



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

Área de Conocimiento de Ingeniería de Procesos de Fabricación

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**Estudio y simulación de procesos de fundición en
molde de arena**

Autor: Dña. Carolina Ortigosa Martínez

Tutor: D. Fermín Bañón García

Cotutor: D. Francisco Javier Trujillo Vilches

Málaga, junio 2025



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Estudio y simulación de procesos de fundición en molde de arena





Resumen:

La fundición es uno de los métodos de fabricación más antiguos y versátiles, utilizado para producir piezas metálicas. En particular, la fundición en molde de arena, que consiste en fundir el metal, verterlo en una cavidad moldeada en arena y esperar a que se solidifique, es uno de los más utilizados debido a las ventajas que ofrece [1]. Entre ellas se incluye su capacidad de moldeo, buena permeabilidad, resistencia a las altas temperaturas del metal fundido y el bajo coste de la arena en comparación con el metal. Por estas razones, este método es ampliamente utilizado en laboratorios universitarios para realizar prácticas experimentales que refuercen los conocimientos adquiridos por el alumnado en las clases teóricas. Sin embargo, también presenta algunos inconvenientes, como pueden ser los defectos de porosidad asociados al proceso [2].

Es aquí donde cobra importancia la simulación de procesos de fundición, la cual ha ganado popularidad en la industria, ya que permite identificar estos posibles defectos internos, como porosidad por contracción o inclusiones de arena, sin necesidad de fabricar prototipos, lo que ahorra tiempo y costes [2].

Altair Inspire Cast es una excelente opción tanto para profesionales del sector como para fines académicos, debido a su facilidad de uso. Permite predecir y optimizar el comportamiento del metal durante el proceso de fundición, estudiando el llenado del molde, la solidificación y enfriamiento de la pieza. Además, también permite anticipar la aparición de defectos y localizarlos en la pieza antes de su fabricación real [3].

La metodología empleada en este Trabajo de Fin de Grado ha permitido analizar la influencia del diseño de elementos como la mazarota, comparando los resultados obtenidos en tres casos de estudio distintos. Finalmente, se concluye que este software es una herramienta muy adecuada para su uso académico, altamente intuitiva y eficaz, con la que se predijeron los defectos más comunes en la colada, obteniéndose los mejores resultados en la pieza que incorporaba mazarotas y sistema de llenado.

Palabras clave: Fundición en molde de arena, simulación, Inspire Cast, mazarota, rechupe, porosidad.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Estudio y simulación de procesos de fundición en molde de arena



Abstract:

Metal casting is one of the oldest and most versatile manufacturing methods used to produce metal parts. In particular, sand casting, which involves melting the metal, pouring it into a sand-molded cavity, and then waiting for the molten metal to solidify, is one of the most widely used processes due to its many advantages. These include malleability, suitable permeability, resistance to the high temperatures of molten metal, and the low cost of sand compared to metal [1]. For these reasons, this method is commonly used in university laboratories and workshops for hands-on sessions that help reinforce the theoretical knowledge acquired by students in lectures. However, it also presents some drawbacks, such as porosity defects associated with the process [2].

This is where casting simulation becomes especially relevant, as it has gained popularity in the industry due to its ability to identify potential internal defects, such as shrinkage porosity or sand inclusions, without the need to manufacture physical prototypes, thereby saving both time and costs [2].

Altair Inspire Cast is an excellent tool for both industry professionals and academic purposes, thanks to its user-friendly interface. It allows for the prediction and optimization of metal behavior throughout the casting process, enabling the study of mold filling, metal solidification, and part cooling. Furthermore, it also helps anticipate the appearance of defects and pinpoint their location on the part before actual manufacturing [3].

The followed methodology in this Bachelor Thesis enabled the analysis of the influence of design elements such as the riser, comparing the results obtained from three different case studies. In conclusion, the software has proven to be a highly suitable academic tool, intuitive, effective, and capable of predicting common casting defects. It noted that the best results were obtained in the part that included risers and a proper gating system.

Key words: Sand Casting, Simulation, Inspire Cast, Riser, Shrinkage, Porosity.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Estudio y simulación de procesos de fundición en molde de arena



ÍNDICE DE CONTENIDO:

1. OBJETO Y ALCANCE:	14
2. ANTECEDENTES:	16
2.1. Procesos de Fabricación:.....	16
2.1.1. Operaciones de procesado:.....	18
2.1.2. Operaciones de ensamblaje:	19
2.2. Procesos de fundición:	19
2.2.1. Clasificación de los procesos de fundición:	19
2.2.1.1. Fundición a alta presión (HPDC, High Pressure Die Casting): .	20
2.2.1.2. Fundición a baja presión (Low Pressure Die Casting, LPDC): ..	20
2.2.1.3. Fundición a la cera perdida (Investment casting):.....	21
2.2.1.4. Fundición por gravedad con molde basculante/ inclinado (Gravity Tilt Pouring):	22
2.2.1.5. Fundición / colada centrífuga:	22
2.2.1.6. Fundición por gravedad (Gravity casting):	23
2.3. Fundición por gravedad en molde de arena:	25
2.3.1. Tipos de materiales empleados en fundición:	25
2.3.2. Modelos para piezas fundidas:.....	27
2.3.3. Arenas y mezclas para el moldeo de piezas:	29
2.3.4. Ventajas e inconvenientes de los Procesos de Fundición:	30
2.3.4.1. Ventajas:.....	30
2.3.4.2. Inconvenientes:.....	31
2.3.5. Factores que influyen en el proceso:	38
2.3.5.1. Velocidad de llenado:	38
2.3.5.2. Mazarota:.....	38
2.3.5.3. Manguitos:	40
2.3.5.4. Elementos enfriadores:	41
2.3.5.5. Velocidad de enfriamiento:	42
2.2.6.6. Sistema de colada:	42
2.3.5.6. Forma de entrada del metal en el molde:.....	44
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL:	53
2.4. Introducción al software Altair Inspire Cast:	53

2.4.1. Espacio de trabajo de Altair Inspire Cast:.....	54
3.1. Concepto inicial:	56
3.2. Definir pieza:	58
3.3. Definir el sistema de colada:	59
3.4. Definir dirección de la gravedad:	60
3.5. Definir la entrada del material:	61
3.6. Definir componentes:	62
3.7. Parámetros proceso por gravedad:.....	65
4. RESULTADOS:	71
4.1. RESULTADOS OPERACIÓN DE LLENADO:.....	71
4.1.1. Temperatura:	71
4.1.2. Evolución del flujo:	72
4.1.3. Contribución a la entrada:.....	72
4.1.4. Fracción sólida:	73
4.1.5. Velocidad de llenado:	74
4.1.6. Aire atrapado:.....	76
4.1.7. Tiempo de llenado:	77
4.1.8. Evolución del aire:	78
4.1.9. Temperatura del molde:	79
4.2. RESULTADOS SOLIDIFICACIÓN:	79
4.2.1. Temperatura:	79
4.2.2. Fracción sólida:	80
4.2.3. Tiempo de solidificación:	81
4.3. RESULTADOS DESMOLDANDO:	82
4.3.1. Microporosidad:	82
4.3.2. Porosidad:.....	83
4.4. COMPARACIÓN ENTRE PIEZA CON MAZAROTAS Y SIN MAZAROTAS:	84
4.4.1. Temperatura:	84
4.4.3. Aire atrapado:.....	85
4.4.4. Tiempo de llenado:	86
4.4.5. Microporosidad:	87
4.4.6. Porosidad / rechupes:	87



4.5. COMPARACIÓN PIEZA CON MAZAROTAS Y CANAL DE LLENADO Y PIEZA SIN CANAL DE LLENADO:	88
4.5.1. Temperatura:	88
4.5.2. Aire atrapado:.....	89
4.5.3. Tiempo de llenado:	90
4.5.4. Microporosidad:	91
4.5.5. Porosidad:.....	91
5. CONCLUSIONES:	95
6. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN:	97
7. BIBLIOGRAFÍA:	99

ÍNDICE FIGURAS:

Figura 1: Diagrama de flujo de un proceso de fabricación	16
Figura 2: Clasificación de los Procesos de Fabricación [5]	17
Figura 3: Fundición [7]	18
Figura 4: Procesos de fundición. A) Fundición a baja presión. B) Fundición a alta presión. C) Colada centrífuga. D) Fundición por gravedad en molde de arena. E) Fundición por gravedad en molde permanente. F) Fundición a la cera perdida. [3,9]	20
Figura 5: Fundición a alta presión [3].....	20
Figura 6: Fundición a baja presión [3].....	21
Figura 7: Fundición a la cera perdida [3]	21
Figura 8: Fundición por gravedad con molde basculante [3].....	22
Figura 9: Colada centrífuga. A) Centrífuga. B) Semicentrífuga. C) En moldes o racimo [8]	22
Figura 10: Pasos de fundición por gravedad en molde de arena [3]	23
Figura 11: Fundición por gravedad en moldes permanentes [3].....	24
Figura 12: Componentes del proceso de fundición en molde de arena [14].....	25
Figura 13: Procesos de fundición según el material [3]	25
Figura 14: Pieza de la aleación de aluminio A356 [17]	26
Figura 15: (a) Ángulos de salida. (b) Modelo desmontable [5].....	27
Figura 16: Mecanizado del espesor suplementario. [5]	27
Figura 17: (a) Modelo de madera (b) Modelo de metal (c) Modelo de resina [20,21]	28
Figura 18: Ejemplo de uso de Noyo/macho en color amarillo [3]	28
Figura 19: Arena para moldes de fundición [22]	29
Figura 20: Molde con arena verde [24]	30
Figura 21: Piezas finales con huecos internos [26]	30
Figura 22: (a) Baja producción usando moldes de arena. (b) Gran producción usando fundición a presión [3]	31
Figura 23: Ejemplo de rechupe en pieza fundida [29].	31
Figura 24: Calidad superficial según el tipo de proceso de fundición [3]	32
Figura 25: Espesor y tolerancias según el proceso de fundición [3].....	32
Figura 26: Porosidad [3]	33
Figura 27: a) Línea de partición en molde metálico. b) Molde de arena [3].....	33
Figura 28: Ejemplos de defectos de porosidad o rechupes [3]	34
Figura 29: Estándar alemán para déficits de volumen [3]	35
Figura 30: Estándar estadounidense de radiografías de referencia para la inspección de fundiciones a presión de aluminio y magnesio [3].....	35
Figura 31: Ejemplo de rechupe [33]	36
Figura 32: Zona con dendritas [3].....	37

Figura 33: Valores críticos de Niyama según el material, a) Cobre, b) Acero, c) Hierro y d) Aluminio [3]	37
Figura 34: Mazarota señalada en naranja [3].....	38
Figura 35: Evolución del metal fundido durante la solidificación en una pieza con mazarota [45].....	39
Figura 36: A) Mazarota cilíndrica. B) Mazarota elíptica. C) Mazarota esférica [43].	39
Figura 37: Manguitos [48]	41
Figura 38: Elementos enfriadores en azul [3]	41
Figura 39: Influencia de diferentes velocidades de enfriamiento [46].....	42
Figura 40: Ejemplo de rechupes [49]	42
Figura 41: Canal principal en rojo [3].....	43
Figura 42: Sistema de colada [46]	43
Figura 43: a) Una entrada inferior, b) Dos entradas superiores y c) Tiempo de solidificación cuando la entrada del metal no se ubica correctamente [3,30].	44
Figura 44: a) Colada directa, b) colada en sifón, c) Colada lateral y d) Colada escalonada [7].	45
Figura 45: Ejemplo Flow-3D Cast [52]	46
Figura 46: MAGMASoft [53].....	46
Figura 47: ProCAST [54].....	47
Figura 48: Altair Inspire Cast [30]	47
Figura 49: a) Mazarota cilíndrica sin carcasa, b) Mazarota esférica sin camisa, c) Mazarota cilíndrica con camisa y d) Mazarota esférica con camisa [4].	49
Figura 50: Tiempo de llenado según la posición del bebedero: a) 6.263 segundos, b) 2.79 segundos [1]	50
Figura 51: Comparación de resultados de porosidad obtenidos con el software y experimentalmente [2].	50
Figura 52: Ciclo de trabajo. Etapas de la metodología experimental	53
Figura 53: Programa Inspire Cast	54
Figura 54: Espacio de trabajo Inspire Cast [3]	55
Figura 55: Submenú Sketch [3]	55
Figura 56: Submenú Geometría [3]	55
Figura 57: Pieza para el estudio.....	56
Figura 58: Abrir archivo geometría pieza	57
Figura 59: Pieza para el proceso de fundición con canal de llenado.	57
Figura 60: Seleccionar pieza para el proceso de fundición	58
Figura 61: Icono para definir el canal de llenado	59
Figura 62: Selección del canal de llenado.....	59
Figura 63: Botón de confirmación.	59
Figura 64: Icono para definir la dirección de la gravedad	60
Figura 65: Configuración de la dirección de la gravedad	60

Figura 66: Definir entrada del metal fundido	61
Figura 67: Crear una entrada de material.....	61
Figura 68: Posición de la entrada	62
Figura 69: Menu de componentes Inspire Cast	62
Figura 70: Pasos a seguir para definir la mazarota	62
Figura 71: Configuración mazarotas.....	63
Figura 72: Pasos a seguir para definir el manguito	63
Figura 73: Configuración del manguito	64
Figura 74: Pasos a seguir para definir el molde.....	64
Figura 75: Creación del molde	64
Figura 76: Selección material para el molde	65
Figura 77: Definir parámetros proceso por gravedad	65
Figura 78: Configuración análisis	66
Figura 79: Configuración análisis	66
Figura 80: Estado ejecución	67
Figura 81: Indicador análisis completo.....	67
Figura 82: a) Pieza con mazarotas y camisa, b) Pieza sin mazarotas	67
Figura 83: Pieza sin canal de llenado, mazarotas ni manguitos.....	68
Figura 84: Resultados de temperatura de llenado	71
Figura 85: Evolución de flujo.....	72
Figura 86: Contribución de la entrada	73
Figura 87: Fracción sólida - Llenado.....	74
Figura 88: Velocidad de llenado	75
Figura 89: Velocidades - vectores	76
Figura 90: Aire atrapado	77
Figura 91: Ejemplo de tiempo de llenado inadecuado [30]	78
Figura 92: Tiempo de llenado.....	78
Figura 93: Evolución del aire. a) 0.50 s. b) 0.80 s. c) 1,00 s	79
Figura 94: Temperatura del molde.....	79
Figura 95: Temperatura de solidificación final	80
Figura 96: Evolución de la temperatura de solidificación. a) 25 segundos, b) 80 segundos, c) 1.5 segundos.....	80
Figura 97: Fracción sólida – Solidificación	81
Figura 98: Tiempo de solidificación	82
Figura 99: Microporosidad.....	83
Figura 100: Porosidad	84
Figura 101: Comparación temperatura de llenado. a) Pieza con mazarotas. b) Pieza sin mazarotas.....	85
Figura 102: Comparación aire atrapado. a) Pieza con mazarotas. b) Pieza sin mazarotas.	86

Figura 103: Comparación tiempo de llenado. a) Pieza con mazarotas. b) Pieza sin mazarotas.	87
Figura 104: Comparación microporosidad. a) Pieza con mazarotas. b) Pieza sin mazarotas.	87
Figura 105: Comparación porosidad (rechupe). a) Pieza con mazarotas. b) Pieza sin mazarotas.	88
Figura 106: Comparación Temperatura de llenado. a) Pieza con mazarotas y canal de llenado, b) Pieza con entrada directa y sin mazarotas.	89
Figura 107: Comparación aire atrapado. a) Pieza con mazarotas y canal de llenado, b) Pieza con entrada directa y sin mazarotas	90
Figura 108: Comparación tiempo de llenado. a) Pieza con mazarotas y canal de llenado, b) Pieza con entrada directa y sin mazarotas	91
Figura 109: Comparación microporosidad. a) Pieza con mazarotas y canal de llenado, b) Pieza con entrada directa y sin mazarotas	91
Figura 110: Comparación porosidad. a) Pieza con mazarotas y canal de llenado, b) Pieza con entrada directa y sin mazarotas	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades de la aleación de aluminio A356 [18,19]	26
Tabla 2: Comparativa resumida de diferentes software de simulación [3,37]	48
Tabla 3: Parámetros del metal para la fundición.....	58
Tabla 4: Parámetros de la entrada del material	61
Tabla 5: Parámetros de la mazarota	63
Tabla 6: Parámetros del manguito isotérmico	63
Tabla 7: Parámetros del molde.	65
Tabla 8: Características análisis	66
Tabla 9: Parámetros y componentes de la pieza A.	68
Tabla 10: Parámetros y componentes de la pieza B.	69
Tabla 11: Parámetros y componentes de la pieza C.	69
Tabla 12: Resumen comparativo de resultados de los tres casos de estudio.	93



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Estudio y simulación de procesos
de fundición en molde de arena



1. OBJETO Y ALCANCE:

El origen de la fundición se remonta al año 4000 a.C. y hoy en día sigue siendo un componente esencial en la producción de diversas piezas y componentes. El proceso de fundición implica verter una aleación de metal fundido en un molde cuya cavidad reproduce la geometría de la pieza deseada en forma negativa. Una vez que el molde está lleno, la aleación comienza a enfriarse y solidificarse. Hay varios procesos de fundición, cada uno con sus propias ventajas y desventajas.

Tres problemas principales que se pueden encontrar son: el aseguramiento de la calidad, la complejidad y el costo de la fabricación de moldes y el tiempo involucrado. En primer lugar, existe la posibilidad de defectos de fundición, que son imperfecciones o irregularidades que pueden aparecer y afectar la calidad de los componentes producidos. Estos pueden incluir problemas estructurales, defectos de vertido, porosidad, grietas, deformaciones y más, lo que puede comprometer la resistencia y la calidad de las piezas fundidas. Además, la fabricación de moldes puede ser compleja y costosa, especialmente para geometrías complejas. Por último, los procesos de fundición pueden ser prolongados, especialmente para la producción de piezas grandes o intrincadas.

La elección del tipo de fundición y la comprensión de estos defectos son cruciales para mejorar la calidad de los productos finales. Para abordar estos problemas, aparece el software de Altair Engineering: Altair Inspire Cast.

Altair incluye un rápido y preciso software de simulación de procesos de fundición que permite al usuario mejorar y optimizar sus componentes fabricados para evitar defectos y problemas de fundición. Altair Inspire Cast es un entorno de simulación que permite crear componentes de alta calidad y más rentables con una solución potente e intuitiva.

Es una de las únicas herramientas que satisface las necesidades tanto de principiantes como de expertos ingenieros de fundición.

Desde el inicio de la fase de diseño, los usuarios pueden visualizar y rectificar defectos de fundición habituales como burbujas, rechupes, porosidad por contracción, cierre en frío o degradación del molde, evitando así la necesidad de corregir costosas en fases posteriores.

Las plantillas guiadas de procesos permiten simular procesos de fundición en cinco sencillos pasos como fundición por gravedad a coquilla o en arena, fundición a la cera perdida, fundición a alta y baja presión y colado basculante. La innovadora experiencia



de Inspire Cast permite a los usuarios aumentar la calidad de sus productos y diseñar mejores productos con pocas horas de formación.

Otra ventaja es que, si se quiere experimentar con nuevos materiales para conseguir diseños innovadores, este software evalúa desde el inicio del proceso para simular posibles problemas de manera anticipada y con su ayuda, el proceso puede avanzar paralelamente a las ideas de los usuarios.

En el presente trabajo de fin de grado titulado *Estudio y simulación de procesos de fundición en molde de arena*, se pretende realizar un estudio mediante simulación de un proceso de fundición en molde de arena. Se realizará una metodología para el correcto funcionamiento del software, lo que permitirá evaluar la influencia del diseño de diferentes elementos geométricos, especialmente la mazarota, comparando los resultados simulados por el software con los obtenidos mediante modelos teóricos como el módulo de enfriamiento. También se busca tener un conocimiento sobre los mecanismos de formación de defectos como el rechupe y cómo optimizarlo.

2. ANTECEDENTES:

En el ámbito de la Ingeniería de Procesos de Fabricación, la fundición en arena continúa siendo una de las técnicas más utilizadas para la obtención de piezas metálicas complejas, gracias a su versatilidad y bajo coste. Sin embargo, su eficacia depende en gran medida de un diseño adecuado de los componentes del sistema de colada, mazarotas, elementos enfriadores y el control de parámetros como la velocidad, tiempo o temperatura de llenado. En este contexto, el uso de herramientas de simulación numérica, como Altair Inspire Cast, ha cobrado especial relevancia en los últimos años, tanto en entornos industriales como en el ámbito docente [4].

2.1. Procesos de Fabricación:

Los procesos de fabricación son el conjunto de operaciones mediante las cuales se obtienen productos conforme a especificaciones de diseño (planos e instrucciones), a partir de materias primas o preformas. Estos procesos se llevan a cabo dentro de un sistema de producción, utilizando recursos como materiales, equipos auxiliares, energía, información y personal. La fabricación se realiza mediante máquinas o instalaciones, aplicando un método óptimo, siguiendo normas establecidas y, al mismo tiempo, enfrentando ciertos parámetros no controlables [5,6]. La siguiente Figura 1 muestra el diagrama de flujo que seguiría un proceso de fabricación de un determinado producto, desde su concepción hasta su puesta en servicio [5].

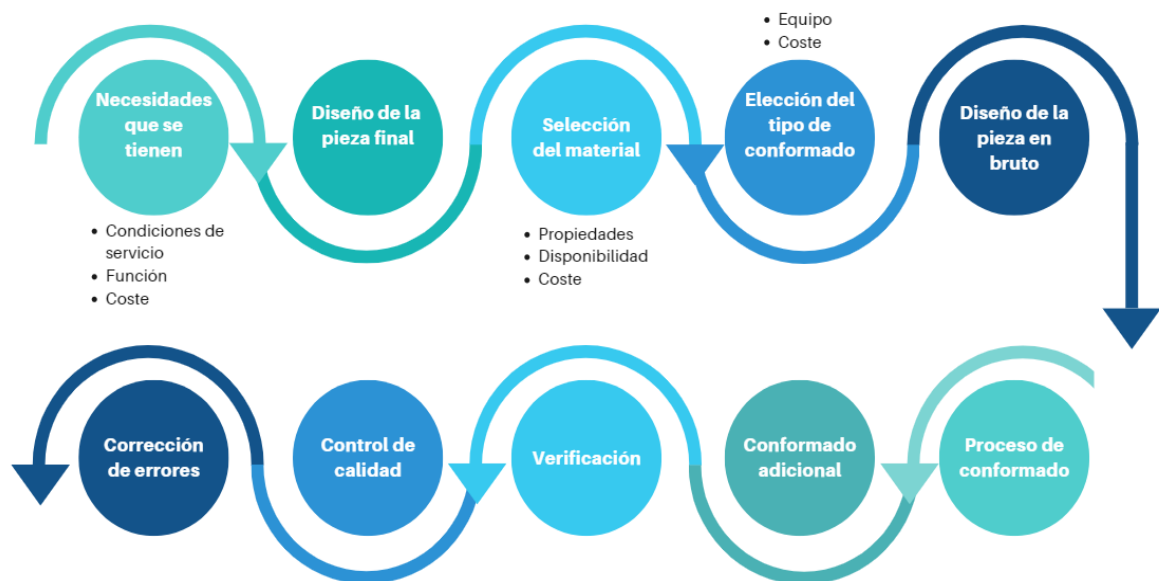


Figura 1: Diagrama de flujo de un proceso de fabricación

Los procesos de fabricación se pueden clasificar en dos categorías principales:

1. Operaciones de proceso: El material de trabajo se transforma a través de diferentes etapas hasta llegar al estado final deseado para el producto [6].
2. Operaciones de unión: Permiten ensamblar dos o más componentes para formar un producto único o nueva entidad [5].

Atendiendo a esta división, la siguiente Figura 2 muestra la clasificación de los diferentes procesos que pueden ser aplicados a un determinado material [5].

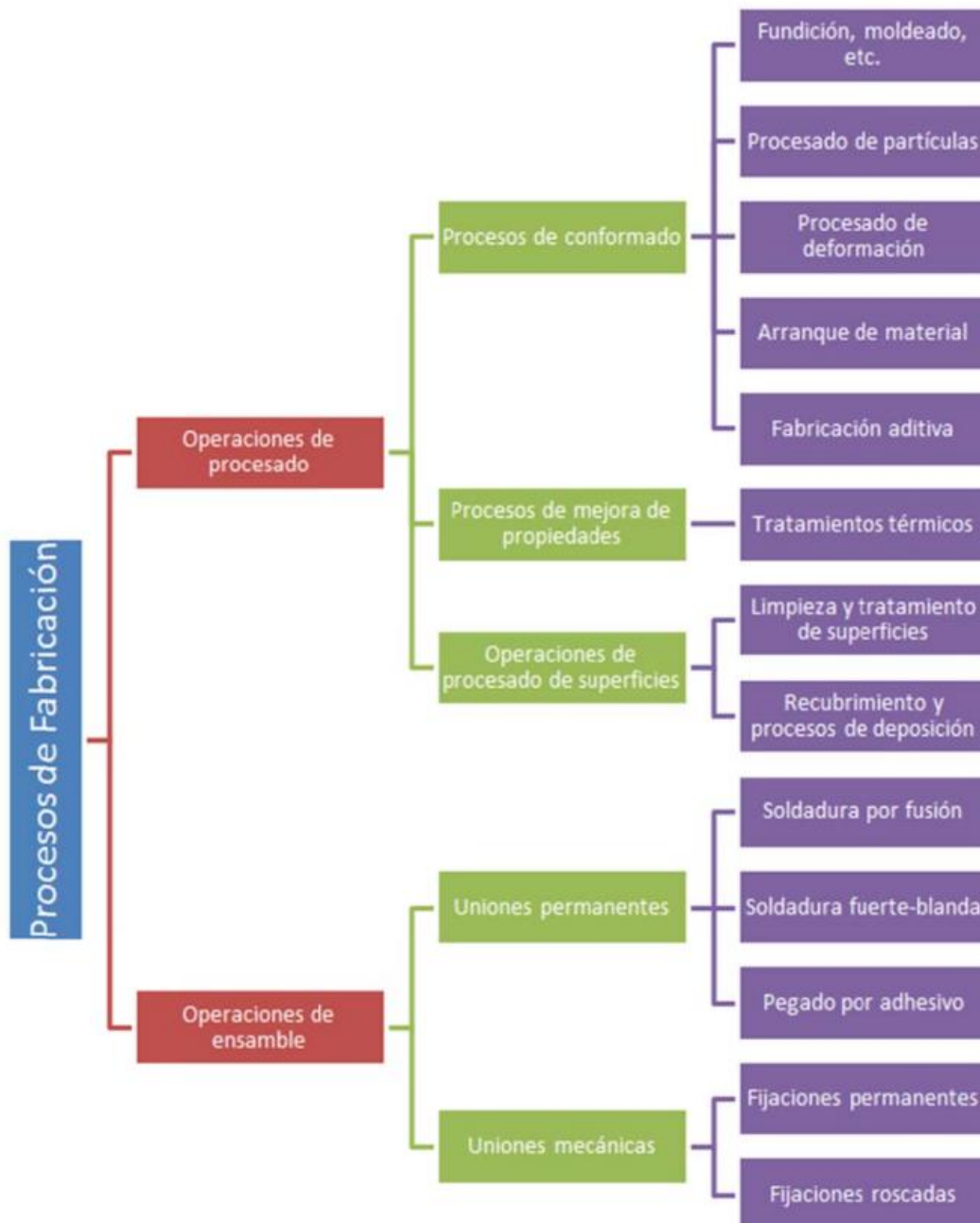


Figura 2: Clasificación de los Procesos de Fabricación [5]

2.1.1. Operaciones de procesado:

Se utiliza energía mecánica, térmica, eléctrica o química para modificar la forma, propiedades o aspecto del material de trabajo, con el fin de agregar valor al mismo. Dicha energía se aplica de forma controlada mediante las máquinas-herramienta [5].

También se requiere la intervención humana para el control de dichas máquinas-herramienta y para las operaciones de manipulación del material entre las etapas de procesado. Normalmente se requiere más de una operación de proceso para llegar al estado final, realizándose cada operación en una secuencia tal que permita obtener la forma y propiedades finales definidas en las especificaciones de diseño [5,6].

Se pueden distinguir tres categorías de operaciones de proceso:

- **Operaciones de conformado:** Se aplica calor, fuerza mecánica o ambas para modificar la geometría del material inicial.
 - Fundición, moldeo y otros procesos en los que el material inicial se calienta lo suficiente para llevarlo a un estado líquido o semifluido como se puede ver en la Figura 3. Este material se vierte en una cavidad donde se solidifica, adoptando la forma de esta. Materiales normalmente utilizados son, metales, vidrios, cerámicos y plásticos [5].



Figura 3: Fundición [7]

En los procesos de deformación plástica, la ductilidad del material es muy importante para evitar la rotura de este. Pueden realizarse en frío o en caliente, según sean las propiedades del metal de que se trate, y según la forma más o menos compleja del producto que se pretende obtener. Las principales operaciones de conformado por deformación plástica son: forja, laminación, trefilado y extrusión [5].

- **Operaciones de mejora de propiedades:** Se añade valor al material ya que con tratamientos térmicos tales como el temple o el recocido se mejoran sus propiedades físicas o mecánicas sin alterar su forma [5].
- **Operaciones de procesamiento de superficies:** Se aplican sobre todo a materiales metálicos. Se limpia, trata, reviste o depositan materiales en la superficie en cuestión, para protegerla contra la corrosión, aumentar la resistencia al desgaste, la propia apariencia [5].

2.1.2. Operaciones de ensamblaje:

En los procesos de unión se forma una nueva pieza, al unir dos o más partes de manera permanente o semipermanente.

- **Uniones permanentes:** Tales como la soldadura, que es la unión localizada de dos o más piezas en las que se funden las superficies que están en contacto o el pegado con uniones adhesivas, donde se usa un material de relleno que permite mantener juntas dos o más partes.
- **Uniones semipermanentes:** Tales como las fijaciones mecánicas (tuercas, tornillos, remaches), las cuales se podrían desmontar fácilmente.

2.2. Procesos de fundición:

Este método es uno de los más antiguos y versátiles [5]. Está basado en la fusión de metales y la posterior colada en un hueco o molde que reproduce la forma de la pieza que se desea obtener, siguiendo con la solidificación de esta cuando el metal se enfría. Existen diferentes tipos de procesos de fundición, estos se pueden clasificar según el material del molde, la forma en la que se introduce el material en la cavidad, etc. [5].

2.2.1. Clasificación de los procesos de fundición:

Los procesos de fundición se pueden clasificar según diferentes criterios, el tipo de modelo (desechable o recuperable), el tipo de molde (desechable o permanente) o el método de llenado o la forma en la que se introduce el material en la cavidad del molde (por gravedad, a presión o centrífuga) [5].

Dentro de esta clasificación de los tipos de procesos de fundición, dependiendo del proceso, el diseño y los parámetros variarán [8]. A continuación, se explican los más comunes y se mencionan las características más importantes de cada uno de ellos. En la Figura 4, se muestran de manera esquemática los procesos más importantes.

- A) Fundición a baja presión
- B) Fundición a alta presión
- C) Fundición o colada centrífuga
- D) Fundición por gravedad en molde de arena
- E) Fundición por gravedad en molde permanente
- F) Fundición a la cera perdida

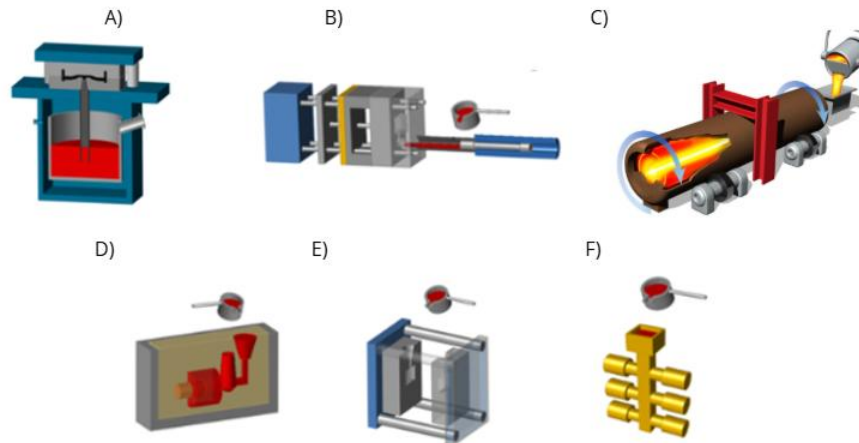


Figura 4: Procesos de fundición. A) Fundición a baja presión. B) Fundición a alta presión. C) Colada centrífuga. D) Fundición por gravedad en molde de arena. E) Fundición por gravedad en molde permanente. F) Fundición a la cera perdida. [3,9]

2.2.1.1. Fundición a alta presión (HPDC, High Pressure Die Casting):

Se utiliza una máquina para inyectar metal en moldes metálicos permanentes bajo alta presión. Es una buena técnica para fabricar piezas complejas con un alto grado de precisión, especialmente piezas ligeras con paredes delgadas que requieren dimensiones consistentes. La alta presión es necesaria para llenar completamente el molde y evitar la solidificación durante el proceso de fundición [3] (Figura 5).

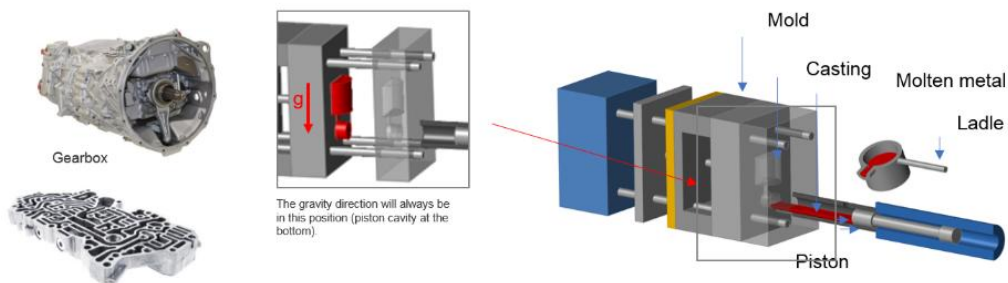


Figura 5: Fundición a alta presión [3]

2.2.1.2. Fundición a baja presión (Low Pressure Die Casting, LPDC):

La fundición a baja presión es un proceso de fundición que generalmente se utiliza en situaciones que requieren una fabricación de alta calidad. El aluminio fundido se

introduce lentamente en un molde metálico o matriz a través de un tubo ascendente, a una presión constante y controlada [3] En la Figura 6 se muestran algunos ejemplos.

Este proceso ayuda a evitar la oxidación, las corrientes frías y las inclusiones de aire, produciendo generalmente un excelente acabado superficial y dimensiones altamente precisas. Sin embargo, es mucho más lento y, por lo tanto, más costoso que la fundición a presión de alta presión.

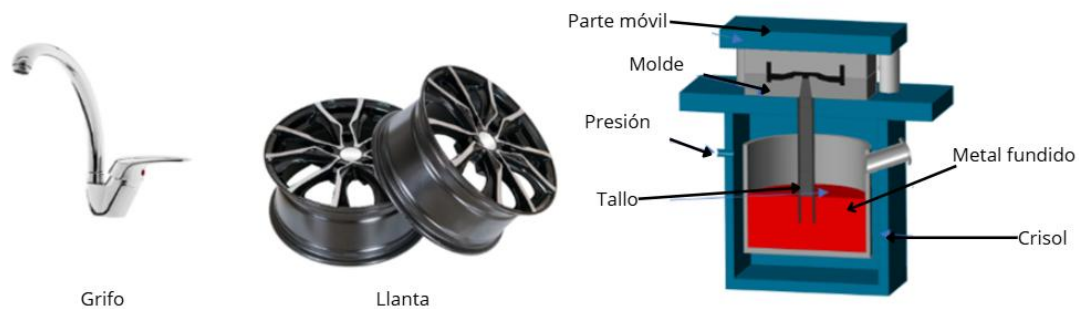


Figura 6: Fundición a baja presión [3]

2.2.1.3. Fundición a la cera perdida (Investment casting):

Como se puede observar en la Figura 7, es un proceso de fundición en el que el molde se crea a partir de un patrón de cera [3].

Se fabrica un modelo exacto de la pieza deseada, generalmente en cera, aunque también puede hacerse con otros materiales y técnicas modernas como impresión 3D. Dicho modelo de cera se recubre con varias capas de material cerámico o refractario, formando un molde resistente al calor. Después se calienta el molde para derretir y extraer la cera, dejando una cavidad exacta de la pieza dentro del molde [3,10].

Por último, se vierte el metal fundido en la cavidad del molde y se rompe el molde cerámico para obtener la pieza final [3,10].

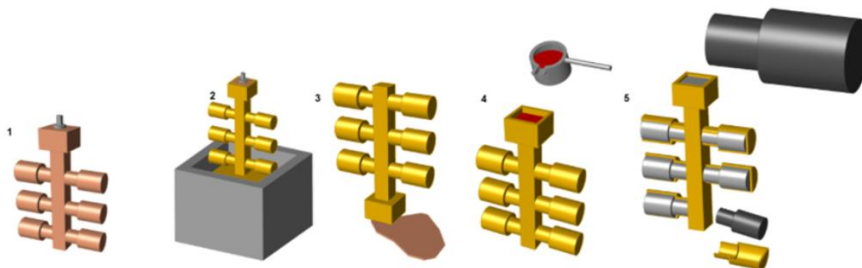


Figura 7: Fundición a la cera perdida [3]

2.2.1.4. *Fundición por gravedad con molde basculante/ inclinado (Gravity Tilt Pouring):*

El vertido por gravedad con molde basculante o inclinado es un proceso de molde permanente en el que el molde se posiciona horizontalmente y se va inclinando gradualmente en posición vertical durante el proceso de llenado como se puede observar en la Figura 8 [3].

De esta manera, se llena de forma controlada, con baja turbulencia y una velocidad de flujo moderada. Esta técnica compensa el efecto de la caída libre al inicio del proceso de vertido y ayuda a evitar inclusiones de aire. [3,11].

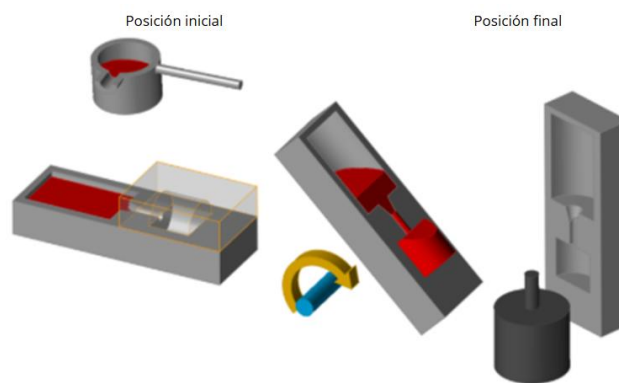


Figura 8: Fundición por gravedad con molde basculante [3]

2.2.1.5. *Fundición / colada centrífuga:*

La colada centrífuga tiene por objeto aumentar la presión sobre el metal líquido contenido en un molde que gira a tal velocidad que supera la gravedad, de modo que el metal se proyecta violentamente contra las paredes del molde [8].

Si la pieza tiene forma de un sólido de revolución hueco, la cavidad se obtiene sin necesidad de machos y el espesor dependerá únicamente de la cantidad de metal introducido en el molde [9]. Hay 3 tipos de colada centrífuga que se muestran en la Figura 9, centrífuga propiamente dicha, semicentrífuga y en moldes o racimo [8].

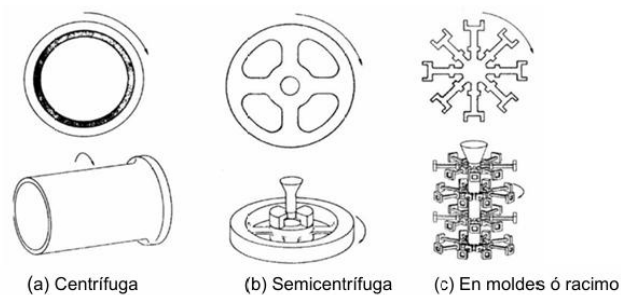


Figura 9: Colada centrífuga. A) Centrífuga. B) Semicentrífuga. C) En moldes o racimo [8]

2.2.1.6. Fundición por gravedad (Gravity casting):

Este proceso de fundición es el más común, representa más del 60% del mercado de fundición de metales [12]. Existen dos tipos, fundición por gravedad en moldes de arena y fundición por gravedad en moldes permanentes [3,8].

- **Función por gravedad en moldes de arena:**

Es uno de los procesos más comunes y en el que se centrará este Trabajo de Fin de Grado para realizar el estudio de simulación con el software Inspire Cast. Este método permite la fabricación de una amplia gama de componentes, desde piezas relativamente sencillas como engranajes y poleas, hasta elementos mucho más complejos como bloques de motor entre otros [13].

El proceso utiliza un molde de arena desechable para formar piezas metálicas llamadas fundiciones, que pueden fabricarse con casi cualquier aleación.

El metal se funde en un horno y luego se vierte en la cavidad del molde de arena. Una vez que la fundición se ha solidificado, se retira del molde de arena como se puede apreciar en la Figura 10 [3].

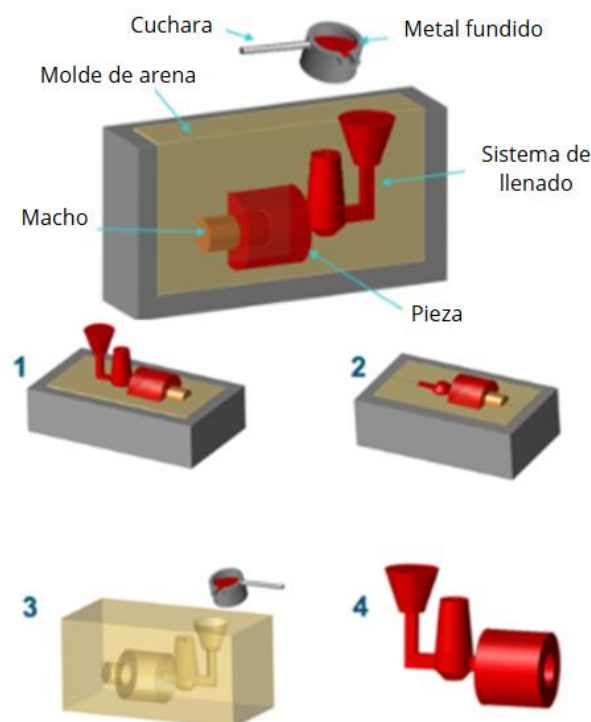


Figura 10: Pasos de fundición por gravedad en molde de arena [3]

La fundición en molde de arena es un proceso ampliamente utilizado que presenta pocas limitaciones en cuanto al tamaño, la forma y el peso de las piezas

que pueden fabricarse. Además, se caracteriza por sus bajos costos tanto en la fabricación de moldes como en los materiales empleados, lo que la convierte en una opción muy rentable para producciones de bajo y medio volumen. No obstante, este proceso, suele ofrecer una menor precisión dimensional y tiene una baja tasa de producción debido a la destrucción de los moldes [3].

- **Fundición por gravedad en moldes permanentes:**

Se trata de un tipo de fundición en molde permanente que se caracteriza por emplear la fuerza de la gravedad para llenar la cavidad del molde con metal fundido, en lugar de utilizar presión o inyección forzada. Este proceso es comúnmente conocido como fundición por gravedad en molde permanente, y se distingue por su capacidad para producir piezas metálicas pequeñas o de geometría relativamente simple, tales como engranajes, pistones, poleas y ruedas, entre otros componentes [3].

Dado que el metal fundido se vierte en el molde en lugar de inyectarse (Figura 11), es similar a la fundición en arena por gravedad, pero con un molde permanente, la reutilización de moldes reduce el tiempo de preparación entre coladas, lo que incrementa la eficiencia del proceso y lo convierte en una opción rentable para volúmenes de producción altos [3].

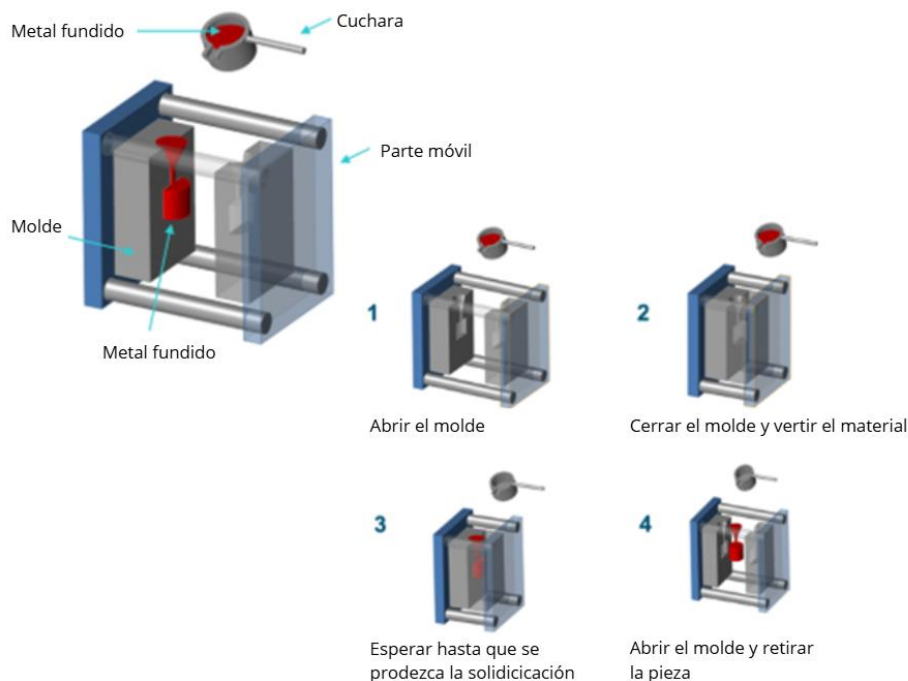


Figura 11: Fundición por gravedad en moldes permanentes [3].

La fundición por gravedad en molde permanente generalmente utiliza metales no ferrosos como aleaciones de aluminio, magnesio y cobre, aunque también se pueden fundir piezas de hierro y acero utilizando moldes de grafito [3].

2.3. Fundición por gravedad en molde de arena:

Como se ha mencionado anteriormente, se trata de un tipo de fundición en molde de arena que se caracteriza por emplear la fuerza de la gravedad para llenar la cavidad del molde con metal fundido, en lugar de utilizar presión o inyección forzada. Se distingue por su capacidad para producir piezas metálicas pequeñas o grandes, tales como engranajes, pistones, motores, entre otros componentes [2] (Figura 12).

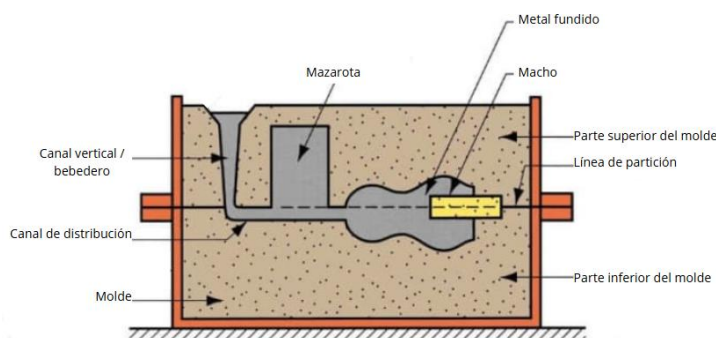


Figura 12: Componentes del proceso de fundición en molde de arena [14].

2.3.1. Tipos de materiales empleados en fundición:

Los moldes permanentes normalmente están hechos de acero. Por ello, la fundición en moldes de arena es una buena alternativa para los materiales ferrosos. Sin embargo, para los materiales no ferrosos, se puede elegir entre varios procesos diferentes como se muestra en la Figura 13 [3].

Metal	Proceso				
	Molde de arena	Molde permanente	Baja presión	Cera perdida	Alta presión
Hierro					
Acero					
Aluminio					
Cobre					
Magnesio					
Zinc					
Titanio					

Figura 13: Procesos de fundición según el material [3]

En definitiva, el tipo de proceso de fundición más adecuado dependerá de factores como las tolerancias dimensionales requeridas, la calidad superficial deseada, la complejidad geométrica de la pieza, las propiedades mecánicas necesarias y el tipo de material a utilizar.

Cada metal y aleación utilizados poseen propiedades químicas y mecánicas únicas, en el artículo Arun A, BalaKrishnan R (2021) *Classification of Metals used in the Sand Casting Process*, se presenta una clasificación basada en los materiales utilizados y la razón de su elección de la fundición en moldes de arena [15]. Dicho artículo, concluye que:

- El hierro fundido se selecciona por su mayor dureza y tenacidad.
- El acero destaca por su buena resistencia a la tracción.
- El cobre se emplea por su excelente conductividad térmica.
- El aluminio se utiliza debido a su alta ductilidad.

En este estudio se empleará el aluminio, más concretamente la aleación A356. Esta aleación con 7% de silicio y trazas de magnesio, destaca por su excelente fluidez para el llenado de moldes complejos, soldabilidad y resistencia mecánica y a la corrosión, y sus excelentes propiedades tras el tratamiento térmico (T6). Se utiliza comúnmente en piezas automotrices, estructuras ligeras y componentes mecánicos. La Figura 14 muestra un ejemplo y en Tabla 1 se pueden observar algunas de sus propiedades [16–18].



Figura 14: Pieza de la aleación de aluminio A356 [17]

Tabla 1: Propiedades de la aleación de aluminio A356 [18,19]

Densidad [kg/m³]	2685
Rango de solidificación [°C]	560 – 615
Rango de fundición [°C]	680 – 750
Conductividad térmica [cal/cm·s·°C]	0.4
Resistencia a la tracción [MPa]	164

2.3.2. Modelos para piezas fundidas:

Para obtener el molde de la pieza que se quiere fabricar, es necesario crear un modelo, que, por regla general, es una fiel reproducción de la pieza [5].

Tiene mucha importancia en el proceso de fabricación y deben cumplir una serie de requisitos:

1. **Facilidad de desmoldado:** Una vez hecho el molde, se procede a la extracción del modelo. Para que sea un proceso sencillo, los modelos se suelen tener unos ángulos de salida que faciliten el proceso o también pueden ser modelos desmontables como se puede ver en la Figura 15 [5].

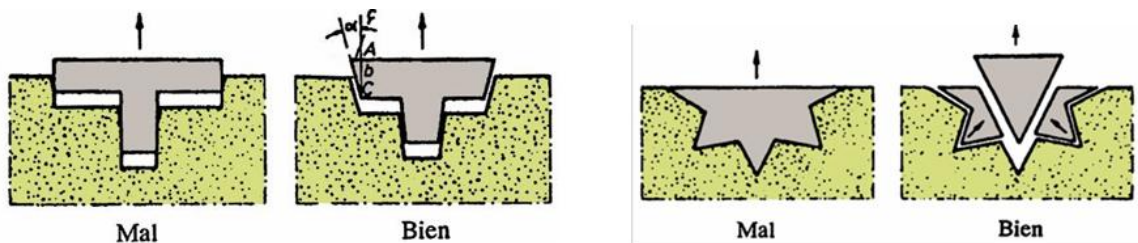


Figura 15: (a) Ángulos de salida. (b) Modelo desmontable [5].

2. **Contracción:** El modelo debe construirse teniendo en cuenta que cuando el metal líquido penetra en el molde, comienza a enfriarse y se solidifica, experimenta una contracción y las dimensiones de la pieza final tendrá unas dimensiones algo menores de acuerdo con el grado de contracción del metal empleado en el proceso [8].

En ocasiones, la pieza ha de ser mecanizada, por esto, el modelo deberá de tener un espesor suplementario o de mecanización (Figura 16) que suele estar comprendido entre 3 y 8 mm [5].

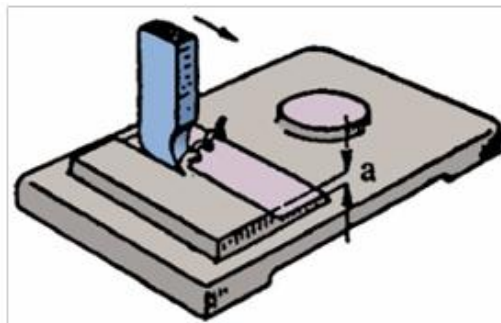


Figura 16: Mecanizado del espesor suplementario. [5]

Los materiales empleados para su construcción son muy variados. Pueden estar hechos de metal, madera, PLA, resina, entre otros. En la Figura 17 se muestran algunos ejemplos de modelos de diferentes materiales.

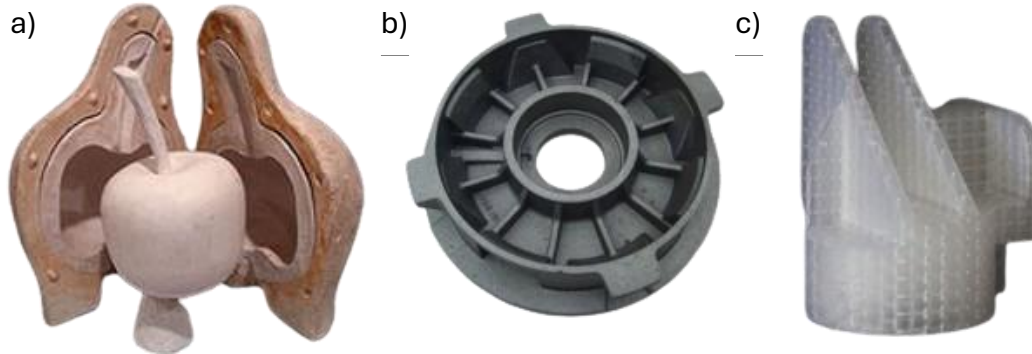


Figura 17: (a) Modelo de madera (b) Modelo de metal (c) Modelo de resina [20,21]

Otros elementos muy comunes en la fundición en arena, aunque también pueden aplicarse en otros procesos, son los machos o noyos. Se coloca dentro de la cavidad del molde de modo que, al verter el material, este impide que el metal ocupe esa cavidad. Una vez solidificado el material, el macho se retira, quedando así el hueco deseado (Figura 18) [3].

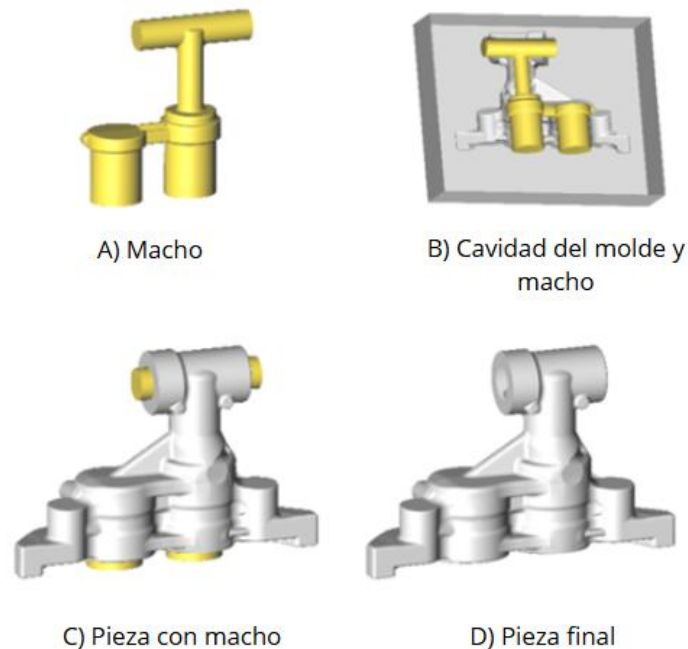


Figura 18: Ejemplo de uso de Noyo/macho en color amarillo [3]

2.3.3. Arenas y mezclas para el moldeo de piezas:

Uno de los procedimientos más conocidos en el colado de piezas es producir el negativo de estas en los llamados moldes perdidos de arena. Se les conoce con este nombre ya que solo se utilizan una vez. En la Figura 19 se muestra un ejemplo de arena utilizada.



Figura 19: Arena para moldes de fundición [22]

Estos moldes de arena poseen cualidades como la plasticidad, resistencia a altas temperaturas (refractariedad), permiten la evacuación rápida de los gases dentro del molde durante el proceso de llenado (permeables) y facilitan la extracción de la pieza tras la fundición [5].

Las arenas de fundición se encuentran en la naturaleza, y poseen estas cualidades. Están constituidas por granos de cuarzo (bióxido de silicio, SiO_2) que aseguran la permeabilidad, y por arcilla (silicato hidratado de aluminio), este último es el elemento de unión y el que confiere plasticidad al molde [5,23].

Podemos clasificar las arenas de fundición dependiendo del contenido de arcilla que poseen:

- G) Arenas arcillosas o tierras grasas, superior al 18%.
- H) Arenas arcillosas o tierras semigrasas, del 8 al 18%.
- I) Arena arcillosa o tierras magras, del 5 al 8%.
- J) Arena síliceas, inferior al 5%.

Hay otro tipo de arena llamado arena verde, la cual no recibe el nombre por el color, sino por su uso en húmedo. Los moldes típicos de arena verde contienen una arena base, generalmente una arena de alta sílice (SiO_2), con un material aglutinante de arcilla (bentonita) y agua (Figura 20) [24].



Figura 20: Molde con arena verde [24]

Las exigencias en cuanto a calidad son cada vez mayores, por lo que las arenas naturales (irregulares en su composición y propiedades), están siendo sustituidas por las arenas sintéticas o aglomeradas, obtenidas mezclando sílice prácticamente pura con una serie de aglomerantes [20,24].

2.3.4. Ventajas e inconvenientes de los Procesos de Fundición:

La fundición por gravedad en moldes de arena es uno de los métodos más tradicionales y ampliamente utilizados en la industria metalúrgica [25]. Su popularidad se debe a la simplicidad del proceso, la capacidad de producir piezas de geometrías complejas y su bajo coste inicial. Sin embargo, como todo proceso de fabricación, presenta tanto ventajas como limitaciones que deben ser consideradas al momento de seleccionar el método más adecuado para una aplicación específica.

2.3.4.1. Ventajas:

- Permite la fabricación en serie de piezas con geometrías complejas, piezas grandes o pequeñas, incluso con huecos en su interior (Figura 21) [3].



Figura 21: Piezas finales con huecos internos [26]

- No requiere de muchas operaciones de fabricación adicionales. Al terminar el proceso de fundición, se consigue la forma y dimensiones requeridas o se le acerca bastante [5].
- Se emplean metales que no son aptos para otros tipos de procesos de fabricación como la soldadura o el conformado por deformación [27].
- Es más económico que el resto de los procesos en la mayoría de los casos, mientras que la fundición a la cera perdida y la fundición a presión tienen los costos de herramental más altos. Un proceso de fundición puede parecer inicialmente demasiado costoso para la pieza que se está diseñando, pero un proceso más caro podría reducir costes de fabricación a largo plazo [3].
En definitiva, cuanto mayor sea el volumen de producción, más rentable resultaría emplear un proceso de fundición más costoso, pero más rápido como se puede observar en la Figura 22 [3].

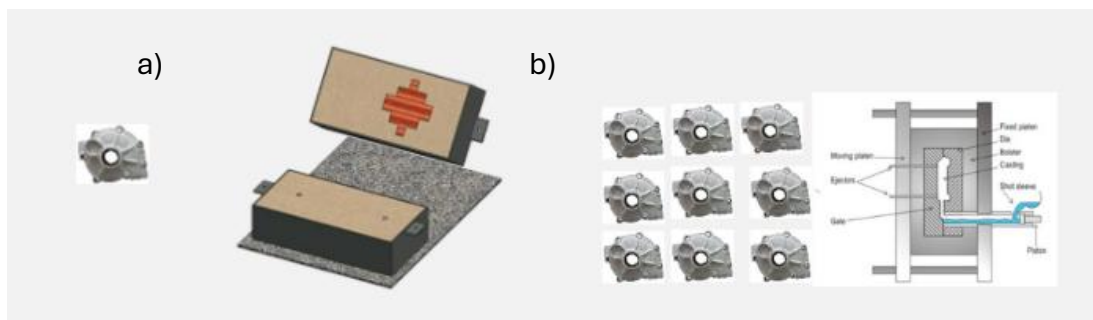


Figura 22: (a) Baja producción usando moldes de arena. (b) Gran producción usando fundición a presión [3]

2.3.4.2. Inconvenientes:

Aunque depende del tipo de fundición empleado y de diferentes parámetros, el proceso de fundición presenta limitaciones en las propiedades mecánicas de las piezas, como la porosidad o el acabado superficial [28]. En la Figura 23 se muestra una pieza en la que se ha producido uno de los defectos de porosidad más comunes, el rechupe [29].



Figura 23: Ejemplo de rechupe en pieza fundida [29].

En la siguiente Figura 24, en términos de calidad superficial, se observa que la fundición a presión ofrece los mejores resultados, seguida por la fundición a la cera perdida y, finalmente, la fundición en moldes de arena [3].

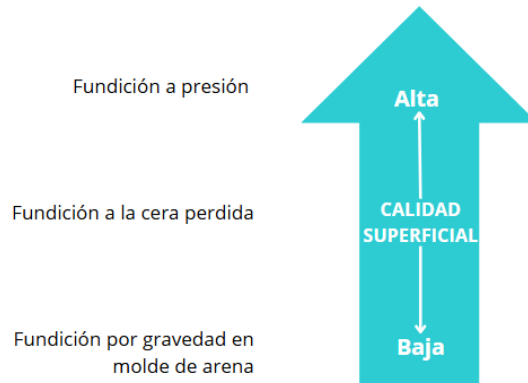


Figura 24: Calidad superficial según el tipo de proceso de fundición [3]

Existen riesgos para el trabajador al manejar el material fundido y los gases emitidos a la atmósfera y la toxicidad de ciertos materiales pueden causar problemas ambientales que podrían contaminar el suelo o a los usuarios que realizan el proceso [30].

Los diseños con geometrías complejas, tolerancias dimensionales estrictas y secciones delgadas tienden a requerir procesos de fundición más costosos. Los diseños con tolerancias ajustadas y poco ángulo de desmoldeo pueden necesitar procesos de moldeo especiales (Figura 25) [3].

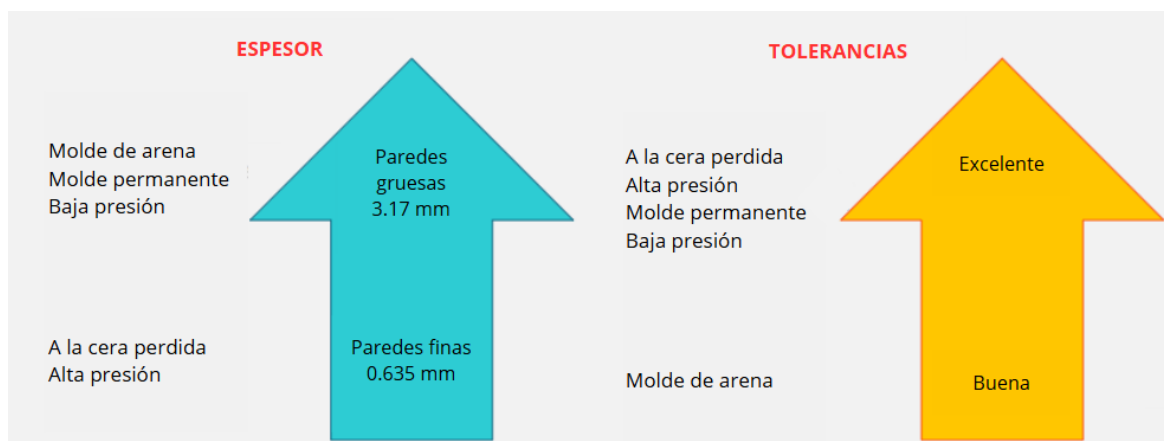


Figura 25: Espesor y tolerancias según el proceso de fundición [3]

El elemento clave para conseguir una buena calidad a bajos costes es la buena elección de los parámetros de diseño [31]. Dependiendo del tipo de proceso de fabricación, dichos parámetros pueden variar considerablemente [3].

El problema más común que afecta la funcionalidad de un componente es la porosidad. Aunque no es posible lograr una porosidad cero en el proceso de fundición, con un diseño de molde bien planificado y un buen control del proceso, se puede minimizar [32].

Cada proceso de fundición tiene su propio método para eliminar o reducir la porosidad (Figura 26). Los métodos más populares para detectar y controlar porosidad son la radiografía, el corte de la pieza y la tomografía computarizada [3].



Figura 26: Porosidad [3]

En general, los defectos de porosidad son causados por:

- **Contracción (macro o microporosidad):** Se produce debido a la contracción volumétrica durante el proceso de solidificación [3,33].
- **Atrapamiento de aire:** La porosidad por aire puede formarse debido a la presencia de elementos gaseosos en el metal fundido, a una reacción con el material del molde, a la turbulencia durante el llenado, entre otros factores [5]. En moldes de acero, el gas puede escapar a través de las líneas de partición o respiraderos, mientras que, en moldes de arena, este problema es menor debido a la permeabilidad natural de la arena (Figura 27) [3].



Figura 27: a) Línea de partición en molde metálico. b) Molde de arena [3]

Ambos tipos de porosidad afectan la calidad estructural de la pieza fundida y pueden comprometer su resistencia y funcionalidad [33]. La porosidad puede afectar en:

- **Zonas sometidas a esfuerzo mecánico:** La porosidad puede afectar directamente la integridad estructural de una pieza. Por ejemplo, un exceso de porosidad en una bisagra de puerta puede comprometer la funcionalidad de la pieza, creando un punto débil y provocando una posible falla [30].
- **Fugas en sistemas hidráulicos:** si se requiere estanqueidad a la presión, la porosidad puede provocar fugas.
- **Estética:** En algunos casos, la porosidad puede tener un impacto indirecto en los requerimientos de acabado del producto final (Figura 28) [3].



Figura 28: Ejemplos de defectos de porosidad o rechupes [3]

Normas y especificaciones sobre porosidad:

Existen diversas normas y especificaciones en la industria relacionadas con la porosidad y este tipo de defectos [3].

Para las aleaciones de aluminio en la industria automotriz, se puede hacer referencia a la norma **ASTM E505**, el estándar estadounidense de radiografías de referencia para la inspección de fundiciones a presión de aluminio y magnesio que se muestra en la Figura 30 (utilizado por Ford, Renault, etc.), o a la especificación **VDG P 201**, el estándar alemán para déficits de volumen en fundiciones de metales no ferrosos (utilizado por Volkswagen) [3,34,35].

Incluso si la porosidad cumple con estas especificaciones, puede no ser aceptable si se encuentra en una zona sometida a esfuerzo mecánico, propensa a fugas o con requerimientos estrictos de acabado superficial, como se muestra en la siguiente Figura 29 [3,35].

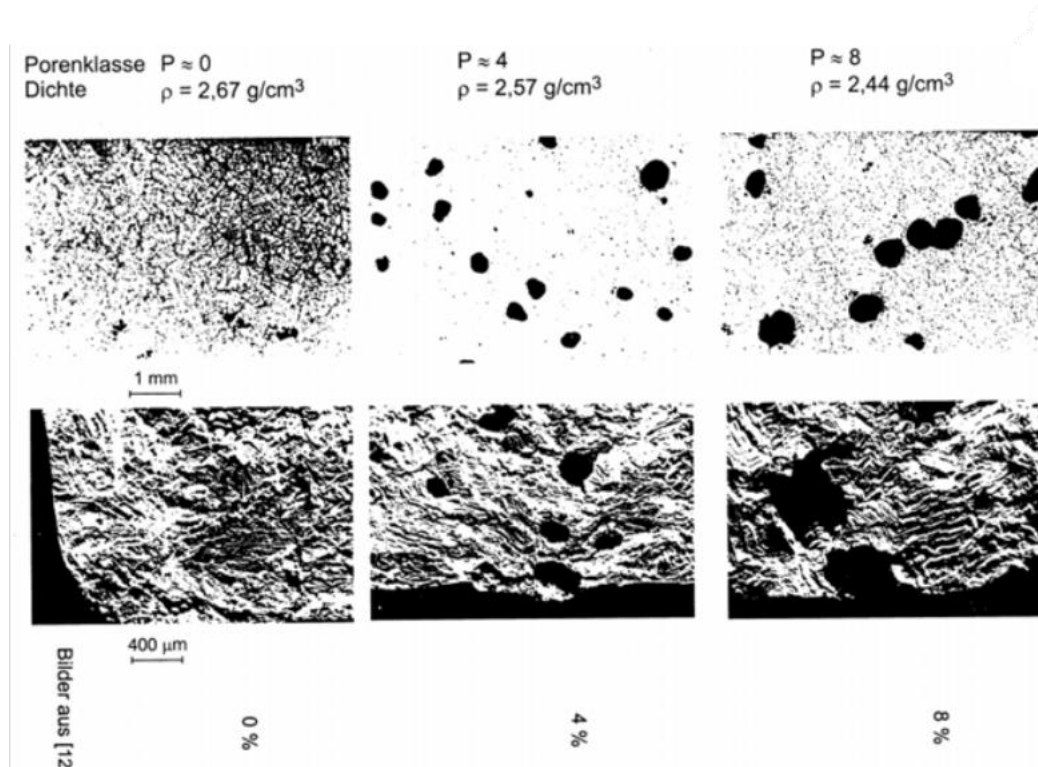


Figura 29: Estándar alemán para déficits de volumen [3]

E 505

TABLE 1 Reference Radiographs for Aluminum and Magnesium Die Castings

Discontinuity	Plate Thickness, in. (mm)	
	Applicable Casting Thickness, in. (mm)	
Aluminum Die Castings		
Category A (Porosity)	¼ (3.2)	up to ¾ (9.5), incl
Category A (Porosity)	¾ (15.9)	over ¾ to 1 (9.5 to 25.4), incl
Category B (Cold fill)	¼ (3.2)	up to ¾ (9.5), incl
Category C (Shrinkage)	¾ (15.9)	over ¾ to 1 (9.5 to 25.4), incl
Category D (Foreign material)	0.200 (5.08)	up to 1 (25.4), incl
Magnesium Die Castings		
Category A (Porosity)	¼ (3.2)	up to ¾ (9.5), incl
Category A (Porosity)	¾ (15.9)	over ¾ to 1 (9.5 to 25.4), incl
Category B (Cold fill)	¼ (3.2)	up to ¾ (9.5), incl
Category C (Shrinkage)	¾ (15.9)	over ¾ to 1 (9.5 to 25.4), incl
Category D (Foreign material)	¼(3.2)	up to 1 (25.4), incl

Figura 30: Estándar estadounidense de radiografías de referencia para la inspección de fundiciones a presión de aluminio y magnesio [3]

Los rechupes son los defectos de porosidad más importantes, estas cavidades internas o superficiales ocasionadas por la contracción del metal durante su solidificación son uno de los problemas más comunes en procesos de fundición y afectan tanto a la calidad como a las propiedades mecánicas de las piezas [33]. Se pueden evitar de varias maneras, pero la forma más extendida es ralentizar la solidificación de la parte superior de la pieza usando tapas termoaislantes, también conocidas como mazarotas [29].



Figura 31: Ejemplo de rechupe [33]

Los rechupes se producen en el cambio de fase de líquido a sólido, debido a la gran contracción que sufre el metal. De esta forma las zonas geoméricamente masivas al enfriar más despacio que el resto de la geometría de la pieza aportan material a las zonas que se enfrían más rápido, generando cavidades en el interior [33].

Existen diversos softwares de simulación utilizados en procesos de fundición, como *MAGMASoft*, *ProCAST*, *NovaFlow&Solid*, y *AnyCasting*, cada uno con distintas capacidades para simular el llenado, solidificación y predicción de defectos como porosidad o inclusiones [36,37].

En particular, Inspire Cast permite obtener información detallada sobre la porosidad en una el proceso de fundición, incluyendo su tamaño y ubicación. A partir de estos resultados, se pueden realizar modificaciones en el sistema de llenado, la geometría de la pieza, incorporar mazarotas, enfriadores o ajustar parámetros del proceso como la velocidad de llenado y la posición del bebedero. Todo ello con el fin de reubicar, reducir o eliminar la porosidad, optimizando así el diseño del componente o aplicando mejoras en el proceso de fundición [3,36].

Criterio de Niyama:

Este criterio se utiliza para detectar defectos de porosidad por contracción durante la solidificación. Se define como el gradiente térmico local dividido entre la raíz cuadrada de la velocidad de enfriamiento local [3].

$$\frac{G}{\sqrt{T}}$$

A) $G \rightarrow$ Gradiente de temperatura [$^{\circ}\text{C}/\text{mm}$].

B) $\sqrt{T} \rightarrow$ Velocidad de enfriamiento. Tasa a la que la temperatura disminuye con el tiempo [$^{\circ}\text{C}/\text{s}$].

Niyama muestra aquellas áreas donde el líquido se solidifica rápidamente (alta velocidad de enfriamiento) y/o cuando el gradiente térmico es bajo (alta conductividad térmica del metal y líneas centrales en zonas con simetría) [3,38].

En estos casos, hacia el final de la solidificación, se forma una zona pastosa compuesta por dendritas encerradas en el líquido restante, lo que impide que el material líquido alimente los vacíos generados, como se puede observar en la Figura 32 [3].

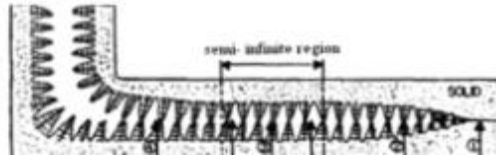


Figura 32: Zona con dendritas [3]

La microporosidad en la fundición está estrechamente relacionada con el criterio de Niyama [38,39].

- **Valores bajos de Niyama:** Cuando el valor de Niyama es inferior al valor crítico, la probabilidad de que se forme microporosidad aumenta. Esto ocurre porque un valor bajo indica que el gradiente de temperatura es pequeño y/o la velocidad de enfriamiento es alta, lo que dificulta la alimentación de metal líquido a las zonas de solidificación y favorece la aparición de microporos y rechupes [39].
- **Valores altos de Niyama:** Si el valor de Niyama es superior al umbral crítico, la probabilidad de microporosidad disminuye, ya que las condiciones térmicas favorecen una alimentación adecuada y una solidificación más controlada [38].

A continuación, se muestran los rangos de valores críticos en la Figura 33, dependen del tipo de material [3].

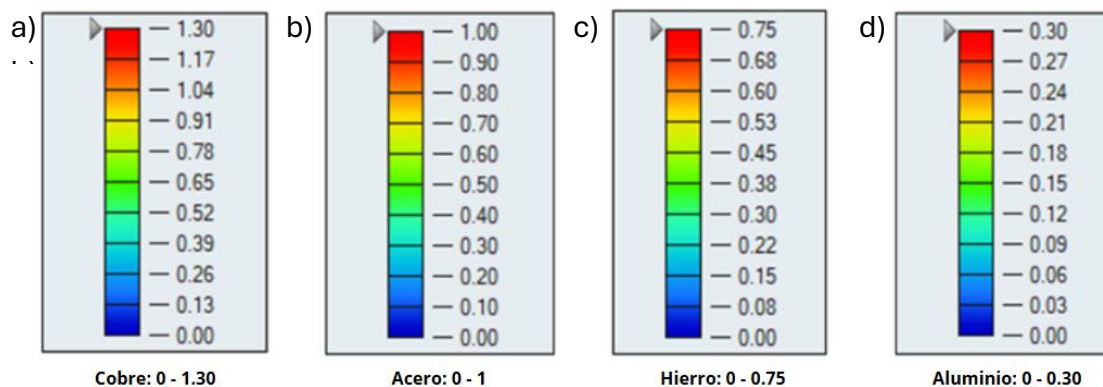


Figura 33: Valores críticos de Niyama según el material, a) Cobre, b) Acero, c) Hierro y d) Aluminio [3]

2.3.5. Factores que influyen en el proceso:

Como se ha comentado, existen variables en el proceso que deben ser controladas para asegurar la producción de piezas de fundición de calidad. Entre estos parámetros se encuentra la velocidad de llenado, posición y diseño del bebedero, el uso o no de elementos enfriadores, mazarotas, etc.

2.3.5.1. *Velocidad de llenado:*

La velocidad de llenado en el proceso de fundición en moldes de arena tiene una influencia decisiva en la calidad final de la pieza fundida. Su control es fundamental para evitar defectos y asegurar una correcta reproducción de la forma del molde [40,41].

- Una velocidad demasiado baja, puede provocar la solidificación prematura de ciertas zonas de la pieza, el metal puede enfriarse antes de llenar completamente el molde, provocando defectos como barreras frías, vertido insuficiente o inclusiones de arena [40].
- Una velocidad excesiva puede provocar turbulencia en el llenado de la pieza e inclusiones de aire no deseadas [40].

El uso de componentes como mazarotas, enfriadores, manguitos/camisas, canales de enfriamiento, etc. Pueden tener una gran influencia en el proceso de fundición en moldes de arena [29]. Sus principales características se detallan a continuación.

2.3.5.2. *Mazarota:*

Una mazarota es una prolongación de la pieza que tiene como misión servir de reserva de metal líquido, la cual, en el momento de la solidificación, pueda compensar las pérdidas de volumen que resultan de las diversas contracciones que experimenta la pieza [3,42]. Además, las mazarotas también pueden actuar como conductos para permitir la salida del aire atrapado en la fundición, si están abiertas a la atmósfera [43].

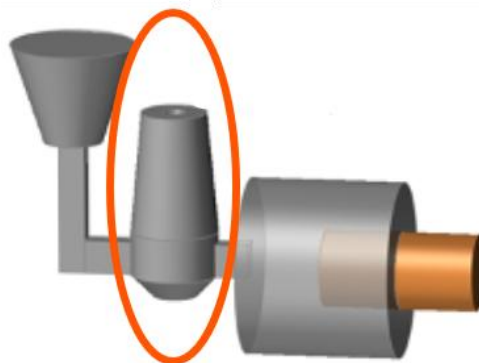


Figura 34: Mazarota señalada en naranja [3]

Gracias a ella, podremos evitar posibles defectos como los rechupes, que son defectos que en ningún caso pueden beneficiar a las piezas, alimentando así las partes que sean susceptibles de aparecer. La mazarota debe ser la última zona en solidificar, asegurando así que el metal llegue a las zonas de más difícil alimentación (Figura 34) [42,44].

En la Figura 35, podemos apreciar la formación de rechupe en la mazarota de la pieza, de esta manera, al ser la última parte de la pieza en solidificar, será donde se produzcan las contracciones del material y, en consecuencia, rechupes [45].

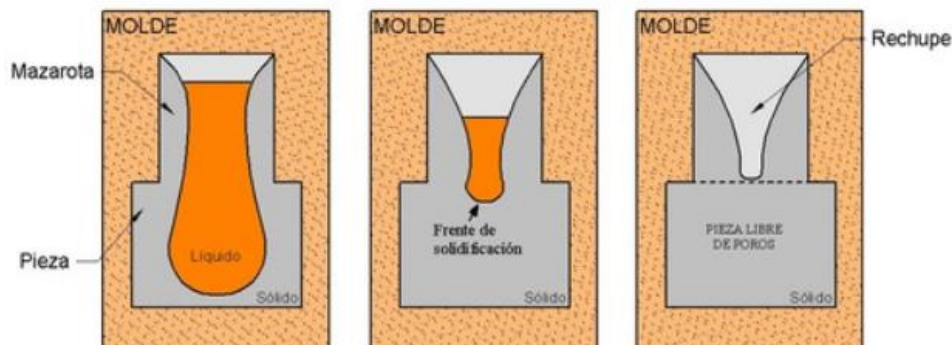


Figura 35: Evolución del metal fundido durante la solidificación en una pieza con mazarota [45]

Dimensionado de las mazarotas:

Existen diferentes criterios para valorar el tamaño y forma de la mazarota. A partir del análisis geométrico, se sabe que las esferas tienen la mayor relación volumen-área en comparación con cualquier otra forma de volumen similar, por lo que, la forma más eficiente y óptima sería la esférica [46]. Sin embargo, esta presentaría dificultades para fabricar los moldes convencionales, es por esto por lo que se ha adoptado, de modo general, la forma cilíndrica [43,46]. En la siguiente Figura 36 se pueden observar distintas geometrías de mazarotas [43].

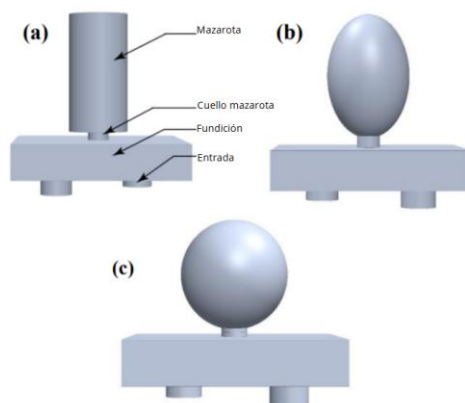


Figura 36: A) Mazarota cilíndrica. B) Mazarota elíptica. C) Mazarota esférica [43].

El criterio actual más aceptado parece adoptar como óptima una relación H/D comprendida entre 1 y 1,5 aproximadamente [42]. Donde H es la altura del cilindro y D es el diámetro de este [42,46]. El cálculo de la mazarota se basa en asegurar que tenga suficiente volumen para compensar la contracción del metal y que su solidificación ocurra después que la de la pieza. Para ello, se utiliza el concepto de módulo de enfriamiento, que es la relación entre el volumen y la superficie de la mazarota [12].

$$M_c = \frac{V}{S}$$

El módulo de la mazarota deberá ser igual o mayor que el de la pieza que alimenta, para asegurar que se solidifica más tarde [3,42,46].

Otro método utilizado para el cálculo del tamaño adecuado de la mazarota es la Ecuación de Chvorinov, que relaciona el tiempo de solidificación con el módulo [46].

$$t = C_m \left(\frac{V}{A} \right)^n$$

Donde:

- C) T es el tiempo de solidificación,
- D) V es el volumen de la pieza,
- E) A es el área superficial de la pieza en contacto con el molde,
- F) n es un exponente que usualmente es 2,
- G) C_m es una constante que depende de las propiedades térmicas del metal.

Actualmente, gracias a la impresión 3D en arena (3DSP) se permite la fabricación de moldes de arena complejos y es posible crear mazarotas esféricas y otras formas complejas que anteriormente no se podía conseguir con moldes convencionales [12].

2.3.5.3. *Manguitos:*

El uso de manguitos en fundición es fundamental para optimizar la solidificación del metal y evitar defectos como porosidad y rechupes. Se colocan en las mazarotas para mantener el metal fundido durante más tiempo, favoreciendo la alimentación de la pieza mientras solidifica y compensando la contracción del metal [47] (Figura 37).

La distinción entre exotérmico e isoterma es clave en su funcionamiento y efecto sobre el proceso de solidificación. Mientras que los exotérmicos generan calor durante la fundición, los isotermos, hechos de materiales como arena, fibra refractaria o ceniza de carbón en polvo, se centran únicamente en el aislamiento térmico. A diferencia de las

exotérmicas, las isotérmicas no producen calor, sino que están diseñadas para ralentizar el proceso de solidificación, mejorando así la eficiencia de la alimentación [3,47].



Figura 37: Manguitos [48]

2.3.5.4. Elementos enfriadores:

La acción de las mazarotas viene complementada en muchas ocasiones por la presencia de enfriadores o también conocidos como “chillers” (Figura 38) [46].

Los enfriadores (chillers) son insertos metálicos o de otro material con alta conductividad térmica que se colocan en el molde de arena. Su función es controlar la velocidad de enfriamiento en zonas críticas. Ayudan a acelerar la solidificación en zonas específicas de la pieza, a dirigir la solidificación y evitar defectos como la segregación de materiales o la formación de estructuras no deseadas [42,46].

Como norma general, el espesor del enfriador debe ser, por lo menos igual al doble del módulo de la parte de la pieza de interés [42]. Normalmente están hechos de materiales con alta capacidad térmica, como acero, hierro o cobre [3].



Figura 38: Elementos enfriadores en azul [3]

2.3.5.5. *Velocidad de enfriamiento:*

La velocidad de enfriamiento influirá en la aparición de defectos como porosidad o rechupes (Figura 39), entre otros [46].

Si la velocidad de enfriamiento es rápida, se favorece la creación de la cementita, lo cual aporta mayor dureza a la pieza, aunque fragilidad al mismo tiempo. Es por ello por lo que se busca que la velocidad de enfriamiento sea lo más lenta posible para favorecer la creación de grafito, quedando la pieza más uniforme, aunque con una menor resistencia (Figura 40) [46,49].

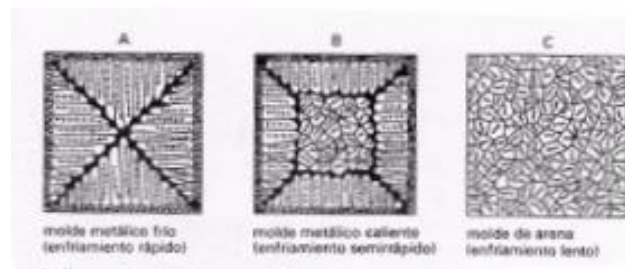


Figura 39: Influencia de diferentes velocidades de enfriamiento [46]

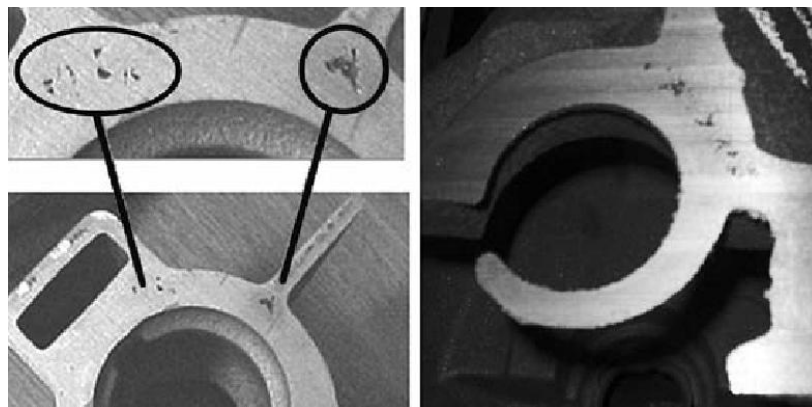


Figura 40: Ejemplo de rechupes [49]

2.2.6.6. *Sistema de colada:*

La función principal del sistema de colada es guiar el metal líquido desde el vertido hasta las cavidades del molde de manera controlada, eficiente y sin generar defectos en la pieza final [25]. Sus componentes principales son:

- **Bebedero:** Abertura por la que se verte el metal fundido.
- **Canal principal o árbol de colada:** Conduce el metal desde el bebedero hasta los canales secundarios o en caso de que no haya, hacia la entrada (Figura 41).

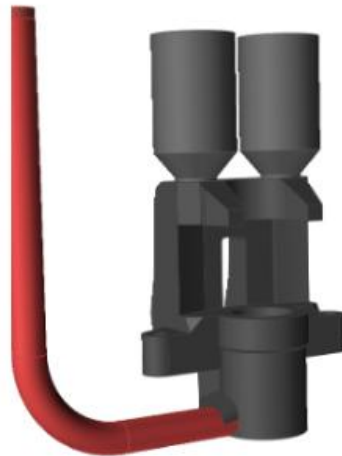


Figura 41: Canal principal en rojo [3]

Softwares de simulación como Inspire Cast son una excelente herramienta para analizar el tamaño y posición del canal de colada para poder evitar la turbulencia en el proceso de llenado, la cual puede generar burbujas de aire en el molde [3].

- Canales secundarios: Distribuyen el metal desde el canal principal hacia las diferentes entradas que pueda tener el molde.
- Entradas (ingates): Son las aberturas que conectan los canales de llenado con la cavidad de la pieza.

En la Figura 42, se pueden observar los elementos principales del sistema de colada.

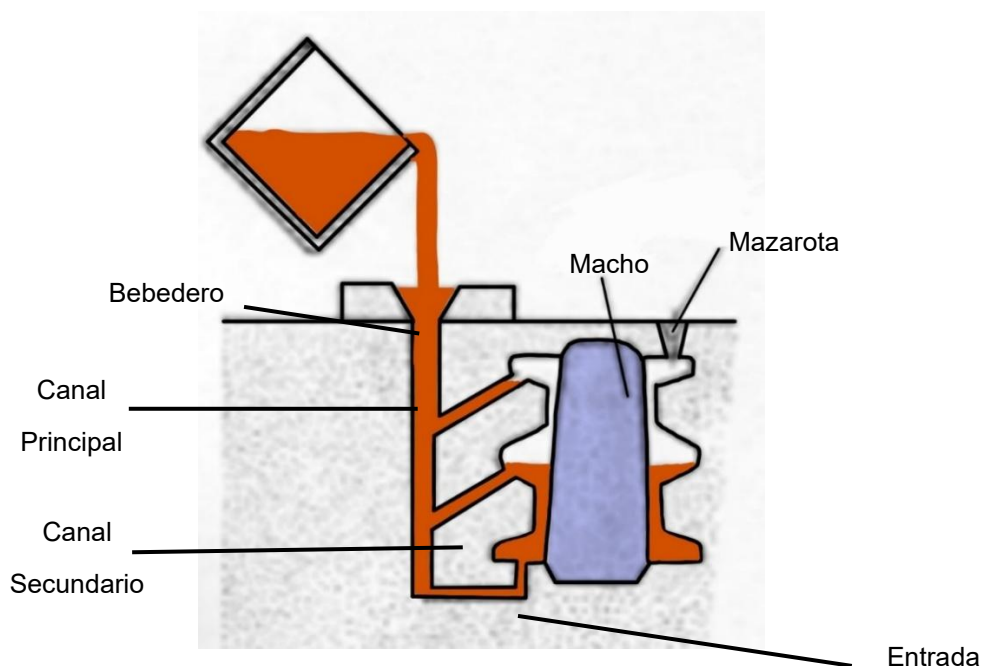


Figura 42: Sistema de colada [46]

Las principales ventajas de un buen diseño del canal de llenado es la reducción de defectos como inclusiones de gas, disminuir la necesidad de operaciones de acabado posteriores y mejorar la eficiencia en la alimentación de la cavidad [3,25].

2.3.5.6. Forma de entrada del metal en el molde:

Los requisitos de llenado en la fundición por gravedad son similares a los de otros procesos, se debe evitar la turbulencia durante el llenado y procurar que el metal avance de manera homogénea. En la Figura 43, se puede ver la diferencia entre el llenado homogéneo de la pieza cuando la entrada del metal se hace desde la parte inferior de la pieza a cuando se realiza desde la parte superior de esta, lo que produce la caída libre del material y turbulencia [3]. También a la hora de la solidificación, esto podría dar lugar a que ciertas zonas de la pieza solidifiquen antes que otras como se muestra en la Figura 43, pudiendo aparecer defectos de porosidad como los rechupes o microporosidades que a la larga puedan dar lugar a grietas y la rotura de la pieza [6].

La entrada del metal líquido de forma directa produce cierta erosión, por lo que se buscan otros métodos de alimentación. Se debe tener en cuenta cual va a ser el tiempo de llenado, la forma de la pieza, el tipo de arena, etc [30].

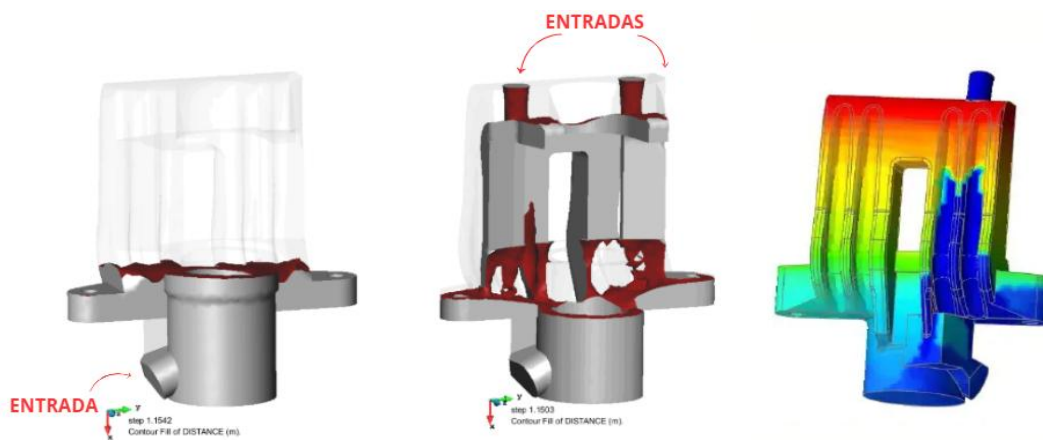


Figura 43: a) Una entrada inferior, b) Dos entradas superiores y c) Tiempo de solidificación cuando la entrada del metal no se ubica correctamente [3,30].

Por ello, la forma de entrada del metal fundido en el molde es muy importante y siempre que sea posible, se recomienda realizar el llenado desde la parte inferior hacia la superior para evitar la caída libre del metal líquido, turbulencia y posibles defectos. Este método también es conocido como colada en sifón. En la siguiente Figura 44 se pueden apreciar distintos métodos de colada [46].

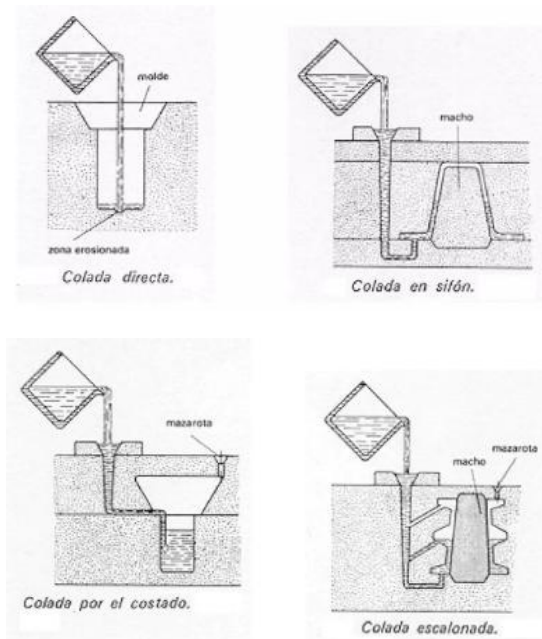


Figura 44: a) Colada directa, b) colada en sifón, c) Colada lateral y d) Colada escalonada [7].

Otros parámetros o factores que pueden influir en el proceso son:

- Altura de la cuchara: Distancia entre la cuchara y el molde en el momento del vertido. Si no se conoce este valor, se recomienda una medida entre 10 y 30 mm [30].
- Caudal: El volumen de metal vertido [3].
- Temperatura del molde: Afecta en la solidificación de la pieza y el flujo del metal [45].

Actualmente, todos estos parámetros pueden analizarse y optimizarse previamente al proceso de fundición mediante el uso de herramientas de simulación computacional [50].

Existen diversos programas especializados, como Altair Inspire Cast, que permiten realizar simulaciones detalladas del proceso, desde la entrada del metal hasta su solidificación. Estas simulaciones ayudan a predecir posibles defectos como atrapamiento de aire, porosidad, falta de llenado o inclusiones, lo cual facilita la toma de decisiones para mejorar la calidad del diseño [51].

La realización de simulaciones de fundición ha ganado popularidad en la industria, ya que permite estudiar el llenado del molde, la solidificación del metal y el enfriamiento de la pieza en el proceso de fundición. Además, resulta de gran utilidad para comprender las posibles ubicaciones donde podrían aparecer defectos internos como porosidad por contracción e inclusiones de arena, sin necesidad de fabricar prototipos, lo que permite ahorrar tiempo, reducir costos y minimizar errores en las primeras etapas del proceso

[36,51]. Se pueden realizar diferentes estudios de simulación cambiando los parámetros deseados y de esta manera comprobar cual es la mejor opción para la pieza de estudio.

En el Trabajo de Fin de Grado de Sanz García (2020), titulado *Benchmarking sobre el software para la simulación de los procesos de fundición*, realizado en la Universidad de Valladolid, se llevó a cabo un estudio comparativo entre varios programas de simulación, lo que permitió identificar sus puntos fuertes, débiles y las capacidades que ofrecen [37].

Algunos de los softwares empleados son:

- **FLOW-3D Cast:** Este software permite obtener resultados de gran precisión para flujo y solidificación (Figura 45). Además, se puede realizar la simulación avanzada de procesos de gravedad, alta y baja presión, centrífuga, vertido por inclinación, entre otros. Requiere cierto nivel de experiencia en simulación CFD (Computational Fluid Dynamics [37,52]).

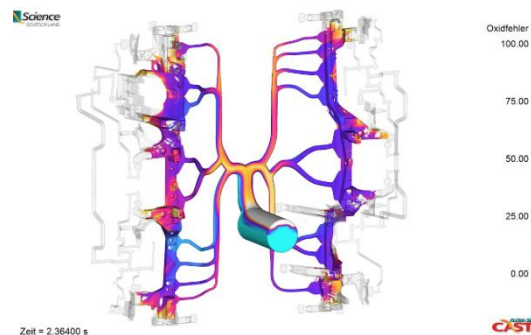


Figura 45: Ejemplo Flow-3D Cast [52]

- **MAGMASoft:** Es una herramienta de optimización integral para mejorar la calidad de la producción de metales, optimizar las condiciones del proceso y reducir los costes de producción. Se trata de una interfaz profesional, orientada a usuarios con experiencia en fundición y simulación, su curva de aprendizaje es más pronunciada (Figura 46) [37,53].

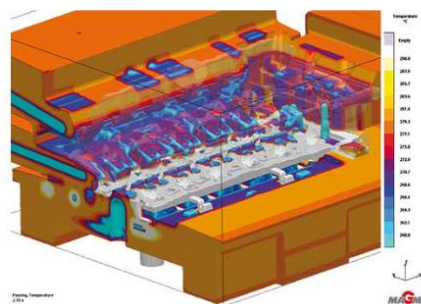


Figura 46: MAGMASoft [53]

- **ProCAST:** El software de simulación de fundición de ESI, ProCAST, es una solución completa que permite la evaluación predictiva de todo el proceso de colada incluyendo defectos de llenado y solidificación propiedades mecánicas y distorsión de piezas complejas (Figura 47). Es una solución muy detallada y precisa, pero con mayor demanda de recursos computacionales [37,54].

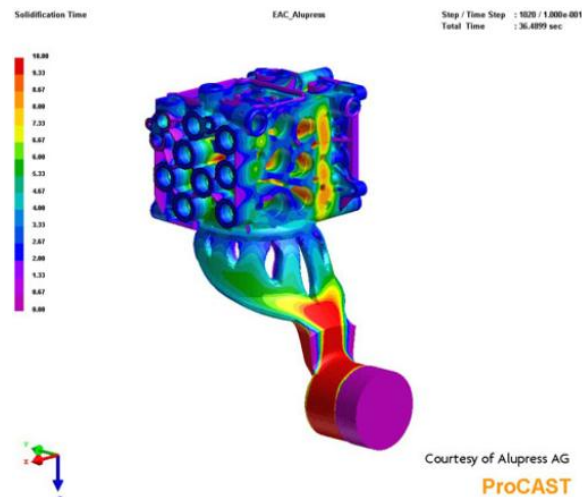


Figura 47: ProCAST [54]

- **Altair Inspire Cast:** Destaca por su facilidad de uso y rapidez, ideal para usuarios que buscan resultados rápidos y eficientes en el diseño y estudio de simulación de los procesos de fundición (Figura 48) [55]. A diferencia de los programas anteriores, Inspire Cast solo incluye los procesos más usuales, por ejemplo, la colada centrífuga no es posible estudiarla con este software [3,30].

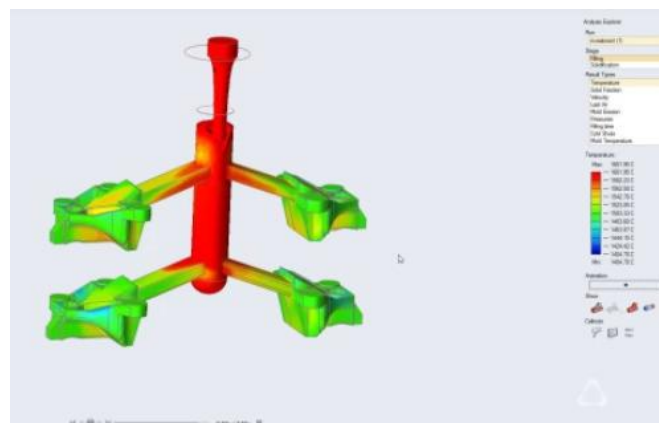


Figura 48: Altair Inspire Cast [30]

Tras el análisis de distintos estudios y herramientas de simulación empleadas en procesos de fundición, se puede concluir que el software Inspire Cast, destaca por ofrecer un equilibrio adecuado entre precisión, accesibilidad y facilidad de uso. Además, cuenta con tutoriales y cursos en línea que permiten aprender rápidamente los conceptos básicos necesarios para realizar simulaciones de piezas complejas [12].

Entre sus principales ventajas se encuentran su interfaz gráfica intuitiva, la posibilidad de visualizar en tiempo real los fenómenos de llenado y solidificación, y su capacidad para detectar defectos comunes como porosidades, turbulencias o zonas de solidificación prematura. No obstante, también presenta ciertas limitaciones frente a softwares más avanzados, como la menor personalización de parámetros de simulación o una capacidad de mallado menos detallada [3].

Desde el punto de vista docente, representa una herramienta de gran valor, ya que permite a los estudiantes de Ingeniería, especialmente de la asignatura Ingeniería de los Procesos de Fabricación, comprender de manera visual e interactiva los principios fundamentales de la fundición y del diseño de sistemas de alimentación.

Su potencial como herramienta de apoyo a la docencia, combinado con su aplicabilidad en entornos reales de ingeniería, convierte a Inspire Cast en una opción sólida, versátil e interesante para la formación en tecnologías de fundición [2,4].

En la siguiente Tabla 2, se muestra una comparativa resumida con las características más importantes de los programas mencionados anteriormente.

Tabla 2: Comparativa resumida de diferentes software de simulación [3,37]

Software	Curva de aprendizaje	Precisión	Capacidades avanzadas	Aplicación principal
Inspire Cast	Baja	Alta	Optimización y defectos	Fundición general y diseño
FLOW-3D Cast	Media	Muy alta	Llenado, gases, CFM	Fundición avanzada, CFD
MAGMASoft	Alta	Muy alta	Microestructura, tensiones	Fundición industrial
ProCAST	Alta	Muy alta	Microestructura, tensiones	Fundición industrial, investigación

A continuación, se presentan algunos estudios destacados que resultan de gran interés. En ellos se utilizó la herramienta Inspire Cast para evaluar distintos aspectos del llenado, la solidificación y la calidad final de las piezas fundidas.

Andrés Carpio López (2024) en su Trabajo de Fin de Grado, utiliza el software Inspire Cast para analizar numérica y experimentalmente cómo el tamaño, la forma y la composición de las mazarotas con camisas exotérmicas influyen en el rendimiento del sistema de alimentación en fundición de hierro dúctil. Además, sintetiza los resultados de las simulaciones en gráficas prácticas para facilitar el dimensionamiento adecuado de estas mazarotas (Figura 49) [4].

En general, concluye que tanto las variaciones geométricas como la presencia de camisas exotérmicas afectan los parámetros temporales del sistema. Experimentalmente, se comprobó que el uso de camisas exotérmicas mejora la retención de calor en la mazarota, prolongando el tiempo durante el cual el hierro permanece por encima del límite de líquidus y, por ende, reduciendo las imperfecciones en la pieza fundida. Los mejores resultados se obtuvieron con la mazarota cilíndrica [4].

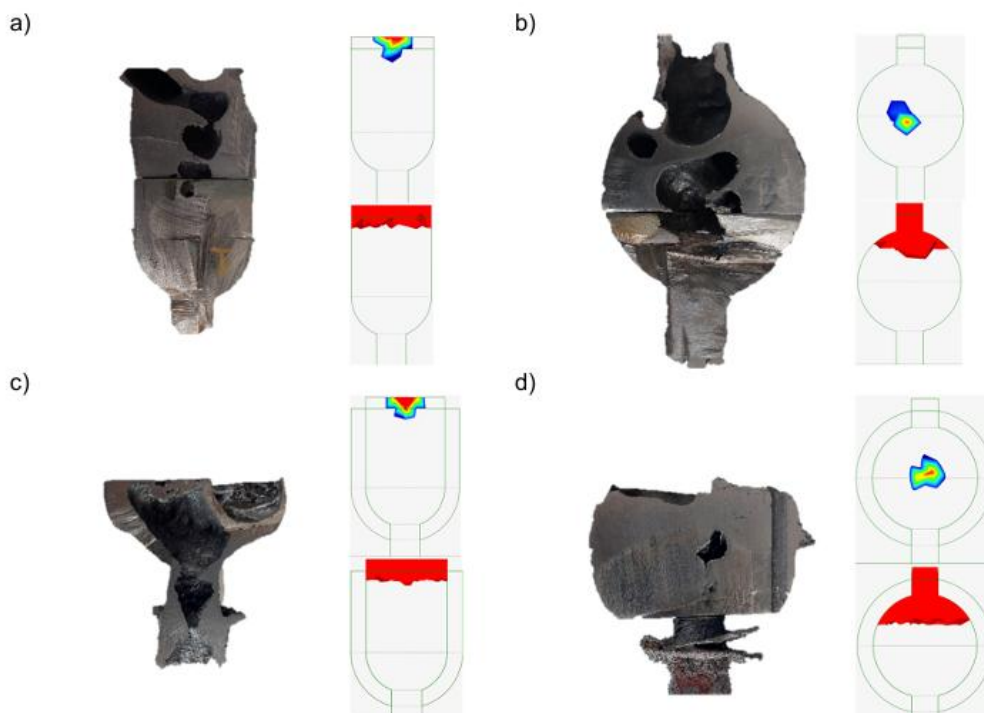


Figura 49: a) Mazarota cilíndrica sin carcasa, b) Mazarota esférica sin camisa, c) Mazarota cilíndrica con camisa y d) Mazarota esférica con camisa [4].

El artículo Harshwardhan L, Rishabh C *Simulation of Sand-Casting Process Using Altair Inspire Cast* (2021) se centra en la simulación del proceso de fundición de un volante de inercia para analizar los efectos de distintas ubicaciones del sistema de colada,

utilizando el software de simulación de fundición Altair Inspire Cast con el fin de mejorar la calidad y eficiencia del proceso (Figura 50) [1].

Concluye que la colada lateral supera a la colada superior, reduciendo el tiempo de llenado en un 44,5 % y minimizando defectos comunes como la erosión del molde y la porosidad por contracción. En general, los resultados demuestran que las herramientas de simulación pueden optimizar eficazmente las decisiones de diseño y mejorar los resultados de la fundición [1].

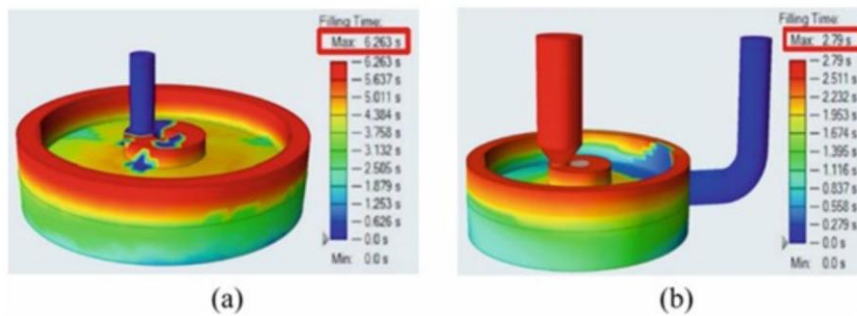


Figura 50: Tiempo de llenado según la posición del bebedero: a) 6.263 segundos, b) 2.79 segundos [1]

El estudio realizado en el artículo *Multilevel Pulley Analysis of Sand-Casting Process Results for Metal Casting Simulation Using Altair Inspire Cast* (2023) se centra en mejorar la enseñanza de la ingeniería mediante el uso de simulaciones para reforzar el aprendizaje de los procesos de fundición en arena. Emplea el software Altair Inspire Cast para visualizar y analizar defectos de fundición, examinando especialmente cómo distintos métodos de diseño de mazarotas influyen en la contracción durante la solidificación. Como resultado principal, el artículo revela que el uso del criterio del módulo de enfriamiento para diseñar las mazarotas reduce significativamente los defectos y conduce a piezas fundidas de mayor calidad, aunque implica un mayor consumo de material (Figura 51) [2].

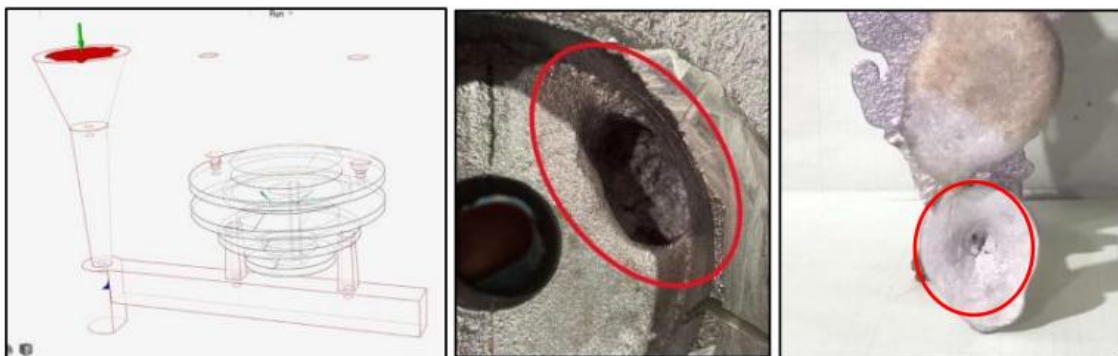


Figura 51: Comparación de resultados de porosidad obtenidos con el software y experimentalmente [2].



En los últimos años, el software Inspire Cast se ha consolidado como una herramienta útil y versátil para el análisis y simulación de procesos de fundición. Su capacidad para predecir con precisión el comportamiento del metal líquido durante las fases de llenado y solidificación ha permitido a investigadores y profesionales del sector optimizar diseños, minimizar defectos y mejorar la eficiencia del sistema de alimentación [2,4].

En este sentido, la optimización mediante software de simulación ha sustituido completamente la etapa de "desarrollo del concepto", permitiendo así simular el proceso directamente en el ordenador, importando modelos 3D y estimando las mazarotas necesarias, ubicación y tamaño de estas, el tipo de bebedero, canales de distribución y entradas necesarias en el proceso [2].

Es por ello que en este Trabajo de Fin de Grado se realizarán las pruebas pertinentes para comprobar su eficacia y sencillez a la hora de obtener los resultados correspondientes a un proceso de fundición por gravedad en molde de arena, para poder así considerar su posible uso en el ámbito docente para la asignatura Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Málaga.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Estudio y simulación de procesos
de fundición en molde de arena



3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL:

Se ha seguido la metodología experimental que se define a continuación para la realización de las diferentes etapas necesarias para conseguir los objetivos descritos anteriormente. Dicha metodología se divide en 5 etapas principales, la primera de ellas se trata del concepto inicial y la obtención de la pieza con la que se llevará a cabo el estudio. La segunda será cómo configurar un análisis de fundición por gravedad en molde de arena utilizando el software Inspire Cast, definir el material, agregar y definir componentes como posicionar el bebedero, mazarotas, molde, etc. En la cuarta se especificarán los parámetros del proceso y por último se analizarán los resultados obtenidos (Figura 52).

Además, se repetirá el proceso sin el uso de mazarotas, para poder comparar los resultados obtenidos en tres casos de estudio y comprobar los beneficios de su uso, tal y como se menciona en la literatura consultada para la realización de este trabajo.



Figura 52: Ciclo de trabajo. Etapas de la metodología experimental

2.4. Introducción al software Altair Inspire Cast:

Altair Inspire Cast es un entorno de simulación de fundición rápido, fácil, preciso y asequible, enfocado en la creación de componentes de alta calidad con una mayor rentabilidad, gracias a una experiencia de usuario altamente intuitiva. Es la única herramienta que se adapta tanto a principiantes como a expertos, desde diseñadores del producto hasta ingenieros de fundición [3].

Desde las primeras fases del diseño, los usuarios pueden visualizar defectos comunes de los procesos de fundición, como inclusiones de aire, porosidad por contracción o

degradación del molde, y corregirlos, evitando así costosas modificaciones en etapas posteriores (Figura 53) [3,36].



Figura 53: Programa Inspire Cast

El software permite simular la fundición por gravedad en molde permanente, de arena, a la cera perdida, a alta y baja presión y por vertido por inclinación [3].

Gracias a su interfaz intuitiva, Inspire Cast permite a los usuarios alcanzar excelentes resultados en el diseño y calidad del producto con tan solo unas horas de aprendizaje. Altair complementa esta experiencia con tutoriales y cursos que hacen más accesible y rápida la curva de aprendizaje.

Se caracteriza por la posibilidad de configurar la simulación en cinco pasos:

1. Importar o crear la geometría.
2. Definir la entrada.
3. Agregar componentes de fundición (mazarotas, molde, enfriadores, etc).
4. Configurar los parámetros del proceso de fundición (tipo de fundición, velocidad de llenado, tiempo de llenado, etc).
5. Ejecutar y analizar los resultados obtenidos.

2.4.1. Espacio de trabajo de Altair Inspire Cast:

En la Figura 54 se muestra el entorno de trabajo del software Altair Inspire Cast. Posteriormente, se explican de forma concisa los elementos que lo componen.

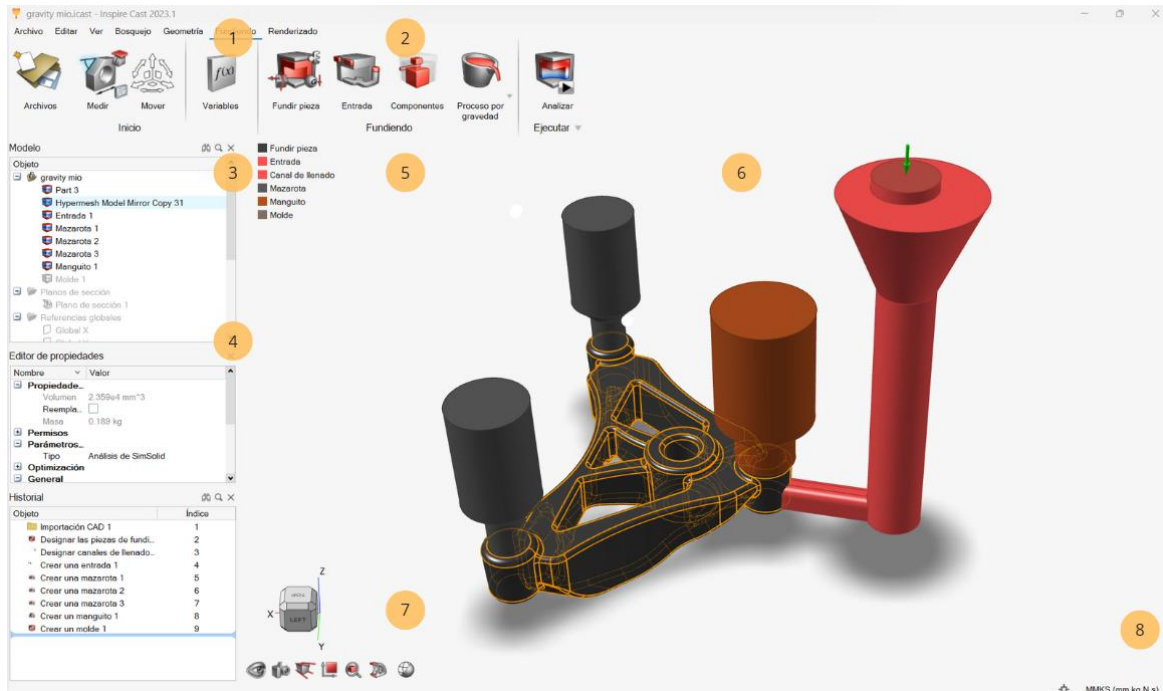


Figura 54: Espacio de trabajo Inspire Cast [3]

1. Menú superior:

Contiene tanto las funciones básicas del software como *Archivo*, *Editar*, *Vista*, como las funciones que se usarán para crear la geometría o para definir componentes del proceso y analizar los resultados [3].

2. Menú de iconos:

Permite acceder a las funciones principales para el diseño de la pieza o para definir los parámetros del proceso (Figura 55 y Figura 56) [3].

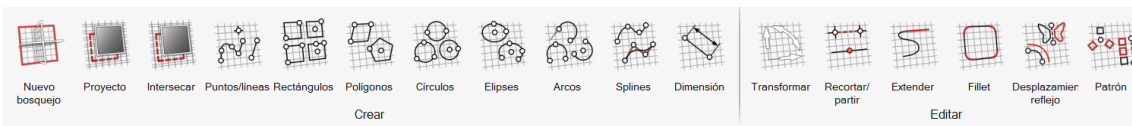


Figura 55: Submenú Sketch [3]

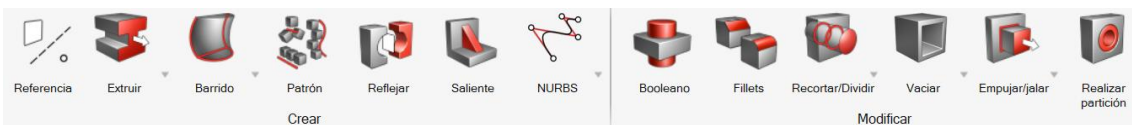


Figura 56: Submenú Geometría [3]

3. Navegador del modelo:

El navegador del modelo muestra todos los objetos del modelo en una estructura de árbol [3].

4. Editor de propiedades:

El editor de propiedades muestra todas las propiedades de un objeto seleccionado y permite editarlas. Se puede abrir desde el menú Vista o presionando la tecla F3 [3].

5. Administrador de leyenda:

Utiliza el administrador de leyenda para mostrar, ocultar o aislar rápidamente los diferentes componentes del modelo [3].

6. Ventana de modelado:

La ventana de modelado, a veces llamada área gráfica o ventana gráfica, es donde se interactúa con el modelo [3].

7. Controles de vista:

Los controles de vista se utilizan para girar la vista, mostrar y ocultar objetos, guardar una vista, cambiar la proyección, ajustar los objetos y realizar cortes de sección [3].

8. Filtro de ajustes:

Se pueden activar varios tipos de ajustes y seleccionar el sistema de unidades en el que se esté trabajando. Existen varios sistemas de unidades disponibles [3].

3.1. Concepto inicial:

En la fase inicial, tal como se ha mencionado previamente, se ha seleccionado la geometría mostrada en la Figura 57. Se trata de una pieza con cierta complejidad, que incluye cavidades diseñadas para hacer más interesante el análisis de los resultados obtenidos en la simulación.



Figura 57: Pieza para el estudio.

Para realizar la simulación, es necesario disponer de un modelo 3D de la pieza, normalmente generado mediante software de diseño CAD y exportado en formato .stl. No obstante, Inspire Cast también permite crear geometrías básicas directamente desde a pestaña *Croquis*. En este Trabajo de Fin de Grado, se utilizará una geometría proporcionada en el curso en línea específico sobre el uso del software.

En primer lugar, se abrirá el archivo con la pieza con la que se quiere realizar el estudio siguiendo los pasos que se indican a continuación y que se muestran en la Figura 58 y Figura 59.

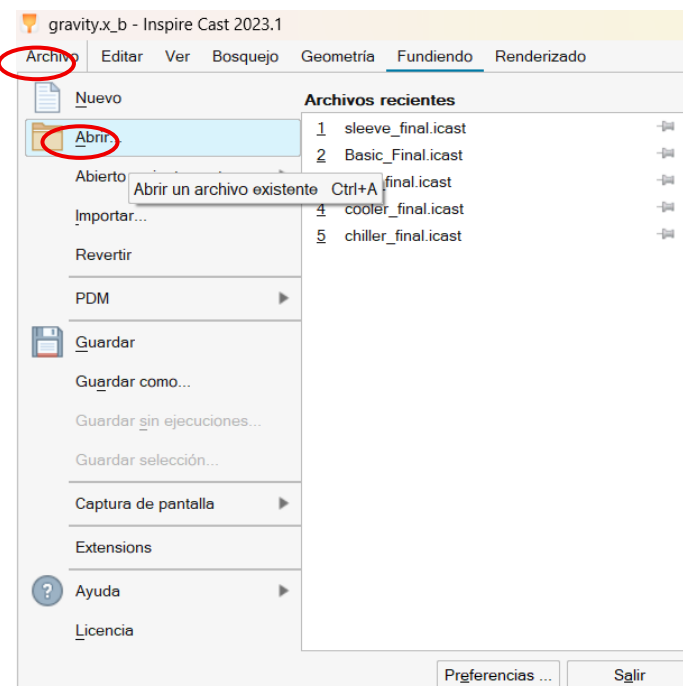


Figura 58: Abrir archivo geometría pieza



Figura 59: Pieza para el proceso de fundición con canal de llenado.

Como se puede observar en la geometría de la pieza también se encuentra ensamblado el sistema de colada (bebedero, canal de principal), en este caso forma parte de la geometría creada de la pieza y deberá ser definido en pasos posteriores.

3.2. Definir pieza:

Para definir la pieza con la que se desea realizar el proceso de fundición, se debe seleccionar la opción **Fundir pieza** en el menú superior. A continuación, se hace clic sobre la pieza correspondiente. Al realizar esta acción, se observa cómo la pieza cambia de color gris a rojo, lo que indica que ha sido correctamente asignada como el componente principal de la fundición. Por otro lado, el canal de llenado permanece en color gris, tal como se muestra en la Figura 60 .

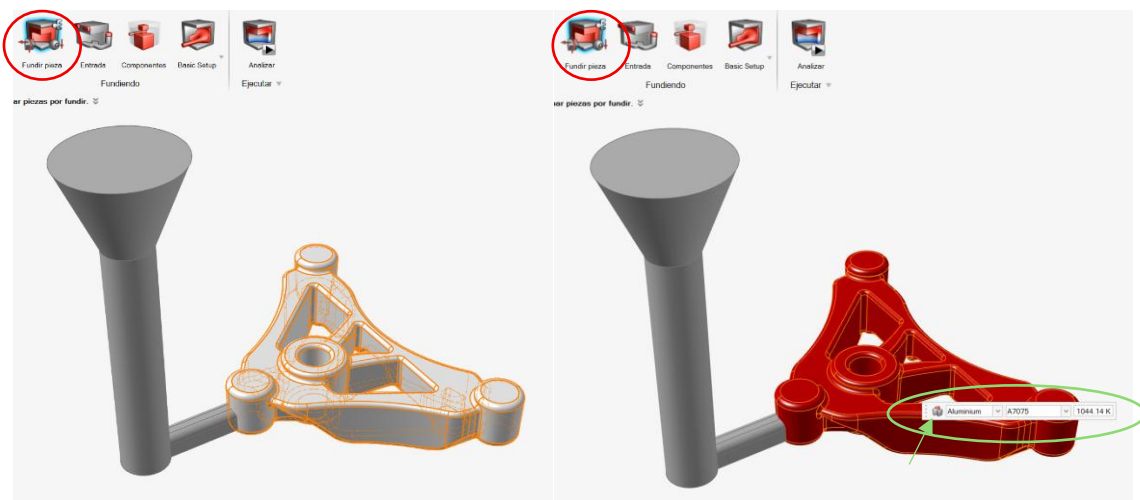


Figura 60: Seleccionar pieza para el proceso de fundición

Al seleccionar la pieza aparece una ventana emergente donde es posible definir el material que se usará en el proceso, el tipo y la temperatura de fusión. Esta configuración también puede realizarse al hacer clic en el icono de la izquierda, el cual aparece señalado en verde en la Figura 60 anterior.

El material elegido para este estudio se especifica a continuación en la Tabla 3:

Tabla 3: Parámetros del metal para la fundición

Material	Aluminio
Tipo	A356
Temperatura	991.15 K

Para confirmar la selección realizada, se debe hacer clic con el botón derecho del ratón y, a continuación, confirmar nuevamente mediante la opción correspondiente.

3.3. Definir el sistema de colada:

A continuación, se definirá el sistema de colada, donde se seleccionará el canal o canales de llenado a través de los cuales fluye el metal fundido. En el caso de la pieza de estudio se ha considerado solamente un canal de distribución, también proporcionado por el propio curso de Altair Inspire Cast.

Para definirlo correctamente, se selecciona el icono marcado en azul en la Figura 61.



Figura 61: Icono para definir el canal de llenado

De la misma manera que ocurre con la pieza, al seleccionar el canal de llenado, este cambia de color gris a rojo, lo que indica que ha sido correctamente asignado (Figura 62).

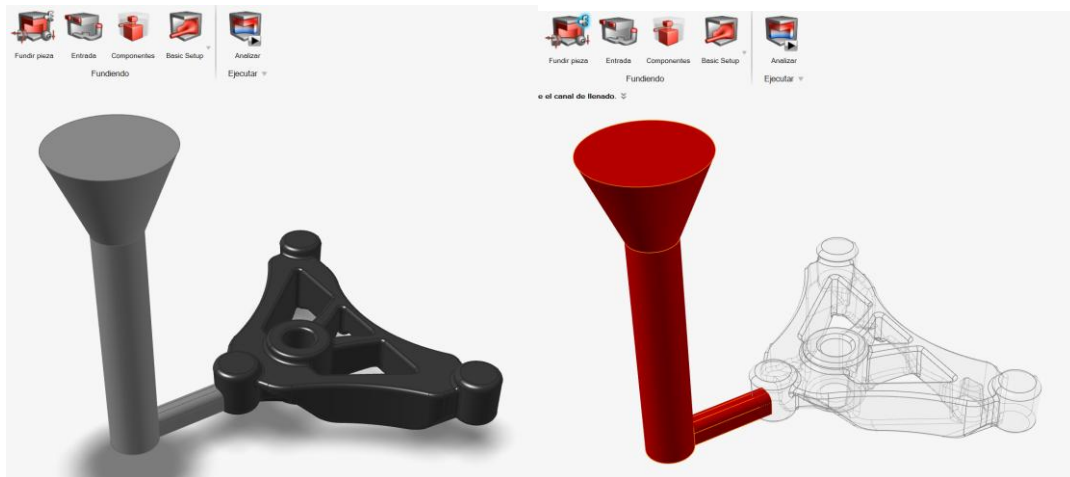


Figura 62: Selección del canal de llenado

Una vez hecha la selección para confirmar y guardar los cambios, se hace clic con el botón derecho del ratón y se confirma la selección de nuevo (Figura 63).

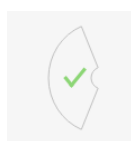


Figura 63: Botón de confirmación.

3.4. Definir dirección de la gravedad:

El siguiente paso es seleccionar la dirección de la gravedad. Para ello, se selecciona el icono señalado en azul en la siguiente Figura 64:



Figura 64: Icono para definir la dirección de la gravedad

Al seleccionar esta opción, aparece automáticamente una flecha en color azul que indica el sentido de la gravedad. En el caso de estudio, coincide con la dirección deseada para el proceso como se puede observar en la Figura 65.

Si no fuera así, simplemente se debe seleccionar la cara de la pieza perpendicular a la dirección de la gravedad deseada.

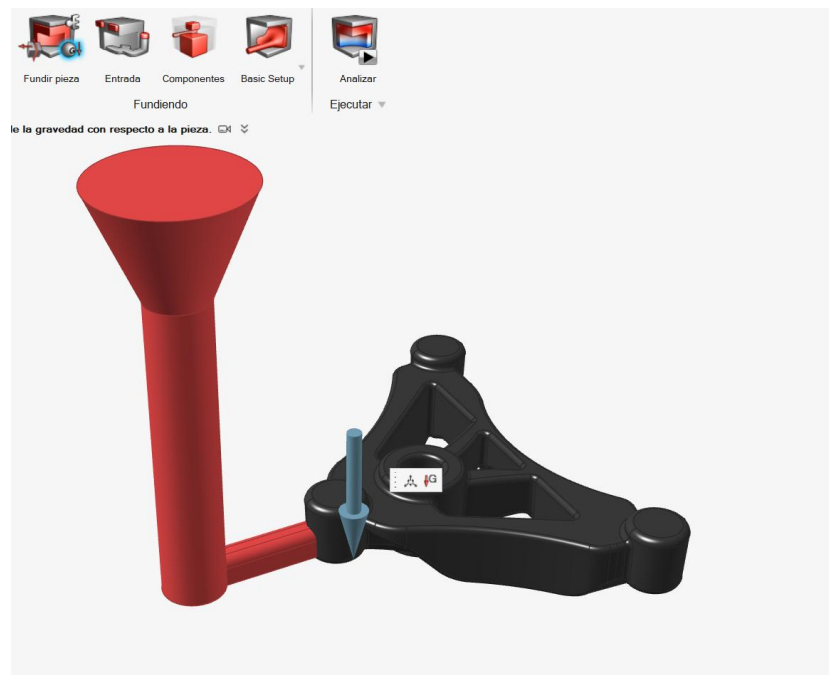


Figura 65: Configuración de la dirección de la gravedad

Para confirmar la selección, se vuelve a hacer clic con el botón derecho del ratón y se confirma la selección de nuevo.

3.5. Definir la entrada del material:

Para definir la entrada del metal fundido para realizar el proceso, se debe seleccionar la opción **"Entrada"** en el menú superior y hacer clic sobre el icono señalado en azul en la Figura 66.



Figura 66: Definir entrada del metal fundido

A continuación, se selecciona la parte superior del sistema de colada como se muestra en la Figura 67.

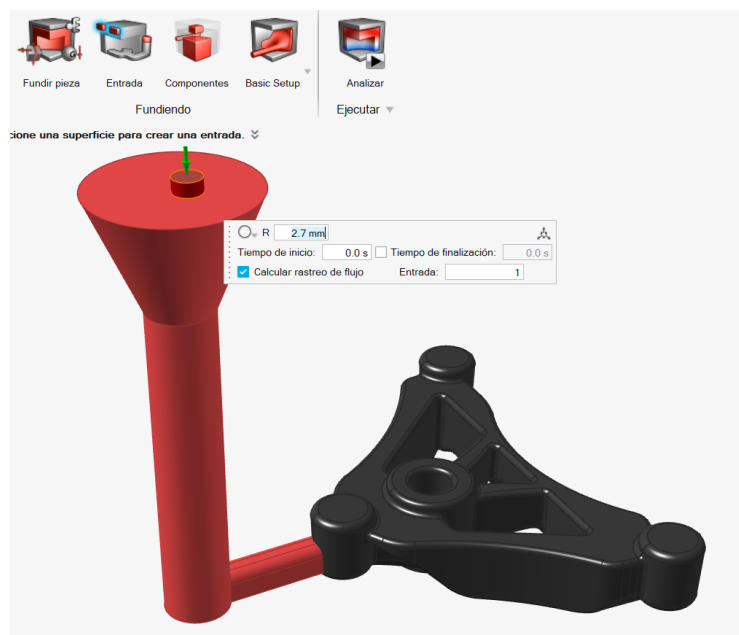


Figura 67: Crear una entrada de material

Aquí también se podrá modificar el tamaño, forma y posición de la entrada. En la Tabla 4, se muestran los valores elegidos para este estudio:

Tabla 4: Parámetros de la entrada del material

Forma	Circular
Radio	7 mm
Posición	Descentrada

La entrada se coloca evitando el centro del bebedero como se muestra en la Figura 68, para evitar la caída libre del metal y minimizar la turbulencia.

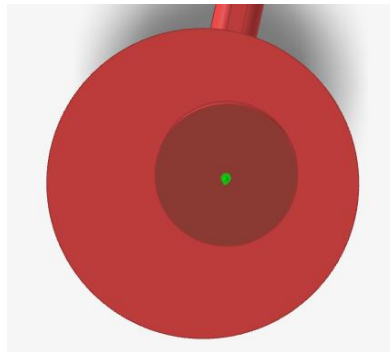


Figura 68: Posición de la entrada

3.6. Definir componentes:

El siguiente paso consiste en definir los componentes que se utilizarán en el proceso de fundición. Para ello, se debe seleccionar la opción "**Componentes**" en el menú superior. Al hacerlo, se despliega un submenú con los distintos tipos de componentes disponibles en Inspire Cast, tal como se muestra en la Figura 69.

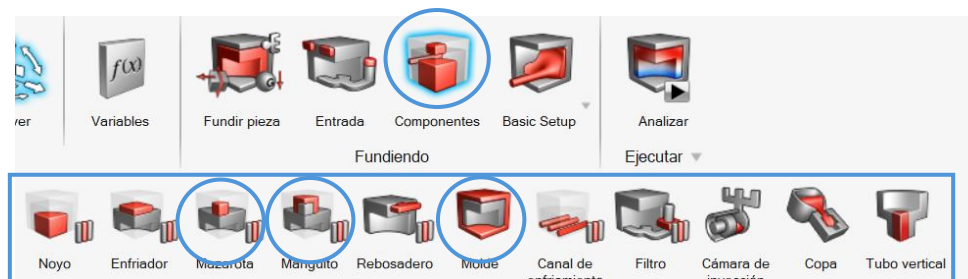


Figura 69: Menu de componentes Inspire Cast

En este estudio se utilizarán los componentes: Mazarota, manguito y molde.

- Definir Mazarota:

En la Figura 70, se muestran los pasos a seguir para colocar las tres mazarotas, con el objetivo de minimizar defectos asociados al proceso de fundición, como la porosidad o las inclusiones de aire. Se colocarán en diferentes puntos de la pieza como se puede observar en la Figura 71. Esto permitirá garantizar una alimentación adecuada del material durante la solidificación y contribuirá a la correcta ejecución del proceso.



Figura 70: Pasos a seguir para definir la mazarota

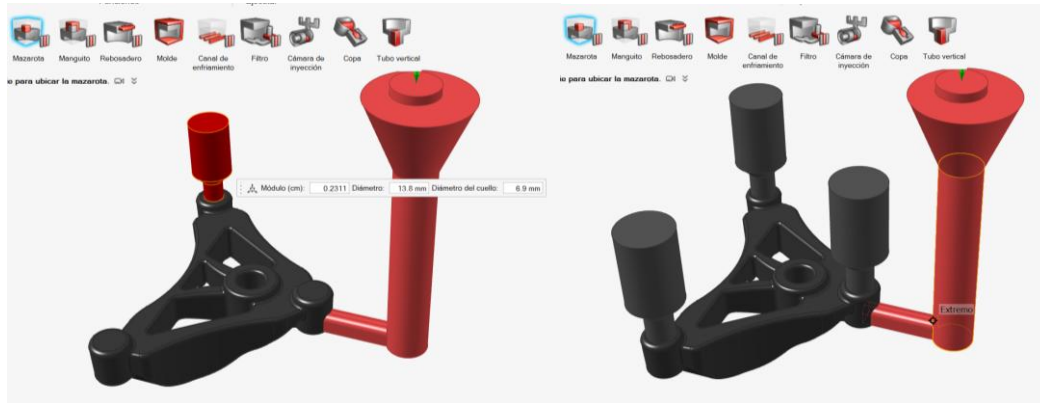


Figura 71: Configuración mazarotas

Al seleccionar la superficie sobre la cual se desea colocar la mazarota, se despliega una ventana emergente que permite introducir los parámetros correspondientes. En el caso de este estudio, dichos parámetros se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5: Parámetros de la mazarota

Módulo	0.3 cm
Diámetro	17.91 mm
Diámetro cuello	8.95 mm
Posición	Centrada
Cantidad	3

- Definir manguito:

Se seleccionará la opción de manguito y seguidamente la mazarota en la que se desea colocar, siguiendo los pasos de la Figura 72.



Figura 72: Pasos a seguir para definir el manguito

En el caso de este estudio, se le colocará el manguito a la mazarota más próxima al canal de llenado tal y como se muestra en la Figura 73 y con los parámetros que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Parámetros del manguito isotérmico

Tipo	General isotérmico
Temperatura	293.15 K
Espesor	2.69 mm
Cantidad	1



Figura 73: Configuración del manguito

- Configuración del molde:

El siguiente paso es crear el molde para el proceso de fundición (Figura 75) siguiendo los pasos que se muestran en la Figura 74. Al seleccionar el icono señalado en verde en la Figura 76, se puede definir el material de interés para el molde y se muestran una serie de propiedades y características específicas asociadas al material seleccionado. Los parámetros para este estudio se muestran en la Tabla 7.



Figura 74: Pasos a seguir para definir el molde

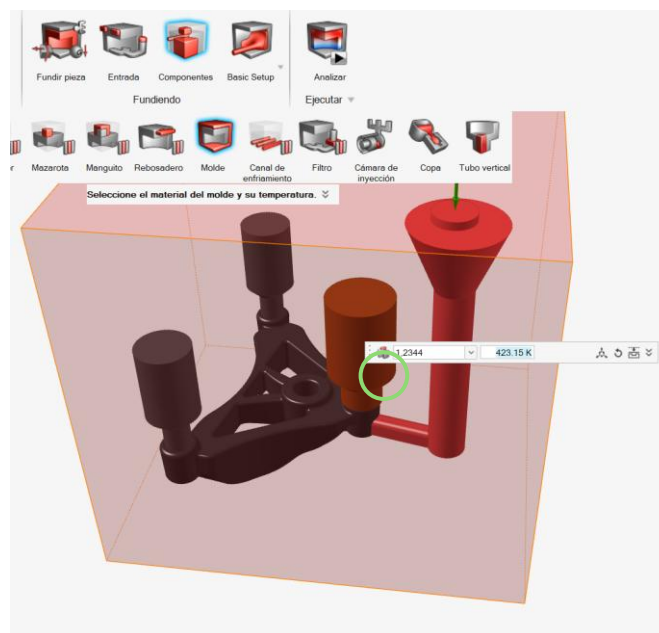


Figura 75: Creación del molde

Tabla 7: Parámetros del molde.

Material	Arena silícea
Temperatura	293.15 K

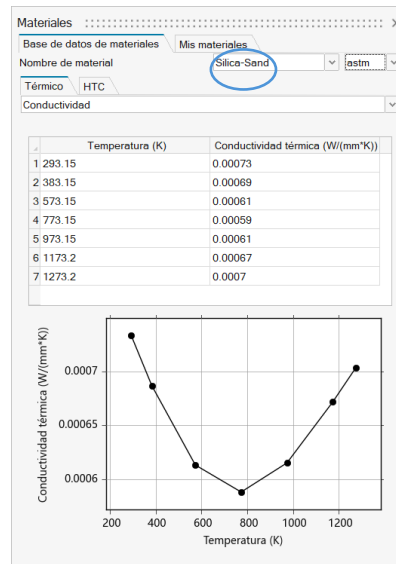


Figura 76: Selección material para el molde

3.7. Parámetros proceso por gravedad:

A continuación, se debe definir el tipo de proceso que se empleará. Para ello, se debe seleccionar la opción *Proceso por gravedad* del menú superior y definir los parámetros asociados a él, tal y como se muestra en la Figura 77, el tiempo de llenado será 1.5 segundos.

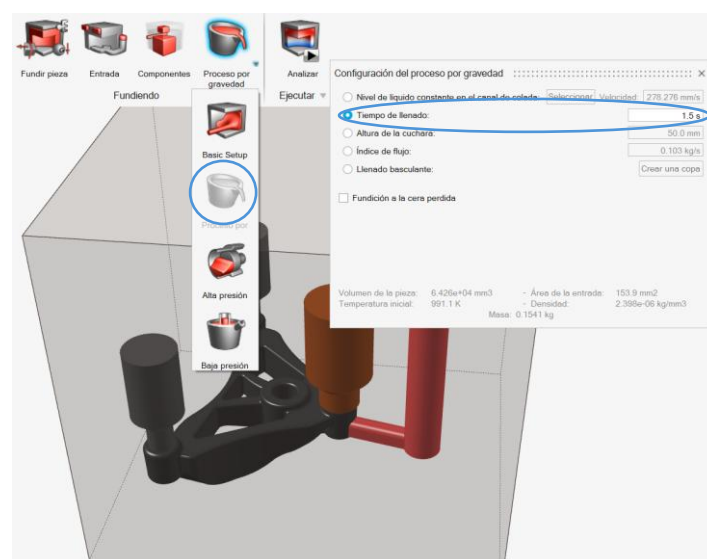


Figura 77: Definir parámetros proceso por gravedad

Por último, se ejecutará el análisis para proceder con la simulación del proceso.

Para ejecutar el análisis del proceso, se debe seleccionar la opción **Analizar** en el menú superior y hacer clic sobre el icono señalado en azul en la Figura 78.



Figura 78: Configuración análisis

A continuación, se deberá introducir el tamaño de elemento y seleccionar las opciones específicas que se desean incluir en el análisis (Figura 79). En el caso de este estudio, estas características se muestran en la Tabla 8.

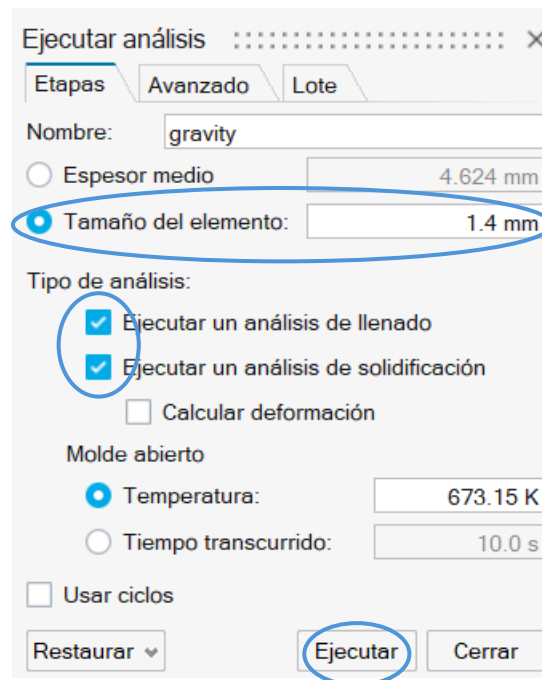


Figura 79: Configuración análisis

Tabla 8: Características análisis

Tamaño del elemento	1.4 mm
Análisis de llenado	Si
Análisis de solidificación	Si

Durante la ejecución del análisis por parte del software, es posible conocer el estado del proceso mediante una barra verde que muestra el porcentaje de avance, tanto en el análisis de llenado como en el de solidificación (Figura 80).

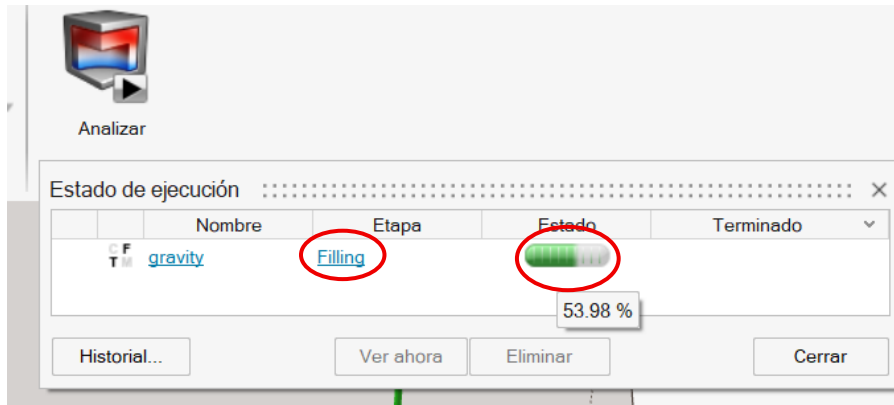


Figura 80: Estado ejecución

Tras quince minutos aproximadamente, una vez finalizado el cálculo de la simulación de llenado, solidificación y desmoldeo, aparecerá una bandera verde en el icono “Analizar” del menú superior que lo indica (Figura 81).

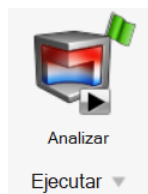


Figura 81: Indicador análisis completo

Se seguirá este procedimiento para crear una segunda simulación, en el que se estudiará la misma pieza descrita hasta ahora, usando el mismo sistema de llenado, saltando los pasos de crear mazarotas y manguitos. De esta manera se podrán comparar los resultados obtenidos posteriormente. En la Figura 82 se comparan ambas.

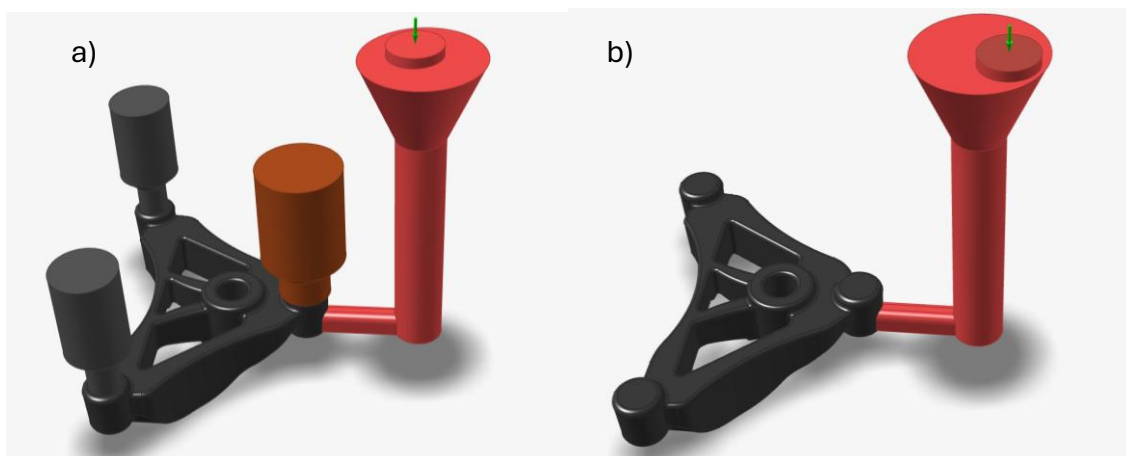


Figura 82: a) Pieza con mazarotas y camisa, b) Pieza sin mazarotas

Además, también se seguirá el mismo procedimiento para crear una tercera simulación en la que se prescinde tanto del canal de llenado como de las mazarotas y manguitos.

De esta manera, podremos comprobar como varían los resultados obtenidos cuando la entrada de metal se produce de manera directa, lo cual, según la literatura consultada, debería dar lugar a un mayor número de defectos, ya que la turbulencia a la hora de la colada es mayor al prescindir del canal de distribución (Figura 83).



Figura 83: Pieza sin canal de llenado, mazarotas ni manguitos.

En las siguientes Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11 se presentan los parámetros empleados en cada una de las simulaciones, lo que permite identificar de forma clara y ordenada las variables que se han mantenido constantes y aquellas que han sido modificadas entre los distintos casos de estudio. Se nombrará a las piezas de la siguiente manera:

- Pieza A: Pieza con canal de llenado, tres mazarotas y un manguito.
- Pieza B: Pieza con canal de llenado, sin mazarotas y sin manguito.
- Pieza C: Pieza sin canal de llenado, sin mazarotas y sin manguito.

Tabla 9: Parámetros y componentes de la pieza A.

Pieza	Material	Aluminio
	Tipo	A356
	Temperatura	991,15 K
Entrada	Forma	circular
	Radio	7 mm
	Posición	descentrada
Mazarota	Forma	Cilíndrica
	Módulo	0,3 cm
	Posición	centrada
Manguito	Uso	Si
	Tipo	isotérmico
Molde	Material	Arena silíceo
	Temperatura	293,15 K
Canal llenado	Uso	Si

Tabla 10: Parámetros y componentes de la pieza B.

Pieza	Material	Aluminio
	Tipo	A356
	Temperatura	991,15 K
Entrada	Forma	circular
	Radio	7 mm
	Posición	descentrada
Mazarota	Uso	No
Manguito	Uso	No
Molde	Material	Arena silíceo
	Temperatura	293,15 K
Canal llenado	Uso	Si

Tabla 11: Parámetros y componentes de la pieza C.

Pieza	Material	Aluminio
	Tipo	A356
	Temperatura	991,15 K
Entrada	Forma	circular
	Radio	2 mm
	Posición	centrada
Mazarota	Uso	No
Manguito	Uso	No
Molde	Material	Arena silíceo
	Temperatura	293,15 K
Canal llenado	Uso	No

Altair Inspire Cast proporciona una amplia variedad de resultados de simulación que permiten analizar y optimizar el proceso de fundición. Entre estos resultados destacan la visualización del llenado del molde, que muestra cómo fluye el metal líquido dentro de la cavidad y permite identificar posibles problemas como turbulencias o vacíos. Además, ofrece un análisis detallado de la solidificación, mostrando los tiempos y zonas donde el metal cambia de estado, lo que ayuda a prever defectos como la porosidad o la solidificación prematura [50]. También representa la distribución de temperatura durante el proceso, a medida que se llena el molde, facilitando la comprensión del comportamiento térmico y la posible optimización del sistema de alimentación [40].

El presente estudio, se centrará sobre todo en los resultados más interesantes como la temperatura de llenado, evolución del flujo, aire atrapado, tiempo de llenado, evolución del aire, fracción sólida, tiempo de solidificación, microporosidad y porosidad.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Estudio y simulación de procesos
de fundición en molde de arena



4. RESULTADOS:

A continuación, se realiza el análisis de los datos obtenidos a lo largo de las distintas etapas de la metodología experimental. A través del explorador de análisis, es posible visualizar los resultados generados por la simulación, tanto para la fase de llenado como para la de solidificación y desmoldeo.

Además, para algunos resultados, al pulsar el icono de reproducción ubicado en la barra inferior, se inicia una animación que permite observar de forma más clara y visual el desarrollo del proceso de fundición. Lo que ayuda a la comprensión de todos los conceptos teóricos relacionados con el proceso mencionados anteriormente.

4.1. RESULTADOS OPERACIÓN DE LLENADO:

4.1.1. Temperatura:

Se puede observar como la temperatura varía durante el proceso de llenado. Se aprecia cómo el líquido entra en el molde de manera suave y homogénea, evitando turbulencias y el choque directo con el molde. También, en la Figura 84, se puede ver como la temperatura durante el proceso de llenado es homogénea, se encuentra aproximadamente entre 991.15 y 921 K, es decir entre 718 y 650 °C, por lo que, según se ha mencionado anteriormente, se encuentra dentro del rango de temperaturas ideal para realizar el vertido de este tipo de aleación de aluminio A356 [19].

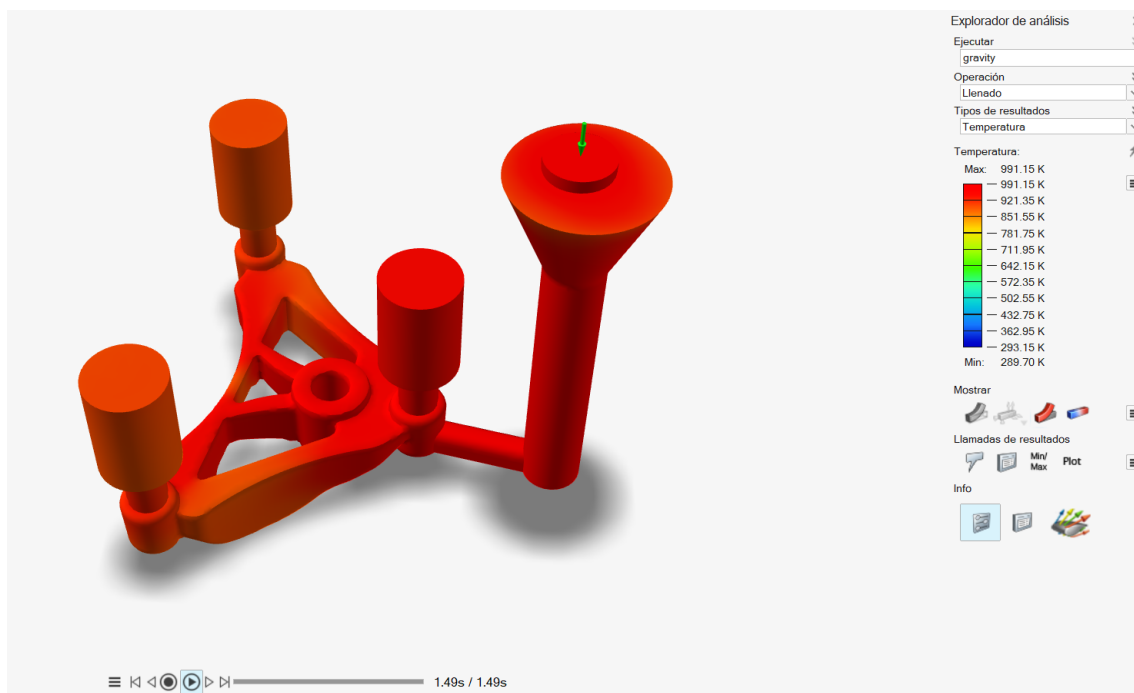


Figura 84: Resultados de temperatura de llenado

4.1.2. Evolución del flujo:

En la Figura 85, se puede observar en gris el metal que está en contacto con las paredes del molde y en rojo el metal que sigue fluyendo por la cavidad de este. Ayuda a visualizar como se comporta el fluido a medida que se introduce en el molde y a decidir si es necesario cambiar la entrada o no, para evitar turbulencias.

En este caso, el líquido fluye de manera homogénea y controlada, por lo que no sería necesario modificar el canal de entrada. En procesos de fundición por gravedad en moldes de arena, una distribución desigual del flujo puede provocar diversos problemas, como: turbulencias, desgaste irregular del molde y llenado desigual, lo que puede zonas mal alimentadas [1].

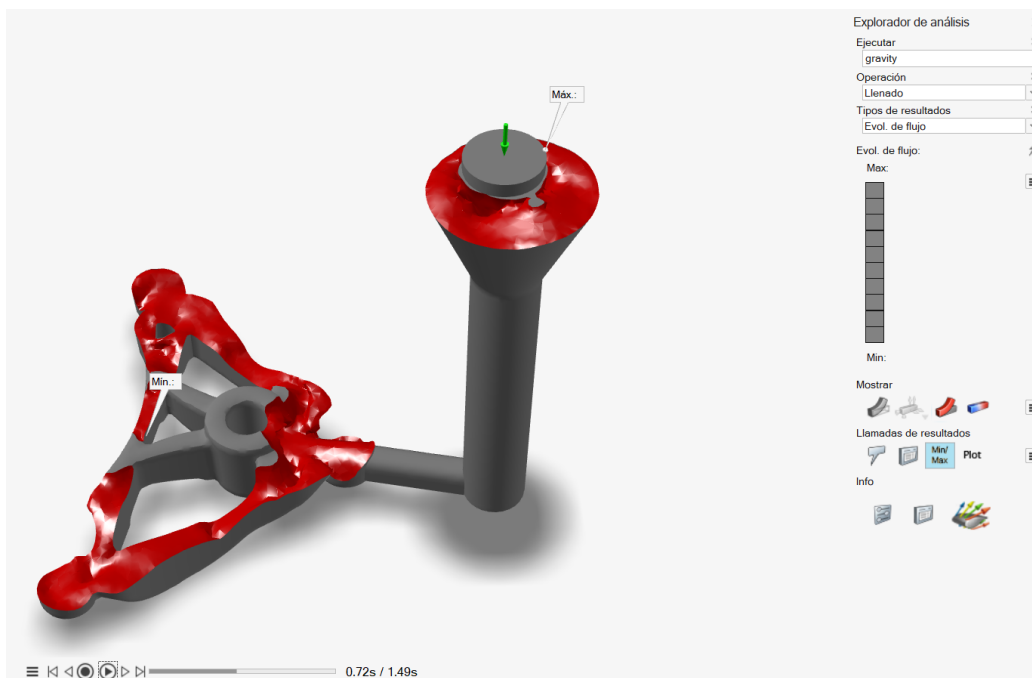


Figura 85: Evolución de flujo

4.1.3. Contribución a la entrada:

Este parámetro permite visualizar el porcentaje del material que ingresa al molde a través de cada una de las entradas. En el caso de estudio, como solo se dispone de una entrada, en la Figura 86, se observa que el 100% del fluido pasa por ella.

En situaciones con múltiples entradas, este resultado puede ser útil para evaluar si es necesario ajustar la posición o el tamaño de las entradas con el fin de optimizar el llenado del molde. Es decir, permite analizar el equilibrio del sistema de colada, ya que como se ha mencionado anteriormente, un llenado desigual podría ocasionar defectos en el molde durante el proceso de llenado o en la pieza final tras el proceso de solidificación.

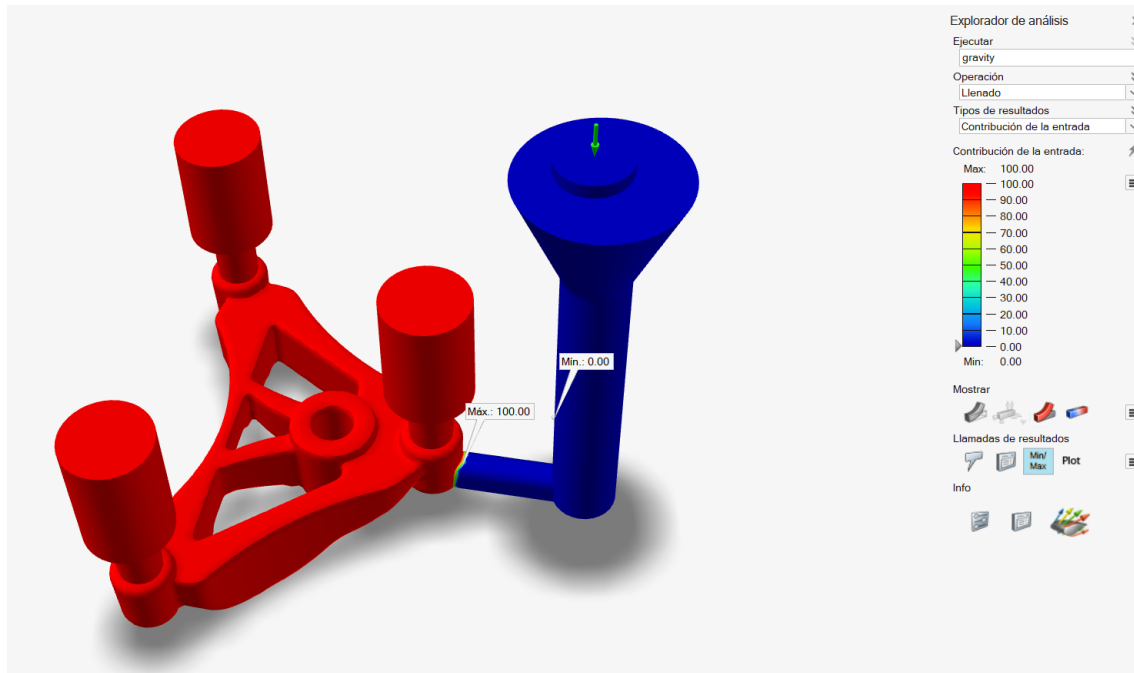


Figura 86: Contribución de la entrada

4.1.4. Fracción sólida:

En la Figura 87, Se identifican las zonas donde se producirá la solidificación. El color rojo indica el metal en estado líquido, lo que significa que no habrá problemas de llenado en esas áreas. Por otro lado, las regiones con colores variados podrían no llenarse completamente, lo que las hace susceptibles a defectos como la solidificación prematura o la colada fría, fenómeno que ocurre cuando el metal no alcanza a llenar totalmente el molde antes de solidificarse.

En el caso de estudio, parece que un tiempo de llenado de 1.5 segundos no está generando este tipo de problemas durante el llenado. Un valor de 0 corresponde a un material completamente líquido, mientras que un valor de 1 corresponde a un material completamente sólido. Y como se puede observar en la figura, los valores de la leyenda de la derecha se encuentran entre 0,00 y 0,18, por lo que todo el material es líquido y no se han producido solidificaciones durante el llenado.

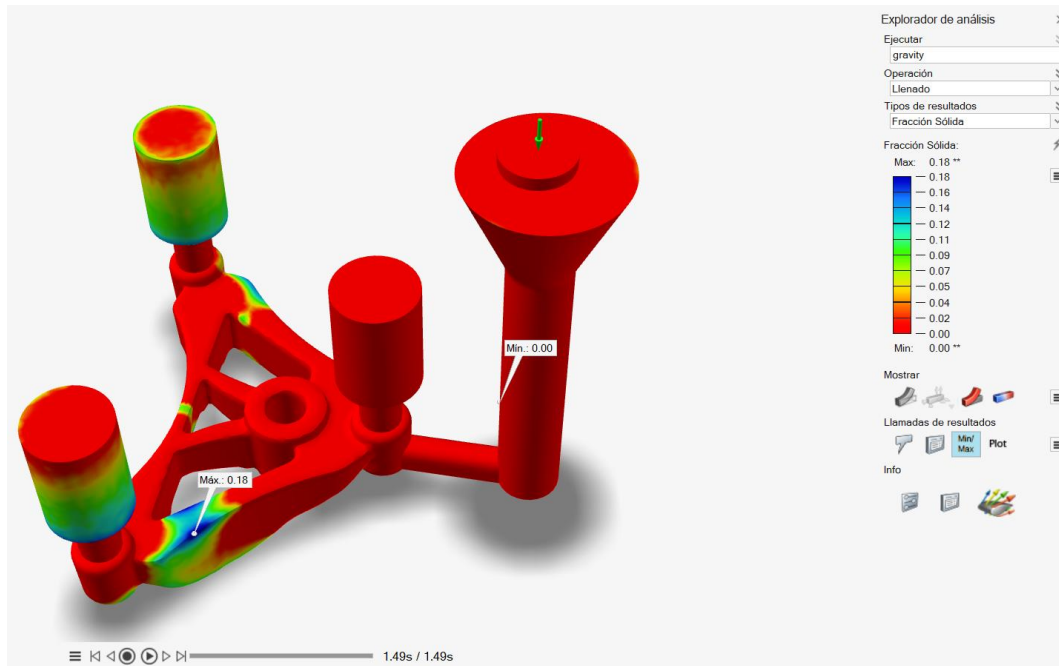


Figura 87: Fracción sólida - Llenado

4.1.5. Velocidad de llenado:

Este resultado permite analizar la velocidad del metal durante el proceso de llenado, lo cual resulta útil para determinar si esta se mantiene de forma uniforme o si presenta variaciones bruscas que puedan generar defectos.

En el caso de estudio la velocidad del fluido se mantiene homogénea en el proceso de llenado de la pieza y de esta manera, se consiguen evitar turbulencias, se reducen las posibilidades de aparición de porosidades y de que algunas partes solidifiquen antes de tiempo (especialmente las zonas más delgadas) [11].

Además, el software permite visualizar el comportamiento del flujo en el proceso de llenado mediante vectores, seleccionando el ícono resaltado en azul en la Figura 88. Esta representación facilita la interpretación de los resultados, permitiendo identificar zonas de interés de manera más intuitiva y visual [30,51].

Según el estudio de Pallo Morocho, E. y Valdivieso Godoy, A. (2019), la velocidad de llenado ideal para fundiciones de aluminio se encuentra entre 0.25 y 0.5 m/s [23]. En el caso de la pieza de estudio, la velocidad de llenado es de 0.28 m/s, por lo que se encuentra dentro del rango mencionado anteriormente. Además, se puede comprobar que los resultados en el llenado de la pieza son buenos, aumentando dicha velocidad únicamente en el canal de llenado.

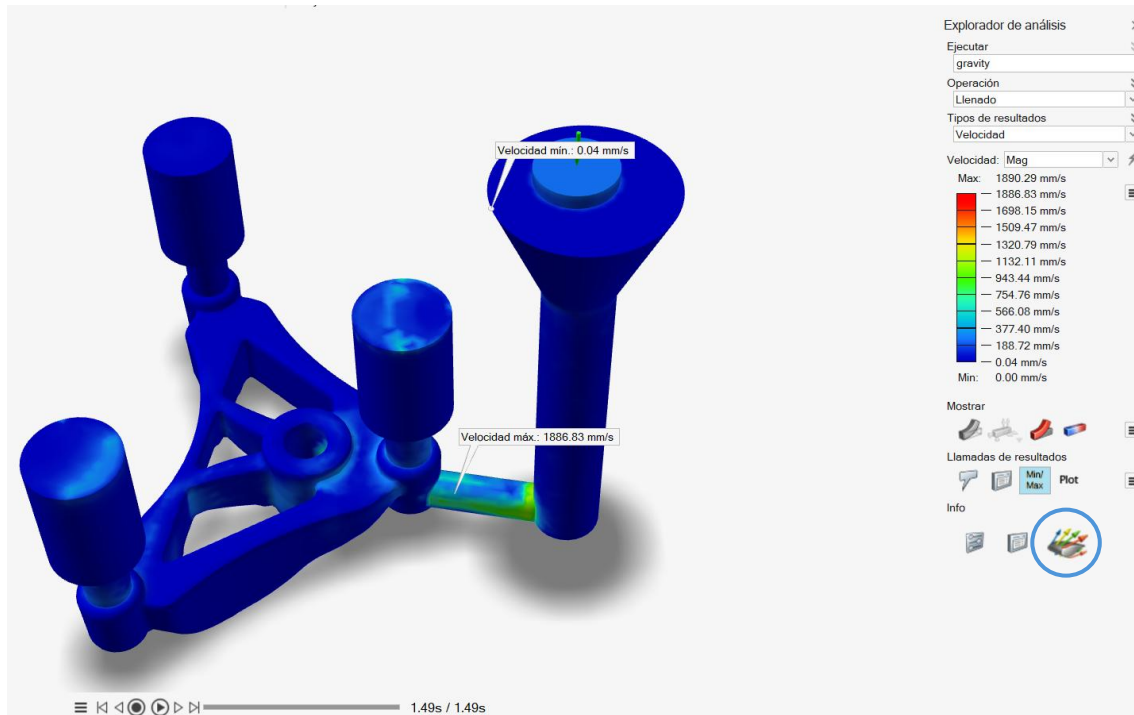


Figura 88: Velocidad de llenado

En la siguiente Figura 89, se pueden observar los resultados de las velocidades representados como vectores. Como se ha mencionado anteriormente, se aprecia como la velocidad es bastante homogénea por toda la pieza excepto en el tramo del canal de llenado justo antes de la entrada. Esta variación se debe al cambio de sección del canal, lo que provoca un aumento en la velocidad del fluido en esa zona.

Este comportamiento se explica por la Ley de Continuidad, la cual establece que, en un flujo incompresible, el caudal debe mantenerse constante, por lo que una disminución en el área de sección implica un incremento en la velocidad [56]. Esto podría causar turbulencias a la entrada del metal fundido en el molde, ya que la velocidad en esa zona es de unos 1.89 m/s, lo cual se aleja del rango ideal que se ha mencionado anteriormente.

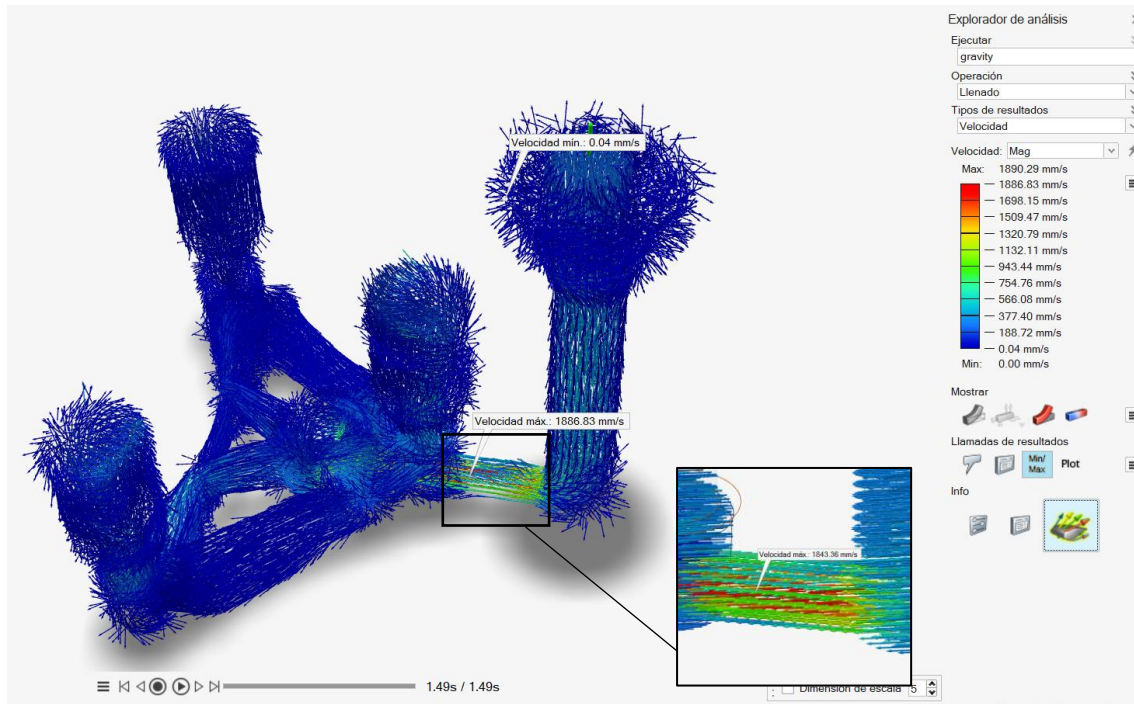


Figura 89: Velocidades - vectores

En el estudio *Modelling the Mechanical Attributes (Roughness, Strength, and Hardness) of Al-alloy A356 during Sand Casting (2020)* se menciona que una velocidad intermedia de 0.35 m/s junto con una temperatura adecuada, propone que una velocidad intermedia (0,35 m/s), junto a una temperatura adecuada (780 °C aprox.) y una humedad adecuada, contribuye a aumentar la dureza y resistencia mecánica [57].

En el caso de la pieza de estudio, la velocidad se encuentra en su mayor parte en estos valores, como se puede apreciar en la figura anterior, por lo que se podría decir que los parámetros seleccionados son adecuados para la pieza en cuestión.

4.1.6. Aire atrapado:

Permite visualizar las últimas áreas en llenarse para poder predecir dónde pueden formarse burbujas de aire. A partir de esta información, se pueden reubicar los rebosaderos para prevenir la porosidad [3].

Las burbujas de aire afectan más a los procesos de fundición a presión que a los moldes de arena, ya que estos últimos son menos susceptibles a la porosidad debido a la permeabilidad de la arena [3,58].

En la Figura 90, se observa que el aire restante está siendo mayormente atrapado en las mazarotas y el canal de llenado. Por tanto, se comprueba que, tal y como se explicó anteriormente, las mazarotas contribuyen a un mejor llenado de la pieza y a prevenir defectos de este tipo.

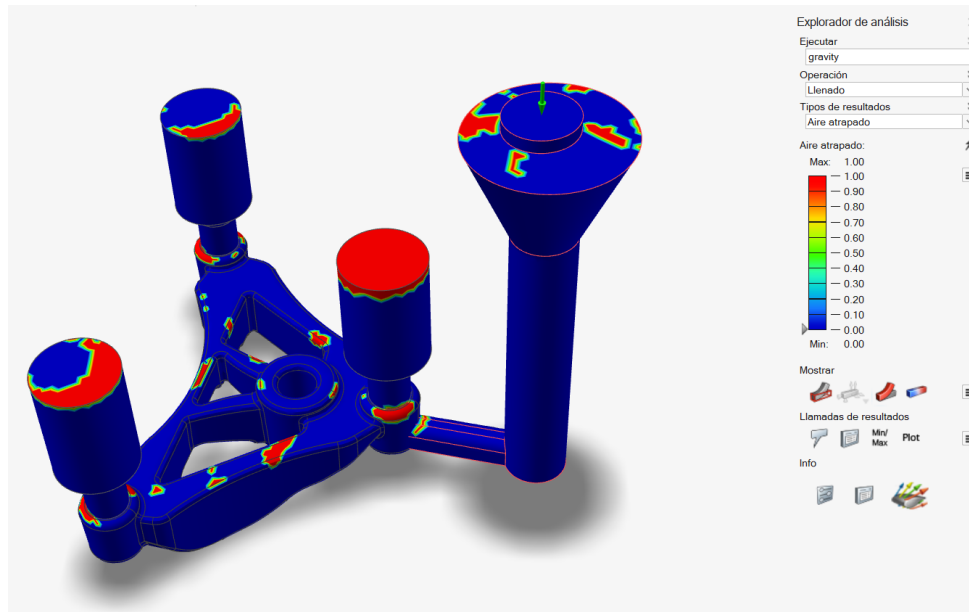


Figura 90: Aire atrapado

4.1.7. Tiempo de llenado:

Se muestra el tiempo que tarda el material en alcanzar las diferentes áreas dentro de la pieza y también es útil para analizar el comportamiento del líquido al entrar en el molde.

En la Figura 92, se pueden ver las diferencias del tiempo de llenado entre el canal de llenado, la pieza y las mazarotas. Como se puede apreciar, las mazarotas es lo último en llenarse por completo, mientras que el tiempo de llenado de la pieza se podría decir que es homogéneo, de esta manera se consigue evitar que especialmente las zonas delgadas solidifiquen antes de tiempo y que se produzcan defectos de porosidad.

En el estudio realizado por el equipo de Altair Inspire Cast y que se muestra en uno de sus tutoriales, gracias a este resultado, se consigue comprobar la necesidad de cambiar la posición de la entrada del material. Como se puede observar en la Figura 91, hay diferencias significativas del tiempo de llenado de las diferentes zonas de la pieza, lo que podría dar lugar a defectos no deseados [30], esto en comparación con la pieza de estudio de este trabajo, no ocurre de esta manera, por lo que el tiempo de llenado es correcto y no sería necesaria su modificación.

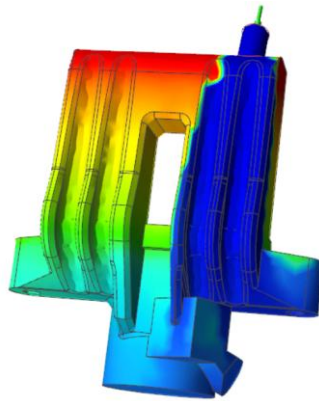


Figura 91: Ejemplo de tiempo de llenado inadecuado [30]

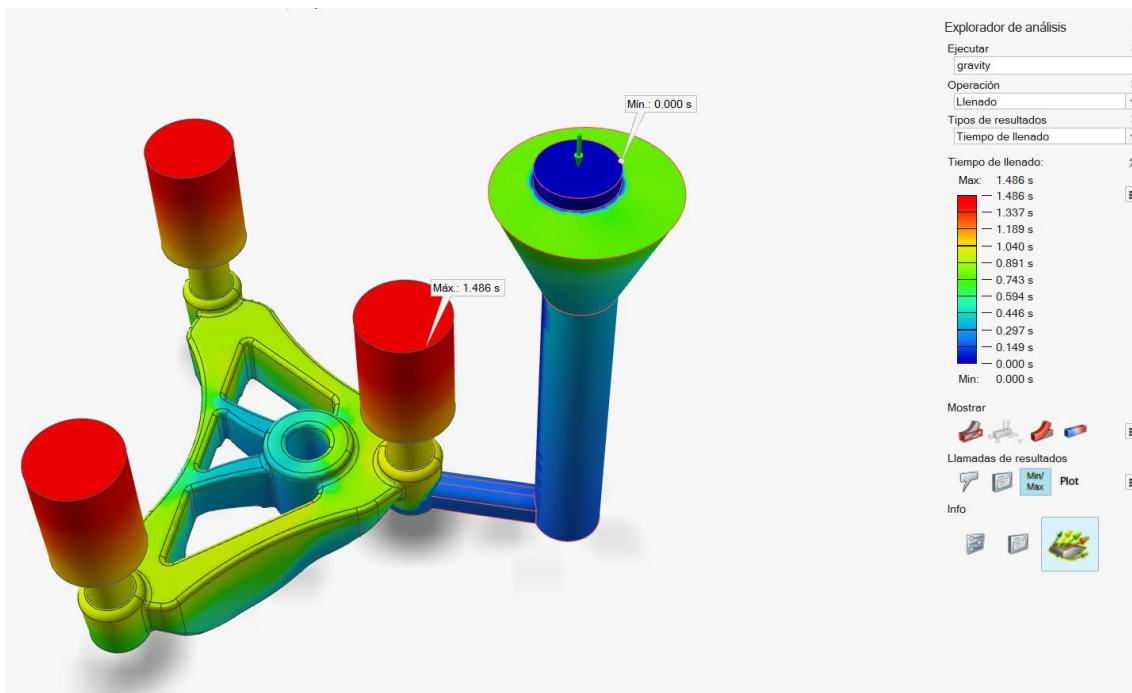


Figura 92: Tiempo de llenado

4.1.8. Evolución del aire:

Se observa la evolución del aire en color azul dentro del molde a medida que se realiza el proceso de llenado. En la Figura 93, se aprecia dicha evolución en 3 tiempos distintos, 0,50, 0.80 y 1,00 segundos.

Como se ha mencionado anteriormente en el apartado de tiempo de llenado, las mazarotas es lo último en llenarse por completo, por lo que son las zonas donde se encontrará el aire hasta una vez terminar el proceso.

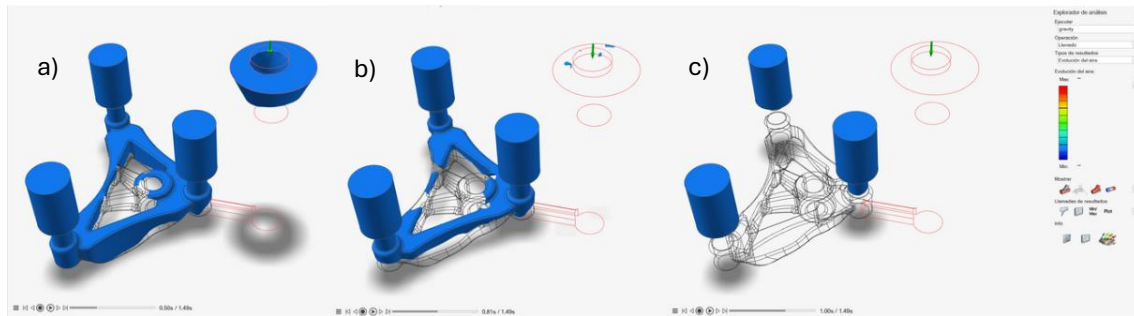


Figura 93: Evolución del aire. a) 0.50 s. b) 0.80 s. c) 1,00 s

4.1.9. Temperatura del molde:

Se observa la evolución de la temperatura del molde durante el proceso de llenado. Gracias un plano de corte, en la Figura 94, se puede ver como efectivamente las zonas con una mayor temperatura se encuentran próximas a la pieza, mientras que el resto del molde se mantiene a una temperatura de unos 293.15 K (20°C).

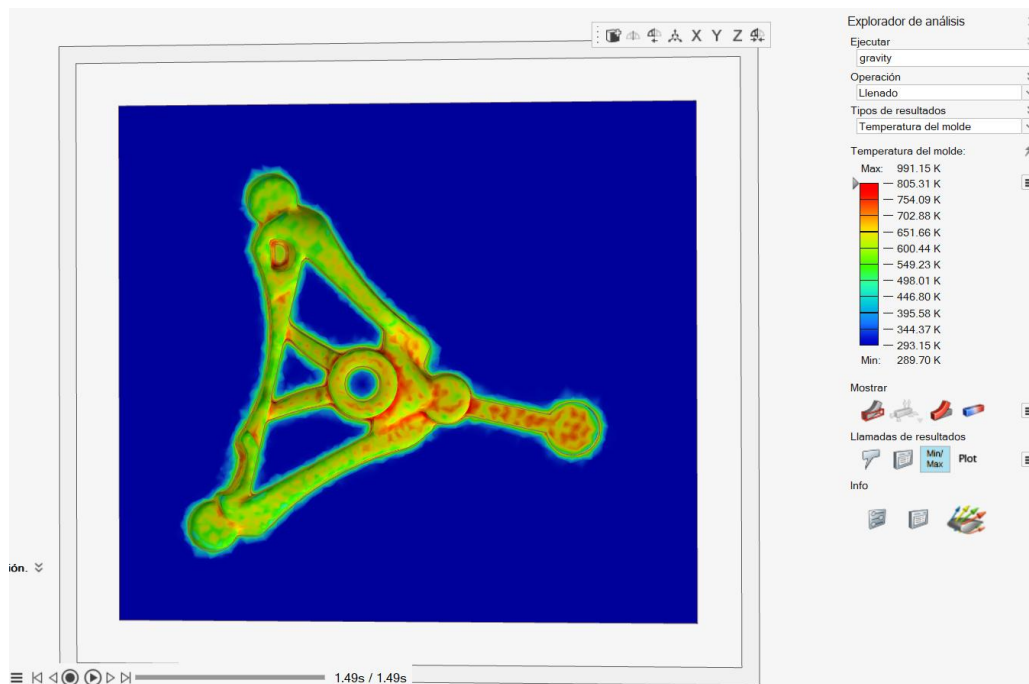


Figura 94: Temperatura del molde

4.2. RESULTADOS SOLIDIFICACIÓN:

4.2.1. Temperatura:

Se pueden observar los cambios de temperatura durante el proceso de solidificación. Como el llenado fue calculado previamente, las temperaturas de solidificación se inician a partir de los valores finales obtenidos durante dicho llenado.

En la Figura 95, se observa una disminución homogénea de la temperatura en toda la pieza de estudio, lo cual indica un proceso de enfriamiento uniforme. Esta condición

favorece una solidificación controlada y reduce el riesgo de generar tensiones internas, porosidad o defectos asociados a gradientes térmicos pronunciados [3,58].

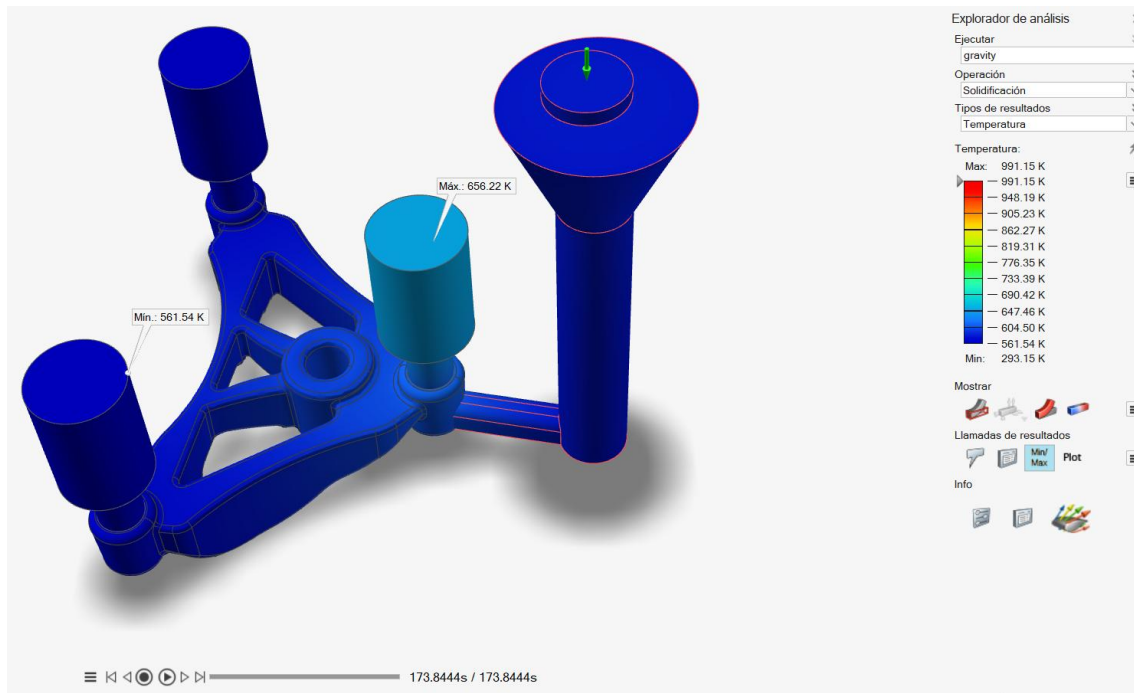


Figura 95: Temperatura de solidificación final

En la siguiente Figura 96, se muestra la evolución de la temperatura de solidificación en tres tiempos diferentes donde se puede apreciar el enfriamiento uniforme de la pieza mencionado anteriormente.

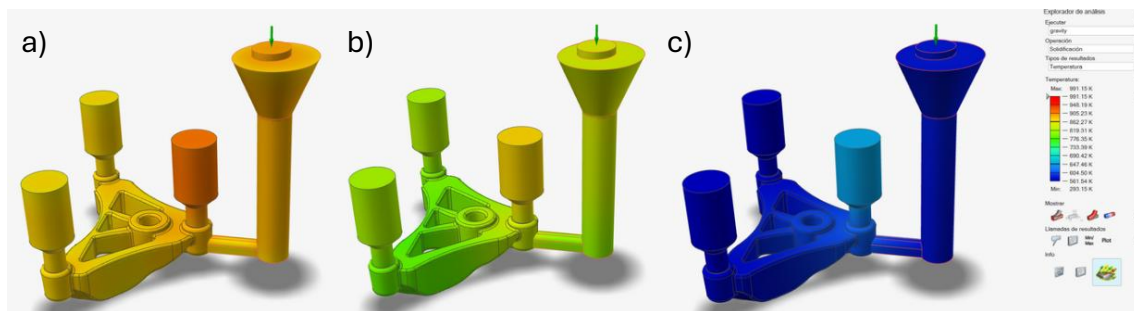


Figura 96: Evolución de la temperatura de solidificación. a) 25 segundos, b) 80 segundos, c) 1.5 segundos

4.2.2. Fracción sólida:

Los resultados de la Fracción Sólida permiten entender el comportamiento de la solidificación dentro de la pieza. El valor predeterminado de 0.7 corresponde al punto en el que, en la mayoría de los casos, el líquido deja de fluir.

El material solidificado (por encima de 0.7) se muestra transparente, mientras que el material líquido (por debajo de 0.7) se muestra de color según la escala que se puede apreciar en la parte derecha de la Figura 97.

Se puede observar cómo las mazarotas alimentan material a la zona superior de la pieza durante la solidificación. Como se mencionó en apartados anteriores, actúan como reservas de material fundido que compensan la contracción de material, evitando la formación de porosidad o rechupes en la pieza final [46,58].

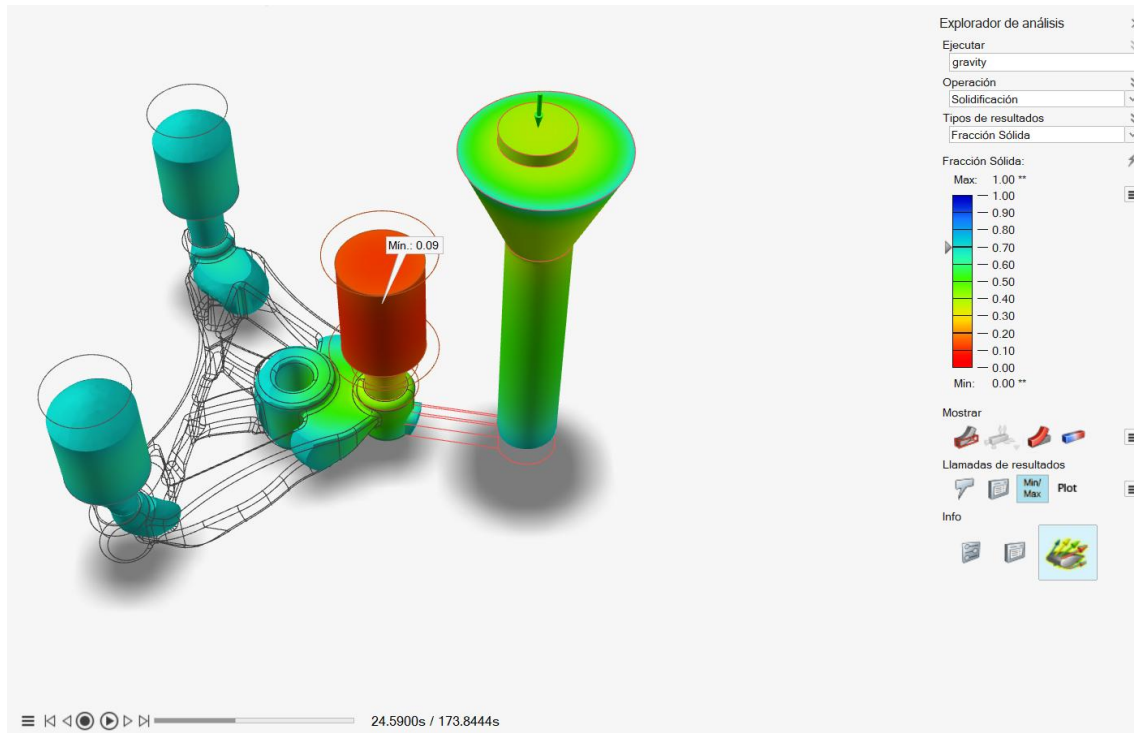


Figura 97: Fracción sólida – Solidificación

Al disminuir la temperatura, los materiales fundidos se solidifican. Esto provoca defectos en la colada, como las cavidades por contracción o rechupes, ya que la colada se solidifica desde la superficie externa hacia el interior, mientras que la contracción volumétrica no puede ser compensada [59].

Con este estudio se confirma que las mazarotas son las últimas zonas en solidificarse durante el proceso de colada. Debido a esto, las contracciones volumétricas y los defectos de porosidad se concentran principalmente en estas áreas, en lugar de afectar la pieza final. Esto es beneficioso, ya que las mazarotas y sus defectos asociados pueden ser fácilmente eliminados después del proceso, asegurando que la pieza terminada tenga una menor presencia de defectos internos.

4.2.3. Tiempo de solidificación:

El análisis del tiempo de solidificación en las diferentes zonas de la pieza es fundamental para entender el comportamiento térmico durante el proceso de colada. Esta

información es clave porque permite identificar las áreas que se solidifican primero, las cuales suelen ser más propensas a defectos como la colada fría.[4].

En la pieza de estudio, se puede observar que la zona marcada en verde en la Figura 98, es una de las primeras zonas en solidificar. Esto implica que existe un mayor riesgo de formación de defectos en esta área, ya que el material puede enfriarse y solidificarse antes de que el metal fundido alcance correctamente esa región. Conocer esta información es crucial para implementar estrategias de diseño o ajustes en el proceso que permitan mejorar la alimentación y evitar defectos, garantizando así una mejor calidad final de la pieza.

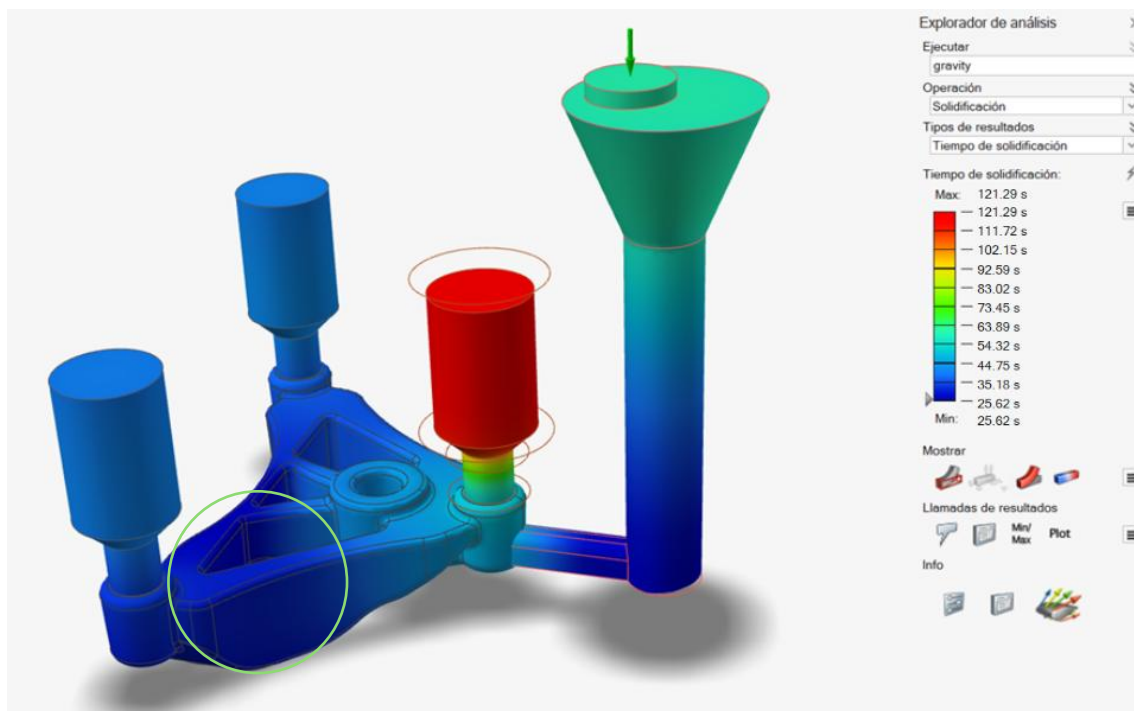


Figura 98: Tiempo de solidificación

4.3. RESULTADOS DESMOLDANDO:

4.3.1. Microporosidad:

La microporosidad en la fundición está estrechamente relacionada con el criterio de Niyama mencionado anteriormente, utilizado para predecir la formación de porosidad durante la solidificación de las piezas fundidas [50,58].

En el caso de estudio, en la Figura 99, donde la leyenda indica un 2.09 % de microporosidad (casi el valor máximo). Sin embargo, este resultado debe interpretarse de forma positiva, ya que la mayor parte de la microporosidad se localiza en las mazarotas y en el canal de llenado, elementos auxiliares del sistema de alimentación que están diseñados precisamente para absorber estos defectos. Al ser retirados tras el

proceso de fundición, la microporosidad no afecta directamente a la pieza útil, lo cual indica que el diseño del sistema de alimentación cumple su función correctamente [32].

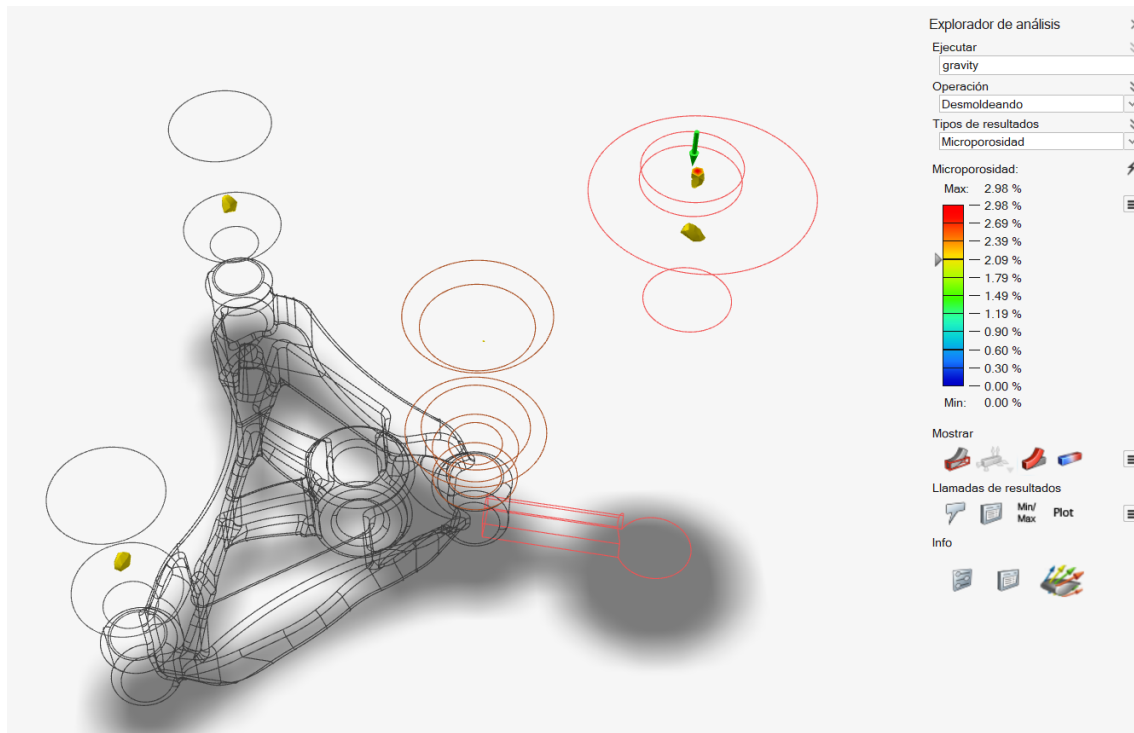


Figura 99: Microporosidad

4.3.2. Porosidad:

Se sabe que la porosidad por contracción ocurre cuando se interrumpe la alimentación del metal debido a diversas causas que provocan una solidificación temprana del metal fundido en la mazarota, lo que afecta el proceso de alimentación en general [59].

En la Figura 100, se puede observar que, gracias al uso de las mazarotas, su colocación en lugares estratégico y diseño, los defectos de porosidad o rechupes se trasladan a la parte superior de estas. Esta es la porosidad macro o porosidad por contracción, también conocida como rechupes, los cuales perjudican la resistencia y la estética de la pieza [3,46]. Las mazarotas reducen la formación de porosidad, ya que el metal líquido puede compensar la contracción que ocurre al solidificarse [59]. Se puede decir en base a esto que la mazarota esté correctamente dimensionada según la regla de Chvorinov mencionada anteriormente y que se obtienen resultados en concordancia con la literatura consultada para la realización de este estudio [46].

Después del proceso de fundición y de la solidificación, las mazarotas y el sistema de colada serán retirados, por lo que la pieza útil quedará libre de defectos, lo que garantiza una vez más la importancia del diseño del canal de llenado y mazarotas [60].

Este parámetro es uno de los más importantes ya que nos permite revisar las zonas donde la proporción de vacíos respecto a las zonas sólidas es mayor o igual al valor porcentual especificado en la leyenda de colores de la derecha de la Figura 100. Al igual que ocurre con los resultados de microporosidad, se puede seleccionar el valor de interés [%] en dicha escala, se ha marcado un valor del 90%.

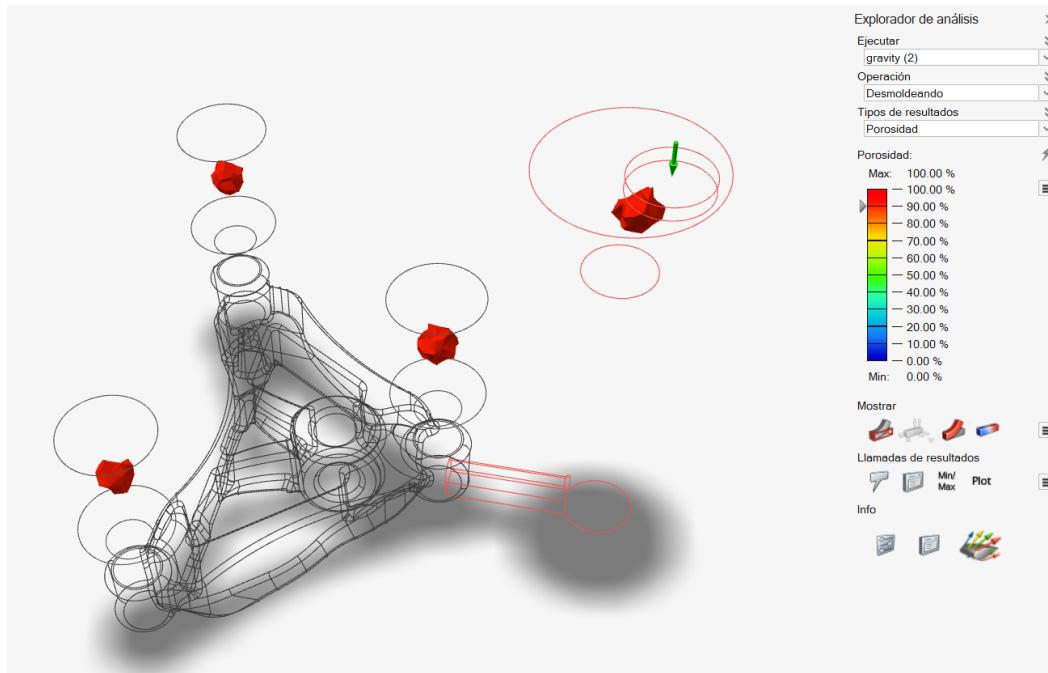


Figura 100: Porosidad

Existen más resultados que se pueden analizar gracias al software Inspire Cast, como por ejemplo Niyama, uniones frías, el volumen de contracción total, el módulo de solidificación, la erosión del molde, etc.

4.4. COMPARACIÓN ENTRE PIEZA CON MAZAROTAS Y SIN MAZAROTAS:

A continuación, se compararán los resultados más relevantes obtenidos en los procesos de fundición en molde de arena de la pieza con mazarotas y de la pieza sin mazarotas.

4.4.1. Temperatura:

En la siguiente Figura 101, se aprecia de forma clara cómo varía la temperatura de llenado en los dos casos de estudio analizados, lo cual es un aspecto fundamental en la calidad del proceso de fundición. Observamos que, en la parte izquierda de la imagen (correspondiente a la pieza con mazarotas), la temperatura del metal fundido durante el llenado se mantiene en un rango adecuado y relativamente homogéneo, entre 991,15 K

y 921 K (equivalentes a 718 y 650 °C). Este comportamiento favorece una buena fluidez del metal, lo que a su vez permite que el molde se llene de manera uniforme y completa.

Por otro lado, si observamos la pieza sin mazarotas (a la derecha), se ve que la temperatura durante el llenado no solo es menos uniforme, sino que además presenta valores por debajo del rango óptimo, con temperaturas que oscilan entre 877,80 K y 934,48 K (604,65 y 661,33 °C). Esto puede llevarnos a pensar en posibles dificultades para que el metal fundido fluya correctamente a través del molde, lo que podría provocar defectos como zonas sin llenar, inclusiones, que serán detallados a continuación.

Esta desviación del rango óptimo puede comprometer la fluidez del metal, dificultando así un llenado completo y adecuado del molde [19].

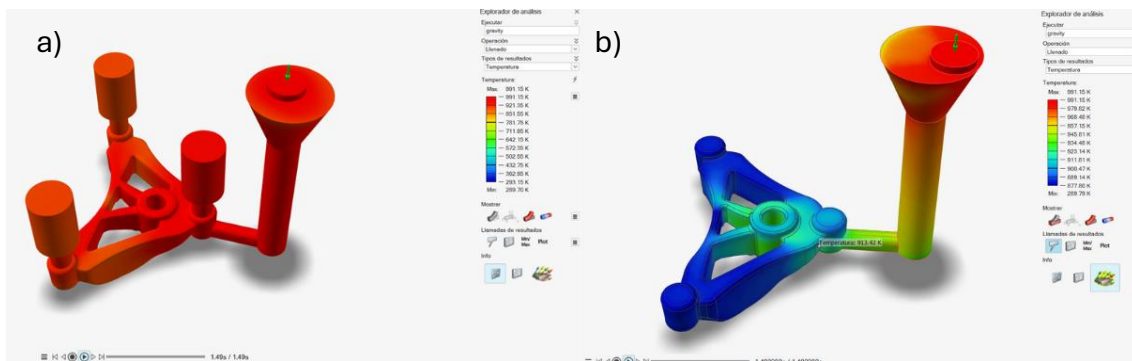


Figura 101: Comparación temperatura de llenado. a) Pieza con mazarotas. b) Pieza sin mazarotas.

4.4.3. Aire atrapado:

En la Figura 102, se puede apreciar una clara diferencia en la distribución del aire atrapado entre los dos escenarios analizados: una pieza con mazarotas y una sin ellas. En el primer caso, es decir, en la pieza que incorpora mazarotas en su diseño, se observa que la mayor parte del volumen de aire atrapado durante el proceso de llenado se concentra precisamente en estas cavidades auxiliares. Este comportamiento evidencia una de las funciones adicionales que cumplen las mazarotas, más allá de alimentar la pieza durante la solidificación: actúan también como cámaras de alivio o zonas de evacuación de gases, permitiendo que el aire desplazado por el metal fundido tenga un espacio donde acumularse sin afectar directamente al cuerpo útil de la pieza.

Por otro lado, en la simulación correspondiente a la colada sin mazarotas, una proporción considerable del aire atrapado queda retenida dentro de la geometría de la pieza final. Esta acumulación de aire puede generar defectos internos como porosidades, inclusiones gaseosas o discontinuidades superficiales, que como se comprobará a continuación, efectivamente se produjeron. Estos defectos comprometen seriamente la integridad mecánica del componente y demás propiedades [42].

Este análisis comparativo confirma que la presencia de mazarotas puede desempeñar un papel clave en el control de defectos asociados a la presencia de gases durante el proceso de fundición, tal y como señalaba literatura consultada [42,44].

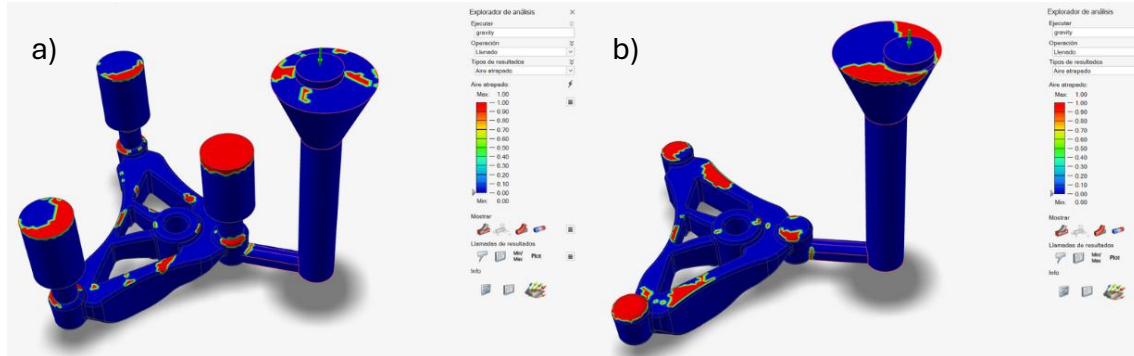


Figura 102: Comparación aire atrapado. a) Pieza con mazarotas. b) Pieza sin mazarotas.

4.4.4. Tiempo de llenado:

El tiempo de llenado se mantiene constante en ambas piezas, dado que se trata de un parámetro preestablecido en el análisis de simulación, lo que permite una comparación directa y objetiva entre los dos casos de estudio. No obstante, al observar la Figura 103, se identifican diferencias significativas en la dinámica del llenado de la pieza útil final con mazarotas y la pieza útil final sin ellas.

En la configuración con mazarotas, el proceso de llenado en la zona correspondiente a la pieza útil ocurre de forma más uniforme y controlada, concentrándose en un intervalo estrecho de tiempo, comprendido entre 0,80 y 1,00 segundos, mientras que, en la pieza sin mazarotas, el rango es considerablemente más amplio (0,40 – 1,34 segundos).

Esta mayor variabilidad puede provocar que ciertas zonas solidifiquen antes que otras, dificultando un llenado completo y homogéneo del molde, lo que puede ocasionar rechupes y coladas frías que afectarán a las propiedades mecánicas de la pieza. Es por esto que no solo es importante el tiempo total de llenado, sino también la distribución temporal del material dentro del molde para conseguir buenos resultados [3].

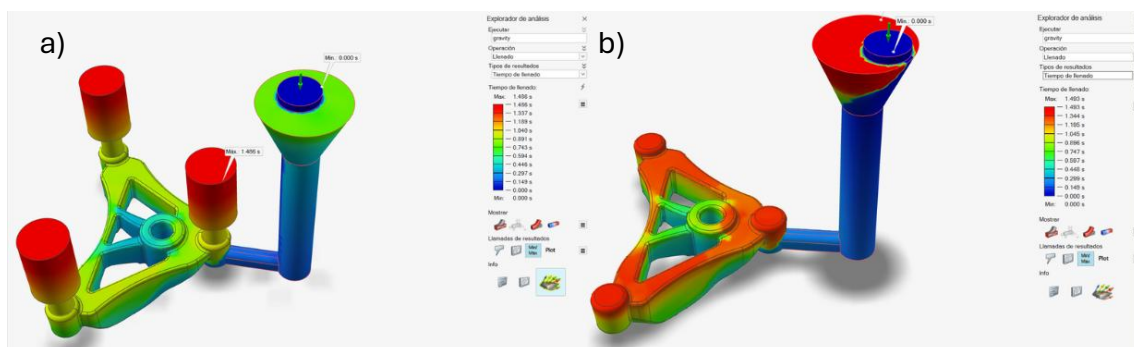


Figura 103: Comparación tiempo de llenado. a) Pieza con mazarotas. b) Pieza sin mazarotas.

4.4.5. Microporosidad:

Los valores fijados en la leyenda que muestra el porcentaje de microporosidad indican un valor de 2.09 %, el cual se encuentra muy cercano al valor máximo registrado en la simulación para ambos casos de estudio, en torno al 2.90 %. Este dato inicial ya nos permite anticipar la presencia de zonas críticas dentro del volumen del molde, que si se compara con el tiempo de llenado detallado anteriormente, en ambos casos coinciden.

Al igual que en el caso del aire atrapado, en la pieza con mazarotas la mayor concentración de microporosidad se localiza principalmente en las propias mazarotas y en el bebedero. Esto contrasta con lo observado en la pieza sin mazarotas, donde dichos defectos se distribuyen en zonas críticas de la pieza útil (Figura 104).

Esta diferencia evidencia el papel fundamental de las mazarotas como elementos de control de defectos internos. Si bien no eliminan completamente la microporosidad, sí la concentran en zonas diseñadas para tal fin, alejándola de la pieza útil y sus zonas funcionales de esta, reduciendo así su impacto en la calidad final del componente [3].

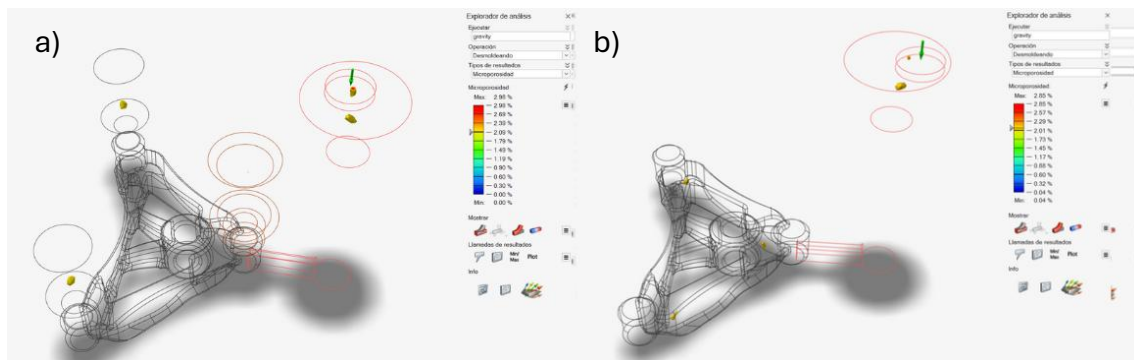


Figura 104: Comparación microporosidad. a) Pieza con mazarotas. b) Pieza sin mazarotas.

4.4.6. Porosidad / rechupes:

Los resultados obtenidos en relación con la porosidad por contracción (también conocida como rechupes) presentan una tendencia coherente con lo ya observado en los análisis previos de aire atrapado y microporosidad. En el modelo correspondiente a la pieza con mazarotas, se observa que estos defectos se concentran mayoritariamente en las mazarotas y en el bebedero, mientras que, en la pieza sin mazarotas, estos se localizan tanto en el bebedero como en el cuerpo de la pieza de estudio, lo cual representa un riesgo considerable para su integridad estructural y funcional (Figura 105).

Se verifica que las mazarotas son elementos esenciales en el proceso de fundición de metales para compensar la contracción durante la solidificación suministrando metal para eliminar la porosidad y los defectos causados por la contracción [12].

En este caso particular, los resultados indican que es posible eliminar por completo este tipo de defectos en la pieza final mediante el uso de mazarotas. Por tanto, se vuelve a poner de manifiesto la eficacia de estos componentes en los procesos de fundición en molde de arena, especialmente cuando se trabaja con geometrías complejas.

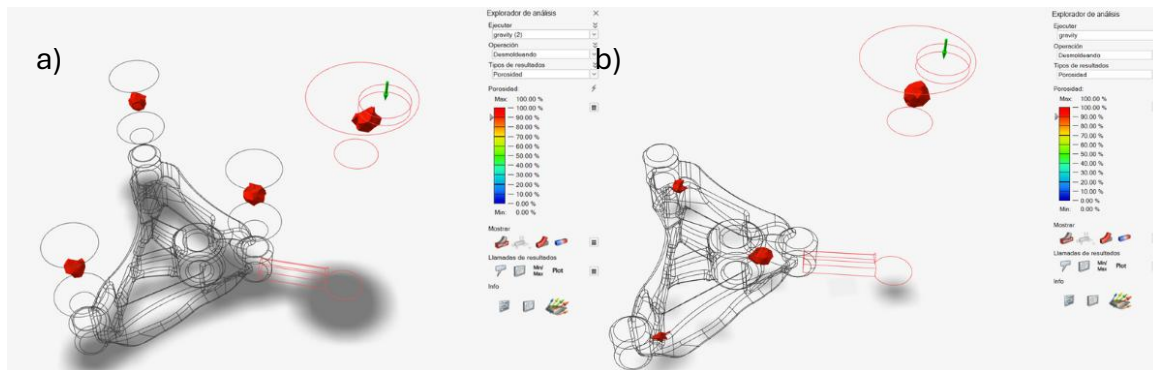


Figura 105: Comparación porosidad (rechupe). a) Pieza con mazarotas. b) Pieza sin mazarotas.

Por tanto, el estudio no solo valida lo que se ha descrito previamente en la literatura consultada y la eficacia de las mazarotas en moldes de arena, sino que también aporta una herramienta valiosa para el aprendizaje y la enseñanza del diseño de sistemas de alimentación, al demostrar cómo decisiones estratégicas en la etapa de diseño pueden tener un impacto directo en la calidad y funcionalidad del producto final.

4.5. COMPARACIÓN PIEZA CON MAZAROTAS Y CANAL DE LLENADO Y PIEZA SIN CANAL DE LLENADO:

4.5.1. Temperatura:

Siguiendo la misma línea de análisis de las comparaciones anteriores, se observa una diferencia significativa en la temperatura del metal durante el proceso de llenado entre los distintos casos de estudio, pieza con mazarotas y canal de llenado versus pieza sin mazarotas y con entrada directa de metal (es decir, sin canal de llenado), Figura 106.

En el caso de la pieza con entrada directa, la temperatura del metal durante el llenado oscila entre 991,15 K y 878,75 K (equivalentes a 718,60 °C y 605,60 °C), lo que indica una mayor pérdida térmica durante el trayecto del metal fundido. Esta situación contrasta con los valores obtenidos en la pieza con mazarotas y canal de llenado, donde la temperatura se mantiene en un rango más elevado y estable, entre 991,15 K y 921 K (es decir, 718,60 °C y 650,00 °C) gracias al uso de mazarotas y camisa isotérmica.

Tal como se ha argumentado en secciones anteriores, el uso de mazarotas y un sistema de colada adecuado no solo favorece una alimentación controlada del molde, sino que también contribuye a mantener una mayor temperatura del metal en las etapas críticas del llenado, lo que retrasa la solidificación en zonas estratégicas del molde, como por ejemplo las zonas laterales más delgadas. En consecuencia, la presencia de mazarotas no solo actúa como reservorio de metal líquido para compensar la contracción, sino que también retarda la solidificación en las zonas donde se requiere un mayor tiempo de alimentación, asegurando así una colada más eficiente y libre de defectos.

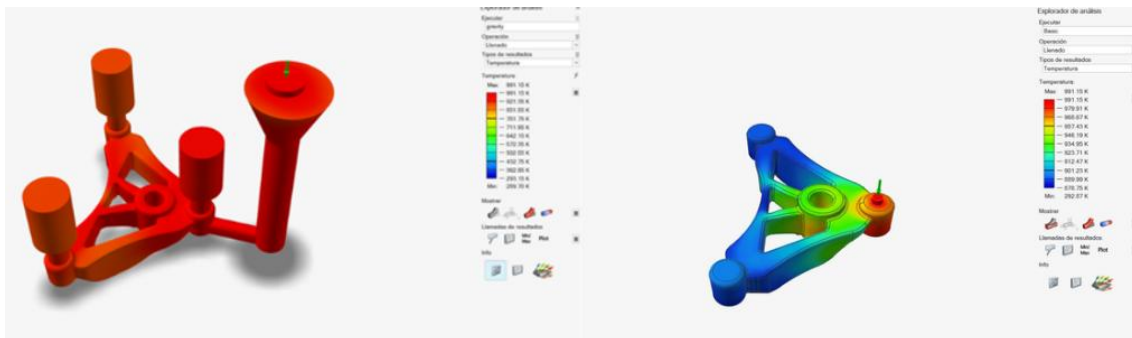


Figura 106: Comparación Temperatura de llenado. a) Pieza con mazarotas y canal de llenado, b) Pieza con entrada directa y sin mazarotas.

4.5.2. Aire atrapado:

La Figura 107 permite visualizar de manera clara la diferencia en la distribución del aire atrapado entre dos configuraciones, una que incorpora mazarotas y otra que prescinde de ellas y de sistema de llenado. En la pieza que incluye mazarotas en su diseño, se evidencia que el mayor volumen de aire atrapado durante el llenado se concentra en estas estructuras auxiliares. Este comportamiento no solo reafirma su función principal como reservorios de alimentación durante la solidificación, sino que también pone de manifiesto que las mazarotas actúan como zonas de descarga de gases, facilitando que el aire desplazado por el metal fundido se aloje fuera del volumen útil de la pieza [4].

En el caso de la pieza que no cuenta con canal de llenado ni mazarotas, se observa que la totalidad del aire atrapado queda retenida en el cuerpo útil de la pieza final. Esta situación se debe a la ausencia de elementos auxiliares, que faciliten la reubicación o evacuación de los gases durante el proceso de llenado como el canal de llenado o las mazarotas. Además, tal como se indicó previamente en la sección de Antecedentes, el uso de una entrada directa puede generar turbulencias significativas, lo que a su vez incrementa la cantidad de aire atrapado y, por ende, la probabilidad de defectos como porosidades o inclusiones gaseosas [40].

En definitiva, este análisis comparativo pone de manifiesto la importancia de diseñar adecuadamente el sistema de alimentación en los procesos de fundición. Las mazarotas no solo cumplen una función esencial como reservorios de alimentación durante la solidificación, sino que también actúan como mecanismos eficaces para controlar la acumulación de gases. Del mismo modo, un canal de llenado bien diseñado contribuye a reducir la turbulencia del flujo de metal fundido, minimizando fenómenos como la caída libre. Estos resultados concuerdan con la información detallada en la literatura [36,38].

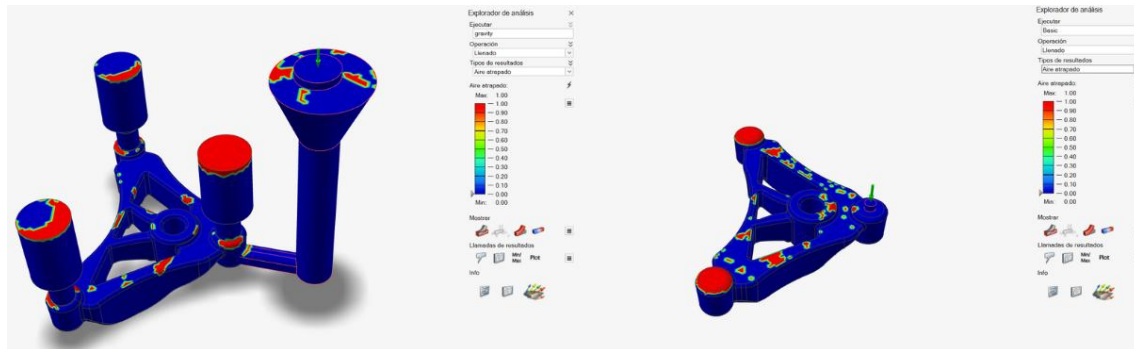


Figura 107: Comparación aire atrapado. a) Pieza con mazarotas y canal de llenado, b) Pieza con entrada directa y sin mazarotas

4.5.3. Tiempo de llenado:

De la misma manera que ocurre en la comparación realizada en el punto 4.4.4, en la configuración con mazarotas, el proceso de llenado en la zona correspondiente a la pieza útil ocurre de forma más uniforme y controlada, concentrándose en un intervalo, comprendido entre 0,80 y 1,00 segundos, mientras que, en la pieza sin mazarotas y sin canal de llenado, se emplea el tiempo completo establecido en los parámetros detallados en la metodología en el llenado de la pieza (Figura 108).

El tiempo de llenado es un factor muy importante, puede causar solidificaciones desiguales, dificultando un llenado uniforme del molde y generando defectos como rechupes o coladas frías, los cuales comprometen las propiedades mecánicas de la pieza. Por ello, no solo importa el tiempo total de llenado, sino también cómo se distribuye el metal durante este proceso [3,40].

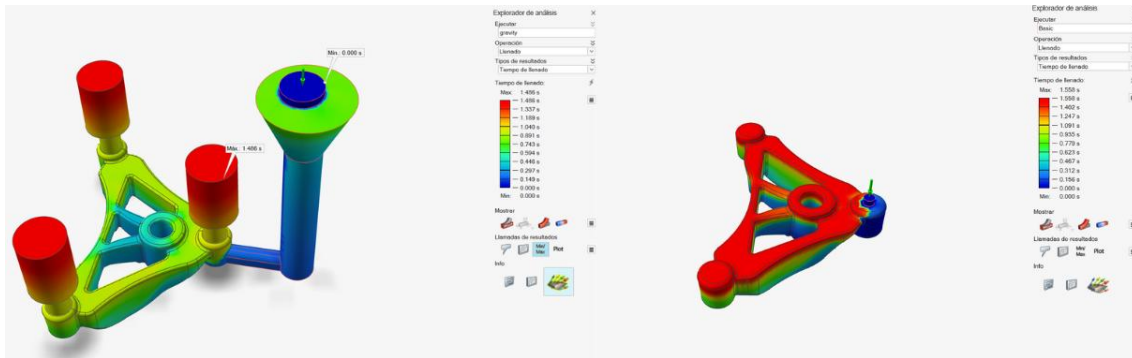


Figura 108: Comparación tiempo de llenado. a) Pieza con mazarotas y canal de llenado, b) Pieza con entrada directa y sin mazarotas

4.5.4. Microporosidad:

En cuanto a los resultados obtenidos con respecto a la microporosidad, en la Figura 109, se observa una continuidad con los resultados obtenidos en la comparación anterior. En la nueva configuración de la pieza sin canal de llenado ni mazarotas, los defectos de microporosidad aparecen en la pieza útil final. Para esta comparación también se ha mantenido el valor de 2.09 % cercano al valor máximo. Esta patrón en los valores obtenidos, refuerza la tendencia observada previamente y confirma la influencia negativa que tiene la ausencia de mazarotas (y ahora también de un canal de colada adecuado) en el control de defectos internos durante el proceso de fundición [46].

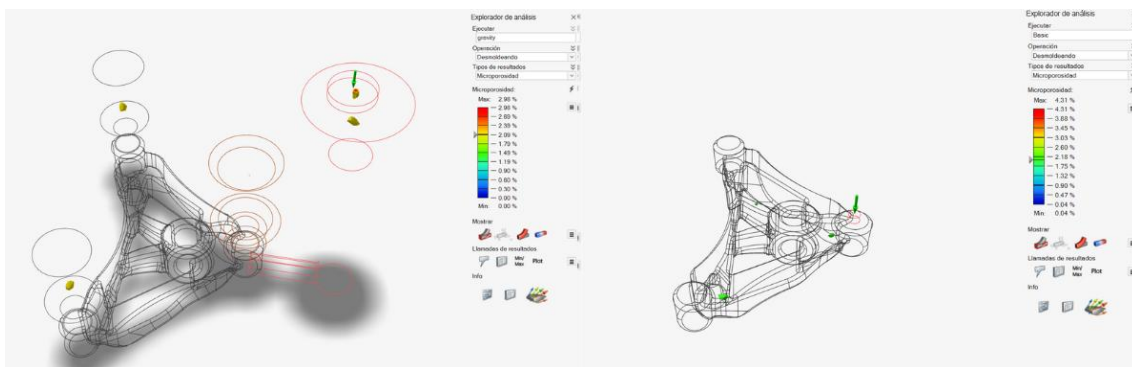


Figura 109: Comparación microporosidad. a) Pieza con mazarotas y canal de llenado, b) Pieza con entrada directa y sin mazarotas

4.5.5. Porosidad:

Por último, los resultados relacionados con la porosidad o rechupes evidencian la presencia de estos defectos en ambas piezas analizadas (Figura 110). No obstante, en la pieza sin mazarotas ni canal de llenado, los rechupes se localizan directamente en la pieza final, lo que implica que permanecerán en zonas funcionales del componente, pudiendo originar cavidades internas que comprometen tanto sus propiedades mecánicas como su funcionalidad [49].

Además, se ha identificado que los puntos críticos donde se concentra la porosidad coinciden con las zonas que tardan más en solidificarse, lo que confirma que la contracción del metal ocurre principalmente en estas áreas [49].

Este comportamiento reafirma el papel esencial que desempeñan las mazarotas dentro del sistema de alimentación en la fundición de metales [41]. Su función principal es compensar la contracción volumétrica del metal fundido durante la solidificación, aportando metal líquido de manera controlada hacia las regiones que aún no han completado la transformación de fase. Gracias a esta aportación térmica y material, se minimiza significativamente la aparición de cavidades internas por falta de alimentación, mejorando así la calidad estructural del componente final [41,55].

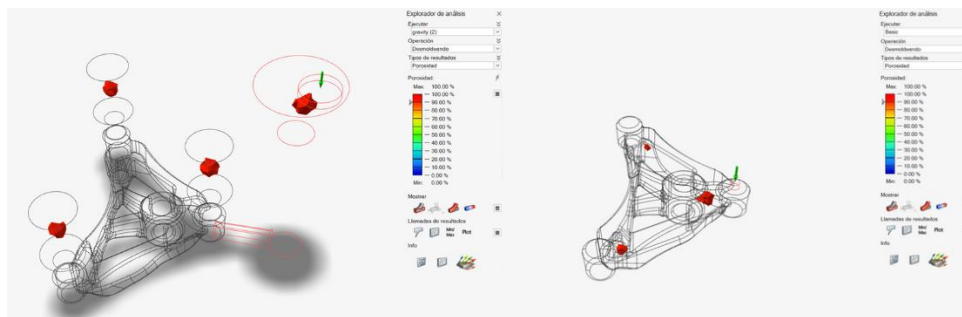


Figura 110: Comparación porosidad. a) Pieza con mazarotas y canal de llenado, b) Pieza con entrada directa y sin mazarotas

Este comportamiento reafirma el papel fundamental que desempeñan las mazarotas como elementos esenciales del sistema de alimentación en fundición de metales. Se ha confirmado que su función principal consiste en compensar la contracción volumétrica del metal fundido al solidificarse, suministrando metal líquido de forma controlada hacia las zonas que aún no han completado la transformación de fase [41]. Gracias a este aporte térmico y material, se reduce significativamente la aparición de cavidades internas por falta de alimentación, conocidos como rechupes, mejorando la calidad interna del componente final y por tanto sus propiedades mecánicas [55].

A continuación, se presenta la Tabla 12 en la que se recopilan las diferentes imágenes de los resultados previamente comentados. Esta tabla permite visualizar de forma más clara y directa las diferencias entre los tres casos analizados. Gracias a esta comparación visual, es posible apreciar con mayor detalle cómo influye cada configuración en la aparición de defectos.

- Pieza A: Pieza con canal de llenado, tres mazarotas y un manguito.
- Pieza B: Pieza con canal de llenado, sin mazarotas y sin manguito.
- Pieza C: Pieza sin canal de llenado, sin mazarotas y sin manguito.

Tabla 12: Resumen comparativo de resultados de los tres casos de estudio.

	Pieza A	Pieza B	Pieza C
Temperatura			
Aire atrapado			
Tiempo de llenado			
Microporosidad			
Porosidad			



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Estudio y simulación de procesos
de fundición en molde de arena



5. CONCLUSIONES:

Se pueden extraer las siguientes conclusiones de los resultados comentados anteriormente:

- Se ha comprobado la facilidad de uso de la herramienta Altair Inspire Cast, destacando su interfaz intuitiva que permite a usuarios, incluso con poca experiencia previa, realizar simulaciones complejas de procesos de fundición con relativa rapidez y precisión. Por lo que parece un software adecuado para utilizarlo como apoyo docente para una mayor comprensión de los procesos de fabricación, especialmente, de la asignatura Ingeniería de Procesos de Fabricación, y contrastar los análisis de la simulación en la práctica con un caso real de estudio para afianzar conocimientos teóricos.
- Se ha comprobado que con un buen dimensionamiento de los componentes que forman parte del proceso de fundición en moldes de arena (mazarota, canal de llenado, uso de manguitos, etc.), se consiguen eliminar y minimizar los defectos de porosidad/rechufe y microporosidad de la pieza final útil que se producen en las piezas que no emplean los componentes mencionados.
- La pieza que presenta mejores resultados es la pieza que utiliza mazarotas, manguito y canal de llenado. Se confirma que las mazarotas son, tanto una de las últimas zonas en llenarse por completo, como una de las últimas en solidificarse (si se dimensiona de acuerdo con la regla de Chvorinov). De esta manera, ayudan considerablemente a la reducción de defectos de porosidad, rechupes y microporosidad en la pieza, reubicándolos, garantizando así la correcta funcionalidad y propiedades de la pieza final.
- Se comprueba que el tiempo de solidificación está directamente relacionado con la formación de porosidades, debido a que en las zonas que tardan más tiempo en solidificar, el metal fundido sufre una contracción debido al proceso, y si no se dispone de un correcto canal de alimentación y mazarotas, derivará en defectos de microporosidades o rechupes.
- Inspire Cast demuestra ser una herramienta valiosa para la optimización del diseño de sistemas de alimentación, coladas y mazarotas, ayudando a mejorar la calidad final de las piezas fundidas y reducir costos asociados a prototipos y pruebas físicas.
- Gracias a las animaciones que posee el software, es posible apreciar de una manera mucho más clara las diferentes etapas del proceso para facilitar la comprensión de todos los conceptos teóricos del proceso de fundición.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Estudio y simulación de procesos
de fundición en molde de arena



6. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN:

En este último apartado del presente trabajo de fin de grado, se proponen diferentes posibilidades para continuar el estudio con diferentes enfoques potenciales para investigaciones futuras, basadas en los hallazgos y limitaciones de este estudio. Estas líneas de investigación no solo buscan profundizar en el entendimiento de los fenómenos observados, sino también explorar nuevas aplicaciones y mejorar las metodologías actuales. Las propuestas se detallan a continuación:

- Realizar un estudio comparativo entre los resultados obtenidos mediante el software Altair Inspire Cast y los datos experimentales en el taller, con el objetivo de comprobar la fiabilidad del software y validar su utilidad como herramienta de simulación en procesos reales.
- Analizar la influencia de distintos tipos de mazarotas en los resultados relacionados con la microporosidad y los rechupes. Sería interesante considerar formas geométricas diversas (esféricas, cilíndricas, prismáticas) y comparar mazarotas que cumplan o no con la regla de Chvorinov.
- Estudiar los resultados obtenidos en el proceso de fundición en molde de arena al modificar parámetros como la velocidad o el tiempo de llenado, evaluando su impacto en la calidad final de la pieza.
- Comparar distintos materiales de molde (por ejemplo, arena de sílice frente a mezclas con arcillas o resinas) para estudiar su influencia en la transferencia térmica y, por tanto, en el desarrollo de defectos durante la solidificación.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Estudio y simulación de procesos
de fundición en molde de arena



7. BIBLIOGRAFÍA:

1. Rajkumar, K.; Jayamani, E.; Ramkumar Editors, P. *Lecture Notes in Mechanical Engineering Recent Advances in Materials Technologies Select Proceedings of ICEMT 2021*;
2. Raharjo, R.; Purnama, A.H.; Ahdiyati, A. *Multilevel Pulley Analysis of Sand-Casting Process Results for Metal Casting Simulation Using Altair Inspire Cast*;
3. Altair Altair Learning Available online:
https://learn.altair.com/mod/scorm/player.php?a=393¤torg=Module_1_-_Casting_Introduction_ORG&scoid=1027 (accessed on 29 May 2025).
4. Andrés, V.; López, C. *ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ESTUDIO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL SOBRE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO, FORMA Y COMPOSICIÓN EN MAZAROTAS CON CAMISAS EXOTÉRMICAS APLICADAS A LA FUNDICIÓN DE HIERRO DÚCTIL TRABAJO DE TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER EN MATERIALES*;
5. *UMA TEMA 3: PROCESOS INDUSTRIALES INTRODUCCIÓN A LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN*;
6. Universidad de Bilbao *MÓDULO I: FUNDICIÓN Y SINTERIZADO TEMA 1: Fundición En Arena*;
7. Tipos de Fundición Available online: <https://metalesvigo.com.mx/tipos-de-fundicion/> (accessed on 16 June 2024).
8. *UMA TEMA 5: PROCESOS DE FUNDICIÓN II*;
9. Green Vinci ¿Qué Es La Fundición Centrífuga y Cómo Funciona? Available online: <https://www.vincibiomass.com/info/what-is-centrifugal-casting-and-how-does-it-wo-73593071.html> (accessed on 11 June 2025).
10. Fundición a La Cera Perdida Available online:
<https://fundirmetal.com/fundicion-a-la-cera-perdida-en-que-consiste/> (accessed on 11 June 2025).
11. Xi Chen Profilling of Injection Velocity for Uniform Mold Filling. 2006.
12. Messen Labs Altair's Manufacturing Solutions -Inspire Cast Webinar.
13. Jürgen Büchner, H. Forecast 2025 for the Global Foundry Industry. 2025.

14. RapidDirect Descripción General Del Proceso de Fundición Available online: <https://www.rapiddirect.com/es/blog/different-types-of-casting-process/> (accessed on 22 June 2025).
15. A. Arun; R. BalaKrishnan; R. Jayanthi; H M S. Kevin; A. Ranjith Raj; S. Paramaguru; R. Kumar; M. Ganesan; R. Rekha Classification of Metals Used in the Sand Casting Process. *International Journal of Engineering and Management Research* 2021, 11, 13–19, doi:10.31033/ijemr.11.2.2.
16. Aguirre de la Torre, E. *Desempeño Mecánico En La Aleación A356 Mediante Variación En Las Concentraciones Del Refinador de Grano Al-5Ti-B y Adición de Tierras Raras*; 2013;
17. Aluminium Die Casting - A356 Available online: <https://aludiecasting.com/es/aluminio-a356-t6/> (accessed on 11 June 2025).
18. Cristiani Reyes. A ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE UNA PIEZA DE ALUMINIO OBTENIDA POR FUNDICIÓN, Mexico, 2003.
19. CNM TECH Aluminio Para Fundición: Guía Completa Available online: <https://www.thediecasting.com/es/aluminio-para-fundicion-una-guia-completa/> (accessed on 12 June 2025).
20. Procesos de Fundición: Modelos Available online: <https://procesosdfundicion-modelos.weebly.com/materiales.html> (accessed on 9 June 2025).
21. FormLabs Metal Casting Available online: <https://formlabs.com/blog/metal-casting/> (accessed on 9 June 2025).
22. IStock Available online: <https://www.istockphoto.com/es/search/2/image-film?phrase=fundicion%20por%20gravedad> (accessed on 9 June 2025).
23. Pallo Morocho, E.L.; Valdivieso Godoy, A.E. Estudio de Las Propiedades de Las Arenas y Su Influencia En Las Piezas Fundidas En Ciertos Talleres de Fundición de La Ciudad de Quito. 2019.
24. FOSECO FOSECO - Casting-Processes Available online: <https://www.foseco.com/en/casting-processes/green-sand-casting> (accessed on 9 June 2025).
25. Kalpakjian, S.; Schmid, S.R. *Manufacturing Engineering and Technology*; 7a, 8a.;

26. Neway Fundición En Arena. Proceso, Materiales, Ventajas y Desventajas Available online: <https://www.newayprecision.com/es/blogs/custom-sand-casting-process-materials-pros-and-cons> (accessed on 20 June 2025).
27. Zintilon Fundición En Arena: Definición, Cómo Funciona y Aplicaciones Available online: <https://www.zintilon.com/es/blog/sand-casting/> (accessed on 20 June 2025).
28. Chaudhari, S.S.; Aloni, S.N. Optimization of Green Sand Process for Quality Improvement in Castings by Using Combination of Taguchi Techniques-GRAPCA. In Proceedings of the Materials Today: Proceedings; Elsevier Ltd, January 1 2022; Vol. 62, pp. 1115–1121.
29. Universidad Politécnica de Valencia Defecto de Colada - Rechupe. Available online: <https://www.youtube.com/watch?v=B57uMkjlBs> (accessed on 22 June 2025).
30. Altair Inspire Cast Altair Inspire Cast Tutorials Available online: https://2023.help.altair.com/2023.1/cast/en_us/topics/cast/tutorials/Tut_Gravity_Casting_c.htm#Tut_Gravity_Casting_c (accessed on 11 June 2025).
31. Viqar Mohiuddin, M.; Krishnaiah, A.; Ferhathullah Hussainy, S.; Laxminarayana, P. *Influence of Process Parameters on Quality of Al7SiMg Alloy Casting Using Statistical Techniques*; 2016;
32. Dhisale, M.; Vasavada, J.; Tewari, A. An Approach to Optimize Cooling Channel Parameters of Low Pressure Die Casting Process for Reducing Shrinkage Porosity in Aluminium Alloy Wheels. In Proceedings of the Materials Today: Proceedings; Elsevier Ltd, January 1 2022; Vol. 62, pp. 3189–3196.
33. Fumbarri Fundiciones MANUAL-DE-RECOMENDACIONES-PARA-EVITAR-LA-APARICION-DE-RECHUPES-EN-PIEZAS-DE-FUNDICION-ESFEROIDAL.
34. ASTM ASTM E505-22 Available online: <https://store.astm.org/e0505-22.html> (accessed on 11 June 2025).
35. VDG P 201 VDG P 201. 2002.
36. Rajkumar, K.; Jayamani, E.; Ramkumar Editors, P. *Lecture Notes in Mechanical Engineering Recent Advances in Materials Technologies Select Proceedings of ICEMT 2021*;
37. Sanz García, C. BENCHMARKING SOBRE EL SOFTWARE PARA LA SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS DE FUNDICIÓN, 2017.

38. De, D.; Porosidad, L.A.; Aleaciones, E.N.; Gueijman, S.F.; Schvezov, C.E.; Ares, A.E. *ZINC-ALUMINIO EMPLEANDO EL CRITERIO DE NIYAMA*;
39. Poligon Soft Criterio de Niyama Available online:
<https://www.poligoncast.com/es/articles/niyama-criterion> (accessed on 11 June 2025).
40. Universidad de Sevilla Estudio de La Influencia de Diferentes Diseños de Los Sistemas de Alimentación y Compensación En La Fundición En Arena.
41. Zamora Pedreño, R. Estudio Experimental de La Formación de Porosidad Por Atrapamiento de Aire Durante La Etapa Lenta de Inyección En Máquinas de Fundición a Alta Presión, 2005.
42. Daniel Rojas Perez DISEÑO DE LAS MAZAROTAS. *Universidad de Málaga*.
43. Shuvo, M.M.; Manogharan, G. Novel Riser Designs via 3D Sand Printing to Improve Casting Performance. In Proceedings of the Procedia Manufacturing; Elsevier B.V., 2021; Vol. 53, pp. 500–506.
44. MÉTODOS DE FUNDICIÓN O COLADA Available online:
<https://www.studocu.com/sg/document/saa-global-education/fundamental-early-childhood-education/fundicion-mazarota-etc/38465671> (accessed on 4 June 2025).
45. Quizlet Ingeniería Mecatrónica Available online:
<https://quizlet.com/mx/735011778/ingenieria-mecatronica-flash-cards/> (accessed on 20 June 2025).
46. Perez, A. *Cálculo Mazarota*;
47. SEFU Comprensión de Los Manguitos En Fundición. 2024.
48. Quipasur Manguitos.
49. Martinez Krahmer, D. Ejemplos Típicos de Rechupes Available online:
https://www.researchgate.net/figure/Ejemplos-tipicos-de-rechupes-secundarios-La-aparicion-de-este-defecto-en-piezas-en-la_fig20_272487696 (accessed on 8 June 2025).
50. Andrés, V.; López, C. *ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ESTUDIO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL SOBRE LA INFLUENCIA DEL TAMAÑO, FORMA Y COMPOSICIÓN EN MAZAROTAS CON CAMISAS EXOTÉRMICAS APLICADAS A LA FUNDICIÓN DE HIERRO DÚCTIL TRABAJO DE TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER EN MATERIALES*;

51. Rajkumar, K.; Jayamani, E.; Ramkumar Editors, P. *Lecture Notes in Mechanical Engineering Recent Advances in Materials Technologies Select Proceedings of ICEMT 2021*;
52. FLOW-3D Cast.
53. MAGMASoft Available online:
<https://www.magmasoft.com/es/solutions/magmasoft/> (accessed on 12 June 2025).
54. ProCAST.
55. Molinari Rathsan, M. *Identifying Shrinkage Porosity and Reducing Physical Try-Outs Using Inspire Cast*; 2024;
56. Aerodinámicos, V. "APLICACIÓN DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) EN";
57. Ishfaq, K.; Ali, M.A.; Ahmad, N.; Zahoor, S.; Al-Ahmari, A.M.; Hafeez, F. Modelling the Mechanical Attributes (Roughness, Strength, and Hardness) of Al-Alloy A356 during Sand Casting. *Materials* 2020, 13, doi:10.3390/ma13030598.
58. Zintilon Defectos de Fundición a Presión: Una Revisión Completa. *Zintilon* 2024.
59. Tadele Bekele, B.; Bhaskaran, J.; Dufera Tolcha, S.; Gelaw, M. Simulation and Experimental Analysis of Re-Design the Faulty Position of the Riser to Minimize Shrinkage Porosity Defect in Sand Cast Sprocket Gear. *Mater Today Proc* 2022, 59, 598–604, doi:10.1016/j.matpr.2021.12.090.
60. Javier, F.; Urrutia, P.; López Rodríguez, J. *Diseño de Los Sistemas de Distribución En Procesos de Fundición Por Gravedad Mediante Un Método Analítico*;