseño para reducir costos, la optimización de los espesores de pared y los ángulos de desmoldeo, así como la correcta selección de materiales. También es fundamental definir una estrategia adecuada de puntos de inyección, considerar los procesos secundarios como pintura o cromado, validar correctamente las tolerancias y fomentar una colaboración temprana con el fabricante.[18,26]

En cuanto a sus beneficios, el DFM contribuye significativamente a la reducción de costos y tiempos. Permite minimizar el desperdicio de material, disminuir los tiempos de diseño del molde, reducir los defectos y retrabajos, y realizar un análisis más preciso de costos y tiempos, lo que mejora la rentabilidad del proyecto. [18,26]

➔ Espesores de la pieza:

- Verificar si hay áreas gruesas en la pieza que puedan generar rechupes o vacíos.
- Identificar áreas delgadas en la pieza que puedan provocar problemas de llenado incompleto.

- Buscar un grosor uniforme de toda la estructura de la pieza.
- ➔ Detalles del modelo:
 - Este debe representar las características de FLUJO: Espesor, Longitud de flujo y Volumen
 - Hay pequeñas características de una pieza que deben eliminarse. Siendo estos los radios de curvatura y aquellos grabados no importantes.
 - Evitar transiciones geométricas bruscas que puedan provocar esfuerzos internos o defectos de llenado.
 - Diseñar teniendo en cuenta las posibles líneas de soldadura.
- ➔ Ángulos de Desmoldeo: Hay incluirlos, porque estos facilitan la extracción de la pieza sin dañar la pieza ni el molde.
 - Si hay ángulos de salida, estos tienen que estar en la dirección y ubicación correctas para lograr una buena línea de partición
 - Si la pieza tiene textura, el ángulo de salida ha de ser suficiente para liberar la textura sin causar marcas o raspaduras
 - Plantearse si es necesario modificar, eliminar o invertir el ángulo de salida para asegurar que la pieza quede en el lado del expulsor del molde
 - Dependiendo de la división del herramental, el ángulo de salida puede necesitar un sellado de 3-5°.
- ➔ Undercuts: son errores en el modelo (una extracción mal hecha, por ejemplo) o entidades de la herramienta que requieren el uso de componentes especiales, como controles deslizantes, elevadores o machos contraídos para poder expulsar la pieza. Un molde más económico es aquel que minimiza la cantidad de movimientos y piezas móviles.

2.6.2. Ubicación de puntos de inyección

La ubicación del punto de inyección es uno de los aspectos fundamentales del diseño para manufactura, ya que influye directamente en la calidad del llenado, el equilibrio de presiones y la aparición de defectos. Una entrada mal posicionada puede ocasionar problemas como líneas de soldadura, atrapamientos de aire o llenado incompleto. Por ello, definir correctamente su posición es clave para garantizar la viabilidad del proceso.

Un flujo de llenado desbalanceado ocurre cuando el avance del material fundido hacia las distintas zonas de la cavidad no es uniforme. Esto genera diferencias de presión, velocidades de flujo y temperaturas, lo que puede derivar en tensiones internas o defectos superficiales. En cambio, un flujo balanceado busca que todas las regiones de la cavidad se llenen al mismo tiempo, reduciendo así los gradientes térmicos y mecánicos, y mejorando el acabado final. [18,26]

Entre las pautas empleadas para definir la ubicación adecuada de la entrada, se encuentran las siguientes:

- Colocar la entrada en zonas gruesas de la pieza, ya que permiten un empaquetamiento más efectivo y favorecen el flujo hacia las áreas más delgadas.
- Evitar situar entradas cerca de zonas finas, donde el riesgo de congelación prematura del flujo es mayor.
- Cuando sea necesario reducir la presión de inyección, añadir múltiples entradas puede ayudar a mejorar el patrón de llenado y a disminuir la resistencia del flujo.
- Las entradas deben orientarse contra una pared, de forma que el flujo se disipe suavemente y se evite el efecto de chorro directo, lo cual contribuye a una mejor distribución del material.
- Además, se han utilizado algoritmos que permiten optimizar la posición de las entradas minimizando la resistencia del flujo, a partir del análisis del espesor y la geometría de la pieza.

Este conjunto de pautas ha guiado la toma de decisiones durante la simulación del llenado, permitiendo seleccionar una ubicación que garantice un proceso estable y un llenado uniforme.

2.6.3. Evaluación del diseño de la pieza sin molde

La evaluación temprana del diseño mediante Moldflow permite optimizar la pieza antes de fabricar el molde, lo que se traduce en una reducción de costos y una mejora en la calidad del producto. Entre los beneficios más destacados se encuentra la optimización de la ubicación de las entradas de inyección, lo que facilita un flujo más balanceado y reduce la posibilidad de defectos. También se puede verificar si la geometría de la pieza es adecuada para el moldeo por inyección, minimizando riesgos en la producción.

Además, el análisis ayuda a identificar de forma anticipada problemas de calidad, como zonas con aire atrapado, líneas de soldadura críticas o marcas de rechupe en superficies visibles o funcionales. Otro beneficio es la posibilidad de comparar distintos materiales para analizar su comportamiento durante el llenado y su efecto en la calidad final de la pieza. También permite evaluar el impacto de posibles cambios de diseño, como la reducción del espesor para acortar el tiempo de ciclo, siempre asegurando que no se comprometa la calidad ni aumenten los costos. Por último, proporciona una estimación inicial del tiempo de ciclo, útil para calcular la capacidad productiva y los costos operativos.

2.6.4. Evaluación de la calidad de enfriamiento y análisis de defectos mediante simulación

Dentro del proceso de diseño para manufactura, la evaluación del sistema de enfriamiento mediante herramientas de simulación resulta clave para garantizar piezas sin defectos y ciclos de producción optimizados. El análisis de la calidad

de enfriamiento permite identificar las zonas donde el calor tiende a concentrarse debido a la geometría y el espesor de la pieza, lo que impacta directamente en la eficiencia del ciclo y en la calidad final del componente.

El análisis se realiza a través de un sistema tipo “semáforo”:

- Verde: indica enfriamiento eficiente.
- Amarillo: áreas con posibilidad de mejora.
- Rojo: zonas con enfriamiento insuficiente.

Este resultado se basa en dos factores principales:

- Variación de la temperatura superficial, influenciada por la geometría y espesor de la pieza.
- Variación del tiempo de enfriamiento, dominada por el grosor del componente.

Cuando la calidad de enfriamiento es deficiente, puede provocar:

- Short shot o “disparo corto” en zonas delgadas si la variación es significativamente menor al promedio.
- Defectos superficiales o deformaciones, en cualquier parte de la pieza, por variaciones extremas. En estos casos se recomienda rediseñar el componente o ajustar el rango de temperaturas.

La variación de la temperatura debe mantenerse baja para ser aceptable:

- Menos de 5 °C para materiales cristalinos.
- Menos de 10 °C para materiales amorfos.

Si no se alcanzan estos valores, se pueden emplear deflectores o bubblers para mejorar la distribución térmica.

Por otro lado, la variación del tiempo de enfriamiento señala cuánto se desvía cada zona respecto al tiempo medio. Zonas con tiempos excesivos o reducidos pueden ser indicativas de problemas de grosor o falta de enfriamiento localizado. En este caso se recomienda: modificar el espesor y aumentar el enfriamiento localmente.

Finalmente, el análisis permite detectar la presencia de marcas de rechupe, que se manifiestan como depresiones superficiales. Este análisis identifica su localización y profundidad, asociadas a: geometrías localizadas y baja presión o tiempo de empaquetamiento corto.

La herramienta permite visualizar las zonas afectadas y estimar la magnitud de las marcas, facilitando así las decisiones de rediseño.[18,26,28]

2.6.5. Sistema de alimentación y cavidades múltiples

En esta etapa se considera el diseño del sistema de canales de inyección y la posible utilización de cavidades múltiples. Los criterios aplicados incluyen el balance del sistema de runners para asegurar un llenado uniforme, la elección del tipo de canal, y la distribución de las cavidades con el fin de evitar desviaciones o diferencias en el llenado. Asimismo, se evalúan el volumen, la presión y el tiempo de ciclo para validar el número óptimo de cavidades.

1. Impacto del número de cavidades. Es fundamental asegurar que el volumen total y la presión necesaria sean compatibles con las capacidades de la máquina de inyección. Al aumentar el número de cavidades, se incrementa el volumen total de material por ciclo, lo que conlleva una mayor pérdida de presión a lo largo del sistema de canales (runners) y exige una fuerza de cierre superior. Por ello, es imprescindible validar que la capacidad de inyección (tanto en volumen como en presión) de la máquina sea suficiente y que pueda mantener el tiempo de ciclo previsto sin comprometer la calidad del producto.
2. Simetría en el diseño del molde. Para evitar diferencias en el llenado, presión o calidad entre cavidades, se recomienda distribuir las cavidades de forma simétrica respecto al canal principal, evitando trayectos de flujo con longitudes desiguales. Se favorecen diseños en espejo, distribuciones radiales o en árbol, con ramas que presenten longitudes y secciones equivalentes, garantizando así un flujo balanceado.
3. Selección del tipo de canal: frío vs caliente. Aunque este tema se aborda en el apartado visto anteriormente 2.4.4 Distribución de cavidades: layouts y tipos de sistema de alimentación, se pretende resumir a continuación sus características principales, para ayudar con la explicación de dichos criterios:
 - Canales fríos: son simples y económicos, pero generan desperdicio (coladas frías) y requieren mayor mantenimiento y fuerza de expulsión.
 - Canales calientes: implican una inversión inicial mayor, reducen el desperdicio y mejoran la estética del producto, aunque requieren un control zonificado de temperatura. La elección entre ambos depende del volumen de producción, geometría de la pieza, tipo de material, tiempo de ciclo y calidad estética requerida.
4. Balanceo del sistema de alimentación. Es esencial garantizar que el flujo de material llegue a todas las cavidades de manera simultánea y bajo condiciones similares. Para ello, los canales deben tener longitudes y secciones equivalentes, aplicando simetría geométrica que asegure trayectos balanceados. En sistemas de canales calientes, el control zonificado de temperatura puede compensar pequeñas diferencias. Un sistema de alimentación desequilibrado puede causar sobrecarga en las primeras cavidades, defectos como rechupe, aire atrapado, llenado

incompleto o variaciones en las propiedades mecánicas entre piezas idénticas. [18,26,28]

2.6.6. Sistema de refrigeración

La fase de enfriamiento representa una parte significativa del ciclo de moldeo por inyección. Su eficiencia depende directamente de la capacidad del sistema de refrigeración para transferir el calor del polímero hacia el refrigerante a través de las paredes del molde.

Variables que afectan la transferencia de calor

- Tasa de transferencia de calor desde el plástico al molde
- Tasa de transferencia a través del molde
- Tasa de transferencia del molde al refrigerante.

Efecto del caudal. Un mayor caudal promueve el cambio de flujo laminar a turbulento, aumentando así la eficiencia de transferencia de calor.

Número de Reynolds

- Es el parámetro que indica la turbulencia del flujo.
- Se considera ideal alcanzar valores de Reynolds mayores a 10.000 para asegurar una extracción eficiente de calor.
- Está definido como: $Re = \rho \cdot D \cdot v / \mu$

Eficiencia del refrigerante

- El comportamiento se divide en tres zonas: flujo laminar (extracción baja), zona de transición y flujo turbulento (extracción óptima).
- Se considera una extracción efectiva cuando la diferencia entre la temperatura de entrada y salida del circuito es menor a 2-3 °C.

Ubicación de las líneas de enfriamiento

- Deben situarse cerca de puntos de calor alto y alejadas de zonas con menor concentración térmica.
- Es esencial para mantener un enfriamiento uniforme en toda la pieza

Principios de DFM aplicados a la refrigeración

- Reducir el tiempo de ciclo, ya que la refrigeración puede representar hasta el 70 % del ciclo de moldeo.
- Diseñar para mantener uniformidad térmica, evitando rechupes, alabeos o contracciones desiguales.
- Asegurar accesibilidad para la manufactura y mantenimiento de los canales.
- Buscar equilibrio entre la manufacturabilidad del molde y la calidad final de la pieza.

Reglas de DFM para diseño de refrigeración

- Colocar canales paralelos al contorno de la cavidad → mantiene temperatura uniforme.
- Usar canales de enfriamiento de diámetro estándar → reduce costos de fabricación.
- Evitar distancias excesivas entre canal y superficie de la cavidad → asegura enfriamiento efectivo.
- Minimizar diferencias de longitud entre canales → mejora la uniformidad del enfriamiento.
- Evitar ángulos agudos en los canales de refrigeración → facilita la fabricación y limpieza.
- Considerar el uso de canales conformales si es posible → adaptan el contorno y mejoran el rendimiento térmico.

2.6.7. Evaluación de deformaciones

El empaquetamiento es una etapa fundamental del moldeo por inyección, ya que condiciona la evolución del volumen y de las tensiones internas de la pieza. Durante esta fase, el polímero aún fundido se compacta dentro del molde, compensando parte de la contracción que se produce al enfriar. La calidad final de la geometría depende en gran medida de cómo se gestionen la contracción, la orientación molecular y la deformación térmica, fenómenos conocidos en conjunto como OER (Shrinkage, Orientation and Warpage). [29]

Contracción

La contracción tiene lugar cuando el material pasa del estado fundido a sólido, reduciendo su volumen. Esta contracción puede ser global o localizada, y se ve afectada por numerosos factores:

- Contracción volumétrica (definida por curvas PvT).
- Velocidad de enfriamiento: altas velocidades reducen la cristalinidad.
- Orientación del flujo: afecta la contracción en diferentes direcciones.
- Restricción mecánica del molde: impide que la pieza se contraiga mientras está dentro.
- Gradientes térmicos a través del espesor: generan tensiones internas.
- Condiciones de proceso: presión de mantenimiento, tiempo, temperatura del fundido, temperatura del molde, geometría de la pieza, tasa de inyección, etc.
- Cada uno de estos factores puede provocar variaciones dimensionales o defectos si no son correctamente controlados.

Orientación

Durante el flujo del material fundido, las cadenas poliméricas tienden a alinearse en la dirección del movimiento. Esta orientación molecular influye directamente en las propiedades mecánicas y en el comportamiento térmico de la pieza:

- Las zonas orientadas se retraen más en la dirección de alineación.
- La contracción es diferente en dirección paralela y perpendicular al flujo.
- Las zonas cerca del canal de inyección suelen presentar mayor orientación y, por tanto, mayor contracción direccional.

Deformación (alabeo)

La deformación o warpage aparece cuando las tensiones internas se liberan de forma no uniforme durante el desmoldeo o enfriamiento final. Esta distorsión es el resultado acumulado de la contracción diferencial, la orientación no equilibrada y el enfriamiento no uniforme.

Las principales causas que contribuyen a este fenómeno son:

- Diferencia de temperatura entre núcleo y cavidad.
- Diferente espesor de las paredes de la pieza.
- Diferente orientación en zonas opuestas.
- Canal de inyección mal ubicado o sistema de refrigeración mal equilibrado.
- Reducir la deformación requiere actuar sobre la causa dominante: mejorar la simetría térmica, corregir geometrías problemáticas o adaptar las condiciones de procesamiento.

Perfiles de empaquetamiento:

La evolución de la presión durante el empaquetamiento afecta directamente a la contracción y, por tanto, a la deformación. Algunos ajustes posibles en el perfil de presión incluyen:

- Aumentar o reducir el tiempo de presión constante.
- Disminuir gradualmente la presión para favorecer el relleno sin generar tensiones.
- Modificar el número de pasos del perfil, incluyendo descensos controlados.
- Estos perfiles se ajustan en función del material, la geometría y los resultados de simulación para obtener una pieza lo más estable y precisa posible

3. Materiales y Métodos

3.1. Materiales considerados para la pieza	77
3.2. Molde.....	79
3.2.1. Elección del material	79
3.2.2. Elección de la colada.....	79
3.2.3. Elección del tipo de molde	79
3.3. Software empleado	79
3.3.1. Autodesk Fusion 360	79
3.3.2. Autodesk Moldflow Adviser	80

3.1. Materiales considerados para la pieza

Dado que la pieza analizada es una tapa para una caja de fusibles, se han seleccionado tres materiales termoplásticos habitualmente empleados en componentes de automoción: Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), poliestireno (PS) y polipropileno (PP). La elección responde a su buena procesabilidad mediante moldeo por inyección y a sus propiedades mecánicas y térmicas, adecuadas para aplicaciones que no requieren grandes esfuerzos estructurales, pero sí estabilidad dimensional y resistencia al calor. En la Tabla 3.1 se recogen los materiales seleccionados, junto con sus principales características y aplicaciones, con el fin de facilitar su comparación.

Tabla 3.1 Características de los materiales considerados en el trabajo[5,11,14]

TIPO DE MATERIAL	CARACTERÍSTICAS	APLICACIONES
Acrilonitrilo-butadieno-estireno ABS	- Gran resistencia y tenacidad - Resistente a la distorsión térmica - Buenas propiedades eléctricas - Inflamable y soluble en disolventes orgánicos - Duro y Tenaz hasta -40°C - Fácil de Pintar y cromar - Brillo Superficial - Regular frente a rayos UV - Inestable Frente a ácidos fuertes, hidrocarburos clorados	- Recubrimiento de interiores de frigoríficos, cortacésped y equipos de jardinería, - Juguetes - Dispositivos de seguridad de carreteras

	- Estables frente ácidos débiles, gasolina, grasas, aceites - RESIS aceites y grasas	
Polipropileno	- Resistencia a la distorsión térmica - Excelentes propiedades eléctricas - Resistencia a la fatiga, - Químicamente inerte - Relativamente barato - Poca resistencia a la radiación ultravioleta - Baja densidad - Baja Resistencia al rayado - Duro y Quebradizo hasta -40°C - RESIS a los ácidos y disolventes - RESIS a las gasolinas y aceites - RESIS a las flexiones alternas - Buena capacidad de insonorización - Difícil de Pintar por su RESIS Química	- Botellas esterilizadas - Láminas para embalaje, televisores maletas
Poliestireno	- Excelentes propiedades eléctricas y claridad óptica - Buena estabilidad térmica y dimensional - Relativamente económico - Transparente y brillo superficial - Gran rigidez	- Tejados, electrodomésticos - carcasas de pilas, juguetes, paneles de alumbrado domestico - Protecciones en embalajes de equipos eléctricos, electrónicos y electrodomésticos

La Tabla 3.2 recoge los parámetros de T^a de fusión y de transición vítrea, así como el porcentaje de contracción que suele caracterizara a cada material.

Tabla 3.2 Parámetros de los Materiales Plásticos[11,14]

Material	Tg °C	Tm°C	Contracciones[16]
ABS	85	317	0.3 a 0.8%
Polipropileno	0 a 5°C	150	1.2 a 2.5%
Poliestireno	100	240	0.4 a 0.6%

3.2. Molde

3.2.1. Elección del material

Tras analizar las propiedades de los materiales más comunes usados en moldes, vistos en el apartado 2.4.2 Materiales para la fabricación de moldes. El acero P20 es la mejor opción para aplicaciones industriales que requieran alta durabilidad y calidad. Su resistencia mecánica y capacidad para soportar las condiciones térmicas y de presión del proceso de inyección lo hacen perfecto para una producción en serie. Aunque tenga una conductividad térmica menor que la del aluminio, su coste y vida útil compensan esta limitación. Por estas razones, y para garantizar la calidad y eficiencia del proceso, en este estudio se ha decidido diseñar el molde en acero templado P20.

3.2.2. Elección de la colada

Para este diseño, según lo analizado en 2.4.4 Distribución de cavidades: layouts y tipos de sistema de alimentación, se ha optado por la colada caliente, dado que permite optimizar los tiempos de ciclo y reducir el desperdicio de material. Factores clave para garantizar la eficiencia y calidad en la producción de las piezas.

3.2.3. Elección del tipo de molde

Se optó por la configuración de molde de dos placas, dado que permite un diseño más sencillo y económico, reduce la complejidad del mecanizado y facilita el mantenimiento. Además, esta elección resulta coherente con el uso de un sistema de colada caliente, en el que no es necesaria una tercera placa. Tal y como se expuso en el apartado teórico, 2.4.4 Distribución de cavidades: layouts y tipos de sistema de alimentación, esta solución es la que mejor se ajusta a las necesidades de la pieza y del proceso han analizar.

3.3. Software empelado

3.3.1. Autodesk Fusion 360

Autodesk Fusion 360 es una herramienta de diseño asistido por ordenador (CAD) basada en la nube que permite modelar piezas en 3D con alta precisión y versatilidad. Es ampliamente utilizada en ingeniería para el desarrollo de productos, ya que integra funcionalidades de diseño paramétrico, generación de planos técnicos y ensamblaje. En este proyecto, se ha empleado Fusion 360 para modelar la geometría completa de la pieza a inyectar, así como para la elaboración de los planos técnicos asociados. Además, este software permite el diseño del sistema de refrigeración y del sistema de alimentación del molde, herramientas esenciales para preparar el entorno de simulación del proceso de inyección.[30]

3.3.2. Autodesk Moldflow Adviser

Este software proporciona herramientas completas para simular todo el proceso de moldeo por inyección, incluyendo el llenado, el empaquetado, el enfriamiento y el análisis del alabeo. El software permite evaluar los parámetros del proceso y la geometría de la pieza, y ayuda a identificar posibles defectos antes de la fabricación” [8]

A lo largo de este proyecto fin de grado, se busca demostrar cómo Autodesk Moldflow Adviser puede ser una herramienta clave para introducirse en el mundo de la simulación de moldeo por inyección de plásticos, de una forma accesible, visual y orientada al análisis práctico del diseño.

La elección de esta herramienta responde a varias razones:

- En primer lugar, Autodesk Moldflow Adviser automatiza muchas de las tareas técnicas complejas que normalmente implican un conocimiento avanzado en simulación, como el mallado de geometrías y la configuración detallada del análisis. Esto permite concentrarse en los aspectos fundamentales del diseño y manufactura de la pieza.
- Además, su interfaz gráfica y su enfoque guiado facilitan la interpretación de resultados, permitiendo identificar rápidamente problemas como líneas de soldadura, atrapamiento de aire, rechupes o deformaciones, sin requerir experiencia previa en simulación avanzada.
- Adviser está ampliamente utilizado en la industria como una herramienta de validación temprana, por lo que este proyecto también busca acercar el entorno académico a herramientas y metodologías aplicadas en entornos reales de manufactura.
- Finalmente, este enfoque permite explorar conceptos de Diseño para Manufactura (DFM) y análisis de comportamiento del material fundido sin necesidad de profundizar en técnicas complejas de mallado 3D, lo cual hace viable el alcance del proyecto dentro del marco académico.

En resumen, Autodesk Moldflow Adviser fue seleccionado como base de este proyecto de grado por su capacidad de facilitar el análisis técnico del moldeo por inyección, sin comprometer la calidad de los resultados ni exigir conocimientos avanzados en simulación computacional. [29,31]

4. Resultados y discusión

4.1.	Validación de Diseño	84
4.1.1.	Análisis de la variación de los espesores.	84
4.1.2.	Análisis de la extracción de la pieza	85
4.1.3.	Análisis de los ángulos de desmoldeo	86
4.1.4.	Modificación y validación del nuevo modelo	87
4.2.	Estudio Ubicación de las entradas	89
4.2.1	Escenario A, 1 entrada	90
4.2.2	Escenario B, 2 entradas	91
4.2.3	Escenario C, 3 entradas	92
4.2.4	Escenario D, 4 entradas	93
4.3	Selección de las condiciones de inyección	95
4.3.1	Determinación de las condiciones de inyección: Escenarios A, 1 entrada 95	
4.3.2	Determinación de las condiciones de inyección: Escenarios B, 2 entradas 96	
4.4	Simulación del proceso de llenado	97
	Evaluación de la simulación de llenado con parámetros óptimos	98
	Caída de presión / Presión Max.	99
	Confiabilidad y Calidad	100
	Evaluación de llenado con parámetros tras iteración	101
4.5.	Análisis de la Calidad de Refrigeración y de los Rechupes	108
4.6.	Diseño del sistema de alimentación y de las cavidades múltiples.....	113
	Sistema de alimentación	114
	Prueba de diferente LAYOUTS	115
	Caída de Presión	117

Confiabilidad y calidad del llenado y calidad de enfriamiento.....	118
Temperatura del frente de flujo.....	118
Tiempo de llenado y tiempo de ciclo.....	119
4.7. Refrigeración.....	124
Tiempo de eyección y tiempo de ciclo.....	129
Número de Reynolds	129
Variación de la temperatura en el circuito.....	129
Calidad de Refrigeración.....	130
4.8. Simulación Completa	131

En esta sección se muestran y discuten los principales resultados del trabajo, los cuales se discuten con el fin de evaluar el cumplimiento de los objetivos establecidos.

El proceso general seguido se resume en el diagrama de flujo que se muestra en la siguiente Ilustración 4.1. Este esquema permite visualizar de forma clara y ordenada las distintas etapas del trabajo, incluyendo los procesos realizados, las decisiones tomadas en cada fase y los datos externos necesarios en cada etapa.

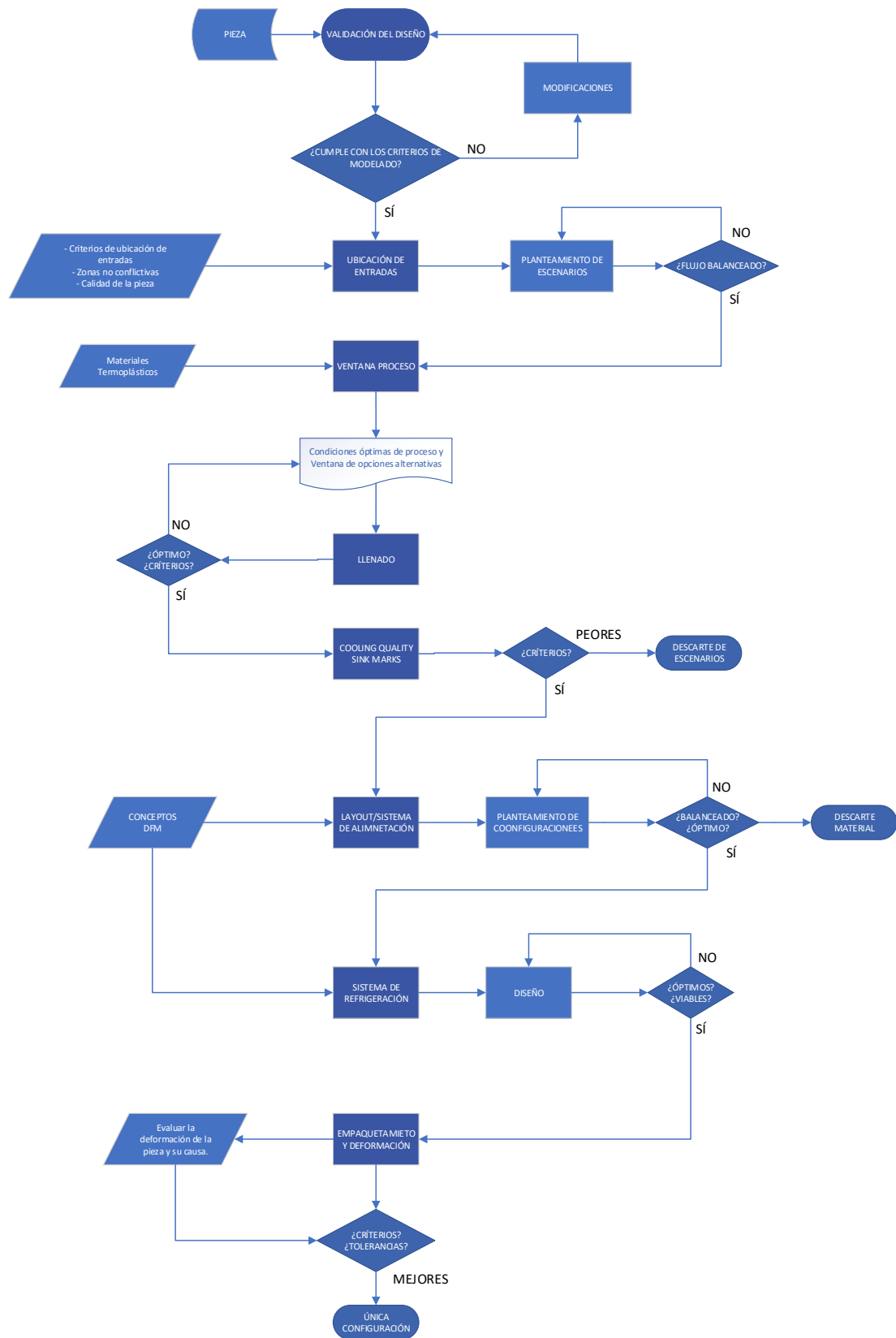


Ilustración 4.1 Diagrama de Flujo del Proceso

4.1. Validación de Diseño

En esta primera etapa del estudio se verificó que el diseño de la pieza permitiera su correcta extracción del molde sin dañar en el proceso ninguno de los dos elementos. Para ello, en base a los contenidos del apartado 2.4.1 *Criterios generales de diseño – Validación del diseño mínima*, el proceso de validación del diseño se centró en tres aspectos clave: el análisis de la variación de espesores, la extracción de la pieza del molde y finalmente el análisis de los ángulos de desmoldeo.

En esta etapa del trabajo, se utilizó la herramienta “*Design Adviser*” del programa “*Moldflow Adviser*”. A continuación, se presentan y discuten los resultados obtenidos, así como las principales conclusiones alcanzadas.

4.1.1. Análisis de la variación de los espesores.

En primer lugar, se realiza el análisis de las variaciones de espesor respecto al valor nominal de la pieza, con el fin de verificar el cumplimiento de los requisitos de diseño para la aplicación final.

Tal como se muestra en la Ilustración 4.2 e Ilustración 4.3 el 82,49 % de la superficie de la pieza se encuentra dentro del rango óptimo definido por $\pm 20\%$ respecto al espesor nominal de la misma el cual presenta un valor de 2,01 mm (zona coloreada verde); este resultado indica una distribución adecuada del material en la mayor parte de la geometría de la pieza.

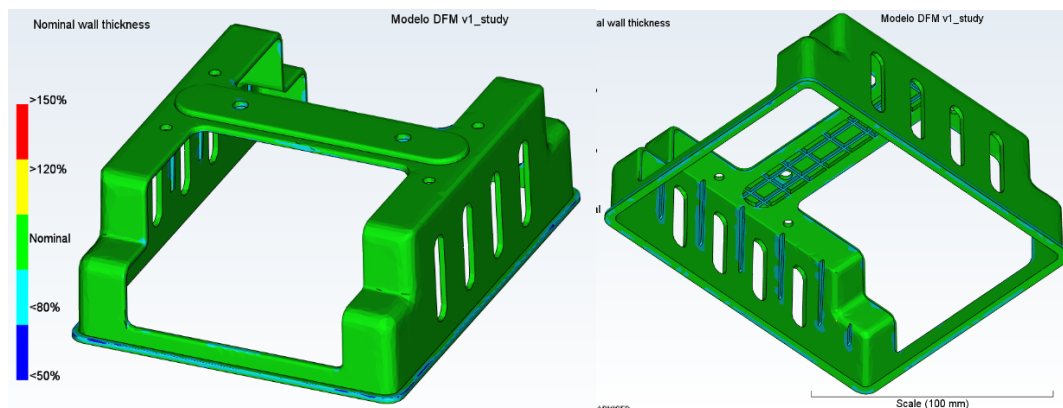


Ilustración 4.2 Vista superior del resultado de la simulación del análisis de variación de espesores.

Ilustración 4.3 Vista inferior del resultado de la simulación del análisis de variación de espesores.

En cuanto a las áreas fuera del rango idóneo, se observa un 10,71 % (área en azul oscuro) con espesores inferiores al 50 % del espesor nominal, y un 6,77 % (área en azul claro) con espesores que se encuentran entre el 50 % y el 80 %. Estas zonas, localizadas mayoritariamente en elementos como las costillas, la rejilla central o el borde inferior de la pieza, corresponden a decisiones de diseño relacionadas con elementos que facilitan el llenado de la cavidad o reducen el volumen de material en zonas donde no es estructuralmente necesario. Dado su carácter localizado y su escasa relevancia estructural, no se considera que estas variaciones supongan un problema significativo para la fabricación o el desempeño funcional de la pieza.

Por otra parte, cabe destacar cómo el análisis de variación de espesores no detecta zonas con espesores por encima del valor nominal. Este resultado es de gran importancia, dado que la presencia de espesores por encima del valor nominal podría favorecer la aparición de defectos en la pieza, como por ejemplo rechupes, que afectarían a su desempeño final.

Por lo tanto, los resultados del análisis de variación de espesores reflejan una correcta distribución del espesor en la pieza, cumpliendo con los criterios normativos establecidos para este parámetro.

4.1.2. Análisis de la extracción de la pieza

En este apartado se presentan los resultados del análisis de la extracción de la pieza del molde. La Ilustración 4.4, en rojo, muestra las áreas donde la geometría de la pieza interfiere con el molde durante el proceso de extracción, lo que impediría la correcta salida de la pieza. En este caso, no es necesario modificar el diseño de la pieza, sino que puede solventarse mediante una solución específica como la incorporación de machos en el molde, los cuales liberan las zonas en negativo y permiten la extracción de la pieza sin dañarla.

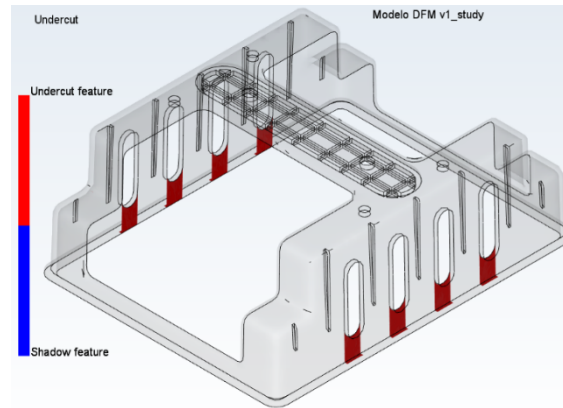


Ilustración 4.4 Resultado del análisis de la extracción de la pieza del molde.

4.1.3. Análisis de los ángulos de desmoldeo

El objetivo de este análisis es identificar zonas críticas en la geometría de la pieza que comprometerían tanto el estado del molde como la integridad de la propia pieza durante el proceso de extracción.

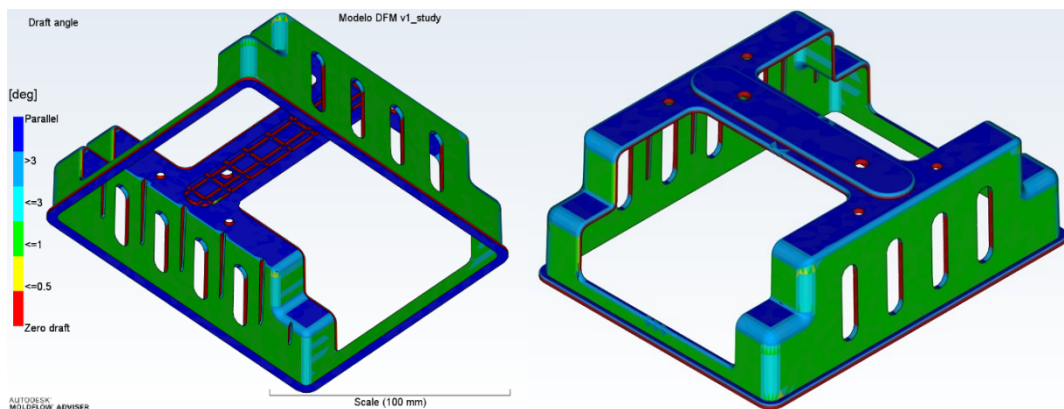


Ilustración 4.5 Vista superior e inferior de los resultados del análisis del draft Angle de la pieza del molde.

En la Ilustración 4.5 las zonas coloreadas en azul oscuro aparecen reflejas superficies paralelas a las paredes del molde, las cuales no dificultarían el desmoldeo de la pieza. En cambio, las áreas en rojo, correspondientes a “zero draft”, reflejan la ausencia de ángulo de desmoldeo. En estas zonas se generaría fricción durante el proceso de extracción, pudiendo provocarse arañazos, arrastres e incluso daños tanto en la pieza como en el molde.

Por tanto, para garantizar una correcta expulsión de la pieza y evitar la aparición de defectos, será necesario modificar la geometría de las zonas conflictivas, corrigiendo y añadiendo ángulos de desmoldeo, tal y como se muestra en la Ilustración 4.6.

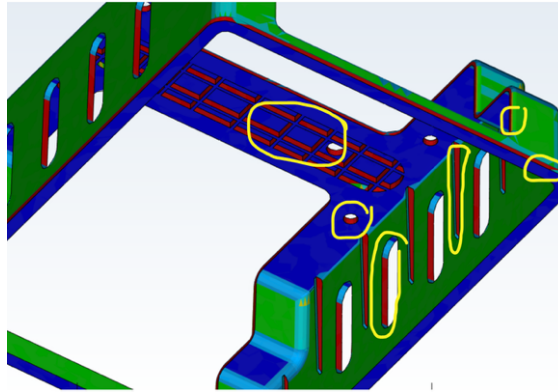


Ilustración 4.6- Zonas Conflictivas Zero Draft que hay que modificar

4.1.4. Modificación y validación del nuevo modelo

En base al análisis anterior, se procede a modificar el modelo con el fin de corregir los problemas detectados en los ángulos de desmoldeo. Las zonas que presentaban ausencia de inclinación fueron ajustadas, aplicando ángulos comprendidos entre $0,5^{\circ}$ y 3° , según la orientación y funcionalidad de cada superficie. La Ilustración 4.7 muestra de forma detallada las modificaciones realizadas en la geometría de la pieza.

Entre las principales modificaciones, se aplicó un ángulo de desmoldeo de $0,5^{\circ}$ en las caras laterales y en las costillas de la pieza; mientras que en el espesor de la base se le dio un valor de 1° . En los agujeros superiores, inicialmente perpendiculares al sentido de apertura del molde, se asignó un ángulo de $1,5^{\circ}$ para facilitar la salida de la pieza sin arrastre del material. Por otro lado, las costillas se modificaron con un ángulo de $2,5^{\circ}$ hacia fuera, lo que permite que el desmoldeo de las paredes laterales no se produzca de forma completamente perpendicular, reduciendo así el riesgo de interferencias. Finalmente, la rejilla superior, incorporada para aligerar el diseño, se ajustó con un ángulo de $2,5^{\circ}$, garantizando su correcta extracción.

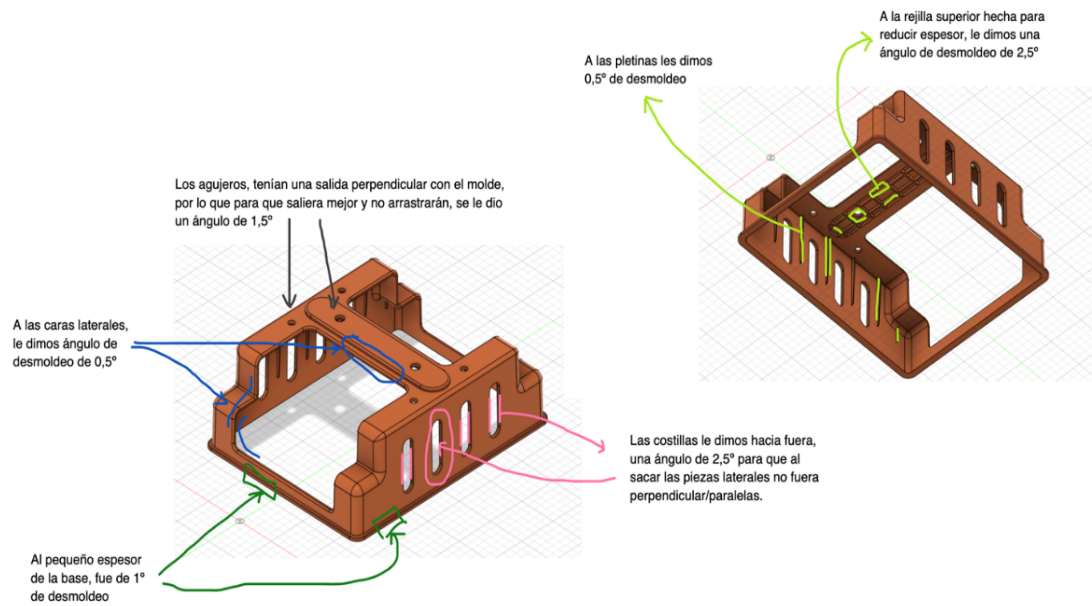


Ilustración 4.7 Ajustes realizados en el modelo para incorporar ángulos de desmoldeo.

Una vez realizadas estas modificaciones se utilizó nuevamente el módulo *Design Adviser* para verificar la viabilidad del diseño. Dado que los únicos problemas detectados estaban relacionados con los ángulos de desmoldeo, el análisis se centrará exclusivamente en este aspecto. La variación de espesores y la extracción se consideran por tanto correctas al no requerir modificaciones adicionales.

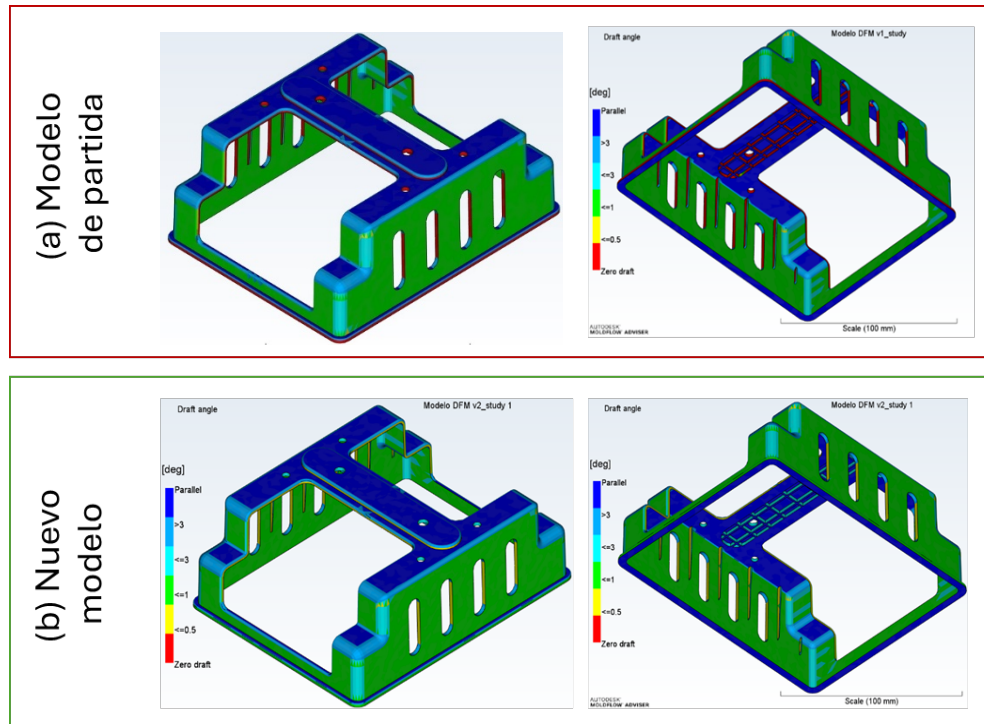


Ilustración 4.8 Comparación de la pieza tras la modificación geométrica, donde se ve ese cambio en los ángulos de desmoldeo y en el redondeo de aristas vivas.

En la Ilustración 4.8 se muestra de forma comparativa el resultado del análisis preliminar y del nuevo análisis de ángulos de extracción. Tal y como puede observarse, en el nuevo diseño ya no aparecen zonas coloreadas en rojo, lo que indica que todas las superficies cuentan ahora con el ángulo de desmoldeo necesario para permitir una correcta salida de la pieza.

Dados los resultados obtenidos puede considerarse que, tras los cambios realizados, el diseño de la pieza queda validado. Por tanto, una vez realizada esta evaluación, el modelo se adopta como definitivo para las siguientes etapas del proyecto, descartándose nuevas modificaciones geométricas como opción de mejora.

4.2. Estudio Ubicación de las entradas

Una vez definido el modelo, el siguiente paso consiste en determinar la ubicación y el número óptimo de las entradas de material.

En base a los contenidos del apartado *Ubicación de puntos de inyección*, los análisis se centrarán en dos aspectos clave:

- i. Lograr un patrón de flujo balanceado, unidireccional y simétrico.
- ii. Evitar zonas comprometidas que dificulten el llenado o generen defectos.

Para ello, se evaluaron distintos escenarios utilizando los módulos “*Gate Location - Advanced Algorithm*” y “*Gate Location - Region Algorithm*”. Los escenarios difieren por tanto en el número de entradas consideradas, las cuales se detallan a continuación en la Tabla 4.1. En este apartado, se presentan y discuten los resultados obtenidos, junto con las principales conclusiones derivadas del análisis de la ubicación de puntos de inyección.

Tabla 4.1 Escenarios considerados para el estudio de las ubicaciones de entrada.

ESCENARIO	NÚMERO DE ENTRADAS
A	1
B	2
C	3
D	4

4.2.1 Escenario A, 1 entrada

Los resultados del análisis se muestran en la Ilustración 4.9 e Ilustración 4.10. Este tipo de análisis genera un mapa de colores que representa visualmente las zonas más favorables y las menos adecuadas para ubicar los puntos de entrada. En este mapa, el color azul representa las áreas óptimas para la entrada del material, mientras que el color rojo señala las zonas donde la ubicación resultaría menos conveniente.

En las Ilustración 4.10 y Ilustración 4.9 se observa un flujo balanceado, sin presencia de áreas problemáticas en zonas críticas como los laterales de la pieza donde se situarán los machos o zonas de tamaño reducido como los laterales

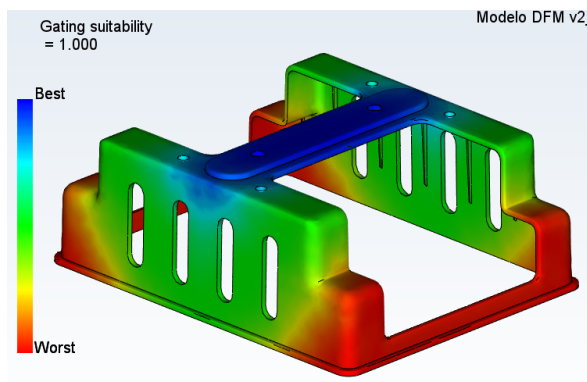


Ilustración 4.9 Resultado del análisis de ubicación de entrada para el escenario de 1 entrada.

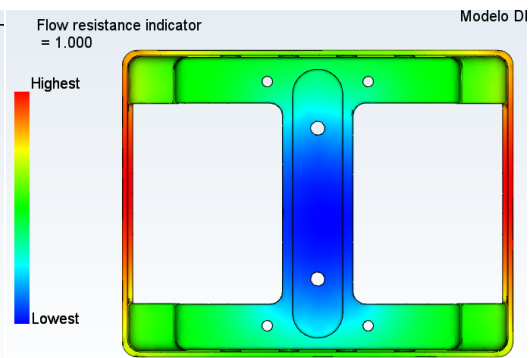


Ilustración 4.10 Vista en planta del resultado del escenario A. Se puede observar que el flujo es simétrico y balanceado.

de la base. Por lo tanto, se concluye que una única entrada en la zona más favorable resultaría una opción viable para esta pieza.

4.2.2 Escenario B, 2 entradas

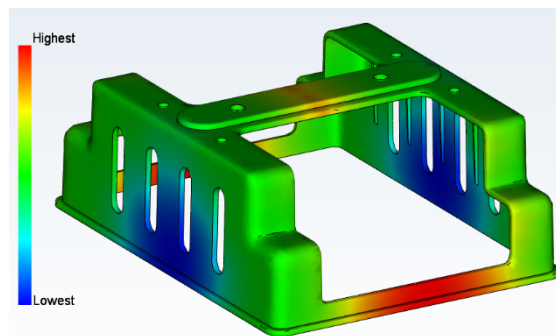


Ilustración 4.11 Resultado del análisis de ubicación de entrada para el escenario de 2 entradas.

El resultado de este escenario se muestra en la Ilustración 4.11. Como puede observarse, se obtuvo un patrón de flujo simétrico y balanceado, sin embargo, las entradas se ubicaron en zonas comprometidas, concretamente en áreas con espesores inferiores al 25 % del valor promedio y en las zonas laterales reservadas para los machos extraíbles.

Por este motivo, se delimitaron regiones prohibidas, tal como se muestra en la Ilustración 4.13, con el fin de restringir la ubicación de entradas en dichas áreas.

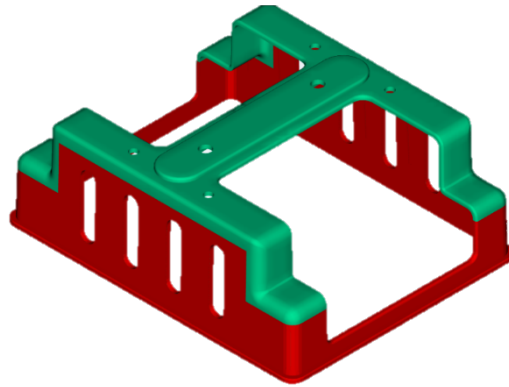


Ilustración 4.13 Restricciones aplicadas. En rojo se encuentran las zonas prohibidas y en verde las zonas donde pueden ubicarse las entradas.

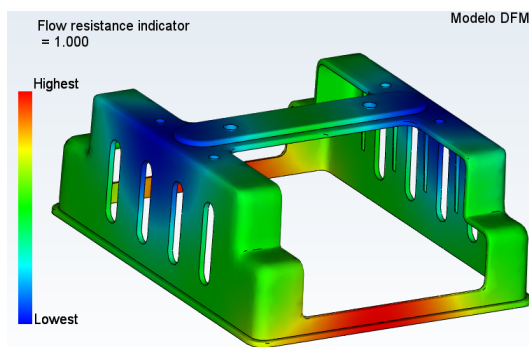


Ilustración 4.12 Resultado del análisis de ubicación de entrada para el modelo restringido del escenario de 2 entradas.

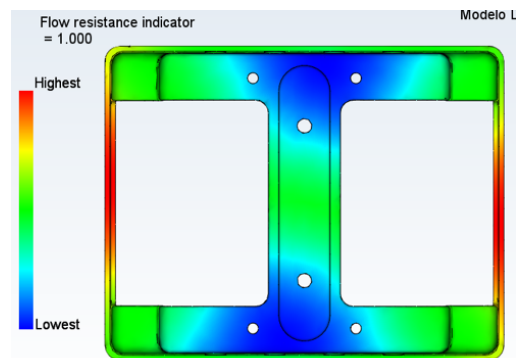


Ilustración 4.14 Vista en planta del resultado del escenario B para el modelo restringido. Se puede observar que el flujo es simétrico y balanceado.

Los resultados para el modelo con regiones restringidas se muestran en la Ilustración 4.12 e Ilustración 4.14. En este caso, se obtuvo un patrón de flujo simétrico y balanceado. Aunque las entradas aparecen ligeramente desplazadas respecto al eje de simetría, ya no comprometen ninguna zona crítica de la pieza. Se concluye, por tanto, que la opción de dos entradas también resulta viable para esta geometría.

4.2.3 Escenario C, 3 entradas

El resultado del análisis para tres entradas se muestra en la Ilustración 4.15. Al igual que en el escenario anterior, las zonas más favorables para ubicar las entradas coinciden con áreas comprometidas. En este caso, no solo se localizaron en la zona de las costillas, sino también en el borde inferior de la pieza, donde el espesor es más reducido.

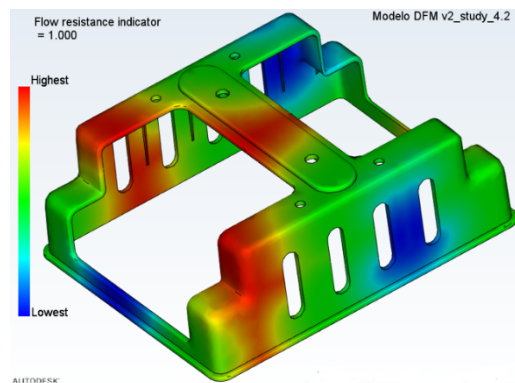


Ilustración 4.15 Resultado del análisis de ubicación de entrada para el escenario de 3 entradas.

De forma análoga al caso en el que se emplearon dos entradas, en este escenario se aplicaron las mismas restricciones (véase Ilustración 4.13). Los resultados correspondientes a la pieza con regiones restringidas se presentan en las Ilustración 4.17 e Ilustración 4.16. Como puede observarse, el flujo del material no presenta un comportamiento simétrico ni alcanza un balance adecuado entre las diferentes zonas de la pieza, lo que compromete la uniformidad del llenado. Por este motivo, se considera que este planteamiento no es técnicamente viable y se descarta para continuar con su análisis en etapas posteriores del estudio.

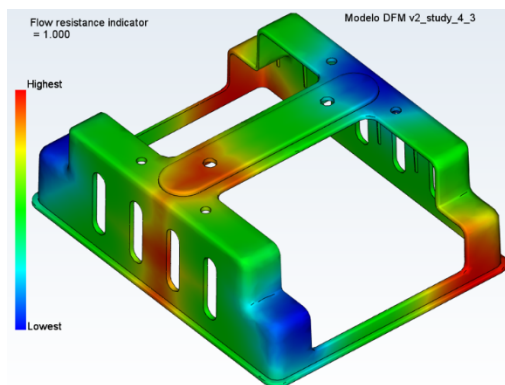


Ilustración 4.17 Resultado del análisis de ubicación de entrada para el modelo

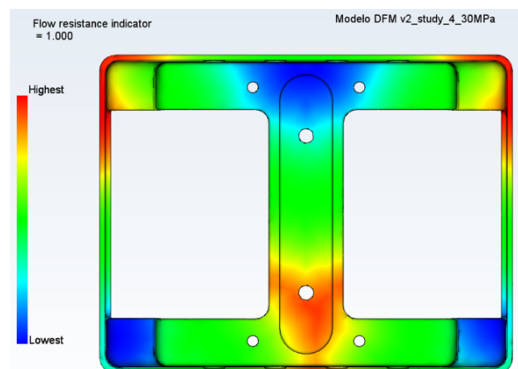


Ilustración 4.16 Vista en planta del resultado del escenario C para el modelo restringido. Se puede observar que el flujo

4.2.4 Escenario D, 4 entradas

Finalmente se procede a realizar el análisis del cuarto escenario en el que se presenta la posibilidad de utilizar cuatro entradas. El resultado de este último escenario se muestra en la Ilustración 4.19 e Ilustración 4.18.

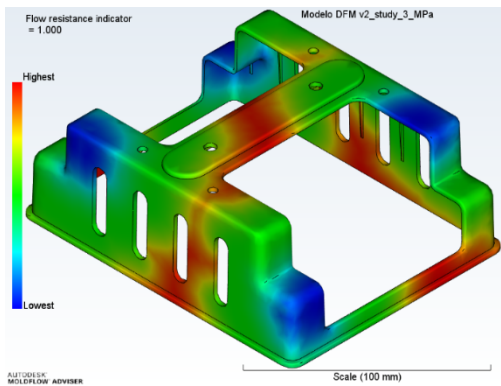


Ilustración 4.19 Resultado del análisis de ubicación de entrada para el

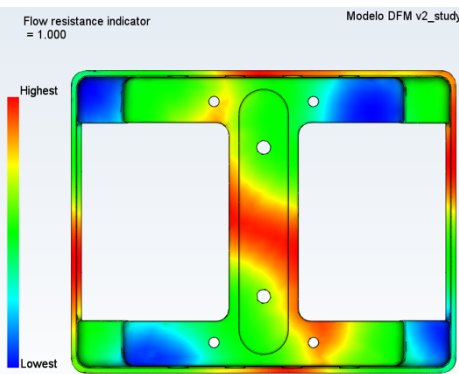


Ilustración 4.18 Vista en planta del resultado del escenario A. Se puede

En este caso, el patrón de flujo obtenido fue desbalanceado y no simétrico, por lo que se descartó esta configuración como opción viable. Además, este escenario permitió concluir que, a medida que aumenta el número de entradas, resulta más difícil controlar el flujo del material y lograr un llenado equilibrado de la cavidad.

La Tabla 4.2 recoge un resumen de los escenarios analizados, diferenciando entre aquellos considerados viables y los que fueron descartados. En general, las configuraciones que favorecen un mejor balance de llenado son aquellas que emplean una o dos entradas. A medida que se incrementa el número de puntos de inyección, el control del flujo se complica, dificultando un llenado uniforme y simétrico de la cavidad. Por ello, se descartan los escenarios con tres y cuatro entradas, y se seleccionan únicamente los casos con una o dos entradas para las siguientes fases del trabajo.

Tabla 4.2 Escenarios viables (en verde) y descartados (en rojo) según los criterios de obtener un patrón de flujo balanceado, unidireccional y simétrico, y evitar zonas comprometidas que dificulten el llenado o generen defectos.

ESCENARIO	NÚMERO DE ENTRADAS
A	1
B	2
C	3
D	4

4.3 Selección de las condiciones de inyección

Una vez identificados los escenarios de entrada viables y localizadas las zonas óptimas para su colocación, el siguiente paso consiste en determinar las condiciones óptimas de procesamiento necesarias para llevar a cabo la simulación del proceso de llenado.

El objetivo es, por tanto, evaluar cómo influyen tanto el tipo de material como la ubicación de los puntos de inyección en las condiciones de moldeo, con el fin de identificar cuál de los tres materiales seleccionados ofrece una ventana de proceso más amplia y cuál presenta mayores exigencias en términos de procesabilidad.

Para ello, se utilizará el módulo *Molding Window* del programa y se analizarán distintos escenarios recogidos en la **Tabla 4.3**. En particular, se estudiará una primera aproximación a los parámetros clave que definen las condiciones de inyección: la temperatura del molde, la temperatura del material y el tiempo de inyección. Para cada uno de los escenarios seleccionados en el apartado anterior, se determinarán las condiciones óptimas de inyección correspondientes a los materiales considerados en este trabajo (véase Sección 3.1): poliestireno (PS), polipropileno (PP) y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).

Tabla 4.3 Resumen de los escenarios analizados para la selección de las condiciones de inyección.

ESCENARIO	NÚMERO DE ENTRADAS	MATERIAL
A - PS	1	PS
A - PP		PP
A - ABS		ABS
B - PS	2	PS
B - PP		PP
B - ABS		ABS

A continuación, se presentan y discuten los resultados obtenidos para cada uno de los materiales, así como las principales conclusiones alcanzadas para cada uno de ellos.

4.3.1 Determinación de las condiciones de inyección: Escenarios A, 1 entrada

El primer paso consiste en ubicar con precisión la posición de la entrada del material. Para ello, se situó el punto de inyección en el centro de la zona óptima determinada en el análisis del apartado anterior, véase Ilustración 4.20.

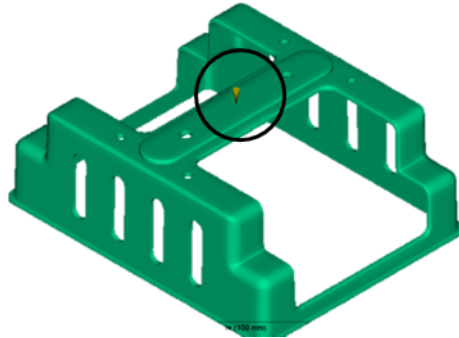


Ilustración 4.20 Localización exacta del punto de entrada para el escenario con una única entrada.

Los resultados del análisis para cada uno de los materiales se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Resultados del análisis de las condiciones de inyección de los escenarios A.

Nº DE ENTRADAS	MATERIAL	Tª DEL MOLDE (°C)	Tª DEL MATERIAL (°C)	t DE INYECCIÓN (s)
1	PS	59	201	3.37
	PP	64	216	1.84
	ABS	63	241	2.05

4.3.2 Determinación de las condiciones de inyección: Escenarios B, 2 entradas

En la **Ilustración 4.21** se muestra la localización exacta de las entradas correspondientes al escenario B. Cada punto de inyección se colocó en el centro de la zona óptima determinada en el análisis realizado en el apartado anterior.

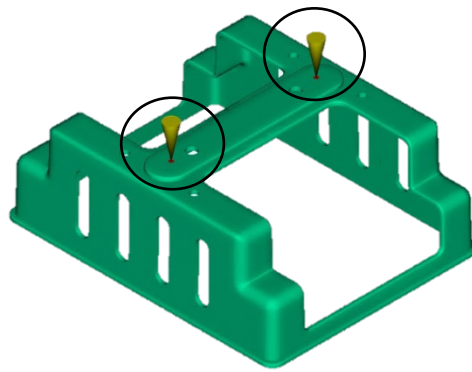


Ilustración 4.21 Localización exacta de los puntos de entrada para el escenario con 2 entradas.

Los resultados del análisis para cada uno de los materiales se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Resultados del análisis de las condiciones de inyección de los escenarios B.

Nº DE ENTRADAS	MATERIAL	Tª DEL MOLDE (°C)	Tª DEL MATERIAL (°C)	t DE INYECCIÓN (s)
2	PS	59	203	2.8
	PP	64	216	1.71
	ABS	63	241	1.81

Al comparar las condiciones óptimas para los casos de una y dos entradas, se observa una diferencia significativa en el tiempo de inyección, siendo este menor en el escenario con dos entradas. En cambio, tanto la temperatura del molde como la del material permanecen constantes, independientemente del número de entradas.

Estas condiciones óptimas, determinadas por el software, se tomarán como punto de partida para el siguiente paso: la simulación de la etapa de llenado.

4.4 Simulación del proceso de llenado

A partir de las condiciones determinadas en los apartados anteriores, se llevó a cabo la simulación del proceso de llenado para los distintos escenarios de entrada seleccionados, empleando en cada caso los parámetros óptimos definidos para cada material, véase Tabla 4.6. Además, para la simulación se consideró una presión de trabajo de la inyectora de 180 MPa, una presión de llenado (V/P) del 99% y un tiempo de molde abierto de 5 segundos.

Tabla 4.6 Condiciones iniciales determinadas por el software para la simulación del proceso de llenado.

ESCENARIO	Tª DEL MOLDE (°C)	Tª DEL MATERIAL (°C)	t DE INYECCIÓN (s)
A - PS	59	201	3.37
A - PP	64	216	1.84
A - ABS	63	241	2.05
B - PS	59	203	2.8
B - PP	64	216	1.71
B - ABS	63	241	1.81

El objetivo último de la simulación es evaluar y comparar los resultados obtenidos con cada una de las configuraciones seleccionadas, con el fin de identificar el material o los materiales que ofrecen el mejor comportamiento en la etapa de llenado.

Evaluación de la simulación de llenado con parámetros óptimos

Los resultados obtenidos en la simulación para los distintos escenarios se recogen en la Tabla 4.7. A continuación, se pasa a discutir e interpretar los datos arrojados por dicha simulación, con el objetivo de identificar la configuración más favorable en términos de llenado.

Tabla 4.7 Resultados de la simulación de llenado según las condiciones óptimas determinadas por el software.

ESCENARIO	CAÍDA DE PRESIÓN (MPa)	PRESIÓN MAX. (MPa)	CONFIABILIDAD DE LLENADO (%)	CALIDAD (%)	Tª DEL FRENTE DE FLUJO (°C)	t DE CICLO ESTIMADO (s)
A - PP	29,69	59	80,4	99,8	216,9	20,22
A - ABS	65,21	130	99,8	74,6	243	22,34

A – PS	66,48	133	99,9	72,6	202,8	30,46
B – PP	22,24	45	86,4	99,9	216,5	18,35
B – ABS	48,89	98	99,9	93	242,42	19,87
B – PS	48,51	97	99,8	89,4	204	27,14

Caída de presión / Presión Max.

En primer lugar, **Tabla 4.8**, se estudian los resultados obtenidos para la caída de presión y/o presión máxima, los cuales se encuentran estrechamente relacionados entre sí. La caída de presión representa la presión necesaria para llenar la cavidad del molde en las condiciones definidas. Por su parte, la presión máxima se estima como el doble de dicha caída, ya que *Moldflow* asume que la inyectora debe operar como máximo al 50 % de su capacidad de presión.

Sin embargo, en este punto es necesario aplicar un criterio más estricto. Dado que aún no se han incorporado al modelo los elementos del sistema de alimentación (canales, compuertas, etc.), es previsible que los requerimientos de presión aumenten. Por tanto, se debe garantizar que el diseño final del molde se mantenga por debajo del 70 % del límite de presión de la máquina; tomando como referencia una inyectora con una capacidad máxima de 180 MPa.

Teniendo en cuenta estos criterios, puede concluirse que únicamente el PP permitiría fabricar la pieza sin superar los límites operativos. En cambio, para el ABS y el PS se requerirían inyectoras de mayor capacidad, lo cual compromete la viabilidad del proceso y hace que estas opciones resulten menos favorables.

Tabla 4.8 Resumen de los resultados referentes a la presión en la simulación de llenado. El color verde indica que el escenario es viable, mientras que el rojo señala los escenarios no viables (> 180 MPa).

ESCENARIO	CAÍDA DE PRESIÓN (MPa)	PRESIÓN ASUMIENDO EL 70 % DEL LÍMITE (MPa)
A – PP	29,69	99
A – ABS	65,21	215

A – PS	66,48	222
B – PP	22,24	74
B – ABS	48,89	163
B – PS	48,51	162

Confiabilidad y Calidad

A continuación, se procede al análisis de los resultados relativos a la confiabilidad de llenado y a la calidad de la pieza. En este caso, se establece como umbral de aceptabilidad un valor mínimo del 95 % en ambos parámetros. Bajo este criterio, todos los escenarios analizados deben ser descartados, al no alcanzar los niveles requeridos. La **Tabla 4.9** presenta un resumen de los valores de confiabilidad de llenado y calidad de la pieza obtenidos en la simulación.

Tabla 4.9 Resumen de los resultados referentes a la confiabilidad y calidad en la simulación de llenado. El color verde indica que el escenario es viable, mientras que el rojo señala los escenarios no viables.

ESCENARIO	CONFIABILIDAD DE LLENADO	CALIDAD
O	(%)	(%)
A – PP	80,4	99,8
A – ABS	99,8	72,6
A – PS	99,9	93
B – PP	86,4	74,6
B – ABS	99,9	89,9
B – PS	99,8	89,4

En este punto del trabajo se han descartado todos los escenarios planteados, ya sea por requerimientos de presiones inviables o por presentar una confiabilidad insuficiente en el llenado o en la calidad final de la pieza. Por tanto, es necesario modificar las condiciones de inyección antes de continuar con la evaluación de la simulación de llenado.

Evaluación de llenado con parámetros tras iteración

Para realizar la modificación de los parámetros de inyección, *Moldflow Adviser* ofrece de forma dinámica posibles soluciones para cada uno de los resultados obtenidos en la simulación de llenado. Basándose en estas indicaciones —véase anexo: Indicaciones de Moldflow—, se aplicaron las sugerencias más adecuadas a cada caso, las cuales incluyeron:

- Aumentar la temperatura del molde,
- Aumentar la temperatura del material fundido y/o
- Disminuir el tiempo de inyección.

Para asignar nuevos valores a los parámetros de inyección, se consultaron las ventanas de proceso de cada material, generadas mediante la herramienta *Molding Window* de *Moldflow Adviser*, véanse Ilustración 4.22 e Ilustración 4.23. Estas ventanas definen los límites operativos dentro de los cuales debe mantenerse cualquier modificación, siendo la zona verde la que indica el rango seguro de procesamiento. Dicha zona representa la tolerancia del material frente a variaciones en los parámetros de inyección. Cuanto más amplia sea esta área, mayor será la robustez del proceso, ya que permite más combinaciones válidas de temperatura de fusión, temperatura del molde y tiempo de inyección que conducen a un llenado exitoso

Por ejemplo, en el caso del PS, ofrece una ventana de proceso más extensa y mayor tolerancia. Por el contrario, materiales con zonas verdes más estrechas, como el PP en nuestro caso, requieren condiciones más precisas, mostrando menor tolerancia a variaciones en los parámetros de inyección.

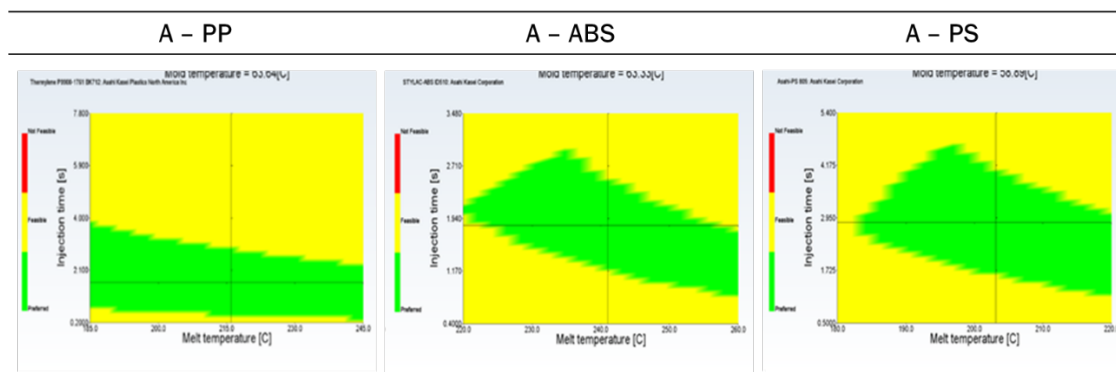


Ilustración 4.22 Ventana de proceso de los escenarios con 1 entrada.

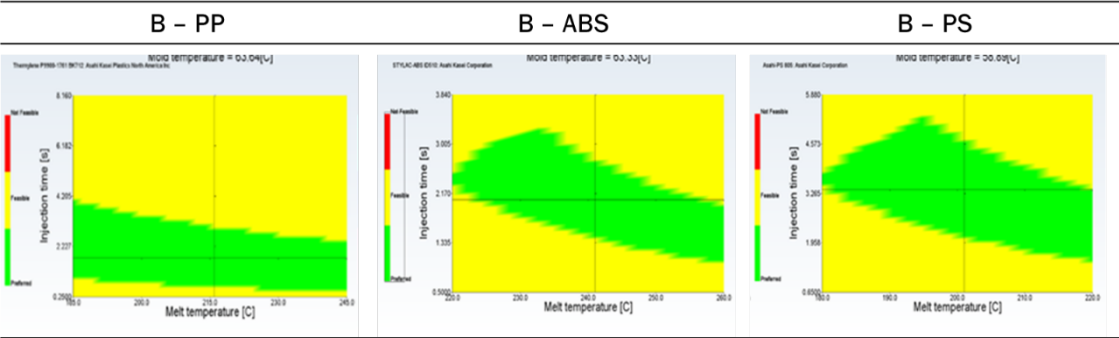


Ilustración 4.23 Ventana de proceso de los escenarios con 2 entradas.

Las iteraciones realizadas para obtener unos nuevos parámetros de inyección se encuentran en el

A3. SIMULACIONES ADICIONALES. Donde se fue simulando, variando, el tiempo de inyección de 0 a 1 seg y las T° de Molde y del Material de 0 a 10°C

Las nuevas condiciones para la simulación de llenado, determinadas por iteración según las ventanas de proceso, se encuentran en la Tabla 4.10. A partir de estas nuevas condiciones se procede a realizar de nuevo la evaluación de la simulación de llenado.

Tabla 4.10 Nuevas condiciones de inyección tras la iteración para la simulación del proceso de llenado.

ESCENARIO	Tª DEL MOLDE (°C)	Tª DEL MATERIAL (°C)	t DE INYECCIÓN (s)
A - PP	68	220	1,84
A - ABS	63	246	1,2
A - PS	59	210	1,5
B - PP	66	221	1
B - ABS	63	246	1,15
B - PS	60	208	1,5

El resumen de los resultados obtenidos tras la nueva evaluación de simulación de llenado se muestra en la **Tabla 4.11**. Para llegar a esos resultados, los nuevos parámetros de llenado se recogen en la **Tabla 4.10**.

Cabe recordar que el objetivo último de la simulación es evaluar y comparar los resultados obtenidos con cada una de las configuraciones seleccionadas, con el fin de identificar el material o los materiales que ofrecen el mejor comportamiento en la etapa de llenado.

Tabla 4.11 Resultados de la simulación de llenado según las nuevas condiciones.

ESCENARIO	CAÍDA DE PRESIÓN (MPa)	PRESIÓN MAX. (MPa)	CONFIABILIDAD DE LLENADO (%)	CALIDAD (%)	Tª. FRENT E DE FLUJO (°C)	t DE CICLO ESTIMADO (s)
A-PP	30,4	59,38	88,5	100	220,9	16,75
A-ABS	60,81	121,62	100	96,7	249,1	21,84
A-PS	58,61	117,2	100	94,2	212,8	29,70
B-PP	22,24	44,48	99,9	99,9	221,5	18,84
B-ABS	46,11	92,22	100	98,9	247,5	19,42

B-PS	45,74	91,48	100	95,2	209,0	27,08
-------------	-------	-------	-----	------	-------	-------

Caída de Presión/Presión Max

Tal y como se explicó en la primera evaluación de la simulación de llenado, la caída de presión y la presión máxima están estrechamente relacionados; siendo la caída de presión una representación de la presión necesaria para llenar la cavidad del molde en las condiciones definidas. Del mismo modo, la presión máxima se estima como el doble de dicha caída, ya que *Moldflow* asume que la inyectora debe operar como máximo al 50 % de su capacidad de presión. Sin embargo, en este punto es necesario aplicar un criterio más estricto. Dado que aún no se han incorporado al modelo los elementos del sistema de alimentación (canales, compuertas, etc.), es previsible que los requerimientos de presión aumenten. Por tanto, se debe garantizar que el diseño final del molde se mantenga por debajo del 70 % del límite de presión de la máquina; tomando como referencia una inyectora con una capacidad máxima de 180 MPa.

Teniendo en cuenta los criterios establecidos, se concluye que los escenarios A-ABS y A-PS superan el límite de presión admisible, requiriendo una inyectora con una capacidad superior a 180 MP, véase Tabla 4.12. Por tanto, supondrían opciones menos viables para la fabricación de la pieza.

Tabla 4.12 Resumen de los resultados referentes a la presión en la simulación de llenado tras modificación de los parámetros. El color verde indica que el escenario es viable, mientras que el rojo señala los escenarios no viables (> 180 MPa).

MATERIAL	PRESIÓN MAX (MPA)	CAÍDA DE PRESIÓN (MPA)	PRESIÓN ASUMIENDO EL 70 % DEL LÍMITE (MPA)
A-PP	60,8	30,4	101
A-ABS	121,62	60,81	203
A-PS	117,22	58,61	195
B-PP	46,88	23,44	78
B-ABS	92,22	46,11	153

B-PS	91,48	45,74	152
------	-------	-------	-----

Confiabilidad/Calidad

Siguiendo el mismo criterio aplicado anteriormente, cualquier resultado por debajo del 95 % de confiabilidad en el llenado y en la calidad de la pieza se considerará inaceptable. A continuación, la Tabla 4.13, muestra de forma resumida los valores de confiabilidad de llenado y calidad obtenidos en la nueva simulación. Tal y como puede observarse, en base a los criterios establecidos el escenario A-PP debe ser descartado al presentar una confiabilidad de llenado de tan solo el 88,5 % pese a presentar un porcentaje de calidad del 100%. Por otra parte, el escenario A-PS podrían considerarse aceptables. El resto de los escenarios con dos entradas también cumplen con el umbral establecido bajo las nuevas condiciones, ya que se encuentran dentro de un margen de tolerancia razonable para este tipo de análisis, especialmente teniendo en cuenta que aún no se han incorporado al modelo elementos como, por ejemplo, el sistema de refrigeración.

Tabla 4.13 Resumen de los resultados referentes a la confiabilidad y calidad en la simulación de llenado tras modificación de los parámetros. El color verde indica que el escenario es viable, el rojo señala los escenarios no viables y el amarillo aquellos que se encuentran en un margen de tolerancia aceptable.

Material	Confiabilidad de Llenado	Calidad
A-PP	88,5	100
A-ABS	100	96,9
A-PS	100	94,2
B-PP	99,9	99,9
B-ABS	100	98,9

B-PS	100	95,2
------	-----	------

Temperatura frente del flujo

En tercer lugar, se analiza el comportamiento térmico del frente de flujo. Este parámetro está relacionado con el control de la temperatura del material durante el proceso de llenado, aspecto clave para garantizar la calidad final de la pieza. En la **Tabla 4.14** se recogen los resultados de la temperatura del frente de flujo y su comparación con la temperatura establecida del material y la máxima temperatura de procesamiento, valor proporcionado directamente por *Moldflow Adviser*.

Tabla 4.14 Resumen de los resultados referentes a la temperatura del frente del flujo en la simulación con las nuevas condiciones. El color verde indica que el escenario es viable, mientras que el rojo señala los escenarios no viables.

MATERIAL	Tª DEL MATERIAL (°C)	Tª MAX. DE PROCESAMIENTO DEL MATERIAL (°C)	Tª. FRENTE DE FLUJO (°C)	
			MIN.	MAX.
A-PP	220	245	206,2	220,9
A-ABS	246	260	230,1	249,1
A-PS	210	220	206,9	212,6
B-PP	221	245	209,3	221,5
B-ABS	246	260	235,9	247,5
B-PS	208	220	202,3	209,0

Tal y como se observa en los resultados obtenidos, en ninguno de los escenarios analizados se supera la temperatura máxima admisible para el material correspondiente. En todos los casos, aunque se produce un incremento de la temperatura debido al cizallamiento del material durante el llenado de las cavidades, la temperatura del frente de flujo se mantiene por debajo del umbral de la temperatura de degradación del material. Esto indica que las condiciones térmicas de procesamiento son adecuadas y no comprometen la integridad del material durante el proceso de inyección.

En cuanto a la temperatura mínima del frente de flujo, no se observan valores que comprometan el llenado de la cavidad, ya que las pérdidas térmicas se

sitúan entre 3 °C y 16 °C, dentro de un rango considerado aceptable. Se toma como referencia un margen admisible de caída térmica inferior a 20–25 °C, ya que este valor asegura que el material mantenga la fluidez suficiente para completar el llenado sin riesgo de solidificación prematura ni aparición de defectos superficiales.

Tiempo de ciclo

Finalmente, en la Tabla 4.15 se presentan los resultados del análisis de tiempo de ciclo estimado comparando los valores obtenidos en cada simulación. En ambos escenarios analizados, con una y dos entradas, el PS presenta el mayor tiempo de ciclo. Este parámetro permite valorar la eficiencia del proceso de inyección, ya que un menor tiempo de ciclo se traduce en una mayor productividad y un menor consumo energético.

Tal y como se observa, el PS presenta los tiempos de ciclo más elevados en ambos escenarios, lo que lo convierte en el material menos favorable desde el punto de vista del rendimiento del proceso. Por el contrario, el PP muestra los tiempos de ciclo más bajos, situándose como el material más eficiente en este aspecto. El ABS ofrece valores intermedios, aunque más próximos a los del PP, lo que sugiere un comportamiento más favorable cuando se realice la optimización del sistema de inyección.

Tabla 4.15 Resumen de los resultados referentes al tiempo de ciclo estimado en la simulación de llenado. El color verde indica los escenarios con menor tiempo de ciclo, mientras que el rojo señala aquellos con el tiempo más elevados y en amarillo aquellos que se encuentran en un margen de tolerancia aceptable.

Material	Tiempo de Ciclo Estimado (s)
A-PP	16,75
A-ABS	21,84
A-PS	30,46
B-PP	18,84
B-ABS	19,42
B-PS	27,08

Finalmente, y a modo de resumen, la **Tabla 4.16** recoge las conclusiones correspondientes a cada uno de los escenarios analizados, indicando si los resultados obtenidos en la simulación de llenado son favorables, se encuentran dentro de un rango admisible o, por el contrario, no son aceptables en relación con cada uno de los parámetros evaluados.

Tabla 4.16 Tabla resumen con las conclusiones de la simulación realizada con las nuevas condiciones de inyección. El color verde indica los escenarios viables, el rojo señala aquellos que no lo son y en amarillo aquellos que se encuentran en un margen de tolerancia aceptable.

ESCENARIO	PRESIÓN REQUERIDA (MPa)	CONFIABILIDAD DE LLENADO (%)	CALIDAD (%)	Tª DEL FRENTE DE FLUJO (°C)	t DE CICLO ESTIMADO (S)
A – PP					
A – ABS					
A – PS					
B – PP					
B – ABS					
B – PS					

Como conclusión del proceso de evaluación de la simulación de llenado, se puede afirmar que las condiciones óptimas inicialmente propuestas por el software no resultaron adecuadas, lo que obligó a ajustar los parámetros de inyección en base a las ventanas de procesamiento específicas de cada material. Este reajuste permitió llevar a cabo un segundo análisis más completo, en el que se evaluaron todos los parámetros relevantes (presión requerida, confiabilidad de llenado, calidad, temperatura del frente de flujo y tiempo de ciclo estimado) con criterios más realistas. A partir de estos resultados, se concluye que los escenarios con una única entrada (escenarios A) deben descartarse, ya sea por requerir presiones excesivas o por no garantizar un llenado fiable ni una calidad final aceptable de la pieza. Las condiciones de llenado definitivas, válidas para la siguiente fase del estudio, se recogen por tanto en la Tabla 4.10.

4.5. Análisis de la Calidad de Refrigeración y de los Rechupes

Una vez finalizada la evaluación de la simulación de llenado y tomando como punto de partida las conclusiones de este, se seleccionaron las condiciones de inyección y se identificaron como viables únicamente los escenarios con dos entradas para los tres materiales analizados, descartando los escenarios con una única entrada para todos los materiales.

A continuación, el objetivo del análisis se centrará en ampliar el estudio de la etapa de llenado previamente realizado, incorporando al mismo la evaluación de la calidad del enfriamiento de la pieza, la predicción de posibles marcas de rechupes y la identificación de áreas críticas en la geometría. Para ello, se emplearán las herramientas *Cooling Quality* y *Sink Marks* del software *Moldflow Adviser*, orientadas a la evaluación de la calidad del enfriamiento y a la estimación de posibles marcas de rechupe, respectivamente.

Es importante señalar que en esta fase aún no se ha definido un sistema de refrigeración. Por tanto, *Moldflow* considera que la pieza se encuentra en el

centro de un bloque metálico, un molde teórico sin canales de refrigeración, y permanece allí durante un tiempo determinado. El análisis resultante muestra cómo el calor se disipa de forma natural desde el interior de la pieza hacia las zonas periféricas del bloque.

Este análisis adquiere especial relevancia en esta etapa del proyecto, ya que permite evaluar de forma preliminar cómo se comportará la pieza durante el enfriamiento, incluso antes de haber diseñado el sistema de refrigeración. La evaluación de la calidad del enfriamiento bajo estas condiciones proporciona información clave sobre la uniformidad térmica en la pieza, permitiendo anticipar posibles deformaciones o defectos superficiales. Es decir, más allá de la eficiencia térmica del molde que se buscará optimizar en fases posteriores, este análisis ya permite verificar si la geometría de la pieza es adecuada para enfriarse correctamente y mantener su estabilidad dimensional tras el moldeo.

Los resultados de la simulación se recogen en la Tabla 4.17, donde se presentan los datos obtenidos para cada escenario.

Tabla 4.17 Resultados de calidad de enfriamiento y marcas de rechupe.

ESCENARIO	CALIDAD DE ENFRIAMIENTO (%)	MARCAS DE RECHUPE ESTIMADAS (MM)
B - PP	98.6	5.36×10^{-2}
B - ABS	98.6	1.77×10^{-2}
B - PS	98.6	1.19×10^{-2}

Calidad de enfriamiento

En primer lugar, se analiza el resultado de la calidad de enfriamiento. Para este parámetro se establece un umbral de aceptabilidad mínimo del 95 %. En todos los casos analizados se observa una alta calidad de enfriamiento, con valores del 98,6 %, lo que indica una distribución térmica adecuada en el molde y, por tanto, condiciones favorables para un enfriamiento uniforme de la pieza.

Además del valor global de calidad de enfriamiento, resulta relevante analizar la distribución de temperaturas en la superficie de la pieza al finalizar el llenado. En la Ilustración 4.24 se observa un ejemplo que muestra las zonas con mayor concentración térmica se localizan principalmente en las esquinas y en áreas más alejadas del punto de inyección. Este tipo de distribución térmica debe considerarse durante el diseño del sistema de refrigeración, con el objetivo de favorecer una disipación del calor más uniforme y eficiente, minimizando así posibles deformaciones o defectos asociados al gradiente térmico.

Ambos resultados confirman que el diseño térmico actual del molde es adecuado para garantizar un enfriamiento uniforme de la pieza.

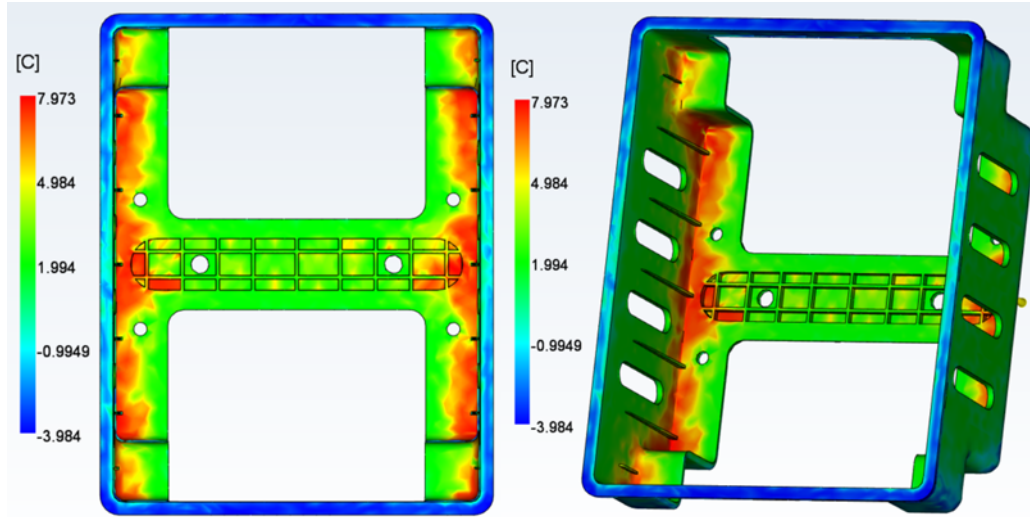


Ilustración 4.24 Mapa de distribución térmica en la superficie de la pieza al finalizar el llenado.

Las zonas en tonos cálidos (rojos y naranjas) indican áreas con mayor concentración de temperatura, principalmente localizadas en las esquinas y regiones más alejadas del punto de inyección. Las áreas en tonos fríos (azules y verdes) representan zonas con menor temperatura.

Marcas de Rechupes Estimadas

En segundo lugar, se estudiaron los resultados sobre las marcas de rechupes estimadas. La Ilustración 4.25, muestra la predicción de zonas con riesgo de marcas de rechupe en la superficie de la pieza tomando como ejemplo uno de los tres materiales estudiados. El mapa de colores identifica las áreas con mayor probabilidad de formación de estos defectos, localizadas principalmente en zonas con acumulación de material, como nervios o refuerzos, tal y como se señala en la ilustración. Las intensidades cromáticas reflejan la magnitud estimada del hundimiento, según se recoge en la Tabla 4.17. En todos los casos los valores que se obtuvieron fueron inferiores incluso al grosor promedio de un cabello humano (aproximadamente $7,5 \times 10^{-2}$ mm). Por tanto, puede considerarse que en el caso de producirse no comprometerían la calidad superficial de la pieza ni serían perceptibles a simple vista.

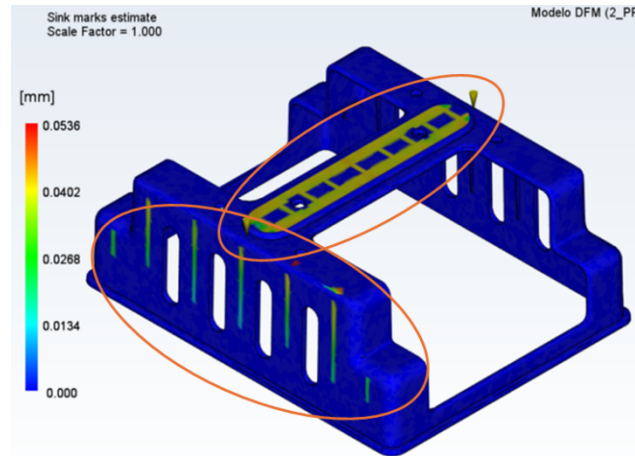


Ilustración 4.25 Predicción de zonas con riesgo de marcas de rechupe en la superficie de la pieza.

Respecto del efecto de los materiales en ambos parámetros, es interesante destacar como el PP presentó el valor más alto de rechupe (Tabla 4.17). Este resultado es coherente con su naturaleza semicristalina, que implica una mayor contracción volumétrica al solidificarse. Si observamos la curva PVT del polipropileno, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde puede apreciarse cómo el volumen específico del material disminuye de forma más abrupta al descender la temperatura. Esta característica estructural puede influir en la aparición de un mayor número de deformaciones internas, como las marcas de rechupe, durante el enfriamiento. Por el contrario, vemos como para el caso del PS (para el ABS ocurre igual, Ilustración) esta variación volumétrica es mucho menor, Ilustración 4.28, Ilustración 4.27, Ilustración 4.28, Tabla 4.18.

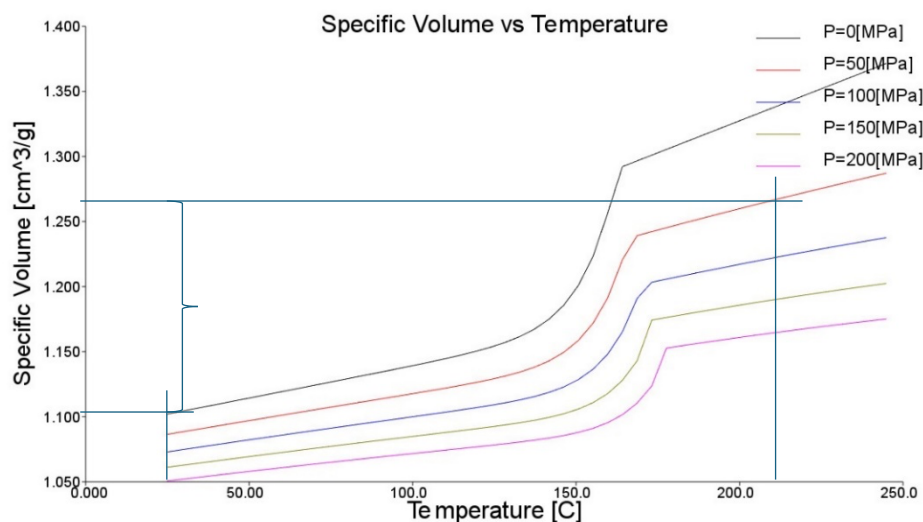


Ilustración 4.26 Curva PVT del PP: evolución del volumen específico frente a temperatura

Tabla 4.18 Comparación de variación de volumen de los diferentes materiales.

MATERIAL	PP	ABS	PS
VOLUMEN INICIAL (cm ³ /g)	1,028	0,9774	0,96
VOLUMEN FINAL (cm ³ /g)	1,102	0,9646	0,9541
CONTRACCIÓN (cm ³ /g)	0,18	0,0128	0,0059

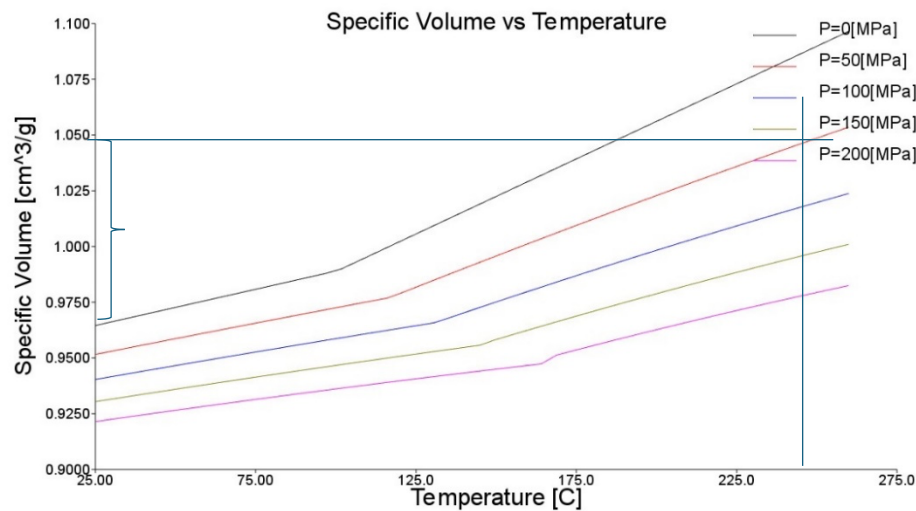


Ilustración 4.27 Curva PVT del PS: evolución del volumen específico frente a Temperatura y la presión

Este análisis complementario ha permitido identificar aspectos relevantes del comportamiento térmico de cada material, en particular el mayor nivel de contracción asociado al PP y su posible efecto en las marcas de rechupe. No obstante, todos los escenarios presentan valores de enfriamiento y deformación dentro de rangos aceptables, por lo que los resultados no condicionan directamente la selección del material o la geometría del molde, aunque sí ofrecen criterios valiosos a considerar en fases futuras del diseño y validación.

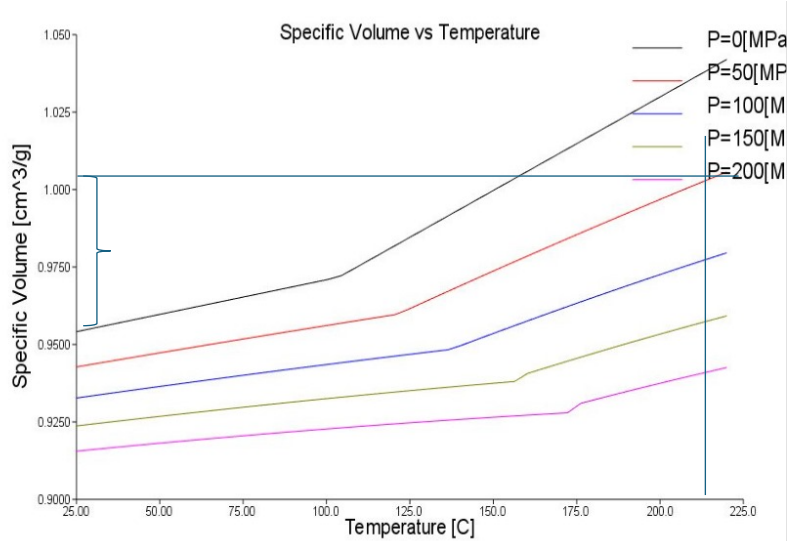


Ilustración 4.28 Curva PVT del ABS: evolución del volumen específico frente a Temperatura y la Presión

En resumen, el análisis complementario de la calidad de enfriamiento y de las marcas de rechupe confirma la viabilidad térmica de los escenarios con dos entradas seleccionados previamente. Todos los materiales analizados mostraron una calidad de enfriamiento elevada y una deformación superficial dentro de los márgenes aceptables, sin riesgo de comprometer la calidad final de la pieza. Además, se observó como el PP presentó el valor más alto de rechupe, debido a su naturaleza semicristalina, manteniéndose en cualquier caso dentro de los rangos aceptables. En conjunto, los resultados obtenidos en este análisis refuerzan la aplicabilidad de los escenarios seleccionados hasta el momento.

4.6. Diseño del sistema de alimentación y de las cavidades múltiples

Todo lo analizado hasta este punto se ha centrado en la pieza, verificando que su diseño cumple con los requisitos establecidos y que puede ser inyectada de forma adecuada, garantizando la calidad final de este componente. A partir de este punto del trabajo, el análisis continuará centrándose ahora en el diseño del molde.

Por tanto, en este apartado se realiza el modelado del sistema de alimentación y se define el diseño de cavidades múltiples del molde, con el objetivo de adaptar el mismo a un proceso de producción, el cual optimice el tiempo de ciclo y teniendo en cuenta el aprovechamiento del material. Para ello, se configuraron distintos escenarios dentro de las ventanas *Geometry*, *Layout*, *Mold* y *Feed System*, realizando análisis mediante las herramientas *Fill* y *Cooling Quality* del software.

El planteamiento de estos análisis se centró en evaluar diferentes configuraciones de distribución (layout) para los diferentes materiales seleccionados, con el objetivo de analizar el comportamiento en cada simulación. A partir de los resultados obtenidos, se procedió a determinar la configuración más adecuada en términos de calidad y de eficiencia del proceso.

Para ello, se aplicarán los principios de Diseño para Manufactura o DFM, además de usarse los parámetros de inyección a los que se llegó en el apartado de Simulación del proceso de llenado, para cada escenario.

Anteriormente en la parte 3.2.

Molde, se justificó y explicó, el porqué de la elección de un molde de 2 placas, con un sistema alimentado con colada caliente en un molde de acero P20.

Principalmente se eligieron estos componentes porque, como se dispone de varias cavidades en el diseño y al no tener el canal de colada visible, hace que se obtenga un buen acabado y control de flujo.

Sistema de alimentación

Antes de analizar las distintas distribuciones de las cavidades, se modeló el sistema de alimentación, diseñando todos los elementos con las mismas dimensiones, independientemente de la configuración del layout, tal como se muestra en la Tabla 4.19. Además, en la Ilustración 4.29 se presenta un ejemplo del sistema de alimentación utilizado en esta etapa, señalando los diferentes canales que lo componen.

Tabla 4.19 Dimensionado del Sistema de Alimentación aplicado a todos los escenarios.

	BEBEDERO	CANALES HORIZONTALES			CANALES VERTICALES	ENTRADA
		A	B	C		
GEOMETRÍA	Cónica	Cónica	Cónica	Cónica	Circular	Cónica
DIÁMETRO (mm)	$\varnothing_{\text{inicial}} = 8$ $\varnothing_{\text{final}} = 10$	$\varnothing_{\text{inicial}} = 10$ $\varnothing_{\text{final}} = 8$	$\varnothing_{\text{inicial}} = 10$ $\varnothing_{\text{final}} = 8$	$\varnothing_{\text{inicial}} = 10$ $\varnothing_{\text{final}} = 8$	$\varnothing = 8$	$\varnothing_{\text{mayor}} = 3$ $\varnothing_{\text{menor}} = 1$
Longitud (mm)	70	111	128	42	70	-
NÚMERO	1	1	2	4	8	8

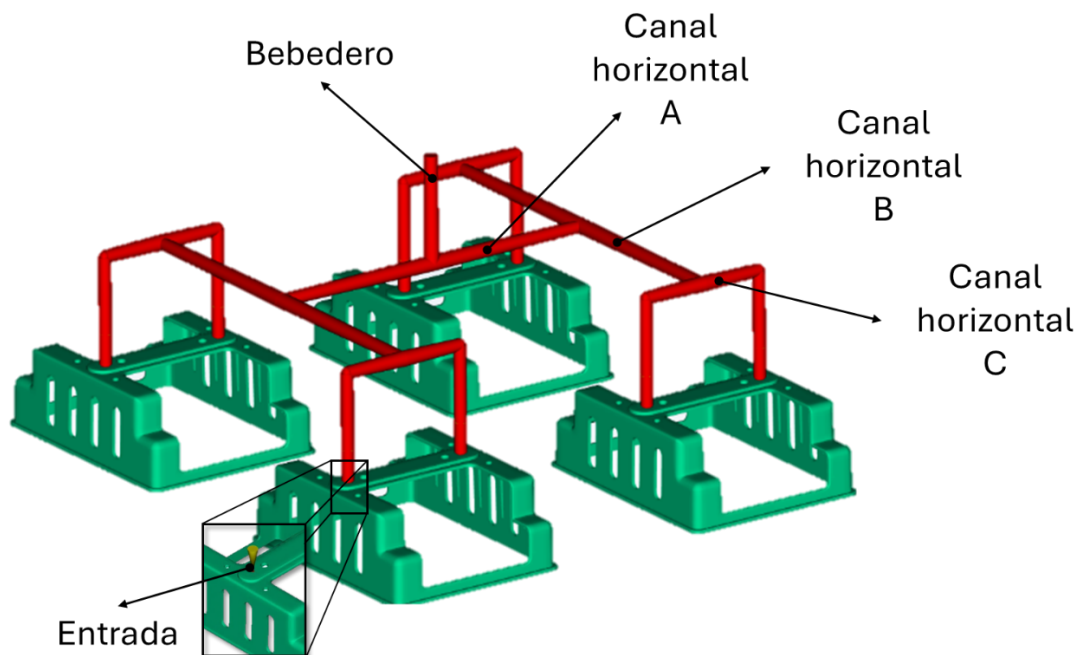


Ilustración 4.29 Imagen del modelo del sistema de alimentación.

Prueba de diferente LAYOUTS

Una vez definido el sistema de alimentación, se procedió a estudiar diferentes configuraciones de cavidades múltiples, es decir, la disposición de varias cavidades idénticas dentro del molde. Este tipo de simulación permite analizar cómo influye dicha configuración en el equilibrio del llenado, los tiempos de ciclo y las presiones requeridas. En la Ilustración 4.30 se muestran las configuraciones evaluadas.

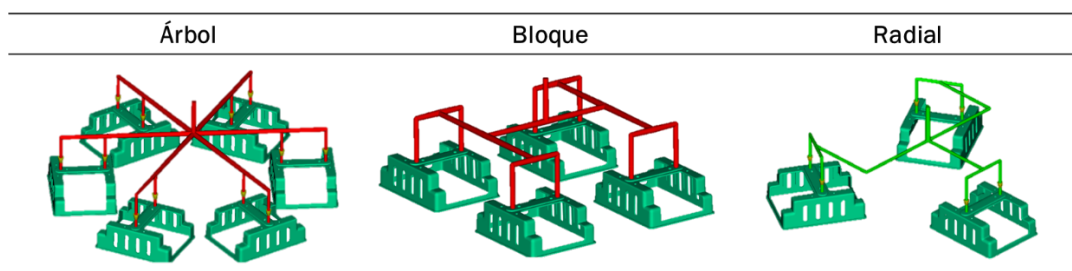


Ilustración 4.30 Representación de las diferentes configuraciones de distribución de cavidades (o layouts) consideradas.

En la Tabla se muestran los resultados obtenidos en esta simulación. Las simulaciones correspondientes a cada configuración se encuentran detalladas

en el ANEXO, A4. Etapa del diseño del sistema de alimentación. El parámetro más crítico en este análisis es el llenado homogéneo, ya que un resultado negativo indica que las cavidades no se llenarán de forma uniforme bajo las condiciones fijadas en la etapa de llenado. En ese caso, sería necesario volver atrás y modificar las condiciones de llenado para subsanarlo.

En nuestro caso, aquellas configuraciones que no permitían un llenado homogéneo fueron descartadas, véanse los resultados Tabla 4.20. Por consiguiente, se descartaron las configuraciones radiales y en árbol, al no lograr un llenado equilibrado entre cavidades. Fueron las configuraciones en bloque las que sí garantizaban un llenado homogéneo en los tres escenarios analizados.

Tabla 4.20 Resultados de los diferentes diseños tras la simulación de llenado y refrigeración.

Se compara de rojo los layouts que no reparten el flujo de manera homogénea y de verde los que si lo hacen.

ESCENARIO	FORMA DEL LAYOUT	LLENADO HOMOGÉNEO	CAIDA DE PRESIÓN (MPa)	CONFIABILIDAD DE LLENADO (%)	CALIDAD DE LLENADO	CALIDAD DE ENFRIAMIENTO (%)	Tª AL FRENTE DE FLUJO		TIEMPO DE LLENADO	TIEMPO DE CICLO
							MIN	MAX		
B – PP	Radial	NO	80,08	100	99,5	98,6	221,1	231,9	1,07	14,16
	Bloque	SI	53,03	100	100	99,3	212,4	223,2	1,11	13,91
B - ABS	Árbol	NO	81,65	100	99,4	98,5	241,1	254,3	1,23	14,62
	Bloque	SI	53,20	100	100	99,3	231,8	251,2	1,23	13,93
B - PS	Radial	NO	68,44	100	98,3	99,3	200,4	213,7	1,6	18,95

	Bloque	SI	75,37	100	98,5	99,3	205,5	217,5	1,57	19,24
--	--------	----	-------	-----	------	------	-------	-------	------	-------

Por tanto, el análisis se centró únicamente en las configuraciones en bloque, cuyo patrón de flujo resultó ser uniforme para todas las cavidades.

Caída de Presión

Como ya se comentó en el apartado de llenado, la caída de presión y la presión máxima están estrechamente relacionadas: la primera representa la presión necesaria para llenar la cavidad en las condiciones establecidas, y la segunda se estima como el doble de esta, ya que Moldflow asume que la inyectora opera, como máximo, al 50 % de su capacidad de presión. En esta etapa del estudio, ya no es necesario aplicar un criterio más restrictivo, dado que el modelo incluye todos los elementos del sistema de alimentación. Lo que debe garantizarse es que el diseño final del molde no supere el límite de presión de la máquina, tomando como referencia una inyectora con una capacidad máxima de 180 MPa.

En la Tabla 4.21 se muestra un resumen de los resultados de este parámetro. Como puede observarse, todos los valores de presión máxima requerida se sitúan por debajo de la capacidad máxima de la inyectora, por lo que no es necesario realizar ninguna modificación ni en las condiciones de llenado, ni en el sistema de alimentación, ni en la configuración de las cavidades múltiples.

Tabla 4.21 Resumen de los resultados referentes a la presión en la simulación de llenado de cavidades múltiples. El color verde indica que el escenario es viable (presión max. requerida < 180 MPa).

ESCENARIO	CAIDA DE PRESIÓN (MPa)	PRESIÓN MAX REQUERIDA (MPa)
B – PP	53,03	106,06
B - ABS	53,2	106,4
B - PS	75,37	150,74

Resulta interesante comparar la presión requerida para la inyección de una única cavidad o de 4, como es este último caso. La Tabla 4.22 muestra de forma comparativa la caída de presión para una sola cavidad y para un sistema de 4 cavidades. Obviamente, la presión requerida en moldes multicavidad es mayor, pero el incremento no es tan elevado como podría suponerse: la presión no se multiplica por 4, sino que, en el peor de los casos, apenas supera el doble, o incluso puede situarse en torno al 10 % más. Este res2

ultado pone de manifiesto el interés técnico de los moldes con cavidades múltiples, ya que permiten fabricar varias piezas por ciclo con un incremento moderado de la presión, siempre que el sistema de alimentación esté correctamente equilibrado y dimensionado para garantizar un llenado uniforme. Esta estrategia mejora notablemente la productividad del proceso sin requerir necesariamente una inyectora de mayor capacidad, lo que también repercute en una reducción del coste por pieza.

Tabla 4.22 Comparativa entre la presión demandada para el llenado de una única cavidad y para 4 cavidades, también se indica el incremento de dicha presión respecto.

ESCENARIO	CAÍDA DE PRESIÓN (MPa)		Δ (%)
	1 x CAVIDAD	4 x CAVIDADES	
B-PP	23,44	53,03	126.2
B-ABS	48,89	53,2	8.8
B-PS	45,74	75,37	64.8

Confiabilidad y calidad del llenado y calidad de enfriamiento

Se aplicó el mismo criterio que en etapas anteriores: cualquier resultado por debajo del 95 % de confiabilidad en el llenado o en la calidad de la pieza se considera inaceptable. Como se puede observar en la Tabla 4.20, todos los valores, tanto de confiabilidad de llenado como de calidad de llenado y de enfriamiento, superan dicho umbral, por lo que no es necesario tomar ninguna acción adicional al respecto.

Temperatura del frente de flujo

Tal y como se observa en los resultados obtenidos, Tabla 4.23, en ninguno de los escenarios analizados se supera la temperatura máxima admisible para el material correspondiente. La temperatura del frente de flujo se mantiene por debajo del umbral de degradación. Esto indica que las condiciones térmicas de

procesamiento son adecuadas y no comprometen la integridad del material durante el proceso de inyección

Tabla 4.23 Resumen de Resultados tras las simulaciones, de los valores de Temperatura alcanzados en cada escenario en comparación con a la máxima de cada material para analizar si hay degradación. El verde indica que no supera dicho limite.

ESCENARIO	TEMPERATURA AL FRENTE DE FLUJO		TEMPERATURA MAXIMA DEL MATERIAL	ΔT (°C)
	(°C)			
	MIN.	MAX		
B – PP	212,4	223,2	245	10,8
B - ABS	231,8	251,2	260	19,4
B - PS	205,5	217,5	220	12

Tiempo de llenado y tiempo de ciclo

Mientras que el resto de los parámetros de la simulación no han presentado inconvenientes, el tiempo de llenado y el tiempo de ciclo requieren especial atención. Si bien ambos tiempos son similares para el PP y el ABS, el PS muestra un incremento del 27,6 % en el tiempo de llenado y del 38,1 % en el tiempo de ciclo, véase Tabla 4.24. Esta diferencia es significativa: en una hora se podrían completar 4 ciclos de moldeo con PP y ABS, frente a solo 3 con PS. A escala industrial, esta reducción implica una menor producción por unidad de tiempo, lo que repercute directamente en los costes y la eficiencia del proceso. Por tanto, este aspecto se considera un factor determinante para descartar el PS como material viable en este caso.

Tabla 4.24 Resumen de resultados de tiempo, calidad de llenado y refrigeración y confiabilidad. Siendo verde los buenos resultados y rojo aquellos que no lo son tanto.

ESCENARIO	TIEMPO DE LLENADO		TIEMPO DE CICLO	
	(s)	Δ (%)	(s)	Δ (%)

B - PP	1,11	ref.	13,91	ref.
B - ABS	1,23	10,8	13,93	0,1
B - PS	1,57	27,6	19,24	38,1

Lo observado puede explicarse por la viscosidad del material, ya que el PS presenta un valor casi el muy elevado en comparación con el PP o el ABS, tal y como se muestra en la Tabla 4.25 y en las Ilustración 4.31, Ilustración 4.32 y Ilustración 4.33. Esta mayor viscosidad puede dar lugar a un incremento de las fuerzas de fricción y cizallamiento durante el llenado.

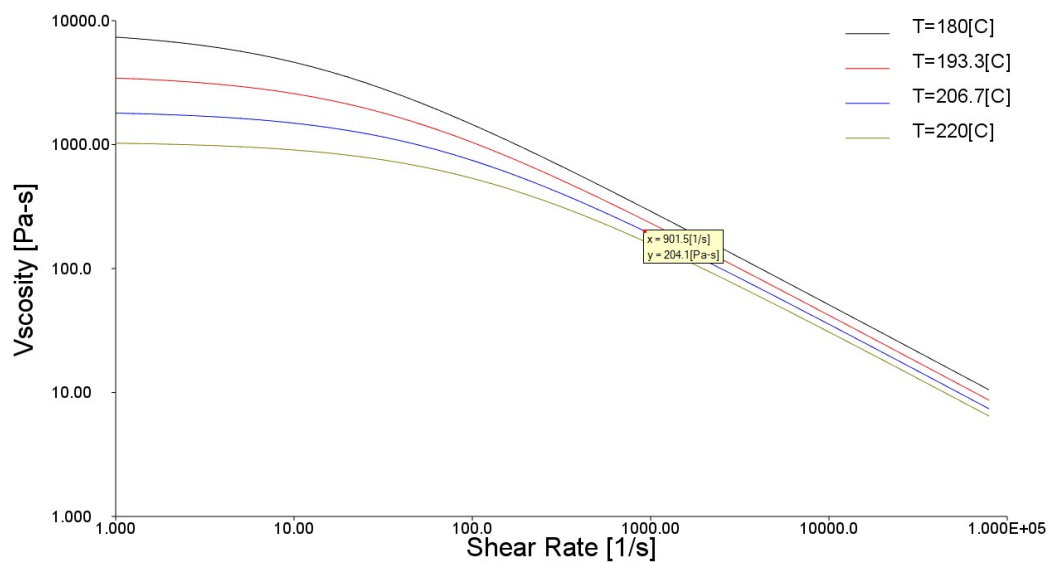


Ilustración 4.31 Gráfica de Plot Viscosity del PS

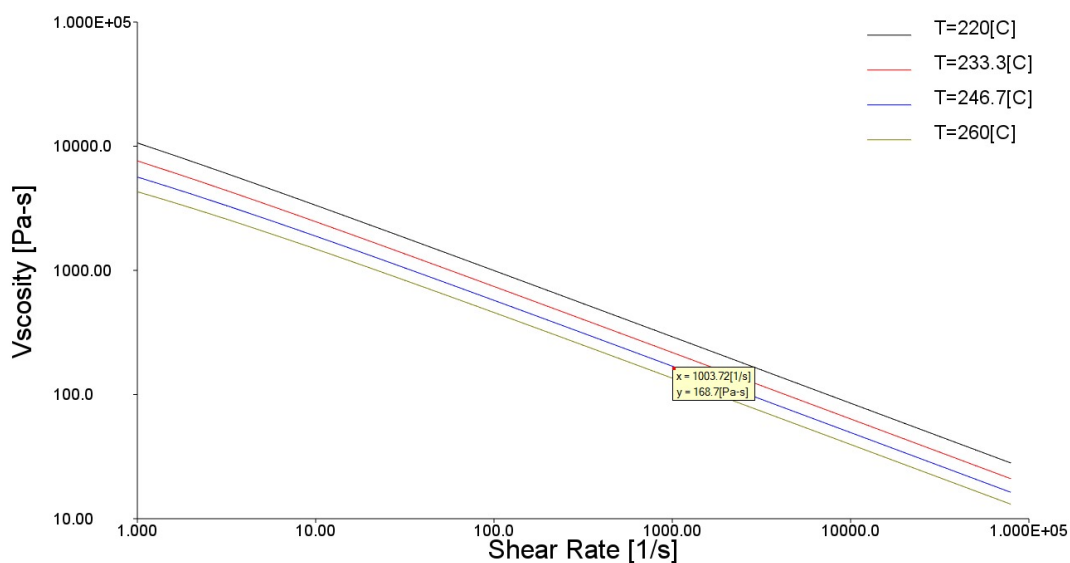


Ilustración 4.32 Gráfica de Plot Viscosity del PP

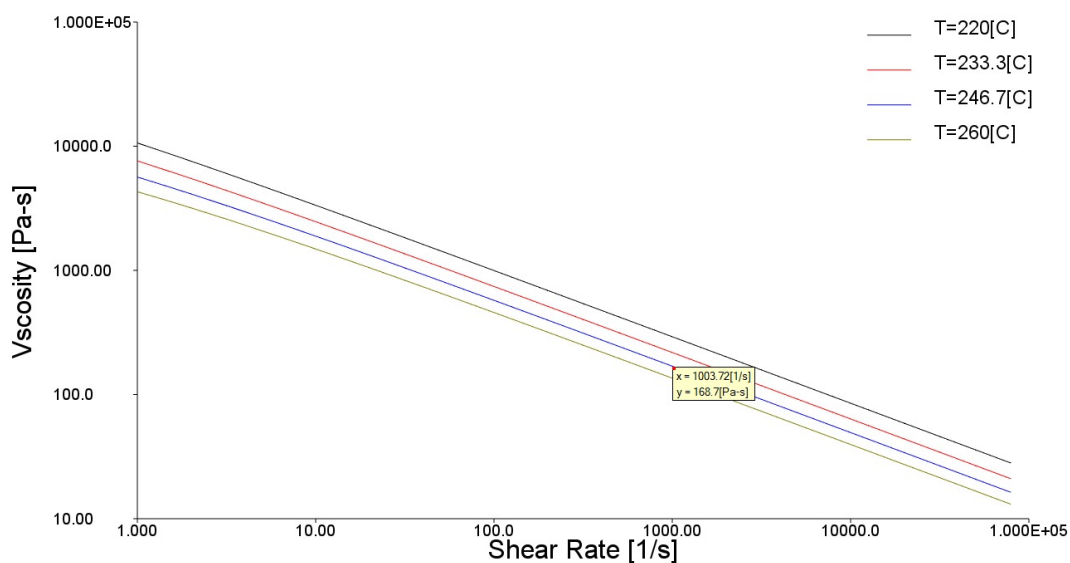


Ilustración 4.33 Gráfica de Plot Viscosity del ABS

Tabla 4.25 Comparación Aproximada de las viscosidades durante el proceso de llenado

MATEREIAL	VISCOSITY (Pa-s)	SHEAR RATE(1/s)	Tª MOLD(°C)
PP	76,51	1000-1100	221
ABS	168,72	1000	246
PS	204,1	880-900	208

Se han comparado de manera aproximada las viscosidades de los materiales, Tabla 4.25, obtenidas en función de la temperatura del material y del *shear*

stress (fuerza por unidad de área) en las zonas críticas donde se presentan las calidades más desfavorables.

Finalmente, y a modo de resumen, se concluye que, entre los escenarios evaluados, únicamente el layout con distribución en bloque, en forma de H, véanse Ilustración 4.34 e Ilustración 4.35. Está garantiza un llenado homogéneo y equilibrado en todas las cavidades del molde. Además, se ha determinado que una configuración de cuatro cavidades resulta óptima no solo por su buen desempeño técnico, sino también por su viabilidad a futuro: permite mantener la simetría si se decide ampliar el molde acoplando unidades iguales, algo que no sería posible con una distribución radial. Las dimensiones y características finales del sistema de alimentación y configuración seleccionado se muestran en la ilustración, definiendo así el punto de partida para el siguiente apartado, centrado en el diseño del sistema de refrigeración.

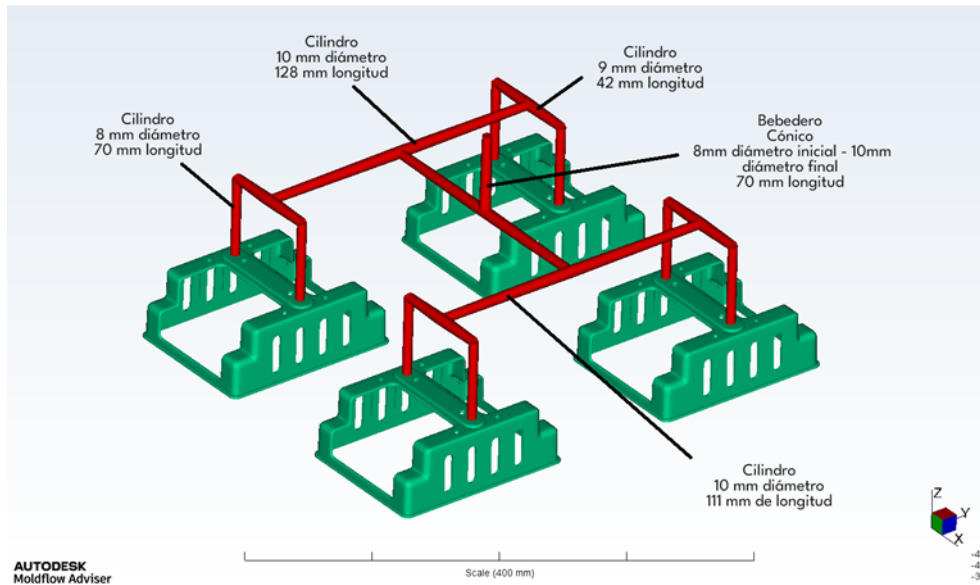


Ilustración 4.34 Vista Isométrica del Layout en bloque o H, el cual se ha visto que es el más viable y se usará en las simulaciones posteriores. Se señalan los distintos elementos y su dimensionado.

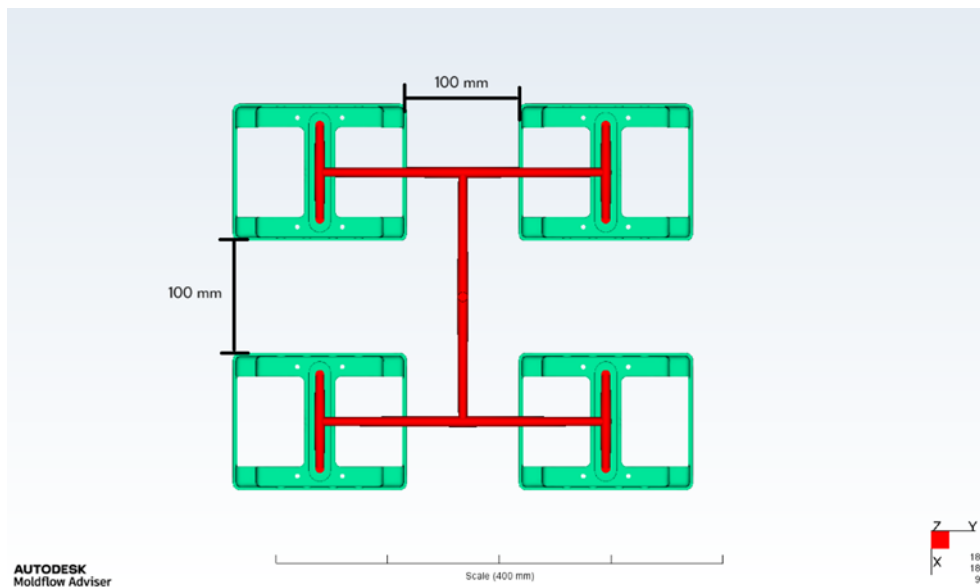


Ilustración 4.35 Vista en Planta del Layout en bloque o H, el cual se ha visto que es el más viable y se usará en las simulaciones posteriores. Se muestra la disposición de las cavidades

En general, los tres materiales analizados han mostrado un comportamiento adecuado para la configuración tipo bloque o H, con valores aceptables en cuanto a presión de inyección, confiabilidad y calidad de llenado, calidad de refrigeración y temperatura del frente de flujo. En ningún caso se superaron los límites establecidos, por lo que no fue necesario realizar ajustes adicionales.

Sin embargo, **el tiempo de ciclo del poliestireno (PS) resultó significativamente superior al del resto de materiales**, lo que supone **un impacto considerable en la productividad industrial**. Por este motivo, y a pesar de que el resto de los parámetros fueron correctos, **se descarta su uso como material viable para este componente**.

4.7. Refrigeración

Una vez definido el sistema de alimentación y la configuración de las cavidades en el molde, resta abordar el diseño del sistema de refrigeración. Cabe mencionar que en el Análisis de la Calidad de Refrigeración y de los Rechupes ya se había simulado el proceso de enfriamiento, aunque sin considerar un sistema real: se empleó una refrigeración ideal, modelada mediante condiciones de contorno térmicas aplicadas en las paredes del molde, asumiendo una disipación natural del calor desde la pieza hacia el exterior. Este enfoque ofrecía una primera aproximación del comportamiento térmico, pero no reflejaba el efecto real de un sistema con canales de refrigeración.

Ahora, el objetivo es definir cómo será físicamente el sistema de refrigeración del molde: ubicación, geometría y dimensiones de los canales; y analizar su repercusión en el comportamiento térmico del componente, evaluando su influencia sobre la eficiencia térmica, la uniformidad de enfriamiento, la calidad final de la pieza y el tiempo de ciclo.

El objetivo principal en esta etapa es lograr una refrigeración lo más homogénea posible a lo largo de toda la pieza, ya que esto garantiza un comportamiento uniforme en términos de contracción y deformación. Dado que la geometría del componente es simétrica, se priorizan diseños que respeten dicha simetría para favorecer una distribución térmica equilibrada. Con este fin, se configuraron distintos escenarios en las ventanas *Geometry* y *Cooling System*, y se realizaron los análisis correspondientes mediante el módulo *Cool* del software Moldflow Adviser.

El planteamiento de estos análisis se centró en evaluar distintas configuraciones del sistema de refrigeración para los escenarios seleccionados, analizando su comportamiento térmico, el tiempo de ciclo y los indicadores de calidad. El objetivo es, a partir de los resultados obtenidos, identificar la configuración más adecuada. Para ello, se aplican los principios del Diseño para la Manufactura (DFM), con el fin de asegurar soluciones viables desde el punto de vista productivo y que optimicen el rendimiento térmico del molde.

En el diseño del sistema de refrigeración se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- Dado que la disposición de cavidades en el layout es simétrica, se definirá el sistema de refrigeración para una sola cavidad y se replicará simétricamente en las demás.
- Se priorizarán configuraciones que permitan un mecanizado sencillo, con el objetivo de reducir los costes de fabricación.

- Se garantizará un régimen de flujo turbulento del refrigerante, con un número de Reynolds superior a 10 000.
- Se controlará que el gradiente de temperatura del líquido refrigerante a lo largo del circuito no supere los $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Las distintas sistema de refrigeración se diseñaron utilizando los mismos elementos, independientemente de su configuración. Estos elementos se describen en la Tabla 4.26. Lo que si se particularizo fue la temperatura del agua de refrigeración, la cual se seleccionó en función del termoplástico. Los valores se muestran en la Ilustración 4.36 Representación de los elementos del sistema de refrigeración Con baffles, el de sin baffles sería idéntico, pero sin este elemento marcado de amarillo verdoso.

Tabla 4.27 y la Ilustración 4.36.

Tabla 4.26 Dimensionado del Sistema de refrigeración aplicado a los diseños, con y sin de refrigeración

PARÁMETRO	CANAL			ENTRADA	DEFLECTOR
	A	B	C		
GEOMETRÍA	Circular	Circular	Circular	Circular	Circular
DIÁMETRO (mm)	8	8	8	10	12
Longitud (mm)	242	52	30	-	53

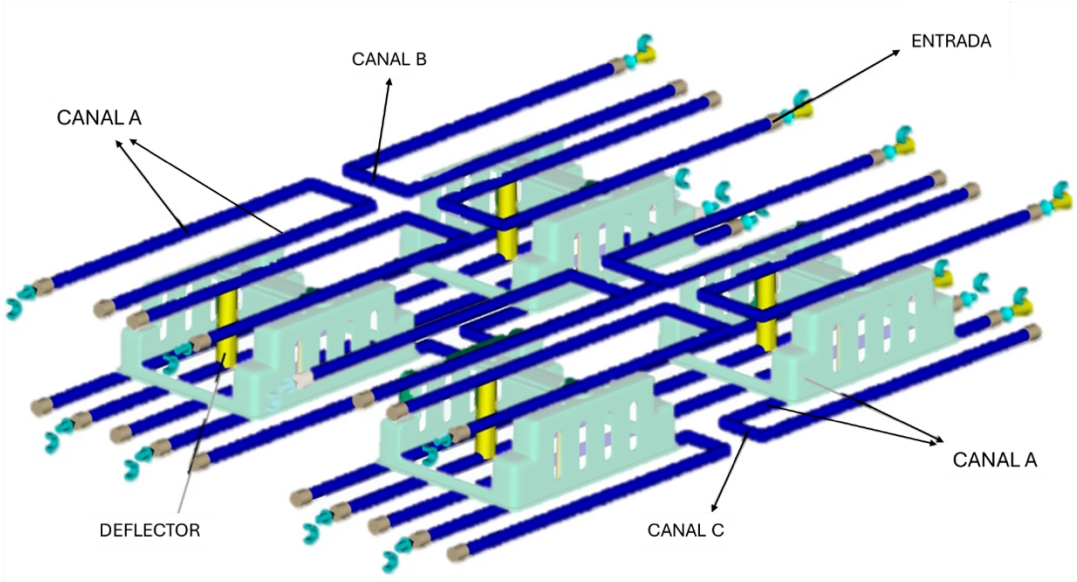


Ilustración 4.36 Representación de los elementos del sistema de refrigeración Con baffles, el de sin baffles sería idéntico, pero sin este elemento marcado de amarillo verdoso.

Tabla 4.27-Temperatura del caudal de Refrigeración empleada de acuerdo con la teórica.

ESCENARIO	TEMPERATURA TÍPICA DEL AGUA DE REFRIGERACIÓN	TEMPERATURA DE ESTUDIO
B-PP	20-40 °C	30 °C
B-ABS	30-50 °C	35 °C

A la hora de diseñar el sistema de refrigeración se tuvo en cuenta:

- i. Que no interfiriera con otros elementos del molde, como los machos, por lo que no se pudo ubicar en las paredes laterales de la pieza.
- ii. Que no dificultara la extracción de la pieza.
- iii. Se evaluaron configuraciones basadas en *conformal cooling*, una técnica de alta eficacia para geometrías complejas. Sin embargo, dado que la pieza en cuestión no presenta tal complejidad y que este diseño implicaría un mecanizado muy complejo o la necesidad de procesos de fabricación alternativos, como la impresión 3D, se consideró innecesario y se descartó su implementación.

A continuación, se presentan dos configuraciones del sistema de refrigeración, ambas basadas en una estructura común compuesta por una parte superior, Ilustración 4.37 y una parte inferior, Ilustración 4.38. La diferencia entre ellas, tal y como se resume en la Tabla 4.28, es que una de las configuraciones incorpora un elemento adicional: un baffle, como se muestra en la Ilustración 4.39.

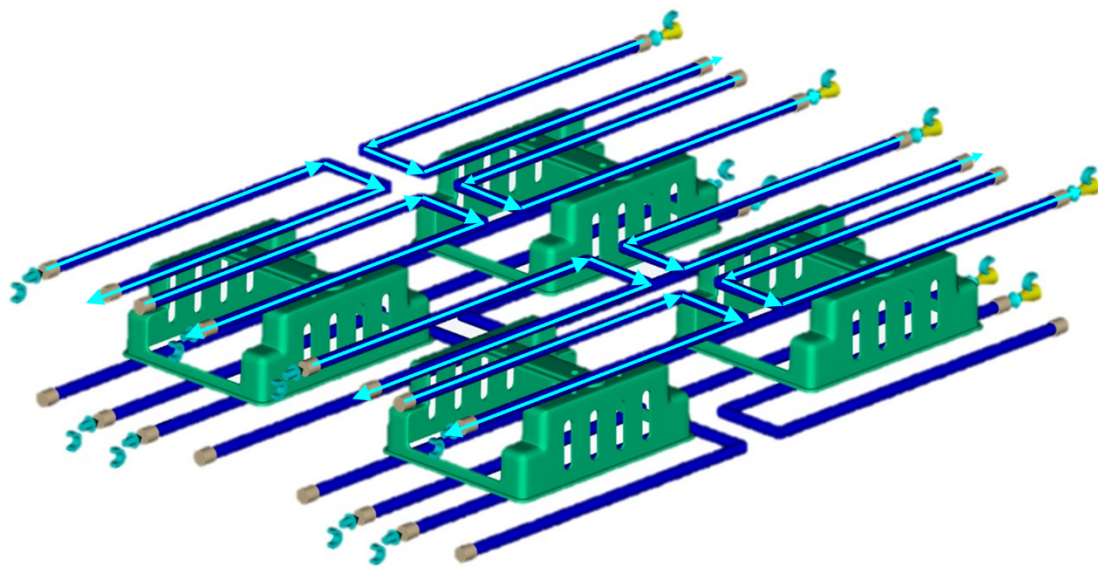


Ilustración 4.37 Esquema detallado del modelo del sistema de refrigeración superior.

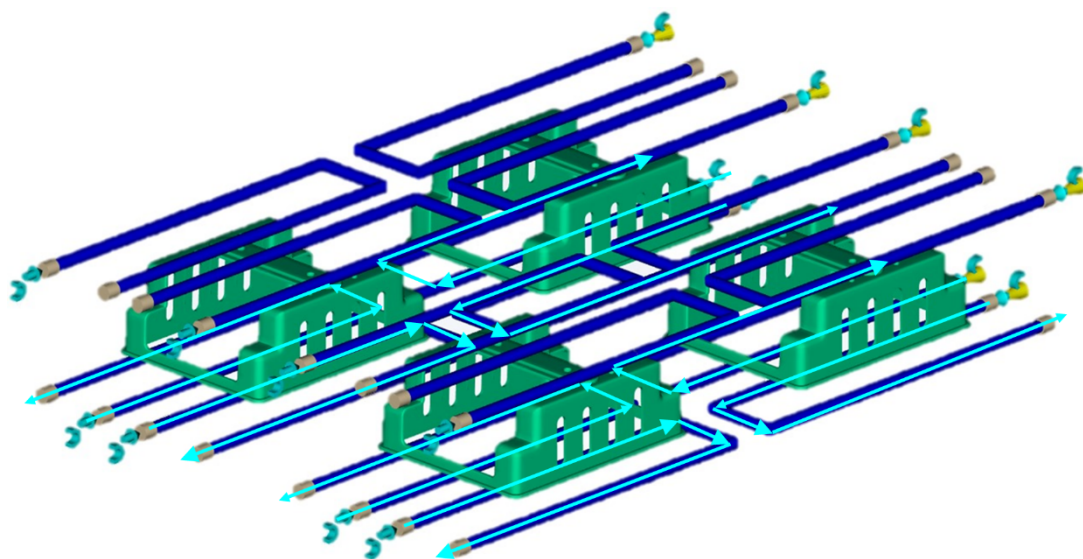


Ilustración 4.38 Esquema detallado del modelo del sistema de refrigeración inferior.

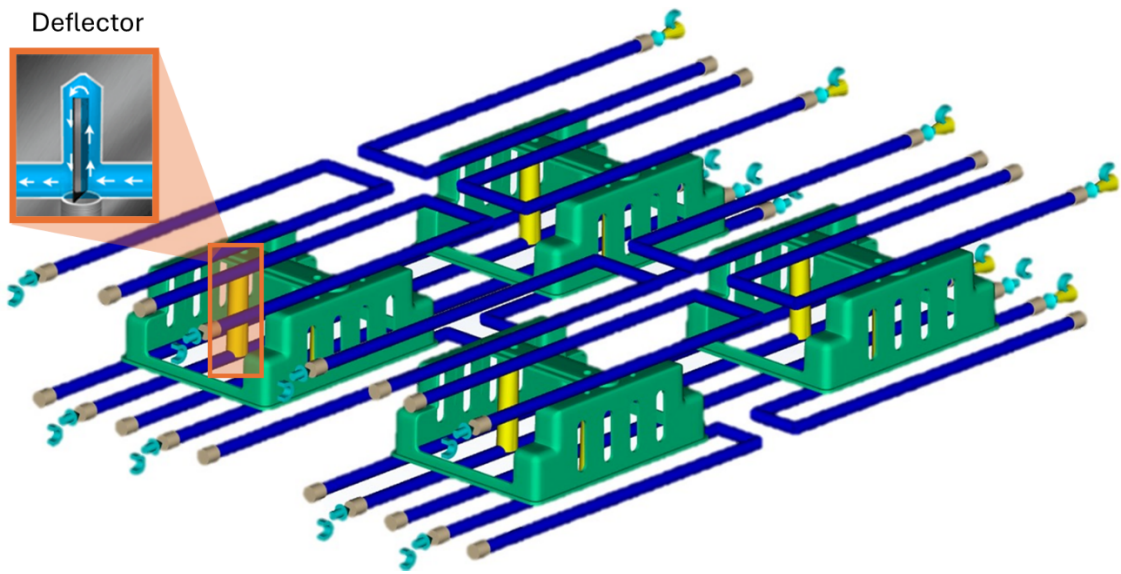


Ilustración 4.39 Esquema detallado del modelo del sistema de refrigeración que cuenta con la incorporación de un deflector (baffle)

Como se han citado, se desarrollaron dos diseños distintos, los cuales se muestran en la Tabla 4.28. Los resultados obtenidos para cada uno de ellos se agrupan en la Tabla 4.29.

Tabla 4.28 Representación de las diferentes configuraciones de sistema de alimentación.

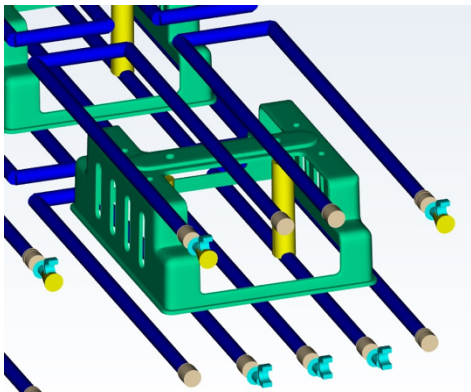
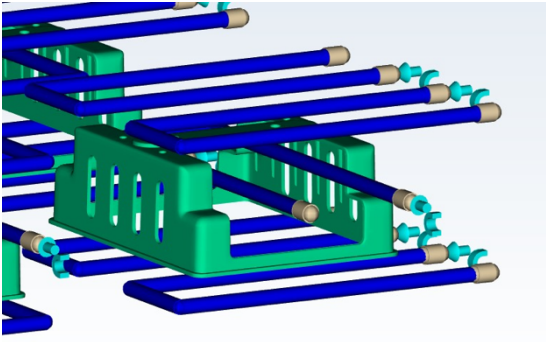
CON BAFFLES	SIN BAFFLES
	

Tabla 4.29 Resumen de Resultados de los diseños de CON y SIN Baffles. Verde quiere decir que los valores están por encima del límite. Rojo que están por debajo.

ESCENARIO	BAFFLES	TIEMPO DE EYECCIÓN N (s)	TIEMPO DE CICLO (s)	REYNOLDS	COOLIN G QUALITY (%)	VARIACIÓN DE LA Tª EN EL CIRCUITO (°C)
B - PP	NO	7,753	13,45	20956 - 26195	76	0,42
	SI	7,853	15,87	26411 - 33014	91,8	0,42
B - ABS	NO	8,384	16,22	20956 - 26195	83,4	0,42
	SI	8,442	18,39	26411 - 33010	96	0,41

Tiempo de eyección y tiempo de ciclo.

En la Tabla 4.29 se observa que los tiempos de eyección y de ciclo son relativamente similares entre ambos diseños, sin que se aprecien diferencias significativas.

Número de Reynolds

El número de Reynolds es un parámetro fundamental en el diseño del sistema de refrigeración, ya que permite caracterizar el tipo de flujo del refrigerante en los canales de enfriamiento. El número de Reynolds determina si el flujo es laminar o turbulento. Para lograr una transferencia de calor eficiente entre el molde y el refrigerante, es esencial que el flujo sea turbulento -por esto el criterio de que sea $> 10\,000$ - ya que este régimen favorece una mejor mezcla del fluido y, por tanto, una mayor eficiencia térmica. En cambio, un flujo laminar reduce notablemente la capacidad de disipación térmica, lo que puede prolongar los tiempos de ciclo y afectar la calidad de la pieza moldeada. Por tanto, durante el diseño del sistema de refrigeración se deben ajustar parámetros como el diámetro de los canales y el caudal del refrigerante, de manera que se mantenga un número de Reynolds lo suficientemente elevado para garantizar un enfriamiento uniforme y eficaz del molde.

El número de Reynolds se encuentra en los 4 escenarios por encima del límite, garantizando el flujo turbulento en el sistema de refrigeración.

Variación de la temperatura en el circuito

Por otro lado, el gradiente térmico en el circuito cumple la condición de ser menor de $+3^{\circ}\text{C}$. Por le momento y según estos criterios resultan viables, analicemos ahora la calidad de refrigeración.

Calidad de Refrigeración

Dado el estado actual del estudio, no resulta adecuado mantener el límite de *cooling quality* en el 95%, ya que se requiere un criterio más representativo de un sistema de refrigeración real. En consecuencia, se ha establecido un umbral del 75%.

Tabla 4.30 Resumen de la calidad de refrigeración de las distintas configuraciones. Verde marca que estan por encima del umbral siendo aceptables.

ESCENARIO	COOLING QUALITY %
CON BAFFLE - PP	91,8
CON BAFFLE - ABS	96
SIN BAFFLE - PP	76
SIN BAFFLE - ABS	83,4

A partir de los valores mostrados en la Tabla 4.30, se observa que todos los escenarios analizados superan el umbral mínimo requerido, por lo que pueden considerarse viables. Además, se aprecia que la incorporación de *baffles* en el sistema de refrigeración mejora la calidad térmica obtenida. No obstante, considerando los principios del DFM, esto implica un mayor coste asociado al mecanizado y la fabricación del molde. Por este motivo, no se descarta por el momento ninguna de las configuraciones, ya que, si bien cada una presenta ventajas e inconvenientes, todas se consideran técnicamente aceptables.

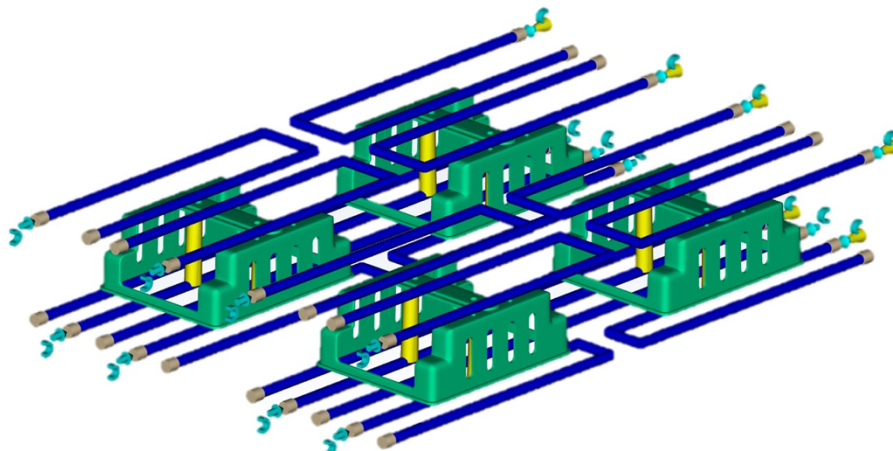


Ilustración 4.40 Sistema de Refrigeración CON Baffles

Con base en estos resultados, se procederá a la simulación completa del ciclo de inyección con el objetivo de analizar el comportamiento final de la pieza, evaluando factores como las contracciones y deformaciones generadas; de las configuraciones que vemos en Ilustración 4.40 e Ilustración 4.41.

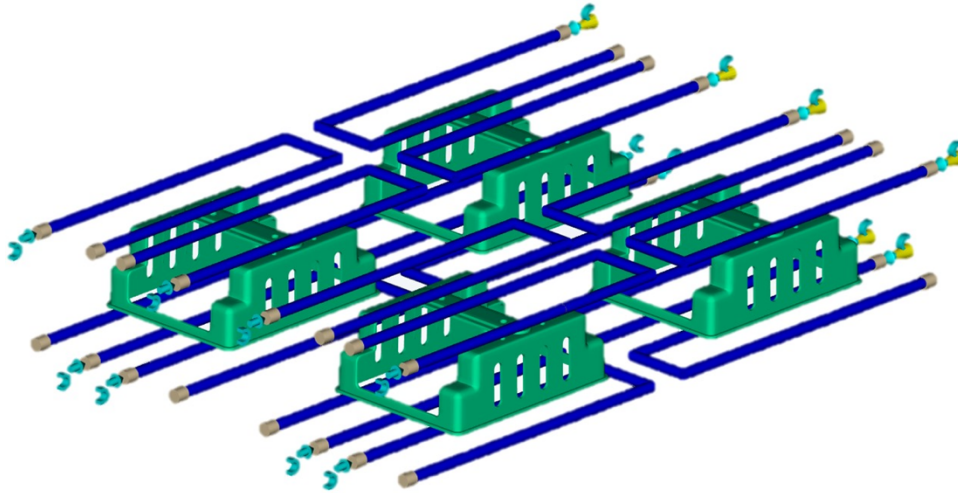


Ilustración 4.41 Sistema de refrigeración SIN Baffles

4.8. Simulación Completa

Con el objetivo de evaluar de forma global el proceso de inyección, en este apartado se analiza el comportamiento de los escenarios previamente seleccionados, empleando las configuraciones de refrigeración definidas. El propósito es identificar la combinación que ofrezca el menor tiempo de llenado, mejores acabados superficiales, mayor estabilidad durante el proceso y un ajuste más preciso a las tolerancias establecidas.

A partir de los análisis realizados en los apartados anteriores y las decisiones adoptadas en cada fase, se procede a la simulación completa del proceso, integrando los módulos Cool, Fill, Pack y Warp, y analizando los parámetros críticos asociados a cada uno de ellos.

Primero, se habilita la opción de empaquetamiento automático, permitiendo que el software determine inicialmente la duración de esta fase. En caso de que el tiempo de empaquetamiento calculado supere al tiempo de enfriamiento, se ajustará manualmente para que no lo sobrepase.

En esta etapa se mantendrán:

- i. Los parámetros de inyección específicos de cada material, definidos en el apartado de Simulación del proceso de llenado

- ii. La configuración del sistema de alimentación en árbol, con colada caliente y molde de tres placas.
- iii. Los dos diseños de sistemas de refrigeración seleccionados como viables en el apartado anterior.

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos tras las simulaciones correspondientes.

Tabla 4.31 Resultados de los diferentes diseños tras la simulación completa de llenado, refrigeración, empaquetamiento y contracción

ESCENARIO	DE TIEMPO CICLO	DE TIEMPO EYECCIÓN	TIEMPO DE EMPAQUETAM ENTO	COOLING QUALITY	WARPAGE INDICATOR ALL EFFECTS	DEFFLECTION ALL DEFECTS
CON PP	12,85	7,404	6,58	86,10	80,70	1,644
CON ABS	13,44	8,042	7,23	87,3	100	0,7862
SIN PP	13,45	7,753	7,38	76	80,6	1,640
SIN ABS	13,38	8,046	7,13	76,4	100	0,7715

Como se muestra en la Tabla 4.31, los tiempos de ciclo, de empaquetamiento y de eyección son muy parecidos en los 4.

Al comprar la calidad de refrigeración, vemos que al igual que pasaba en el apartado anterior, los escenarios que cuentan con baffles en su sistema de refrigeración, dan mejores resultados de acabado. Como nuestro limite estaba en 75%, todos estan por encima de este, siendo viables.

WARPAGE/DEFFLECTION

Tabla 4.32 Resumen de los resultados de warpage y deflection, causa de los efectos de contracción, orinetación, empaquetamineto y enfriamientos. Comparando los rojos aquellos

que sobrepasan considerablemente el umbral, amarillo los que se mantienen próximos y verdes los que se encuentran por encima.

ESCENARIO	WARPAGE INDICATOR ALL EFFECTS	DEFLECTION ALL DEFECTS MAX	DEFLECTION ALL DEFECTS
CON PP	80,70	1,644	0,9781
CON ABS	100	0,7862	0,4022
SIN PP	80,6	1,640	0,9487
SIN ABS	100	0,7715	0,3883

En la Tabla 4.32, se recogen los valores obtenidos en relación con los efectos de empaquetamiento, contracción, orientación y refrigeración. La tolerancia establecida para este análisis es de 0,5 mm, y todos los escenarios evaluados se mantienen dentro de los márgenes permitidos, como lo indica el módulo *Warpage Indicator*, que muestra resultados en verde para los cuatro casos.

Sin embargo, cabe destacar que, aunque todos los indicadores se sitúan dentro del umbral, existen diferencias significativas entre ellos. En el caso del ABS, se alcanza un valor del 100 % en el indicador de *Warpage*, lo que significa que la pieza cumple de forma global y consistente con los requisitos dimensionales, manteniéndose por debajo del límite de tolerancia en prácticamente toda su superficie. En cambio, para el PP, este porcentaje es notablemente inferior, lo cual implica que **pueden existir zonas localizadas en las que la deformación supere el umbral establecido**, motivo por el cual se considera inaceptable y **se descarta su uso como material**. Se podría optimizar más el empaquetamiento, pero ya es cosa de proceso.

Con ello, las opciones viables se reducen a las configuraciones con y sin *baffle* empleando como material definitivo el ABS. La opción con *baffle* presenta una ligera mejor calidad de refrigeración respecto a la alternativa sin él; no obstante, esta opción implica también una mayor complejidad a nivel de mecanizado. Además, frente a la opción sin él, presenta una tolerancia algo superior. Cabe destacar que la calidad de refrigeración en la opción sin *baffles* se mantiene por encima del umbral del 75 %, por lo que continúa considerándose una alternativa técnicamente válida.

Por tanto, la configuración final seleccionada para la fabricación del molde y la pieza corresponde al uso de ABS como material de inyección, un sistema de refrigeración sin *baffles* y el sistema de alimentación en bloque, en forma de H, definido en etapas anteriores.

A continuación, se muestra una representación aproximada de cómo quedaría el molde, véase Ilustración 4.42 e Ilustración 4.43.

Aproximada, porque al final se ha visto en el 2.4 Moldes para inyección, que un molde está constituido por muchos elementos, entre ellos por ejemplo los machos y en este caso, se ilustra cómo se podría ver en la realidad.

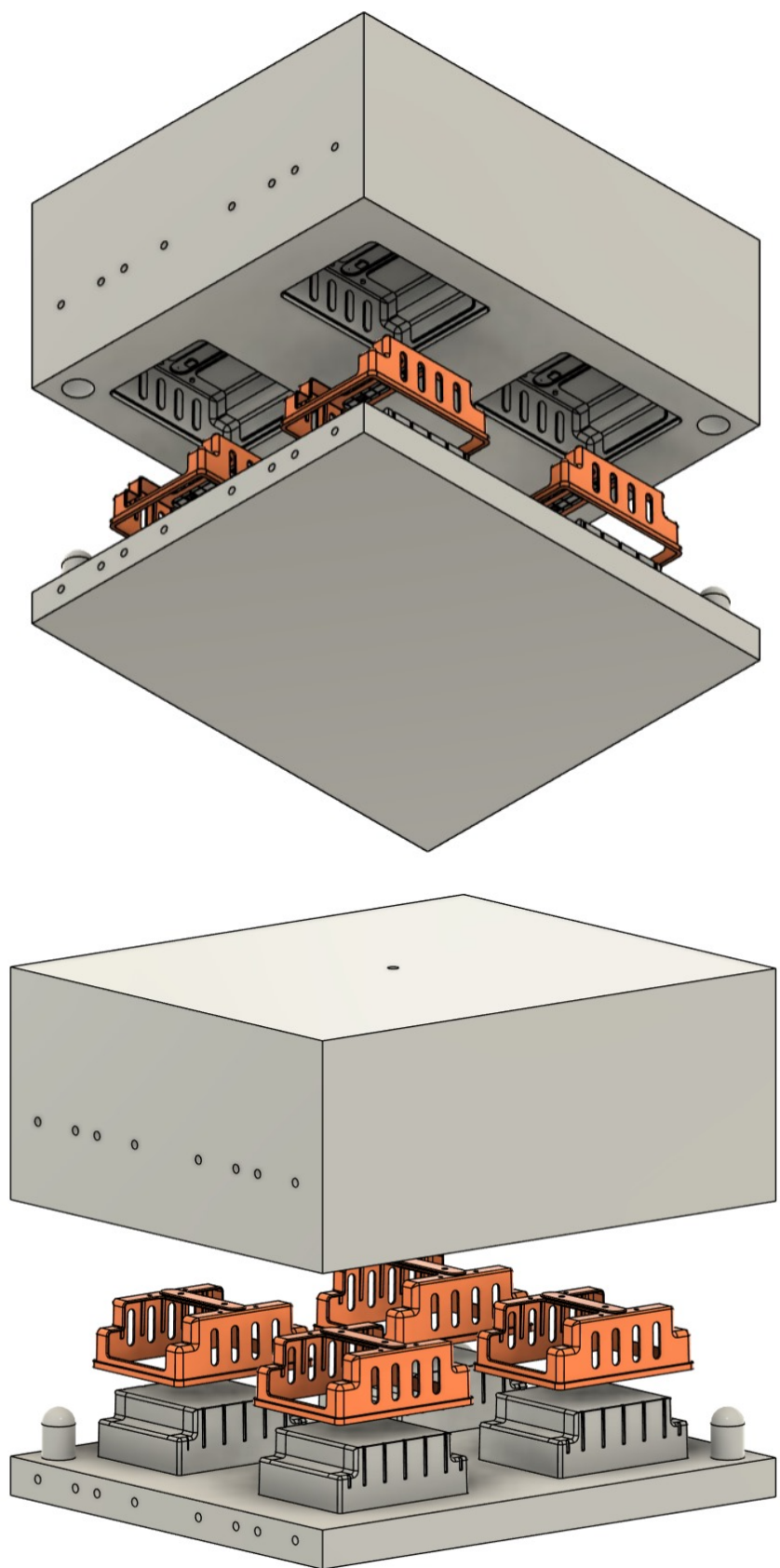


Ilustración 4.42 Modelo 3D del molde.

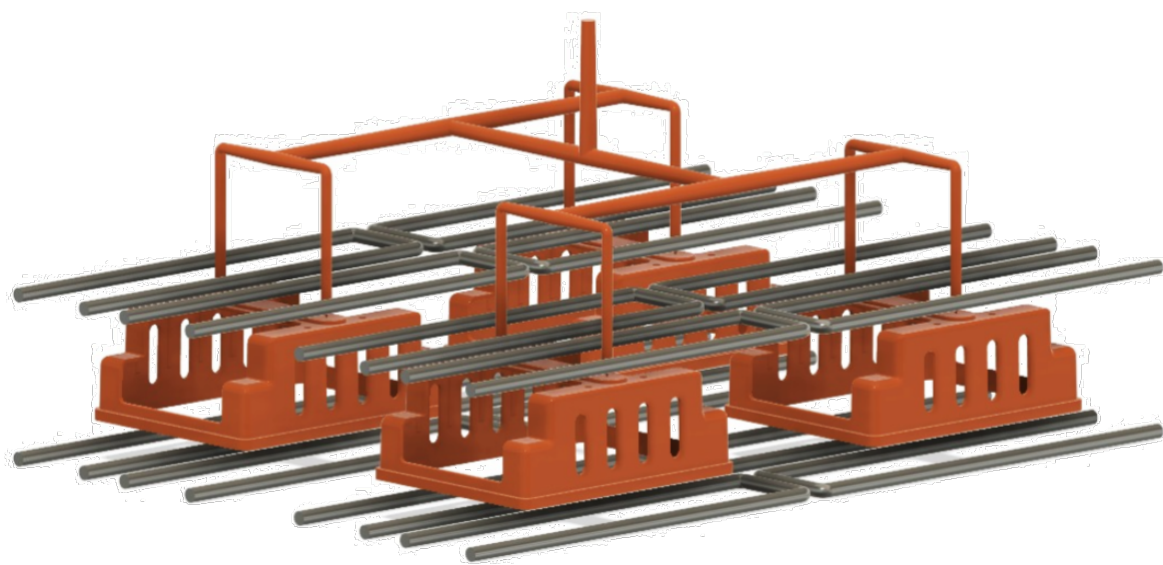


Ilustración 4.43 Modelo 3D del sistema de alimentación, refrigeración y distribución del Layout definitiva

5. Presupuesto Detallado de las Actividades

En la Tabla 5.1 y Tabla 5.2, se plantea una estimación del costo total (directo e indirecto) para la fabricación del molde, basada en unos precios promedios del mercado, y una estimación de las horas de cada etapa. Ofertados sobre unos costes máximo, pudiendo ser menores, pero dando así un caso más desfavorable.

Tabla 5.1 Estimación de los costes directos de la fabricación del molde

Etapa	Actividad	Recurso	Horas (h)	Coste / (€/h)	Subtotal (€)
Diseño y simulación	Modelado CAD 3D de la Pieza	1x Ingeniero Industrial	10	31	310
	Preparación malla y validación		8		248
	Simulación de llenado		6		186
	Simulación sistemas de alimentación		6		186
	Simulación sistemas de refrigeración		8		248
	Simulación de deformación y empaquetamiento		8		248
	Redacción de informe y conclusiones		10		310
	TOTAL	-	40 (5 días)		1 736 €
Fresado (fresadora CNC)	Fresado de la placa Superior	1 Operario	20	16	320
		1 Fresadora CNC		100	1200
	Fresado de la placa Inferior	1 Operario	30	16	480
		1 Fresadora CNC		100	1800
	TOTAL	-	50	-	3800
Material: tocho de acero P20	TOTAL	425kg	-	1.5 €/kg	637.5 €

De acuerdo con las dimensiones de los planos que encontramos en los ANEXOS, el volumen de material sería de unos 54068,11332 cm³, contando con una densidad del material de 7,85 g/cm. Obtenemos una masa de unos 425Kg.

Tabla 5.2 Estimación de los costes indirectos de la fabricación del molde

Concepto	Precio / Base de cálculo	Amortización	Subtotal
Amortización software: Fusion, Moldflow)	745 €/año	10 %	74.50 €
Amortización software: Moldflow	9 898 €/año	5 %	494,90 €
Amortización fresadora CNC	100.000 € · 10 años · 2.000 h/año	5 %	250 €
Electricidad y consumibles de taller	-	2.5 %	125 €
Mantenimiento y utillaje auxiliar	-	2 %	100 €
Mano de obra indirecta / administración	10% s/ MO directa	5 %	254 €
Total			1298.40 €

Tabla 5.3 Estimación del beneficio industrial la fabricación del molde

Beneficio industrial	25 %
-----------------------------	-------------

Tabla 5.4 Total estimado del Coste

Base Imponible	7471,9 €
Beneficio	1867,98 €
IVA (21 %)	1569,1 €
TOTAL	9041 €

Dicho esto, se ha considerado una tarifa horaria de 31 €/h para la mano de obra de ingeniero industrial, basada en el promedio de Madrid y alrededores. El coste del fresado, operario CNC, se ha estimado en 16 €/h, y el uso de una fresadora, de 100€/h, conforme a datos promedios nacionales. El precio del acero P20, considerando tarifas de proveedores internacionales, se ha fijado en 1,5 €/kg.

Obteniendo un coste final para la fabricación y diseño del molde de 9041 €, según los valores recogidos en la Tabla 5.4. El beneficio estimado con este molde sería de unos 1867,98 €, de acuerdo con el porcentaje aplicado en la Tabla 5.3.

Términos y Condiciones

- Los precios están Expresados en euros.
- Se acepta pago 30 días después de emitida Orden de Compra.
- Confidencialidad. Los términos y condiciones comerciales contenidos en esta propuesta son absolutamente confidenciales. No está permitido divulgarlos a terceros sin previa autorización por escrito de nosotros.
- Los resultados entregados son a fines informativos, el consultor no se hace responsable por las decisiones tomadas en base a los resultados para la elaboración de herramientas o modificación de procesos de inyección en planta.
- El cliente recibe una interpretación teórica de la simulación, y es él quien toma la decisión de la implementación de estos.

6. CONCLUSIONES

6.1. Conclusiones técnicas	141
Validación del diseño	141
Análisis de la ubicación de las entradas.....	141
Determinación de las condiciones óptimas de procesamiento	142
Estudio del llenado	142
Evaluación de la calidad térmica y rechupes	143
Diseño del sistema de alimentación y cavidades múltiples.....	143
Análisis de configuraciones de refrigeración.....	144
Evaluación global del proceso de inyección	144
6.2. Conclusiones Personales	145

6.1. Conclusiones técnicas

Validación del diseño

Se pretendía obtener un diseño optimizado con espesores constantes, ángulos de desmoldeo adecuados y una orientación correcta en el molde. Además, se buscaba minimizar los mecanismos de apertura, reduciendo componentes móviles innecesarios.

Durante esta etapa se realizó una primera simulación con el diseño inicial de la pieza, que permitió detectar incumplimientos en algunos criterios de evaluación, especialmente relacionados con los ángulos de desmoldeo y redondeos. Tras modificar la geometría en Fusion 360, incorporando los ajustes necesarios, se llevó a cabo una segunda simulación. Los resultados confirmaron que el modelo ya cumplía con los requisitos exigidos, por lo que se consideró validado. Desde ese momento, se adoptó como diseño definitivo para las siguientes fases del trabajo, descartando nuevas modificaciones geométricas como vía de mejora.

Análisis de la ubicación de las entradas

Estudiar distintas configuraciones de entrada al molde con el objetivo de identificar aquellas que favorezcan un llenado más equilibrado. Analizar cómo se modifica el patrón de flujo al variar el número y posición de entradas, así como las implicaciones que esto conlleva sobre el diseño global del molde.

En general, las configuraciones que favorecen un mejor balance de llenado son aquellas que emplean una o dos entradas. A medida que se incrementa el número de puntos de inyección, el control del flujo se complica, dificultando un llenado uniforme y simétrico de la cavidad. Por ello, se descartan los escenarios con tres y cuatro entradas, y se seleccionan únicamente los casos con una o dos entradas para las siguientes fases del trabajo.

Determinación de las condiciones óptimas de procesamiento

Evaluar el comportamiento de los materiales seleccionados frente a distintas configuraciones de punto de inyección, con el objetivo de identificar qué material presenta una ventana de proceso más amplia y cuál resulta más sensible a las condiciones de moldeo.

Se comprobó que las temperaturas de molde y de fusión permanecen constantes al variar el número de entradas, mientras que el tiempo de inyección se reduce de forma considerable cuando se emplean dos entradas en lugar de una. Estas configuraciones óptimas, generadas por el software, se adoptaron como referencia para las simulaciones de llenado posteriores.

Además, se observó que la ventana de proceso del polipropileno (PP) es la más estrecha, lo que indica que es un material más exigente y menos tolerante a variaciones en las condiciones de inyección. En cambio, el poliestireno (PS) presenta la ventana de proceso más amplia, siendo más flexible y permisivo ante ajustes en los parámetros, lo cual también influye en su rendimiento global y presencia de defectos.

Estudio del llenado

Analizar el comportamiento del llenado de material en la cavidad a partir de las condiciones de proceso y materiales seleccionados previamente. Comparar los distintos escenarios para determinar qué material y qué configuración ofrecen los mejores resultados en esta etapa.

Como resultado del proceso de evaluación de la simulación de llenado, se concluye que las condiciones óptimas inicialmente propuestas por el software no eran del todo adecuadas, por lo que fue necesario reajustar los parámetros de inyección en función de las ventanas de proceso específicas de cada material. Este ajuste permitió realizar un segundo análisis más completo y realista, evaluando parámetros clave como la presión requerida, la confiabilidad del llenado, la calidad de la pieza, la temperatura del frente de flujo y el tiempo de ciclo estimado. A partir de estos resultados, se determina que los escenarios con una única entrada (escenarios A) deben ser descartados, ya que no garantizan un llenado fiable ni una calidad final aceptable, y en algunos casos requieren presiones por encima del límite operativo del sistema.

Evaluación de la calidad térmica y rechupes

Complementar el análisis de llenado incorporando el estudio de defectos como marcas de rechupe y zonas críticas. Evaluar también la calidad térmica del sistema de refrigeración, determinando su impacto en el comportamiento de la pieza.

El análisis complementario de la calidad de enfriamiento y de las marcas de rechupe confirma la viabilidad térmica de los escenarios con dos entradas seleccionados previamente. Todos los materiales analizados mostraron una calidad de enfriamiento elevada y una deformación superficial dentro de los márgenes aceptables, sin riesgo de comprometer la calidad final de la pieza. Además, se observó que el polipropileno (PP) presentó el valor más alto de rechupe, lo cual es coherente con su naturaleza semicristalina, que tiende a sufrir mayores contracciones. A pesar de ello, los valores se mantuvieron dentro de los rangos admisibles. En conjunto, los resultados obtenidos refuerzan la aplicabilidad y robustez de los escenarios seleccionados hasta el momento, permitiendo avanzar con confianza hacia las siguientes fases del diseño. El análisis complementario de la calidad de enfriamiento y de las marcas de rechupe confirma la viabilidad térmica de los escenarios con dos entradas seleccionados previamente. Todos los materiales analizados mostraron una calidad de enfriamiento elevada y una deformación superficial dentro de los márgenes aceptables, sin riesgo de comprometer la calidad final de la pieza.

Diseño del sistema de alimentación y cavidades múltiples

Modelar el sistema de alimentación y definir la configuración de cavidades múltiples del molde, aplicando criterios de Diseño para Manufactura (DFM), con el objetivo de obtener un diseño eficiente, simétrico y adaptable a la producción industrial.

Se descartaron las configuraciones radiales y en árbol por no garantizar un llenado uniforme entre cavidades. El layout en bloque, en forma de H, fue el único que aseguró un patrón de flujo homogéneo en todos los escenarios.

Las simulaciones confirmaron que todas las configuraciones en bloque cumplían con los criterios de presión, confiabilidad, calidad de llenado y condiciones térmicas, sin superar los límites. Además, se comprobó que el aumento de presión en moldes multicavidad es moderado, y permite inyectar cuatro piezas por ciclo sin necesidad de mayor capacidad en la inyectora, mejorando la productividad sin aumentar el coste por pieza.

Finalmente, se descartó el poliestireno (PS) debido a su elevado tiempo de llenado y ciclo —hasta un 38 % mayor que el resto—, causado por su alta viscosidad. Esto limita su viabilidad industrial frente a materiales como ABS y PP. La configuración de cuatro cavidades con sistema de alimentación en bloque (H)

se considera óptima técnica y productivamente, y permite futuras ampliaciones del molde sin comprometer la simetría.

Análisis de configuraciones de refrigeración

Diseñar, modelar y comparar diferentes configuraciones de refrigeración aplicadas al sistema de alimentación previamente seleccionado, con el fin de identificar cuál proporciona un mejor equilibrio entre eficiencia térmica, homogeneidad del enfriamiento y reducción del tiempo de ciclo.

Para dar cumplimiento a este objetivo, se diseñaron varias configuraciones de refrigeración con distintos niveles de complejidad y elementos incorporados. Entre ellas, se valoró una opción basada en *conformal cooling*, cuyo rendimiento térmico es elevado, pero cuya fabricación resulta demasiado costosa y compleja para una pieza de geometría sencilla como la analizada. Por otro lado, se descartaron un par de diseños adicionales por razones mecánicas, ya que sus conductos interferían con la extracción de los machos laterales o directamente con la pieza, impidiendo su desmoldeo.

Finalmente, se seleccionaron dos configuraciones técnicamente viables: una con *baffles* y otra sin ellos. Ambas ofrecieron resultados aceptables en cuanto a calidad térmica, tiempo de ciclo y viabilidad de fabricación. El uso de *baffles* mejora ligeramente la eficiencia del enfriamiento, pero implica un mayor coste y complejidad en el mecanizado. En cambio, la alternativa sin *baffles* presenta una calidad térmica algo inferior, aunque se mantiene por encima del umbral del 75 %, y resulta más sencilla y económica de fabricar.

Además, en todos los casos evaluados se verificó que el número de Reynolds supera el umbral mínimo requerido, asegurando un flujo turbulento en el sistema de refrigeración. También se cumplió la condición de que el gradiente térmico en el circuito no excediera ± 3 °C. Por tanto, ambas configuraciones con y sin *baffles* se consideraron viables y se mantuvieron como candidatas hasta completar la simulación global del proceso.

Evaluación global del proceso de inyección

Realizar una simulación integral del proceso de inyección, combinando las configuraciones finales de material, refrigeración y alimentación. Se busca determinar cuál de las combinaciones presenta mejor comportamiento general en términos de tiempo de llenado, calidad superficial, estabilidad dimensional y cumplimiento de tolerancias.

Se evaluaron los efectos de empaquetamiento, contracción, orientación y refrigeración, verificando que todos los escenarios cumplen con la tolerancia establecida de 0,5 mm. El ABS alcanzó un 100 % en el indicador Warpage, asegurando estabilidad dimensional en toda la pieza, mientras que el PP mostró un rendimiento inferior y fue descartado.

Las configuraciones con y sin baffles usando ABS resultaron viables. Aunque el diseño con baffles mejora ligeramente la refrigeración, su mecanizado es más complejo y presenta mayor tolerancia. Por tanto, se selecciona como configuración final el uso de ABS con refrigeración sin baffles y sistema de alimentación en H.

6.2. Conclusiones Personales

Este trabajo ha supuesto un reto importante y, al mismo tiempo, una experiencia muy enriquecedora. Durante su desarrollo, he tenido que familiarizarme con herramientas que no había utilizado antes, como Autodesk Moldflow Adviser, donde he aprendido a simular el proceso de inyección de moldes y a manejar todas las variables que esta herramienta permite analizar. Ha sido necesario comprender desde cero cómo funciona Moldflow y para qué se utiliza, integrando conceptos relacionados con la simulación, los materiales y el diseño del molde.

También he podido profundizar en el uso de Fusion 360, herramienta con la que modelé la pieza y generé los planos técnicos necesarios. Gracias a este proceso, he adquirido nuevas competencias en simulación, análisis de resultados y diseño orientado a la manufactura. Una parte clave del aprendizaje ha sido interpretar correctamente los datos que arrojan las simulaciones para poder tomar decisiones justificadas en cada etapa del proyecto.

Además del aprendizaje técnico, este proyecto me ha enseñado lo importante que es llevar una buena organización y hacer un seguimiento continuo de cada avance. He aprendido a documentar todas las decisiones que tomaba, a justificar cada cambio y a dejar constancia de por qué se descartaba o se mantenía una opción concreta. Este registro diario ha sido clave para no perder el hilo del trabajo y poder volver atrás cuando era necesario.

También he utilizado herramientas visuales como mapas mentales o esquemas globales, que me han ayudado a ordenar ideas complejas y a tener una visión clara del proyecto en todo momento. En varios puntos del proceso, estas representaciones me facilitaron la redacción de los apartados más técnicos de la memoria y me sirvieron como guía para tomar decisiones con mayor claridad.

La parte más exigente de todo el proceso fue sin duda la fase final, en la que debía entregar el trabajo completo para poder presentarlo en la defensa. Fue entonces cuando tocó dar un esfuerzo extra y dedicar muchas horas para cerrar bien todos los apartados, organizar la documentación y dejar todo listo.

A lo largo del desarrollo del proyecto, fui marcando avances de forma periódica junto a mis tutores, lo que me permitió ir enfocando cada etapa con claridad. Agradezco especialmente la comunicación fluida y la implicación que mostraron en todo momento, ya que me ayudaron a entender qué debía corregirse, qué podía mejorarse y hacia dónde debía orientar el siguiente paso. Esa guía fue clave para mantener el rumbo y llegar a una versión final sólida.

Este trabajo no solo me ha permitido adquirir nuevos conocimientos, sino que también me ha abierto una posible vía profesional que no había considerado antes. Me ha gustado especialmente la combinación entre análisis técnico, interpretación de datos y toma de decisiones fundamentadas, pero también la parte creativa y estructural del diseño.

Poder trabajar con simulación, ver cómo se comportan los materiales, valorar distintas configuraciones y tener que elegir en base a criterios técnicos me ha resultado muy estimulante. Todo esto me ha hecho darme cuenta de que proyectos de este tipo —relacionados con diseño, simulación y plásticos— podrían formar parte de mi futuro profesional. Y aunque este ha sido un primer contacto, me quedo con la motivación de seguir explorando esta línea.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Informe de crecimiento y tamaño del mercado de plásticos moldeados por inyección (2032) n.d. <https://www.gminsights.com/es/industry-analysis/injection-molded-plastic-market> (accessed August 28, 2025).
- [2] Historia y evolución del moldeo por inyección de plásticos n.d. <https://ambienteplastico.com/historia-moldeo-por-inyeccion-plasticos/> (accessed July 5, 2025).
- [3] Evolución de la Inyección de Plásticos Innovaciones. | MultiprocesosMX n.d. <https://www.multiprocesosmx.com/blog-evolucion-de-la-inyeccion-de-plasticos> (accessed July 5, 2025).
- [4] Dzulkipli AA, Azuddin M. Study of the Effects of Injection Molding Parameter on Weld Line Formation. *Procedia Eng*, vol. 184, Elsevier Ltd; 2017, p. 663–72. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.135>.
- [5] Ashby MF. *Materials selection in mechanical design*. Butterworth-Heinemann; 2011.
- [6] WILLIKMD.CALLISTER J. *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales - Calister*. Barce lona • Bogotá • Buenos Aí res • Caracas • México: Reverté S.A.; n.d.
- [7] Maribel Beltrán, Antonio Marcilla. *Tecnología de Polímeros*. M. Beltrán y A. Marcilla - Capítulo 1. 1st ed. Alicante: Publicaciones de la Universidad de Alicante; 2012.
- [8] Knoll J, Heim HP. Analysis of the Similarity between Injection Molding Simulation and Experiment. *Polymers (Basel)* 2024;16. <https://doi.org/10.3390/polym16091265>.
- [9] Mao H, Wang Y, Yang D. Study of injection molding process simulation and mold design of automotive back door panel. *Journal of Mechanical Science and Technology* 2022;36:2331–44. <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0415-0>.
- [10] Gráfico: 70 años de “boom” del plástico | Statista n.d. <https://es.statista.com/grafico/20441/produccion-de-plastico-a-nivel-mundial/> (accessed July 5, 2025).
- [11] Donald G. Baird, Dimitris I. Collias. *POLYMER PROCESSING*. New Jersey: 2014.

- [12] Serapone Kalpakjian, Steve R. Schmid. Manufactura Ingeniería y Tecnología - Capítulo 7. vol. 1. Ulises Figueroa. Mexico: Pearson; 2014.
- [13] Dominick V. Rosato DVR y MGR. Injection Molding Handbook. vol. 1. 3rd ed. New York: Springer Science + Business Media, LLC; n.d.
- [14] Maribel Beltrán y Antonio Marcilla. Tecnología de Polímeros. M. Beltrán y A. Marcilla. 1st ed. Alicante: Publicaciones Universidad de Alicante; 2012.
- [15] Maribel Beltrán, Antonio Marcilla. Tecnología de Polímeros. M. Beltrán y A. Marcilla - Capítulo 5. 1st ed. Alicante: Publicaciones de la Universidad de Alicante; 2012.
- [16] D.H. Morton Jones. Procesamiento de Plásticos: Inyección, Moldeo, Hule y PVC - Capítulo 8. Ernesto Ureta Barrón. Mexico, D.F.: Editorial LIMUSA; 2006.
- [17] Lerma Valero JR. Manual avanzado de transformación de termoplásticos por inyección: Scientific injection molding: Recomendaciones y buenas prácticas para un proceso de inyección avanzado. Barcelona: Biesterfeld; 2014.
- [18] Shoemaker J. Moldflow Design Guide A Resource for Plastics Engineers First Edition. Framingham: 2006.
- [19] Componentes de moldes de inyección | Introducción de la estructura completa n.d. <https://firstmold.com/es/guides/injection-mold-components/> (accessed July 1, 2025).
- [20] Partes de un molde de inyección de plástico - Fow Mould n.d. <https://imolde.com/partes-de-moldes-de-inyeccion-de-plastico/> (accessed July 1, 2025).
- [21] Tipos de aceros para moldes de inyeccion de plasticos - Fow Mould n.d. <https://imolde.com/tipos-de-aceros-para-moldes-de-inyeccion-de-plasticos/> (accessed July 4, 2025).
- [22] ¿Acero o aluminio para moldes de inyección de plástico? Guía de selección - KLUMEX Moldes e inyección de plástico n.d. <https://klumex.com/blog/acero-aluminio-moldes-de-inyeccion-plastico/> (accessed July 5, 2025).
- [23] Chanda M, Roy SK. Plastics Technology Handbook. n.d.
- [24] Molde de inyección de 3 placas, el mejor Molde de inyección de tres placas n.d. <https://plas.co/es/molde-de-inyeccion-de-3-placas/> (accessed August 28, 2025).

- [25] Antonio A., Fernández T, Bártolome T:, Hurtado C. DISEÑO DE UN MOLDE DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO. 2019.
- [26] Shoemaker J. Moldflow Design Guide A Resource for Plastics Engineers First Edition. 2006.
- [27] OEM's Guide to Design for Manufacturing for Injection Molding n.d. <https://www.crescentind.com/oem-guide-to-design-for-manufacturability-in-plastic-injection-molding> (accessed July 7, 2025).
- [28] OEM's Guide to Design for Manufacturing for Injection Molding n.d. <https://www.crescentind.com/oem-guide-to-design-for-manufacturability-in-plastic-injection-molding> (accessed July 4, 2025).
- [29] Martowibowo SY, Kaswadi A. Optimization and Simulation of Plastic Injection Process using Genetic Algorithm and Moldflow. Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition) 2017;30:398–406. <https://doi.org/10.1007/s10033-017-0081-9>.
- [30] Fusion Help | Tutorials | Autodesk n.d. <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=GUID-670346CA-4CF8-4009-9E9B-09FCC6803B61> (accessed August 28, 2025).
- [31] Szabó F, Suplicz A, Kovács JG. Development of injection molding simulation algorithms that take into account segregation. Powder Technol 2021;389:368–75. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.05.053>.
- [32] Serapone Kalpakjian, Steve R. Schmid. Manufactura Ingeniería y Tecnología - Capitulo 19. vol. 1. Ulises Figueroa. Mexico: Pearson; 2014.

ANEXOS

A1. Anexo del Marco Teórico -Defectos	152
A2. Anexo de indicaciones de Moldflow.....	154
A3. SIMULACIONES ADICIONALES de la Etapa de llenado - iteración de los parámetros de inyección.....	156
A4. Etapa del diseño del sistema de alimentación	160
PS-Bloque	165
A5. Etapa de diseño de sistemas de refrigeración	166
Diseño Con Baffles	166
Diseño Sin Baffles	166
A6. Etapa de simulación completa con tiempo de empaquetamiento.....	167
Con Baffle PP	167
Sin Baffle PP	167
Con Baffle ABS.....	167
Sin Baffle ABS	168
A7. ANEXO PLANOS DE LA PIEZA Y DEL MOLDE	169

A1. Anexo del Marco Teórico -Defectos

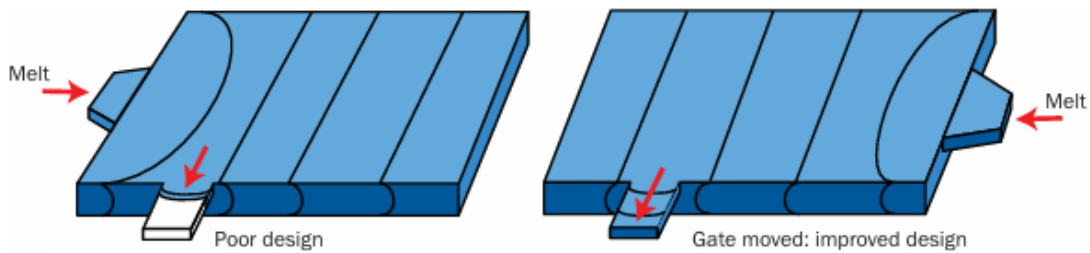


Ilustración A1.1 Solución ante Hesitation

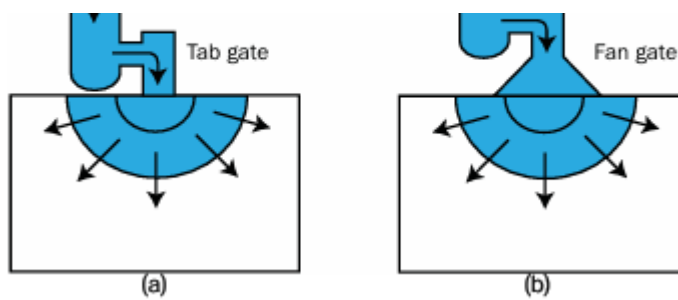


Ilustración A1.2 Tipos de compuertas: Tab Gate (a) en Abanico (b)

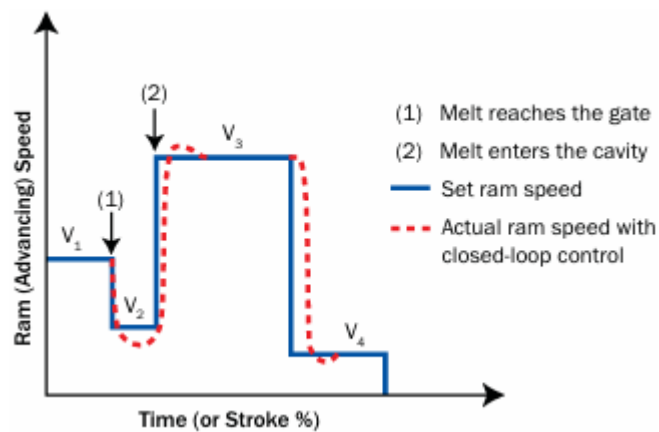


Ilustración A1.3 Ajuste del perfil de velocidades para evitar jetting

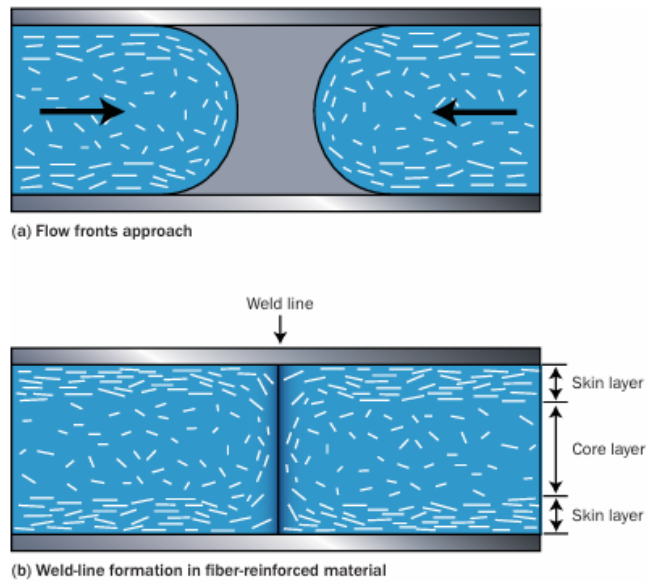


Ilustración A1.4 La distribución de fibras paralela a la línea de soldadura conduce a una unión más débil.

A2. Anexo de indicaciones de Moldflow

Cuando nos encontramos antes resultados poco favorables, el programa dispone de un asesor para corregir parámetros. Durante las simulaciones se siguieron en la etapa de llenado los siguientes consejos.

- Temperature is low
 - Increase the melt or mold temperature
 - But this may cause material degradation and increase the cycle time. Keep the temperature within the material's recommended limits.
 - Decrease the injection time
 - But this may cause excess shear in the gate if it is restrictive. Too much shear will cause degradation and surface defects.
 - Increase the thickness in the area to permit flow, but this may cause a functional problem with the design.
 - For hesitation in thin ribs, decrease the draft angle slightly, but this may cause a functional problem with the design. Also, reducing the draft on ribs can make ejecting the part more difficult.
 - Move the gate away from the hesitation area, but this may cause hesitation or other problems elsewhere in the part.
- Cooling time is too high, there might be packing problems, it is better if the areas requiring the longest cooling time are at or near the gate.
 - Decrease the melt temperature.
 - Decrease the mold temperature.
 - Make the problem area thinner.
- Shear stress exceeds the recommended limit = High shear stress can cause cracks in the plastic, which can make the part degrade and fail.
 - Increase the mold or melt temperature to reduce the plastic viscosity
 - Thicken the part at the end of flow or in thin sections.
 - The injection time is longer than optimal, decrease the maximum injection time to make the plastic inject more quickly. This will increase the shear heating; as the plastic heats up, its viscosity decreases. If the injection time is already too low, decreasing the injection time can shear the material beyond its limits, compromising the mechanical properties of the finished part.
- Needs a high injection pressure to fill
- Temperature is low
- Cooling time is too high, there might be packing problems
 - To reduce excessive cycle time:
 - Decrease the melt temperature.

- Decrease the mold temperature.
- Make the problem area thinner.

Velocity switch over, es el momento en que el molde empieza llenarse por presión en vez de por velocidad, llenado por presión es pequeño y suele estar estandarizado de (95-99%)

A3. SIMULACIONES ADICIONALES de la Etapa de llenado - iteración de los parámetros de inyección

En este anexo se recogen las simulaciones realizadas con el objetivo de ajustar los parámetros de inyección, tras comprobar que los valores óptimos propuestos inicialmente por el software no ofrecían los mejores resultados. Se muestran aquí las combinaciones iteradas hasta alcanzar configuraciones aceptables, siempre respetando la condición de mantenerse dentro de la zona verde definida por la ventana de proceso para cada material.

PP – 2 Entradas

Para llegar a los resultados de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.A3.1**, se redujo el tiempo de inyección en 0.5 y 0.7 segundos y se aumentó la temperatura de Mold en aproximadamente 3°C y la de Melt en 5°C.

Tabla A3.0.1 Resultados de cada iteración en el escenario PP con 2 entradas

B - PP	Tª DEL MOLDE (°C)	Tª DEL MATERIAL (°C)	t DE INY. (s)	Confiabilidad de llenado %	Calidad %	t de ciclo (s)
Iniciales	63,6	216	1,71	86,4	99,9	18,35
1º IT	63,6	216	1,21	98,2	99,9	17,82
2º IT	73,6	226	1	100	99,9	20,91
3º IT	68,64	221	1	99,9	98	19,71
4º IT	66	221	1	99,9	99,9	18,84

PS - 2 Entradas

Tiene uno de los mayores tiempos de ciclo de todos. Para llegar a los resultados de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.A3.2**, se redujo el tiempo de inyección en 0.1 y 0.8 segundos y se aumentó la temperatura de Mold en aproximadamente 2°C y la de Melt en 5°C.

Tabla A3.0.2 Resultados de cada iteración en el escenario PS con 2 entradas

B - PS	Tª DEL MOLDE (°C)	Tª DEL MATERIAL (°C)	t DE INY. (s)	Confiabilidad de llenado %	Calidad %	t de ciclo (s)
Iniciales	58,9	203,2	2,8	89,4	99,8	27,14
1º IT	58,9	203,2	1,8	100	90,5	26,10
2º IT	58,9	203,2	1,5	100	92,7	26,36
3º IT	60	208	1,5	100	95,2	27,08

ABS - 2 Entradas

Para llegar a los resultados de la **referencia.A3.3**, se redujo el tiempo de inyección en 0.8 segundos y se aumentó la Temperatura de Melt en 5°C.

Tabla A3.0.3 Resultados de cada iteración en el escenario ABS con 2 entradas

B - ABS	Tª DEL MOLDE (°C)	Tª DEL MATERIAL (°C)	t DE INY. (s)	Confiabilidad de llenado %	Calidad %	t de ciclo (s)
Iniciales	63,33	241,1	1,814	99,9	93	19,87
1º IT	63,33	246,0	1,15	100	98,3	19,42

PP - 1 Entrada

Para llegar a unos buenos resultados, las medidas se han obtenido tras, aumentar 5°C la temperatura de molde, aumentar 4 °C la temperatura de fusión y reducir 0.5 s tiempo de inyección, véase **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**A3.4.

Tabla A3.0.4 Resultados de cada iteración en el escenario PP con 1 entrada

A - PP	Tª DEL MOLDE (°C)	Tª DEL MATERIAL (°C)	t DE INY. (s)	Confiabilidad de llenado %	Calidad %	t de ciclo (s)
Iniciales	63,6	216	1,78	80,4	99,8	20,22
1º IT	63,6	211	1,28	87,40	100	15,55
2º IT	68	220	1,28	87,5	100	16,75

ABS - 1 Entrada

Para llegar a unos buenos resultados, las medidas se han obtenido tras, aumentar 5°C la temperatura de molde, aumentar 4 °C la temperatura de fusión y reducir 0.5 s tiempo de inyección, véase **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**A3.5.

Tabla A3.0.5 Resultados de cada iteración en el escenario ABS con 1 entrada

A - ABS	Tª DEL MOLDE (°C)	Tª DEL MATERIAL (°C)	t DE INY. (s)	Confiabilidad de llenado %	Calidad %	t de ciclo (s)
Iniciales	63	241	2	99,8	74,6	22,334
1º IT	63	220	1,2	100	92,5	21,61
2º IT	63	246	1,2	100	96,9	21,84

PS – 1 Entrada

Tabla A3.0.6 Resultados de cada iteración en el escenario PS con 1 entrada

A - PS	Tª DEL MOLDE (°C)	Tª DEL MATERIAL (°C)	t DE INY. (s)	Confiabilidad de llenado %	Calidad %	t de ciclo (s)
Iniciales	58,9	201	3,37	99,9	72,6	30,46
1º IT	60	206	1	100	83,3	30,16
2º IT	58,9	203,2	2	100	96,6	26,36
3º IT	58,9	210	1,5	100	94,2	27,08

A4. Etapa del diseño del sistema de alimentación

Este anexo recoge las ilustraciones correspondientes a las simulaciones realizadas durante la etapa de diseño del sistema de alimentación. Si bien en la memoria principal se han presentado los resultados numéricos obtenidos para cada configuración, en este apartado se incluyen de forma complementaria las representaciones visuales de dichos escenarios. Las imágenes muestran el comportamiento del llenado para los distintos layouts y materiales analizados, permitiendo así una comprensión más completa y directa de los patrones de flujo y la distribución del material dentro del molde.

PP-Radial

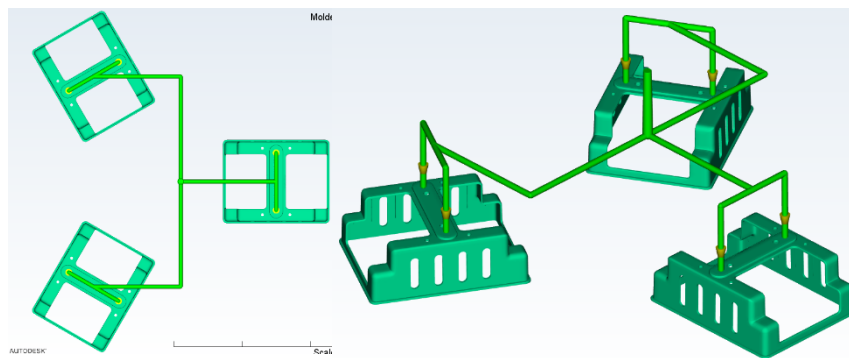


Ilustración A4.1 Visualización del Layout en forma Radial con 3 Cavidades del PP

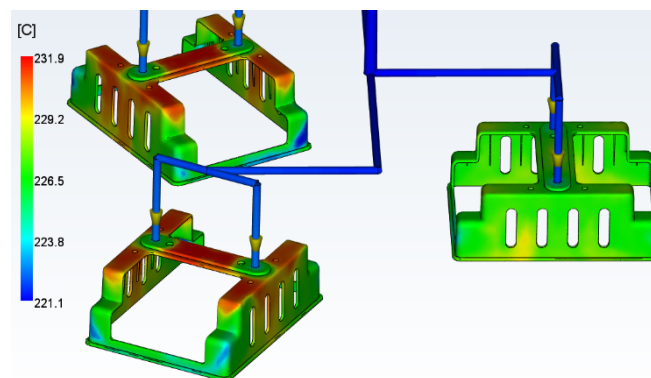


Ilustración A4.2 Resultados de la Simulación, para la Temperatura al frente del flujo en Configuración Radial del PP

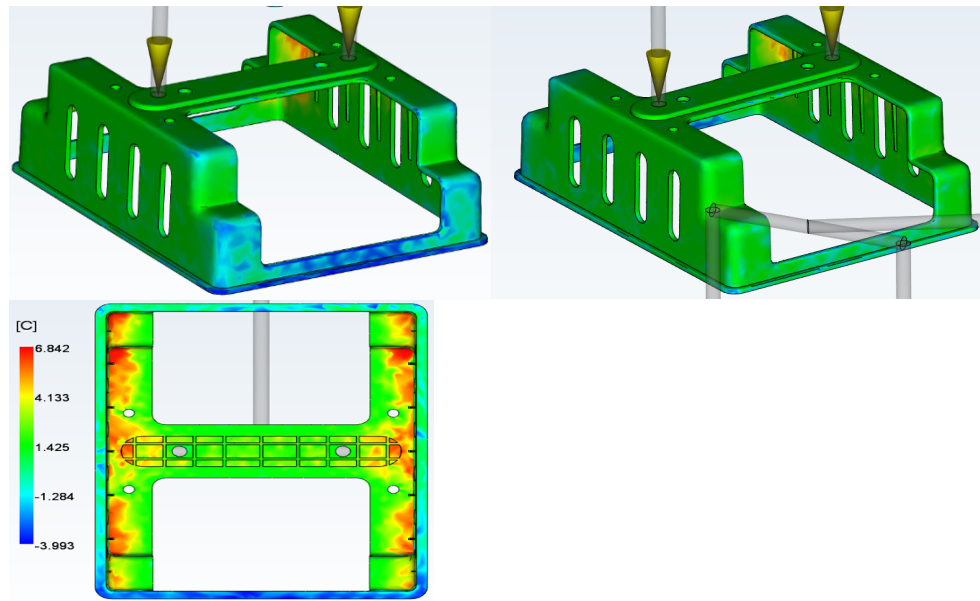


Ilustración A4.3 Resultado de la Variación de Temperatura. Zonas de color Rojo, son las zonas críticas donde se enfría más lentamente al tener T° más elevada, para la distribución Radial de 3 Cavidades del PP

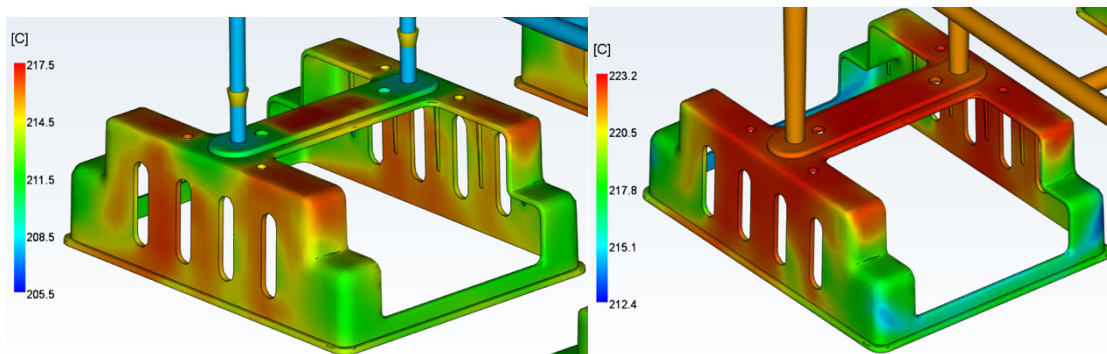


Ilustración A4.4 Resultados de Temperatura al frente del flujo para la configuración radial de PP. Donde se ven distribuciones de T° diferentes en las cavidades, siendo o homogéneo el comportamiento

PP-Bloque

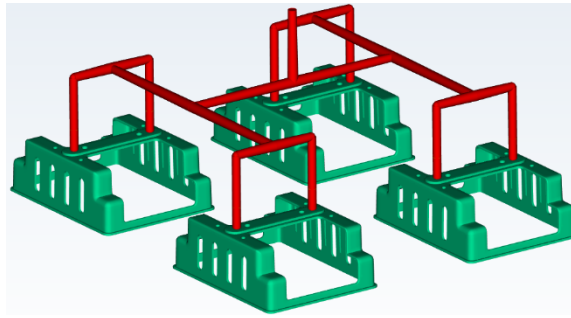


Ilustración A4.5 Distribución del Layout de PP con 4 cavidades en forma de H o Bloque

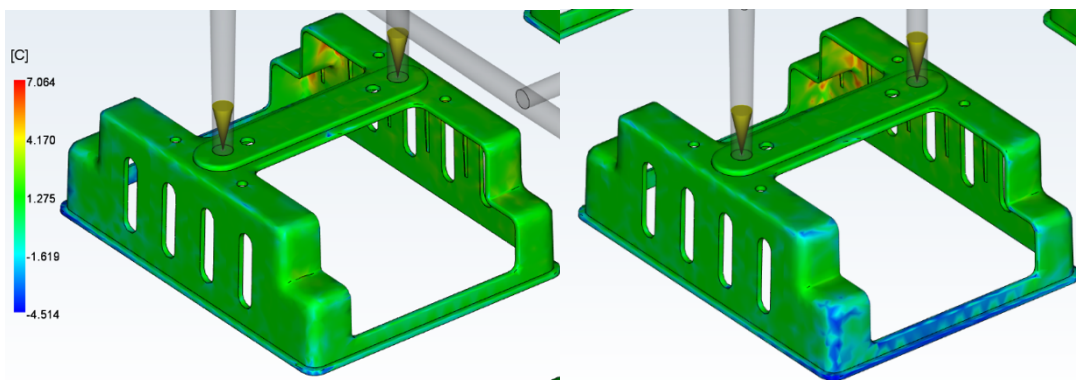


Ilustración A4.6 Resultado de la Variación de Temperatura. Zonas de color Azul, son las zonas donde se enfría más rápidamente al tener un menor espesor, se acumula menos energía térmica, para la distribución en forma de H, de 4 Cavidades del PP

ABS-Árbol

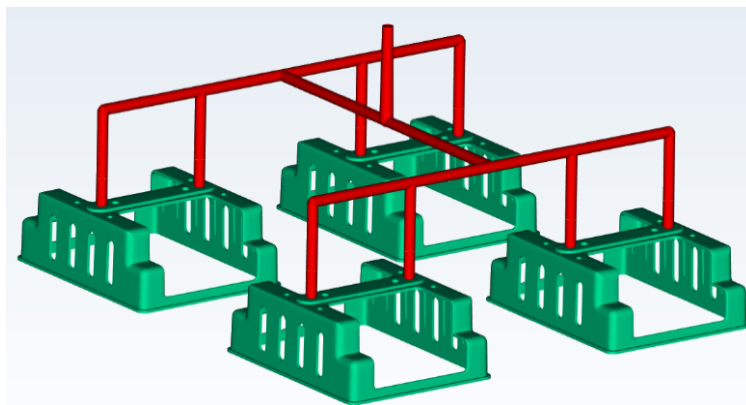


Ilustración A4.7 Distribución del Layout de ABS con 4 cavidades en forma de árbol

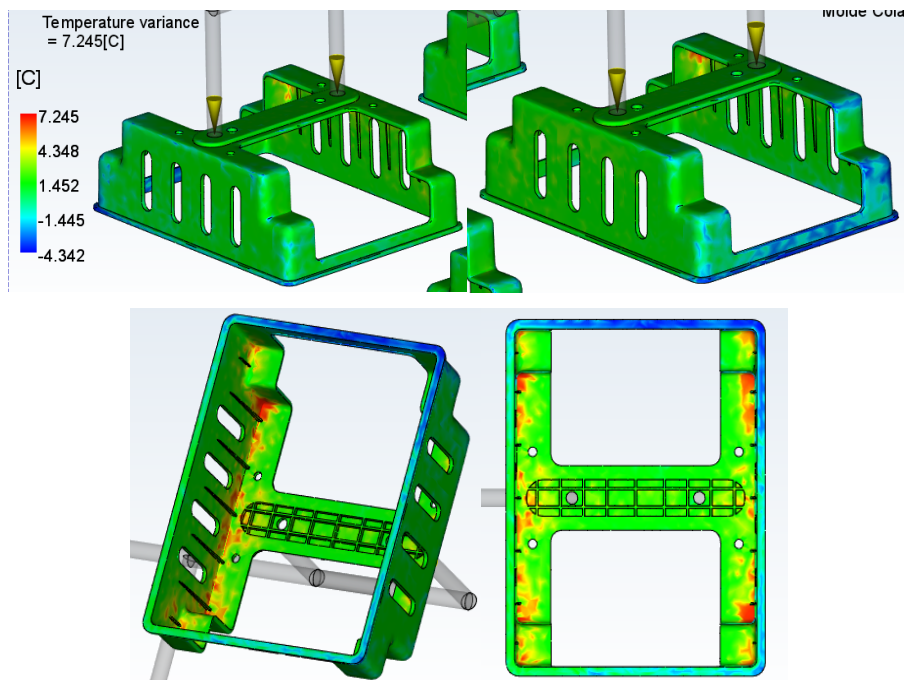


Ilustración A4.8 Resultado de la Variación de Temperatura. Zonas de color Rojo, son las zonas críticas donde se enfría más lentamente al tener T° más elevada. Zonas azules, donde hay una menos acumulación térmica al ser de menor espesor. Para la distribución en árbol de 4 Cavidades del ABS

ABS-Bloque

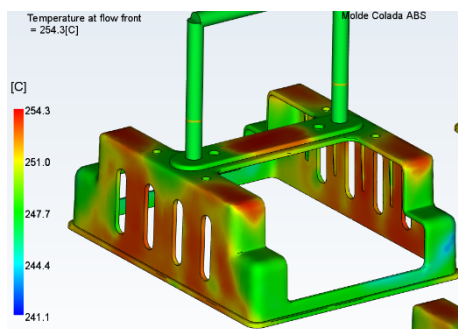


Ilustración A4.9 Resultado de la T° al frente del flujo, para las 4 cavidades de la configuración en Bloque de ABS

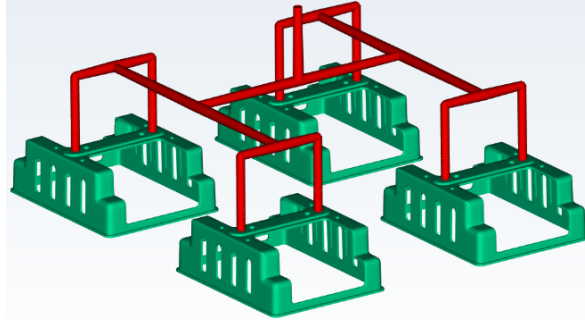


Ilustración A4.10 Distribución del Layout de ABS con 4 cavidades en forma de H o Bloque

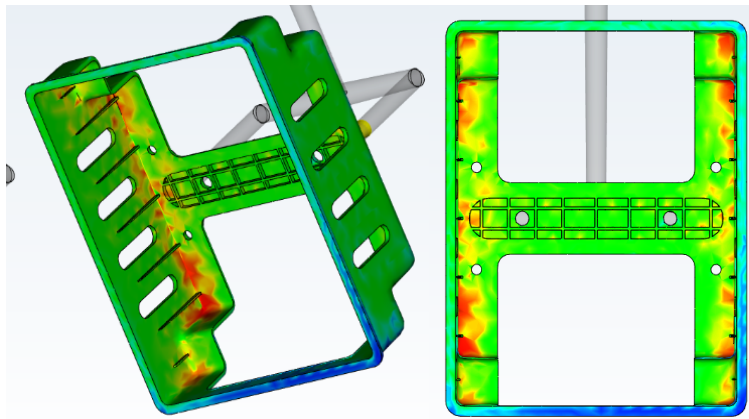


Ilustración A4.11 Resultados de la simulación de la variación de la T^a , donde se ve las zonas donde hay una acumulación térmica mayor y por tanto cuesta más de enfriar. Para ABS en Bloque

PS-Radial

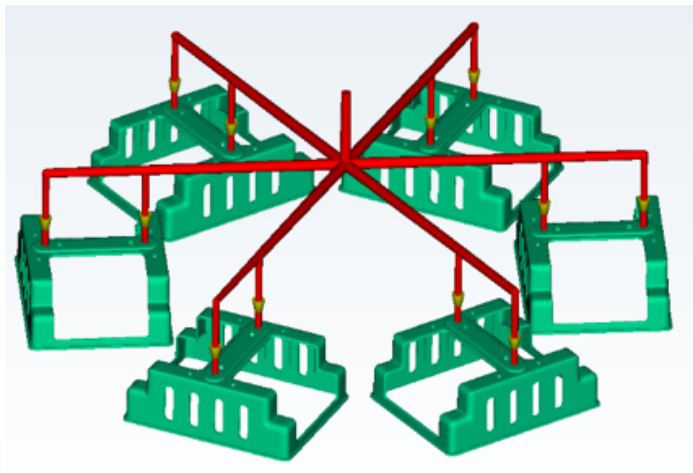


Ilustración A4.12 Distribución del Layout de PS con 6 cavidades en forma Radial

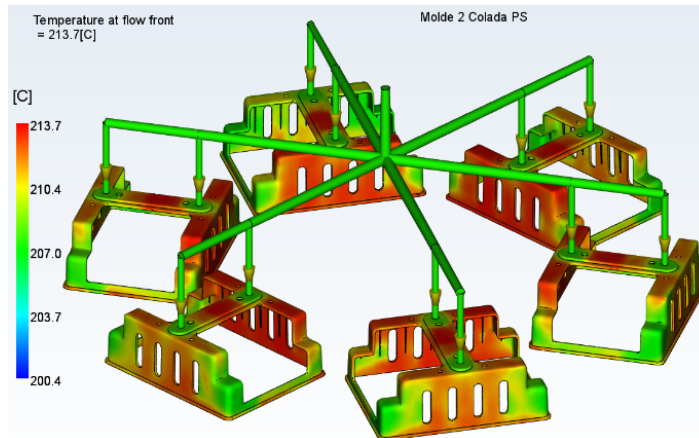


Ilustración A4.13 Resultado de la variación de la T^a para el PS en distribución Radial, donde se ve que la pieza no tiene un flujo homogéneo, al igual que de una a otra cavidad presentan comportamientos diferentes

PS-Bloque

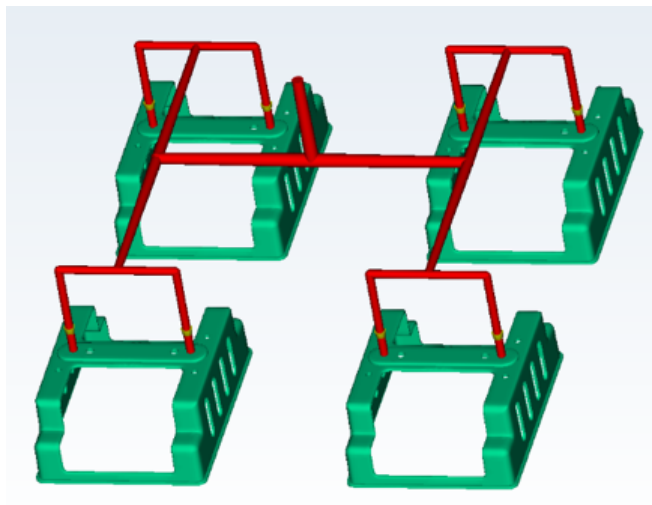


Ilustración A4.14 Distribución del Layout de PS con 4 cavidades en forma de H o Bloque

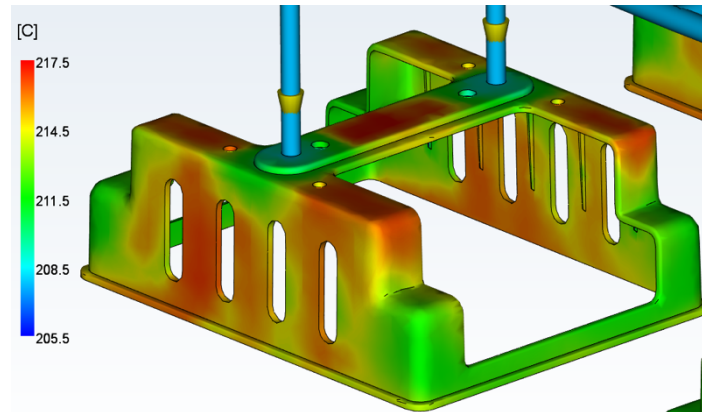


Ilustración A4.15 Resultado de la Temperatura al frente del flujo para las cavidades del PS en forma de H, cuyo comportamiento es el mismo para todas

A5. Etapa de diseño de sistemas de refrigeración

Diseño Con Baffles

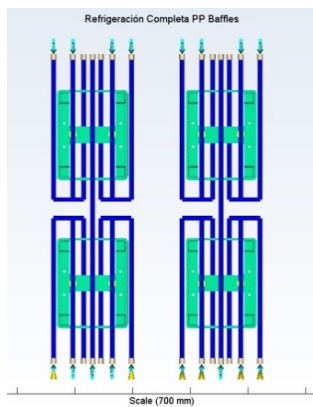


Ilustración A5.1 Vista en Planta del diseño de refrigeración CON Baffles

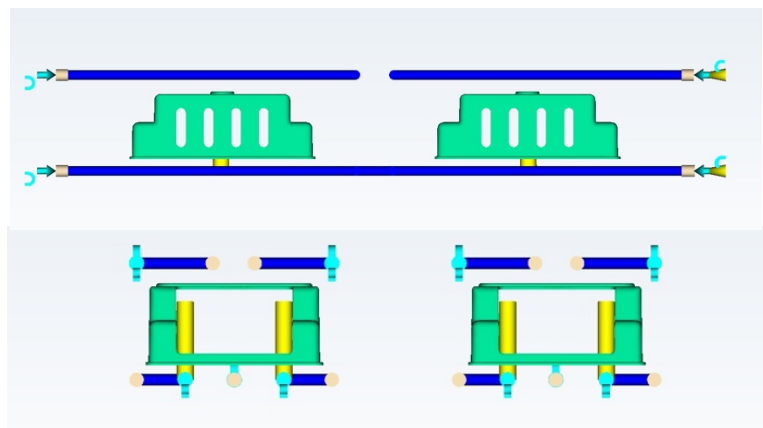


Ilustración A5.2 Vista de alzado y perfil del diseño de refrigeración CON Baffles

Diseño Sin Baffles

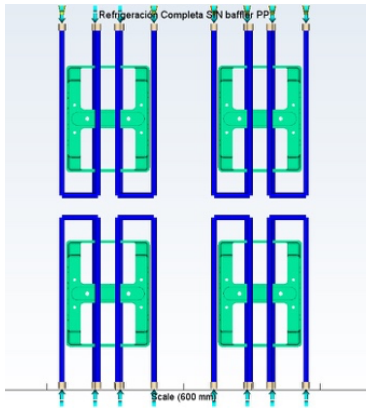


Ilustración A5.3 Vista en Planta
del diseño de refrigeración SIN
Baffles

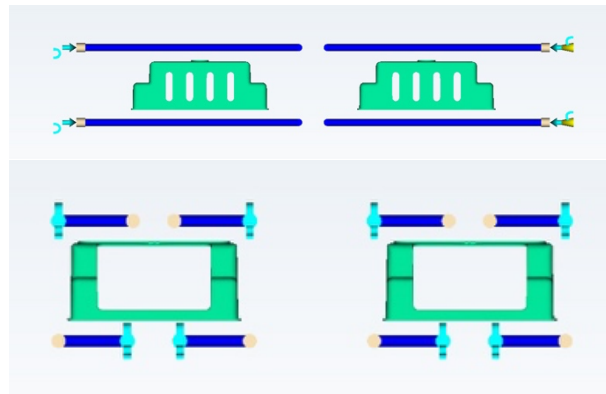


Ilustración A5.4 Vista de Alzado y Perfil del diseño de
refrigeración SIN Baffles

A6. Etapa de simulación completa con tiempo de empaquetamiento

Con Baffle PP

Tabla A6.1 Resultados PP Con Baffles

Tiempo de ciclo	15,87 seg --> 12,85 seg
Tiempo de eyección	7,853 seg --> 7,404 seg
Tiempo de empaquetamiento	9,80 seg --> 6,58 seg
Cooling quality	91,8% --> 86,1%
Warpage indicator all effects	82,6% --> 80,7%
Deflection all defects	1.644 mm

Sin Baffle PP

Tabla A6.2 Resultados PP Sin Baffles

Tiempo de ciclo	13,45 seg
Tiempo de eyección	7,753 seg
Tiempo de empaquetamiento	7,38 seg
Cooling quality	76%
Warpage indicator all effects	80,6%
Deflection all defects	1.640 mm

Con Baffle ABS

Tabla A6.3 Resultados ABS Con Baffles

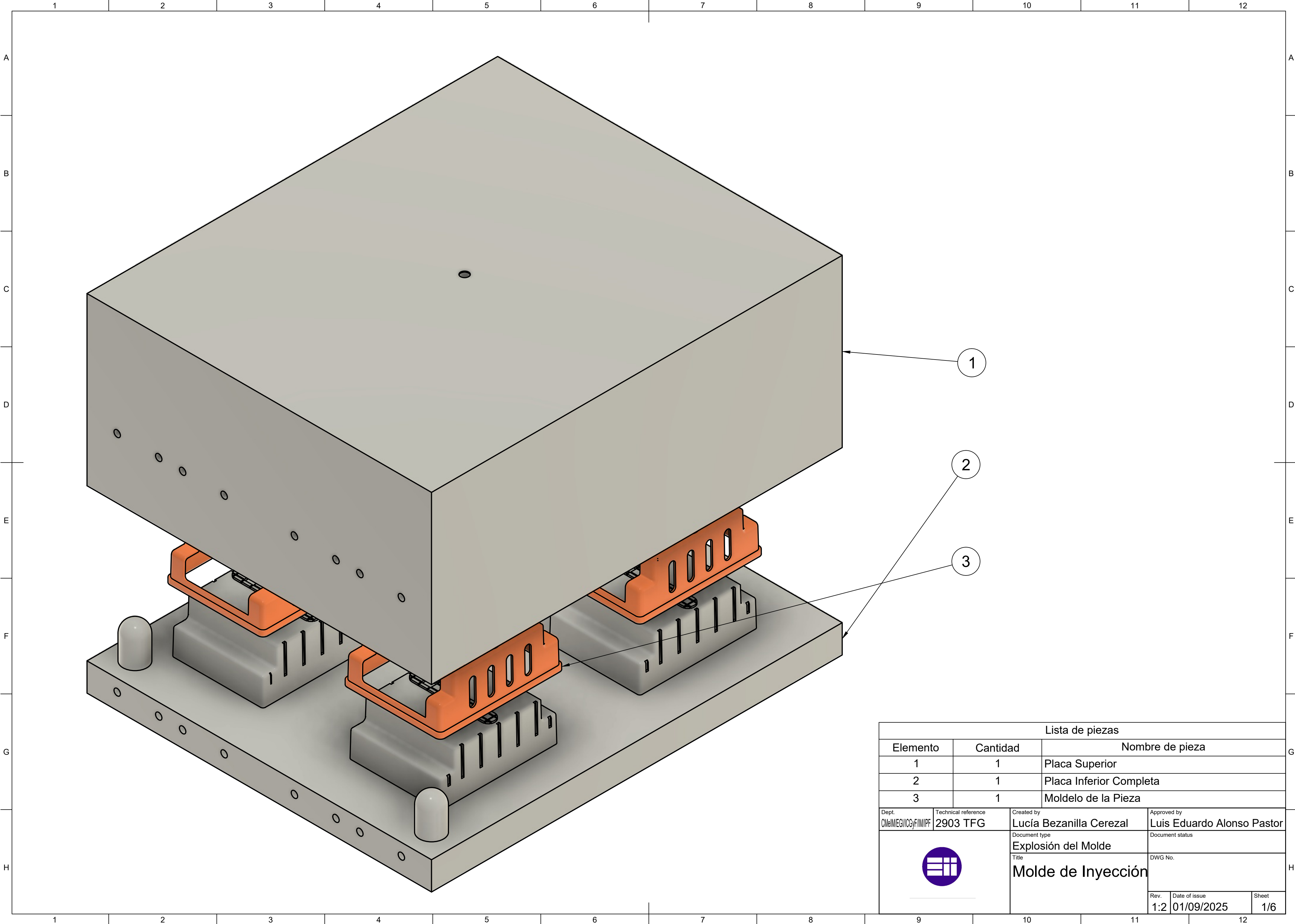
Tiempo de ciclo	18,39 seg -> 13,44
Tiempo de eyección	8,442 seg -> 8,042
Tiempo de empaquetamiento	10,50 seg -> 7,23
Cooling quality	96% -> 87,3%
Warpage indicator all effects	100% -> 100%
Deflection all defects	0.7862 mm

Sin Baffle ABS

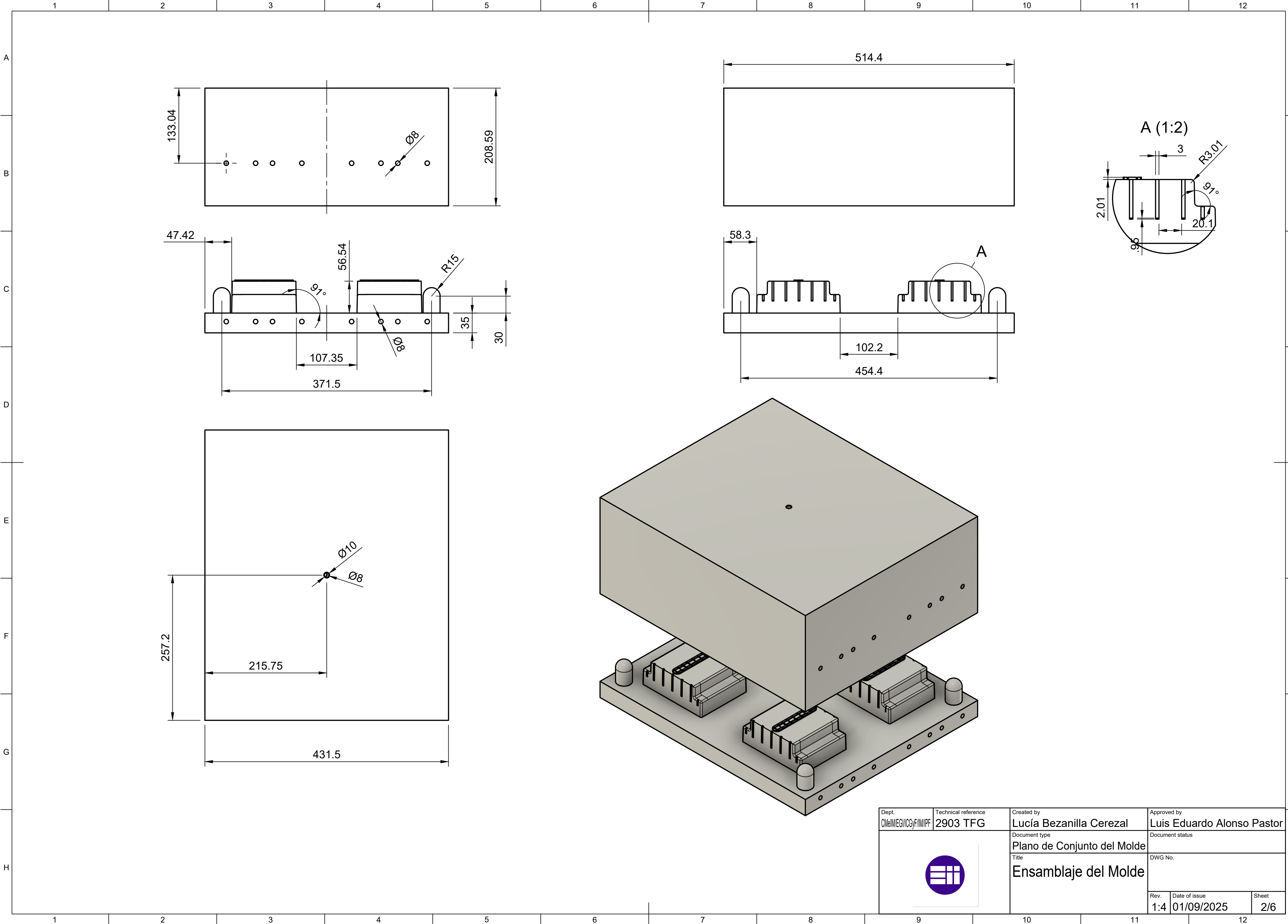
Tabla A6.4 Resultados Sin Baffles

Tiempo de ciclo	16,22 seg --> 13,38 seg
Tiempo de eyección	8,384 seg --> 8,046 seg
Tiempo de empaquetamiento	9,75 seg --> 7,13 seg
Cooling quality	83,4% --> 76,4%
Warpage indicator all effects	100% --> 100%
Deflection all defects	0.7715 mm

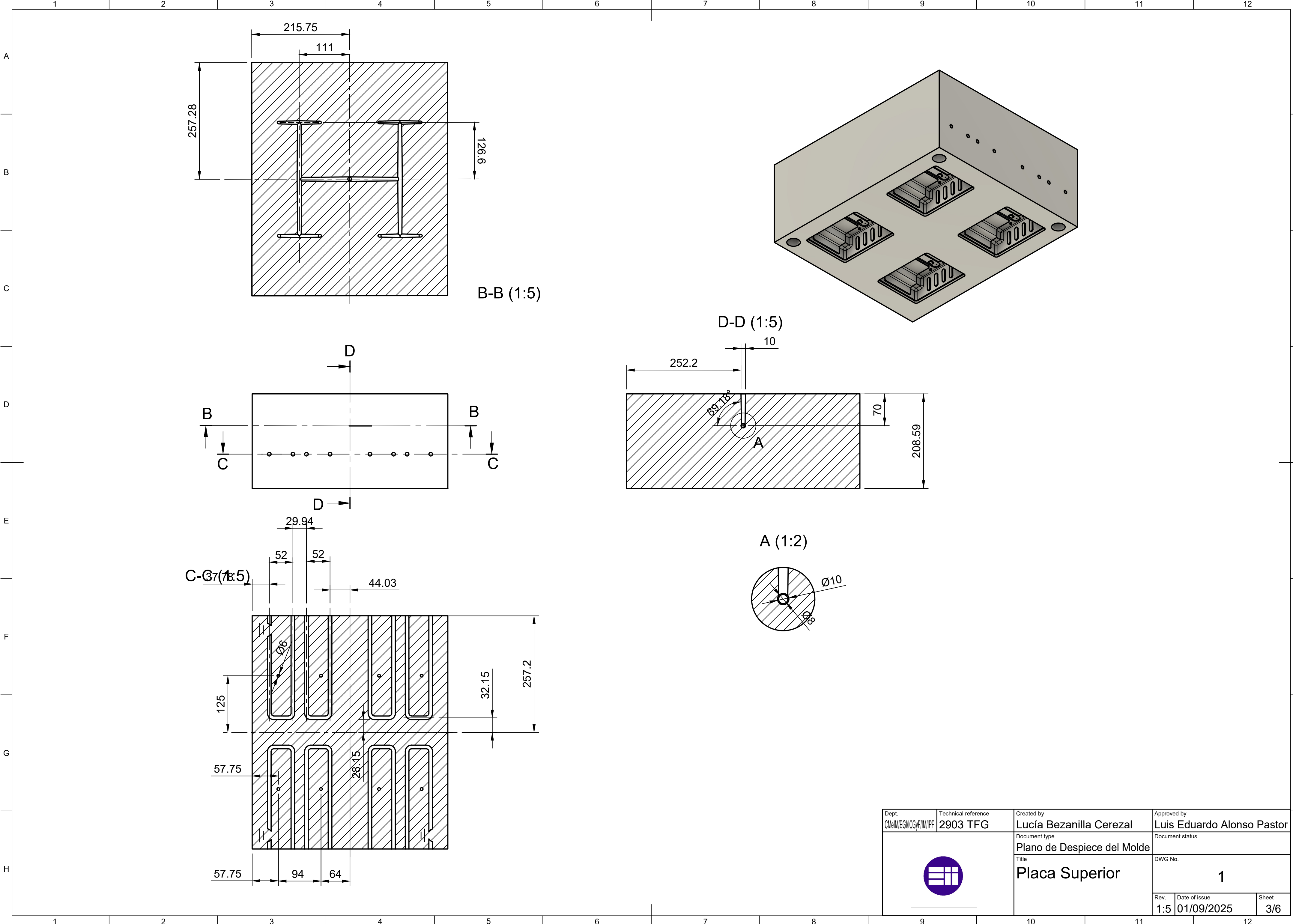
A7. ANEXO PLANOS DE LA PIEZA Y DEL MOLDE



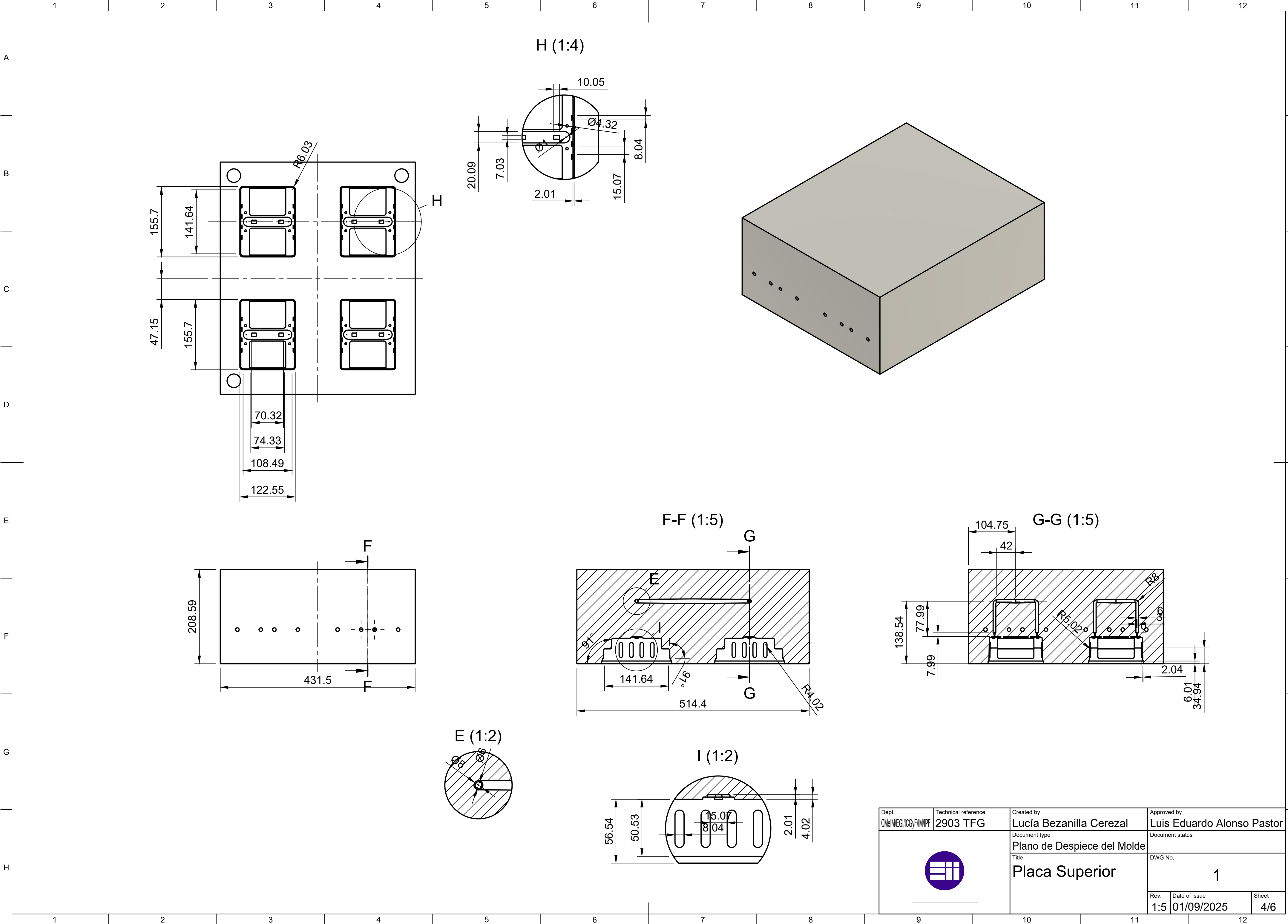
Lista de piezas					
Elemento		Cantidad	Nombre de pieza		
1		1	Placa Superior		
2		1	Placa Inferior Completa		
3		1	Moldelo de la Pieza		
Dept.	Technical reference		Created by		Approved by
CMeIM/EG/INGyF/IM/MPF	2903 TFG		Lucía Bezanilla Cerezal		Luis Eduardo Alonso Pastor
			Document type		Document status
			Explosión del Molde		
			Title		DWG No.
			Molde de Inyección		
			Rev.	Date of issue	Sheet
			1:2	01/09/2025	1/6

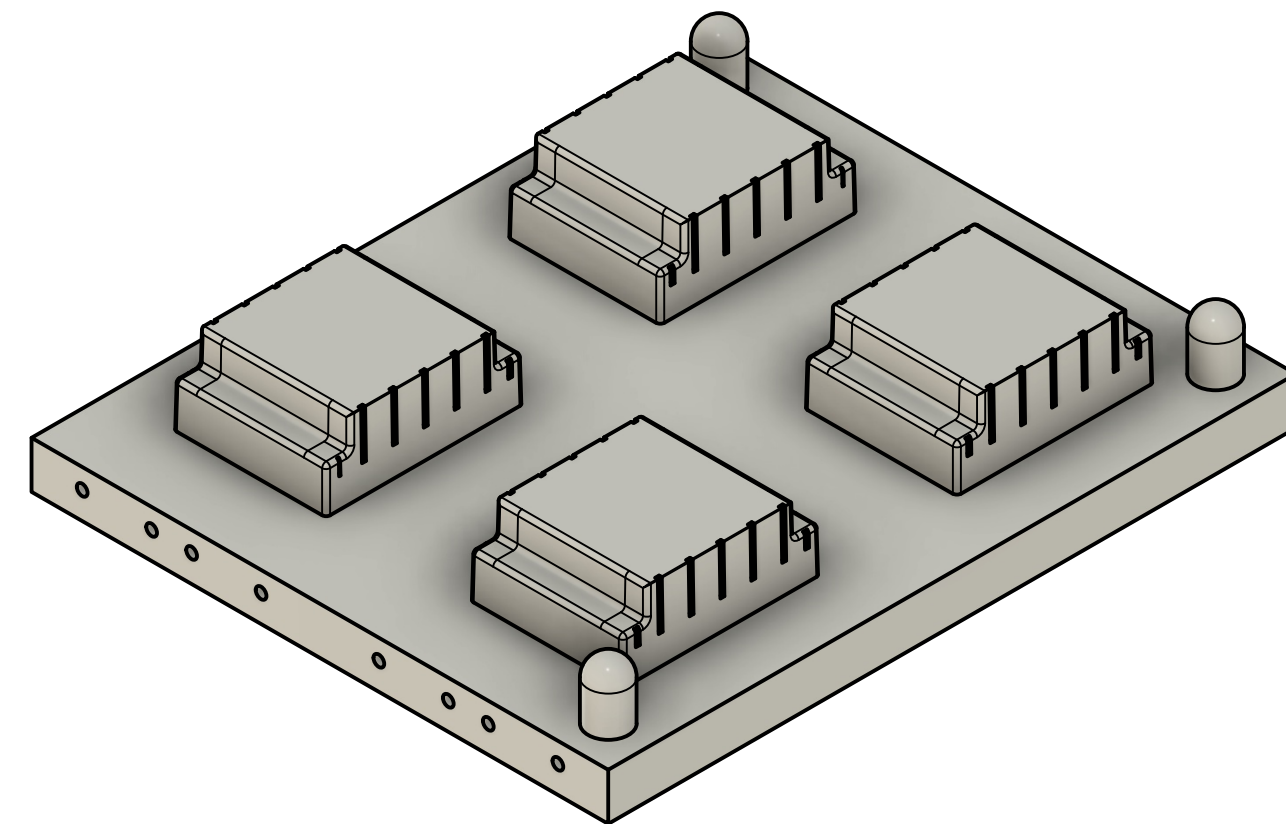
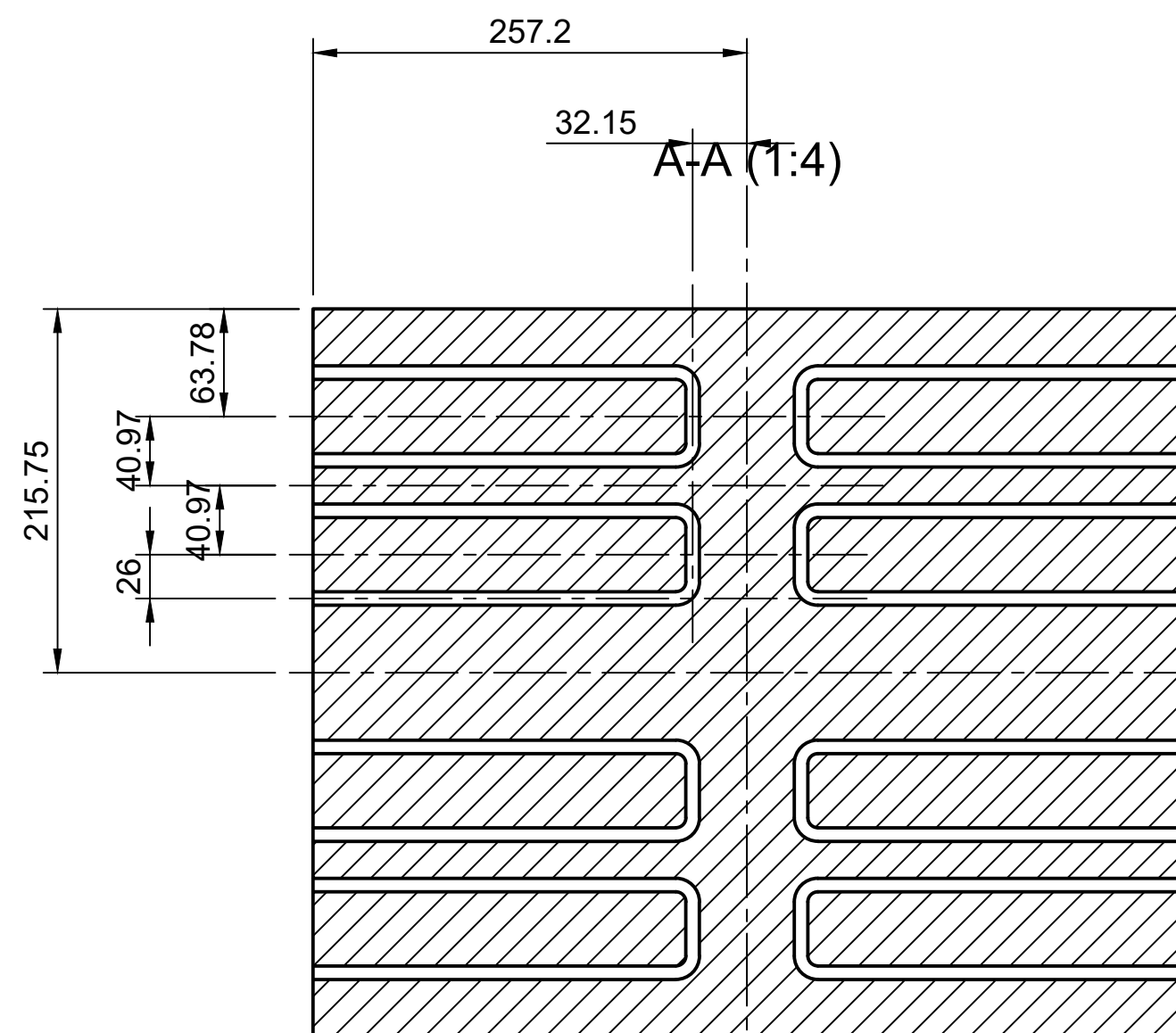
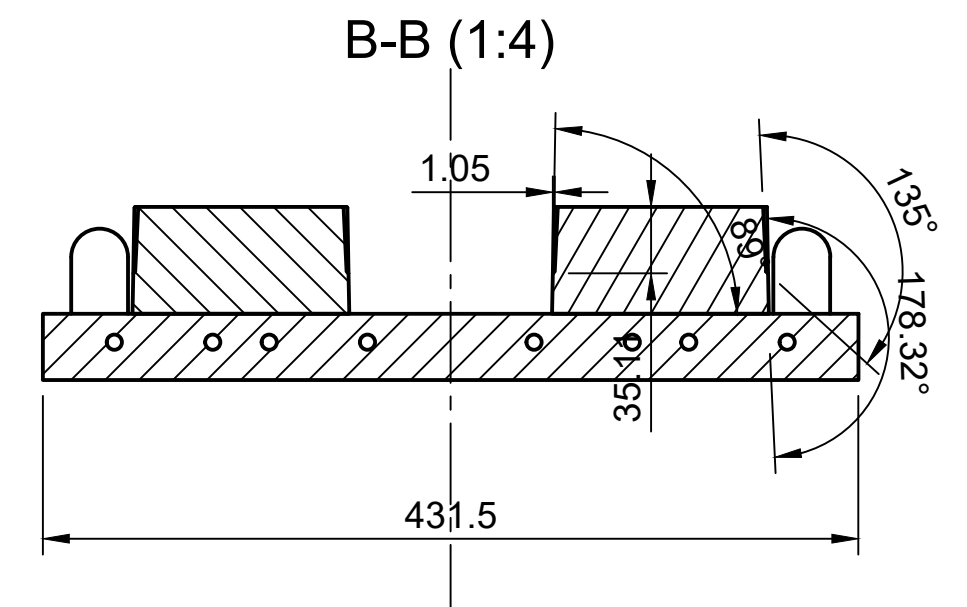
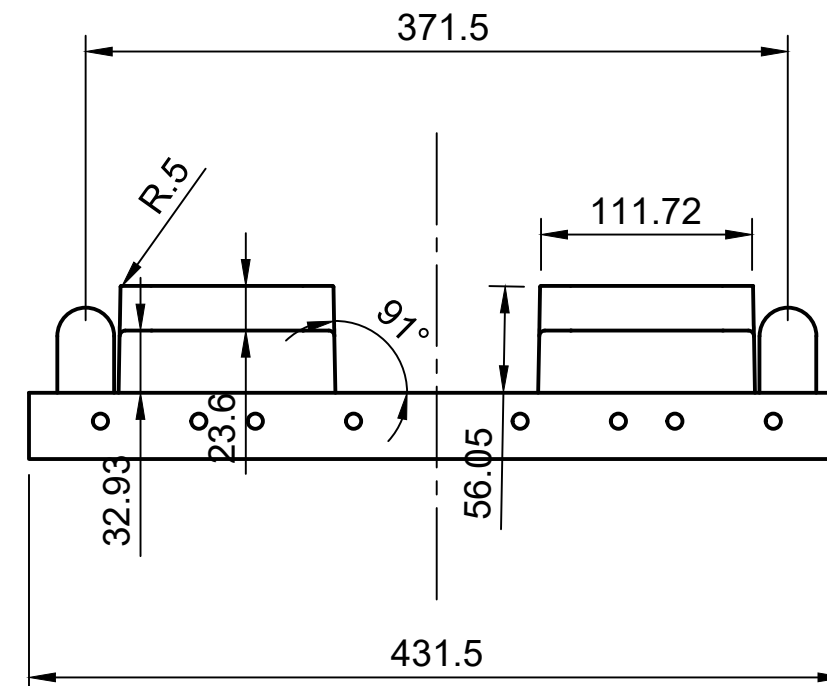
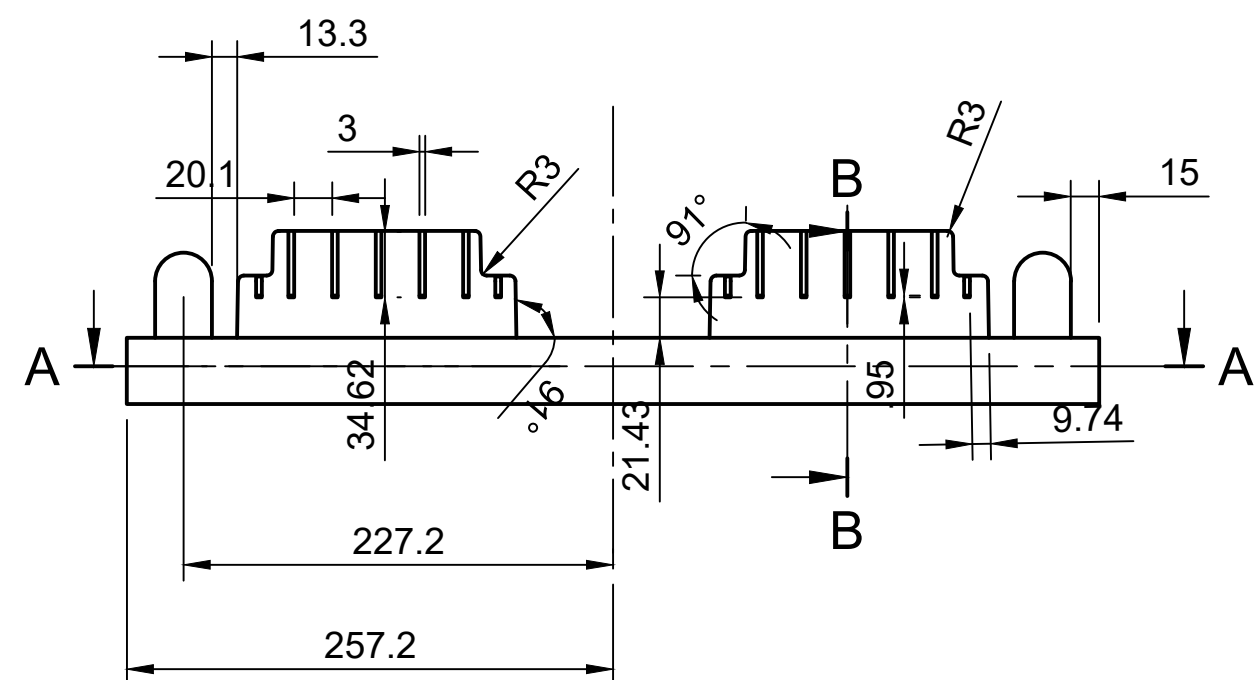


Dept. CM&I/MEG/ICSyF/IM/MPF	Technical reference 2903 TFG	Created by Lucía Bezanilla Cerezal	Approved by Luis Eduardo Alonso Pastor
		Document type Plano de Conjunto del Molde	Document status
		Title Ensamblaje del Molde	DWG No.
		Rev. 1:4	Date of issue 01/09/2025
		Sheet 2/6	

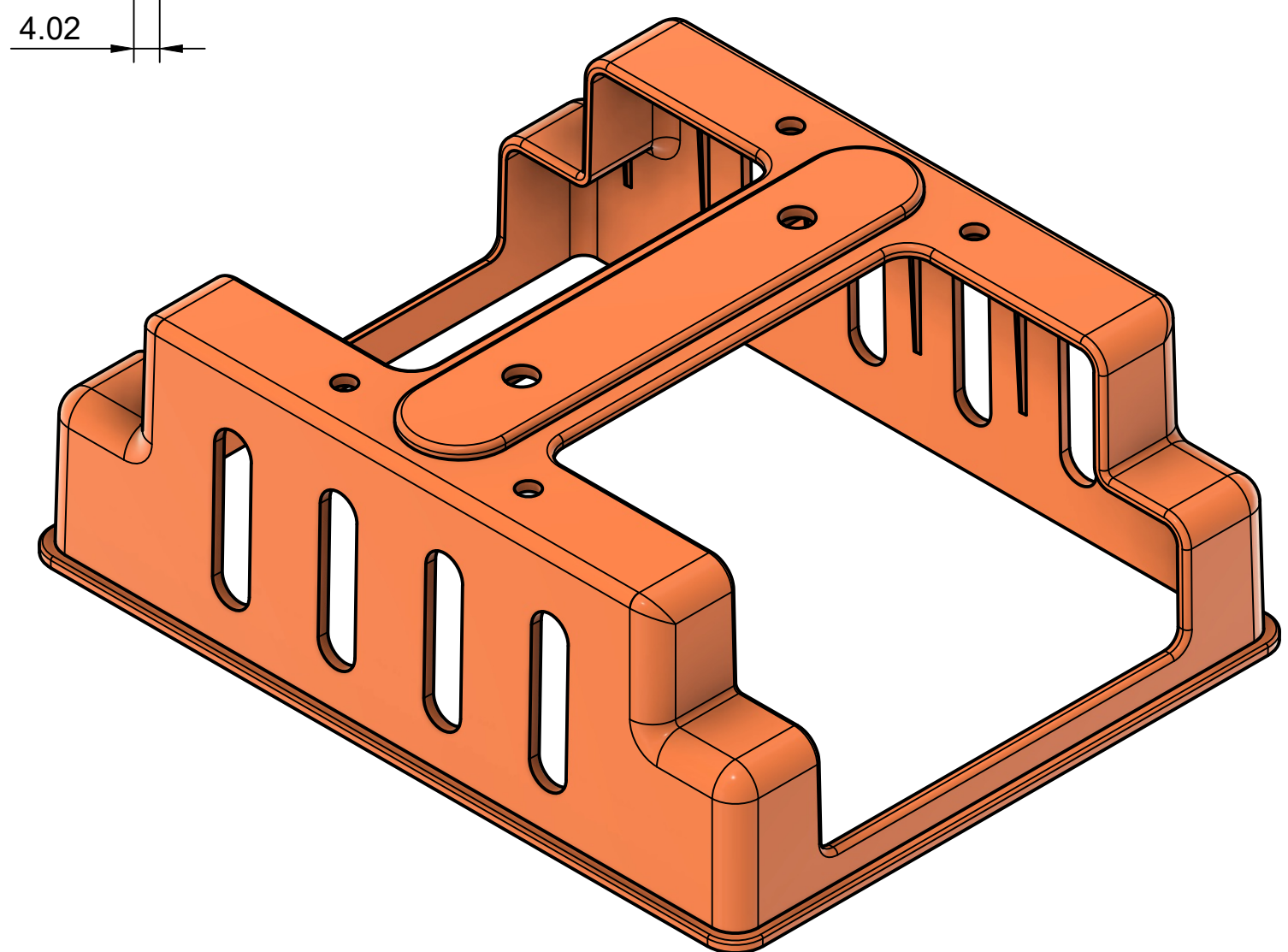
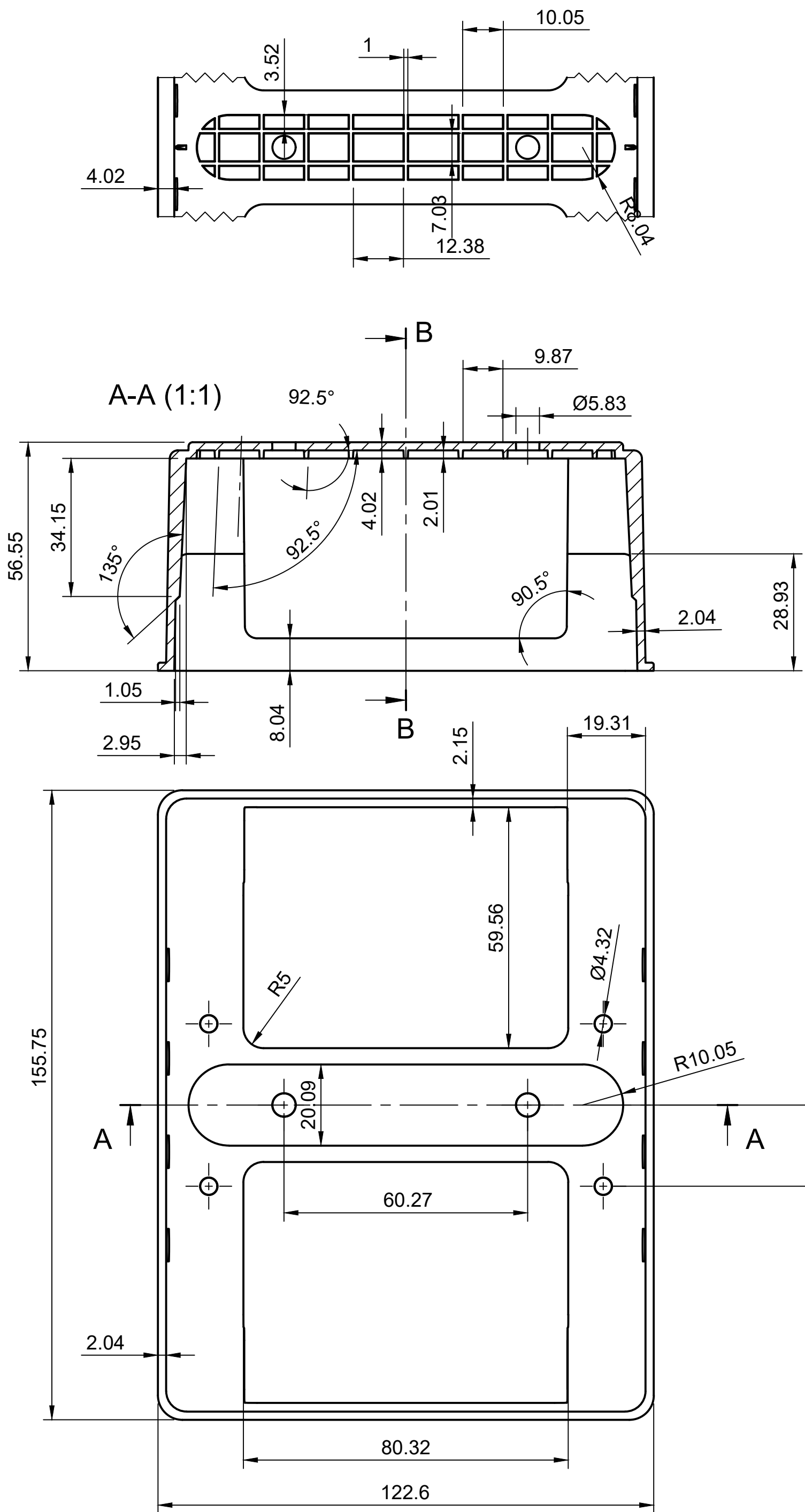


Dept. CM&M/MEG/INGY/FIM/MPF	Technical reference 2903 TFG	Created by Lucía Bezanilla Cerezal	Approved by Luis Eduardo Alonso Pastor
		Document type Plano de Despiece del Molde	Document status
		Title Placa Superior	DWG No. 1
		Rev. 1:5	Date of issue 01/09/2025
		Sheet 3/6	





Dept. CMeIMEGNCgyFIIMIPF	Technical reference 2903 TFG	Created by Lucía Bezanilla Cerezal	Approved by Luis Eduardo Alonso Pastor		
	Document type Plano de Despiece del Molde	Document status			
	Title Placa Inferior	DWG No. 2			
		Rev. 1:4	Date of issue 01/09/2025	Sheet 5/6	



Dept. CMA/MEG/INGyF/IMP/	Technical reference 2903 TFG	Created by Lucía Bezanilla Cerezal	Approved by Luis Eduardo Alonso Pastor	
		Document type Plano de Despiece del Molde	Document status	
		Title Molelo de la Pieza	DWG No. 3	
		Rev. 1:1	Date of issue 01/09/2025	Sheet 6/6

