



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE MAR DEL PLATA



Facultad de Ingeniería UNMDP

PROYECTO FINAL DE GRADO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN
MATERIALES

**ESTUDIO DE FABRICACIÓN DE HUB Y EJE PRINCIPAL DE
MOLINOS EÓLICOS DE BAJA POTENCIA MEDIANTE EL
PROCESO DE FUSIÓN Y COLADO, UTILIZANDO
ALEACIONES DE ALUMINIO-SILICIO**

Autor: Gonzalo Ezequiel Avila

Contacto: avilagonzalo00@gmail.com

DNI: 42.629.956

Matrícula: 14080

Director: Dr. Ing. Alejandro D. Basso

Fecha de la defensa: 27/12/2024

Departamento de Ingeniería en Materiales

Facultad en Ingeniería - UNMDP

Mar del Plata, Diciembre del 2024



RINFI es desarrollado por la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE MAR DEL PLATA



Facultad de Ingeniería UNMDP

PROYECTO FINAL DE GRADO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN
MATERIALES

**ESTUDIO DE FABRICACIÓN DE HUB Y EJE PRINCIPAL DE
MOLINOS EÓLICOS DE BAJA POTENCIA MEDIANTE EL
PROCESO DE FUSIÓN Y COLADO, UTILIZANDO
ALEACIONES DE ALUMINIO-SILICIO**

Autor: Gonzalo Ezequiel Avila

Contacto: avilagonzalo00@gmail.com

DNI: 42.629.956

Matrícula: 14080

Director: Dr. Ing. Alejandro D. Basso

Fecha de la defensa: 27/12/2024

Departamento de Ingeniería en Materiales

Facultad en Ingeniería - UNMDP

Mar del Plata, Diciembre del 2024

Agradecimientos

Quiero dedicar este proyecto a mi papá, cuya memoria me acompaña en cada paso de este camino. Aunque ya no está físicamente, su amor, sacrificio y apoyo incondicional han sido la base de todo lo que he logrado. Este trabajo es, en gran parte, gracias a él y a todo lo que me enseñó a lo largo de los años.

A mi mamá y a mis hermanos, por su amor, apoyo constante y por estar siempre a mi lado. Gracias por su paciencia, por darme fuerzas en los momentos difíciles y por acompañarme en todo este proceso.

Finalmente, quiero agradecer profundamente a mi tutor, Dr. Ing. Alejandro D. Basso, por su paciencia, dedicación y orientación durante todo el proceso. Sus sugerencias y consejos fueron cruciales para orientar mi investigación y mejorar la calidad del proyecto.

Índice de contenidos

Capítulo 1. Introducción.....	9
1.1 Importancia de energías renovables.....	9
1.2 Definición y clasificación de molinos eólicos.....	9
1.3 Componentes de un molino eólico de baja potencia.....	10
1.4 Materiales de los componentes en los aerogeneradores.....	11
1.5 Desarrollos realizados en INTEMA sobre esta temática.....	12
Capítulo 2. Objetivos generales y particulares.....	14
2.1 Generales.....	14
2.2 Particulares.....	14
Capítulo 3. Revisión bibliográfica.....	15
3.1 Clasificación de las aleaciones de aluminio.....	15
3.2 Aleaciones de Al-Si.....	18
3.2.1 El sistema Al-Si.....	18
3.2.2 Aleación hipoeutéctica.....	20
3.2.3 Aleación eutéctica.....	21
3.2.4 Aleación hipereutéctica.....	22
3.3 Tipo de aleaciones aluminio-silicio. Serie 4xx.x de aleaciones de aluminio (Norma ASTM B108).....	23
3.3.1 Aleación de aluminio AlSi7Mg.....	25
3.3.2 Aleación de aluminio AlSi10Mg.....	26
3.4 Tratamientos térmicos en aleaciones de aluminio.....	27
3.4.1 Tratamiento de Solubilización y envejecimiento (también llamado de disolución):.....	27
3.4.2 Recocido.....	30
3.5 Sistema de Designación de Tratamientos Térmicos.....	31
3.6 Tecnología de la fundición.....	32
3.6.1 Ventajas de la tecnología de fusión y colado.....	33
3.6.2 Fundición o Moldeo en arena.....	34
3.6.3 Sistema de alimentación.....	35
3.6.3.1 Contracción durante la solidificación. Mazarotas.....	37
3.6.3.2 Enfriadores o “Chills”.....	40
3.6.3.3 Filtros de cerámica.....	40
3.6.4 Defectos en piezas coladas utilizando la técnica de moldeo en arenas.....	41
3.6.4.1 Porosidad por gas.....	41
3.6.4.2 Porosidad por contracción.....	43
3.6.4.3 Llenado incompleto.....	44
3.6.4.4 Choque de frentes de flujos.....	44
3.6.4.5 Inclusiones.....	44
3.6.4.6 Erosión.....	44

3.6.4.7 Fisuras en caliente.....	45
Capítulo 4. Resultados anteriores y discusión del desarrollo del proceso de fusión y colado de la pieza “HUB-EJE LENTO”.....	45
Capítulo 5. Resultados y discusión de las simulaciones del proceso de fusión y colado de la BRIDA CON CAÑO Y HUB-EJE LENTO.....	50
5.1 Rutina de Simulaciones.....	50
5.2 Aleaciones de Al-Si evaluadas, diseño de moldes y parámetros de colada utilizados.....	52
5.3. Diseño de la geometría de la pieza “BRIDA CON CAÑO”.....	53
5.4 Resultados de las simulaciones de la “BRIDA CON CAÑO”.....	54
5.4.1 Brida con caño de 10 mm de espesor sin canal de alimentación- $AlSi10Mg$	54
5.4.2 Brida con caño de 10 mm de espesor con una mazarota. Sistema SB1.....	55
5.4.3 Brida con caño de 15 mm de espesor de brida y una mazarota de mayor volumen. Sistema SB2.....	57
5.4.4 Brida con caño de 15 mm de espesor con tres mazarotas de mayor volumen. Sistema SB3.....	58
5.4.5 Brida con caño de 15 mm de espesor con cuatro mazarotas. Sistema SB4.....	59
5.4.6 Brida con caño utilizando la aleación de aluminio $AlSi7Mg$	61
5.5 Validación experimental de las simulaciones de la Brida con caño.....	61
5.5.1 Colada de la Brida con caño.....	62
5.5.2 Análisis microestructural de la brida con caño.....	65
5.6 Resultados y discusión de las simulaciones del proceso de fusión y colado de la pieza “HUB- EJE LENTO”.....	69
5.6.1 Diseño de la geometría de la pieza “HUB- EJE LENTO”.....	69
5.6.2 Resultados de las simulaciones de la pieza “HUB-EJE LENTO” mediante el uso del software Magmasoft.....	70
5.6.2.1 Primera simulación Hub-Eje lento.....	70
5.6.2.2 Segunda simulación del Hub-Eje lento. Sistema SH1.....	71
5.6.2.3 Tercera simulación del Hub-Eje lento. Sistema SH2.....	74
5.6.2.4 Cuarta simulación Hub-Eje lento. Simulación SH3.....	76
5.7 Colada experimental de la pieza HUB-EJE LENTO.....	86
6- Conclusiones.....	95
7- Trabajo a futuro.....	96
Bibliografía.....	97

Índice de figuras

Figura 1. Tipos de aerogeneradores	10
Figura 2. Componentes del molino eólico [6]	11
Figura 3. Hub de un molino eólico de alta potencia	12
Figura 4. Diagrama Al-Si [11]	19
Figura 5. Cambio en la morfología del silicio a través de tratamientos térmicos prolongados a altas temperaturas o mediante la adición de elementos como	

estroncio (Sr) o sodio (Na) [13]	20
Figura 6. Microestructura de una aleación hipoeutética (aleación 357) [16]	22
Figura 7. Microestructura de una aleación eutética [17]	23
Figura 8. Microestructura de una aleación hipereutética (Al-18% Si) [20]	24
Figura 9. Aleación de aluminio A356 a) enfriamiento lento b) enfriamiento rápido [23]	27
Figura 10. Microestructura del AlSi10Mg, a) Sin tratamiento térmico, b) Con tratamiento térmico T6 [24]	28
Figura 11. Difusión para aleaciones binarias de aluminio. (a) Elementos de difusión lenta, (b) Elementos de difusión rápida [25]	29
Figura 12. Principales técnicas utilizadas en la fundición	34
Figura 13. Piezas representativas obtenidas por tecnología de fundición y colado	35
Figura 14. Esquema de un sistema de alimentación para un molde de arena [26]	37
Figura 15. Diferentes configuraciones de mazarotas y sus valores característicos (Mr, Vr, D, H, entre otros)	40
Figura 16. Principios generales de diseño para los cuellos de mazarotas empleados en la fundición de hierro (a) Diseño estándar de mazarota lateral. (b) Mazarota lateral adaptada para piezas planas o tipo placa	41
Figura 17. Filtros de cerámica	42
Figura 18. Influencia del hidrógeno con la temperatura [28]	43
Figura 19. Macro y micrografía de la macrocontracción	44
Figura 20. (a) Esquema del flujo de metal alrededor de las dendritas, (b) Micrografía de una región con porosidad interdendrítica. [30]	45
Figura 21. Sistema de alimentación diseñado para el caso de colar fundición gris	47
Figura 22. Resultado de simulaciones de porosidad del Hub-Eje lento fabricado en fundición gris	48
Figura 23. Sistema de alimentación diseñado para el caso de colar aleación de aluminio	48
Figura 24. Porosidad (zonas celestes en la figura) del Hub-Eje lento simulado en aleación aluminio	49
Figura 26. Porosidad (zonas celeste en la figura) del Hub-Eje lento simulado con acero	50
Figura 27. Propiedades de la aleación de aluminio C355-0-T61	50
Figura 28. Perfil de tensiones de Von Mises en el Hub-Eje lento	51
Figura 29. Hub-Eje lento colado en AlSi7 durante el año 2019 en la DMI, utilizando moldeo vertical y sistema de alimentación mostrado en la Figura 23	52
Figura 30. Composición química del AlSi7Mg	54
Figura 31. Composición química del AlSi10Mg	54
Figura 32. Vista anterior de la Brida con caño	55
Figura 33. Vista superior de la Brida con caño	56
Figura 34. Ubicación y nivel de porosidad para para la Brida con caño utilizando la aleación AlSi10Mg, sin sistema de colada	57

Figura 35. Principales partes que integran el Sistema de alimentación SB1 para la pieza Brida con caño	58
Figura 36. Sistema SB1. Porosidad de la pieza Brida con caño. Espesor de brida de 10 mm	58
Figura 37. Sistema SB1. Fracción de sólido en la pieza Brida con caño para aproximadamente 158 seg desde el inicio de la solidificación. Espesor de brida de 10 mm	59
Figura 38. Sistema SB2. Porosidad de la pieza Brida con caño. Brida de 15 mm de espesor y mazarota de volumen 673.28 cm ³	60
Figura 39. Sistema SB2. Fracción de sólido en la pieza Brida con caño para aproximadamente 118 seg desde el inicio de la solidificación. Espesor de brida de 15 mm. Mazarota de volumen 673.28 cm ³	60
Figura 40. Sistema SB3. Porosidad de la pieza Brida con caño. Brida de 15 mm de espesor y tres mazarotas de volumen 673.28 cm ³	61
Figura 41. Sistema SB4. Porosidad de la pieza Brida con caño. Brida de 15 mm de espesor y cuatro mazarotas de volumen 673.28 cm ³	62
Figura 42. Sistema SB4. Fracción de sólido en la pieza Brida con caño para aproximadamente 187 seg desde el inicio de la solidificación. Espesor de brida de 15 mm. Mazarotas de volumen 673.28 cm ³	62
Figura 43. Sistema SB4. Porosidad de la pieza con 15 mm de espesor en la brida con cuatro mazarotas de volumen 673.28 cm ³ con aleación de aluminio AlSi7Mg	63
Figura 44. Modelo de buje con brida junto a una mazarota	64
Figura 45. Bajo del molde (a), bajo y sobre del molde (b), Molde de arena cerrado, con basin de colada (c)	65
Figura 46. Coladas de Bridas con caño: a) AlSi10Mg, b) AlSi7Mg, c) Seccionamiento de sistema de alimentación, d) Brida con caño, e) Seccionamiento para obtener probeta para estudio de porosidad, f) Sección transversal de la brida, cortada en tres partes para facilitar observación de porosidad	66
Figura 47. Porosidad de las probetas analizadas de AlSi7Mg y AlSi10Mg	67
Figura 48. Microestructura del AlSi7Mg a 400 um y 100 um respectivamente (a,b), c) Porosidad por contracción en el AlSi7Mg y d) Porosidad por gas en AlSi10Mg	69
Figura 49. Microestructura del AlSi10Mg a 400 um,100 um y 50 um respectivamente a,b y c)	70
Figura 50. Vista lateral derecha del Hub-Eje lento	71
Figura 51. Vista posterior del Hub-Eje lento	72
Figura 52. Vista lateral izquierda del Hub-Eje lento	72
Figura 53. Ubicación y nivel de porosidad para el AlSi10Mg sin sistema de alimentación para la pieza Hub-Eje lento	74
Figura 54. Dimensiones del chill	75
Figura 55. Sistema de alimentación SH1	75
Figura 56. Porosidad en la pieza Hub-Eje lento. Sistema de alimentación SH1	76
Figura 57. Fracción de sólido en la pieza Hub-Eje lento para un tiempo de solidificación de aproximadamente 188 segundos. Sistema de alimentación SH176	

Figura 58. Sistema de alimentación SH2	77
Figura 59. Enfriador utilizado en la zona del Eje lento	77
Figura 60. Porosidad en la pieza Hub-Eje lento. Sistema de alimentación SH2	78
Figura 61. Fracción de sólido en la pieza Hub-Eje lento para un tiempo de solidificación de aproximadamente 163 segundos. Sistema de alimentación SH279	
Figura 62. Sistema de alimentación SH3	80
Figura 63. Temperatura del metal una vez llenado el Hub-Eje lento, cuarta simulación para una temperatura de colada a 800 °C	81
Figura 64. Porosidad de la pieza Hub-Eje lento con una temperatura de colada de 800 °C. Sistema de alimentación SH3	82
Figura 65-a. Valor porcentual de porosidad en la pieza Hub-Eje lento. Sistema de alimentación SH3 con una temperatura de colada de 800 °C	82
Figura 65-b. Valor porcentual de porosidad en la pieza Hub-Eje lento. Sistema de alimentación SH3 con una temperatura de colada de 800 °C	83
Figura 66. Porosidad de la pieza Hub-Eje lento con una temperatura de colado de 750 °C. Sistema de alimentación SH3	84
Figura 67. Valor porcentual de porosidad la pieza Hub-Eje lento con una temperatura de colado de 750 °C. Sistema de alimentación SH3	84
Figura 68. Porosidad de la pieza Hub-Eje lento con una temperatura de colado de 800 °C. Sistema de alimentación SH3 con chill en la parte superior del Hub	85
Figura 69. Valor porcentual de porosidad la pieza Hub-Eje lento con una temperatura de colado de 800 °C. Sistema de alimentación SH3 con chill en la parte superior del Hub.	85
Figura 70. Valor porcentual de porosidad en la parte inferior de la pieza Hub-Eje lento con una temperatura de colado de 800 °C. Sistema de alimentación SH3 sin uso de chills	86
Figura 71. Porosidad de la pieza Hub-Eje lento con una temperatura de colado de 750 °C. Sistema de alimentación SH3 sin uso de chills.	87
Figura 72. Valor porcentual de porosidad en la parte inferior de la pieza Hub-Eje lento con una temperatura de colado de 750 °C. Sistema de alimentación SH3 sin uso de chills	87
Figura 73. Sistema de alimentación SH3 con sus dimensiones en milímetros	89
Figura 74. a) Modelo externo del Hub-Eje lento, b) Caja de noyo	90
Figura 75. Bajo del molde Hub-Eje lento	90
Figura 76. Noyo del Hub-Eje lento	91
Figura 77. a) Bajo del molde con noyo, b) Sobre del molde, c) Basin de colada	92
Figura 78. Horno de crisol con la cuchara	93
Figura 79. a) Vista inferior del Hub-Eje lento, b) Vista superior del Hub-Eje lento donde se evidencia el llenado incompleto	94
Figura 80. a) Vista lateral del Hub-Eje lento, b) Vista frontal del Hub-Eje lento	94
Figura 81. Porosidad en el plano de simetría del Hub-Eje lento después del pulido	95
Figura 82. Sección transversal del eje lento evidenciando la porosidad presente	96
Figura 83. Porosidad por gas observada en la zona del eje	97

Índice de tablas

Tabla 1. Materiales utilizados en los componentes de un molino eólico [6]	12
Tabla 2. Clasificación de las aleaciones de aluminio según el método de fabricación	15
Tabla 3. Características de diferentes aleaciones de aluminio de la serie 4xx.x [21]	24
Tabla 4. Composición química típica del AlSi7Mg [wt %]	26
Tabla 5. Composición química típica del AlSi10Mg [wt %]	27
Tabla 6. Propiedades mecánicas reportadas en la literatura para AlSi10Mg y AlSi7Mg	28
Tabla 7. Precipitación en aleación de aluminio (Al-Mg-Si) [25]	31
Tabla 8. Contracción de solidificación para diferentes metales [27]	38
Tabla 9. Composición química de las muestras correspondientes a las bridas con caño, según el análisis espectrométrico. Balance Al. (wt%)	67
Tabla 10. Volumen y peso de cada parte del sistema de alimentación SH3 y pieza	90

Resumen

El presente trabajo aborda la fabricación de la Brida con Caño y el Hub-Eje Lento, componentes esenciales en molinos eólicos de baja potencia. El objetivo principal es mejorar la eficiencia y calidad de estas piezas mediante el uso del proceso de fusión y colado en aleaciones de aluminio-silicio.

Se estudiaron distintas configuraciones de sistemas de alimentación y parámetros de colado, enfocándose en reducir la porosidad por contracción a través de simulaciones computacionales y ensayos experimentales. Este estudio contribuye al desarrollo de tecnologías de fabricación más eficientes y sostenibles, sentando las bases para futuras investigaciones en el área de materiales para energía eólica.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Importancia de energías renovables

A lo largo del último siglo, la humanidad ha dependido en gran medida de recursos no renovables como el carbón y el petróleo. Estos combustibles impulsaron el crecimiento industrial, pero también dieron lugar a crisis energéticas y ambientales importantes, agravando el cambio climático y la degradación ambiental global. La transición hacia fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, ha sido identificada como esencial para mitigar estos impactos y avanzar hacia un desarrollo más sostenible [1;2]

Desde la década de 1990, la energía eólica ha experimentado un crecimiento significativo, posicionándose como una de las principales fuentes de energía limpia. Países como China y el Reino Unido han liderado su adopción a gran escala. Según proyecciones de la Agencia Internacional de Energía (IEA), la energía eólica podría generar hasta un 18% de la electricidad global para 2050 [3]. Esta expansión es parte de una tendencia más amplia, donde las energías renovables y la energía nuclear se espera que dominen la producción de electricidad para 2030, reduciendo considerablemente la dependencia de los combustibles fósiles [2;3].

En este contexto de crecimiento acelerado, la mejora tecnológica en la producción de energía eólica es fundamental. Optimizar la fabricación de componentes de los molinos eólicos resulta esencial no solo para incrementar la eficiencia de las turbinas de baja potencia, sino también para reducir los costos de producción, facilitando una adopción más generalizada y accesible de esta tecnología.

1.2 Definición y clasificación de molinos eólicos

Una turbina eólica, también conocida como aerogenerador, es un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en electricidad. Lo hace a través del movimiento de sus aspas, las cuales utilizan la fuerza aerodinámica del viento para girar un rotor, que a su vez acciona un generador. Los tipos de molinos eólicos se dividen en dos categorías: horizontal y vertical. El primero, conocido como HAWT, tiene el eje del rotor paralelo a la corriente del viento y está conectado a más de una aspa, lo que le permite funcionar en condiciones de baja velocidad del viento. En cambio, el segundo, conocido como VAWT, tiene un rotor que gira a lo largo de un eje vertical y requiere una alta velocidad del viento para su funcionamiento. Ambos tipos de molinos se observan en la Figura 1.

Además de estas diferencias estructurales, ambos tipos de aerogeneradores presentan características únicas que les otorgan ciertas ventajas y desventajas operativas. Los aerogeneradores de eje horizontal (HAWT) ofrecen diversas ventajas, como la capacidad de optimizar la captación de energía eólica ajustando el ángulo de sus aspas y su capacidad de autoinicio según las condiciones de viento. Además, su diseño con torres altas les permite aprovechar vientos más intensos en terrenos desiguales o en ubicaciones offshore, mientras

que sus aspas pueden ajustarse en condiciones climáticas adversas para evitar daños. Sin embargo, enfrentan ciertos desafíos, como dificultades para operar cerca del suelo, problemas en el transporte e instalación de sus grandes estructuras, y posibles conflictos con la navegación en ubicaciones marítimas. [4]

En contraste, los aerogeneradores de eje vertical (VAWT) presentan ventajas como un mantenimiento más accesible, menores costos de fabricación y transporte, y su capacidad para funcionar sin orientarse al viento. Además, son ideales para áreas con condiciones climáticas extremas y representan un menor riesgo para las aves debido a la velocidad más baja de sus aspas. No obstante, su eficiencia es generalmente menor en comparación con los HAWT, y pueden experimentar problemas de vibración debido a turbulencias cerca del suelo. [4]

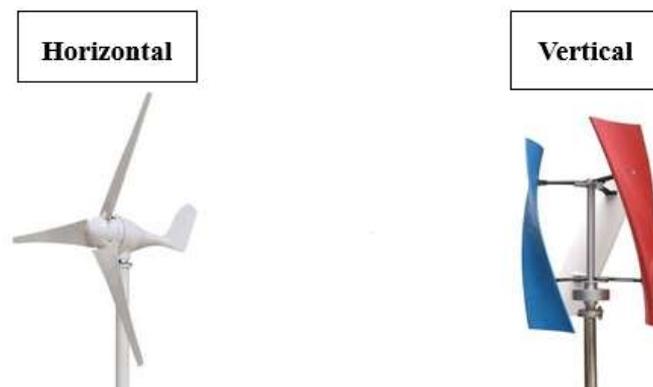


Figura 1. Tipos de aerogeneradores

1.3 Componentes de un molino eólico de baja potencia

Un aerogenerador de baja potencia está compuesto por varios elementos claves que, en conjunto, permiten convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica utilizable. Cada componente, ilustrado en la Figura 2, tiene un papel específico y esencial para garantizar un rendimiento eficiente y seguro. A continuación, se describen las principales partes que conforman este tipo de aerogenerador [5;6]:

- Rotor (o HUB): Este dispositivo contiene las aspas y se encarga de convertir la energía cinética del viento en energía mecánica a través de un eje conectado.
- Generador: Transforma la energía mecánica producida por el rotor en energía eléctrica.
- Caja de cambios o engranaje: Modifica la velocidad de rotación del eje para que sea compatible con los requisitos del generador.
- Sistema de control y protección: Asegura que la turbina no funcione en condiciones peligrosas, mediante un sistema de frenos que se activa cuando la velocidad del viento supera niveles seguros.

- Soporte giratorio: Como el rotor debe estar siempre orientado al viento, todos los componentes están montados sobre un soporte que permite el movimiento de orientación alrededor del eje de la torre.
- Anemómetro: Este dispositivo detecta la dirección del viento y permite que el sistema de control oriente automáticamente el rotor hacia la dirección óptima, garantizando así la máxima eficiencia en la generación de electricidad.

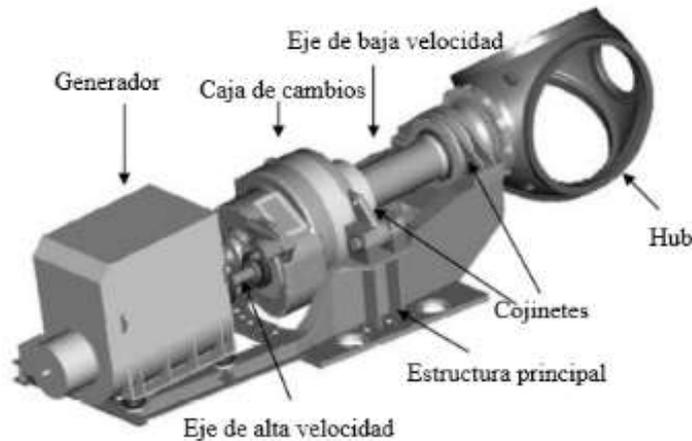


Figura 2. Componentes del molino eólico [6]

1.4 Materiales de los componentes en los aerogeneradores

En la Tabla 1 se destacan los materiales más comunes empleados en la fabricación de un molino eólico. Las aspas están compuestas de materiales con una relación resistencia-peso muy favorable, lo que las hace ideales para soportar las fuerzas aerodinámicas durante su operación, además de reducir las cargas sobre el Hub. Los composites utilizados generalmente incluyen fibra de vidrio y una resina de poliéster, aunque también se emplean viniléster y laminados de madera-epoxi. En años recientes, las fibras de carbono han ganado popularidad en la construcción de aspas, no tanto como un sustituto de la fibra de vidrio, sino como un complemento. Un desafío importante con las aspas es su reciclabilidad, por lo que actualmente se están investigando nuevas estrategias para seleccionar materiales que sean reciclables.

Por otro lado, el hub se encarga de transmitir y soportar todas las cargas generadas por las aspas, generalmente se fabrican en acero, ya sea mediante soldadura o fundición. Este material se elige por su capacidad para soportar grandes cargas y su alta resistencia. Sin embargo, tanto el hub como el eje principal son componentes separados que deben unirse mediante procesos como atornillado, remachado o soldadura, como se observa en la Figura 3. Estos métodos pueden incrementar los costos de producción y, en algunos casos, puede generar defectos que comprometan la integridad de la pieza.

Tabla 1. Materiales utilizados en los componentes de un molino eólico [6]

Componente	Categoría de Material	Subcategoría de Material
Aspas	Composites	Fibras de vidrio, fibras de carbono, laminados de madera, resinas de poliéster, epoxis
Hub	Acero	
Caja de engranajes	Acero	Varias aleaciones, lubricantes
Generador	Acero, cobre	Imanes permanentes a base de tierras raras
Equipos mecánicos	Acero	
Cubierta de la nacelle	Composites	Fibra de vidrio
Torre	Acero	
Chasis o estructura principal	Acero, concreto	
Sistema eléctrico y de control	Cobre, silicio	



Figura 3. Hub de un molino eólico de alta potencia

1.5 Desarrollos realizados en INTEMA sobre esta temática

La División Metalurgia del INTEMA ha iniciado el desarrollo de componentes para molinos eólicos. Desde 2017, se ha trabajado específicamente en la pieza denominada HUB-EJE LENTO, la cual es una pieza que unifica el hub y el eje lento (también denominado eje

principal), y se produce mediante la técnica de fusión y colado en molde de arena, evaluando distintos materiales para su fabricación, como aceros, fundiciones de hierro y aleaciones de aluminio. Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación en colaboración con la División de Compuestos Estructurales Termorrígidos y la División de Materiales Compuestos Termoplásticos del INTEMA, que están enfocadas en la creación de las aspas para los molinos.

La primera parte del desarrollo de la pieza HUB-EJE LENTO consistió en evaluar la factibilidad de su manufactura a través de la técnica de fusión y colado, evaluando tres materiales candidatos mencionados anteriormente. El objetivo principal fue desarrollar un sistema de colada (desarrollo de sistema de alimentación, materiales y condiciones de colada) que permita minimizar defectos en la pieza colada, como la porosidad, y asegurar que la pieza cumpliera con los requisitos mecánicos y estructurales necesarios para las condiciones operativas de los molinos eólicos. Los materiales evaluados fueron:

- Acero con composición química apta para lograr estructuras bainíticas libre de carburos.
- Aleación de aluminio de la serie 3xx.x (aleaciones Al-Si).
- Fundición gris nodular con composición química apta para lograr microestructura ausferrítica (Fundiciones ADI).

Para el estudio del desarrollo de colada de la pieza se utilizó el software Magmasoft, que permite simular el proceso de colado, predecir porosidad y optimizar el diseño de los sistemas de alimentación y mazarotas. Se llevaron a cabo simulaciones con distintas configuraciones de materiales y métodos de colado (horizontal y vertical), con el fin de identificar configuraciones que redujeran defectos y mejoraran la calidad de la pieza. En particular, se trabajó con:

- Fundición gris GJS 700
- Aleación de aluminio AlSi7Mg
- Acero GX40CrSi13

Los resultados mostraron que la colada en molde vertical ofrecía mejores resultados, obteniendo piezas libres de defectos en fundición de hierro y con baja porosidad en acero y aluminio. Para analizar el rendimiento mecánico, se realizaron análisis estáticos en SolidWorks, aplicando diversas condiciones de carga para identificar áreas críticas de la pieza. El estudio se centró en la resistencia ante tensiones generadas por el viento, utilizando el perfil de tensiones de Von Mises. Los resultados indicaron que el conjunto era capaz de operar eficientemente a velocidades de viento de hasta aproximadamente 100 km/h, sin superar los límites mecánicos de los materiales seleccionados. También se evaluó el impacto de la geometría y el número de aspas, concluyendo que un diseño de tres aspas era el más eficiente.

Debido a las ventajas tecnológicas de las aleaciones de aluminio, como su bajo peso (esencial para este componente), se decidió fabricar un prototipo de la pieza siguiendo los parámetros y dimensiones definidos en las simulaciones. Los resultados experimentales revelaron algunos defectos de colada, como llenado incompleto. Este trabajo experimental fue desarrollado dentro del proyecto final de grado del estudiante Joaquín Grisolia, en la carrera de Ingeniería en Materiales.

El presente trabajo es una extensión de ese proyecto, y se enfoca en avanzar con el desarrollo de la pieza fabricada en aleaciones de aluminio-silicio, buscando obtener piezas sanas, con énfasis en un llenado adecuado del molde y en la evaluación cualitativa de defectos como porosidad y gases atrapados. En este proyecto se evaluaron distintas aleaciones de aluminio-silicio, ya que cada tipo de aleación presenta características distintas en términos de colabilidad, microestructura y propiedades mecánicas.

De forma complementaria, se fabricó la pieza BRIDA CON CAÑO, que se utiliza como acople para ensamblar las aspas al hub del molino, utilizando las mismas aleaciones de aluminio-silicio y el proceso de fusión y colado. Aunque la integración de estas piezas en una sola colada plantea desafíos en el diseño del molde y el proceso de colado, se evita la necesidad de soldadura o ensamblaje, reduciendo puntos de tensión que podrían ocasionar fallas prematuras y disminuir la durabilidad del conjunto.

Capítulo 2. Objetivos generales y particulares

2.1 Generales

Dentro de los objetivos generales se busca:

- Ampliar el dominio en el manejo de softwares de uso comercial como *Solidworks* y *MagmaSoft*.
- Aplicar las herramientas y conceptos metalúrgicos aprendidos durante la formación ingenieril.
- Integrar los conceptos de los materiales estudiados, centrándonos en las aleaciones de aluminio, en el marco de este proyecto final.
- Integrarse a un equipo de investigación y desarrollo para obtener experiencia en metodologías de trabajo, técnicas aplicadas y comprender las limitaciones habituales en investigación nacional.

2.2 Particulares

Con respecto a los objetivos particulares, se encuentran:

- Desarrollar satisfactoriamente un sistema de alimentación y definir parámetros de colada que permitan garantizar la fabricación por medio de la técnica de fusión y colado de la pieza HUB-EJE LENTO, procurando una porosidad mínima o nula para cada una de las aleaciones de aluminio consideradas. Este análisis se centra en la evaluación de variables que abarcan condiciones de colada y parámetros geométricos, influyendo directamente en la orientación de la solidificación y en la distribución de la porosidad presente en las piezas finales.

- Realizar una colada experimental de las piezas en estudio siguiendo el desarrollo realizado durante el proceso de simulación. Validar los resultados experimentales a través de la observación de la macro-microporosidad de las piezas coladas (mediante cortes y pulido específicos en las piezas, utilizando la técnica de macro/microscopía óptica), y su comparación con los datos proporcionados por el simulador Magmasoft.

Capítulo 3. Revisión bibliográfica

3.1 Clasificación de las aleaciones de aluminio

El aluminio se destaca por su versatilidad, debido a su apariencia atractiva, baja densidad, facilidad de manufactura y sus propiedades físicas, mecánicas y de resistencia a la corrosión. Las aleaciones de aluminio son ampliamente utilizadas en diversas aplicaciones, con el objetivo de diseñar componentes livianos en comparación con el acero [7].

Las aleaciones de aluminio se dividen principalmente en dos categorías: forjadas y de fundición. La clasificación dentro de estas categorías depende del contenido de aleantes. Muchas de estas aleaciones responden favorablemente a tratamientos térmicos basados en las solubilidades de sus fases, como el tratamiento en solución, enfriamiento y envejecimiento, resultando en un endurecimiento efectivo. Tanto las aleaciones de fundición como las forjadas pueden ser descritas como tratables térmicamente [8].

Las aleaciones forjadas a menudo se endurecen mediante trabajo mecánico, logrando propiedades específicas a través de reducción mecánica y del tamaño de grano; el endurecimiento por solución sólida es limitado debido a la baja solubilidad de los elementos a temperatura ambiente [7]. Algunas aleaciones de fundición, por otro lado, no son tratables térmicamente y se usan en su condición as-cast (en bruto de colado) o con tratamientos específicos no basados en efectos de solución o precipitación [8].

La nomenclatura de las aleaciones de aluminio varía según su categoría. Las aleaciones forjadas se identifican mediante un sistema de cuatro dígitos, mientras que las aleaciones de fundición emplean un sistema de tres dígitos y un valor decimal. Estas especificaciones se presentan en la Tabla 2.

- Primer dígito - componente(s) de aleación principal,
- Segundo dígito - variaciones de la aleación inicial,
- Tercer y cuarto dígitos - variaciones individuales de aleación (el número no tiene significado pero es único).

Tabla 2. Clasificación de las aleaciones de aluminio según el método de fabricación

Aleaciones para forja	
Serie	Aleación de aluminio
1XXX	Al puro
2XXX	Al-Cu
3XXX	Al-Mn
4XXX	Al-Si
5XXX	Al-Mg
6XXX	Al-Mg-Si
7XXX	Al-Zn
8XXX	Al-otros elementos
Aleaciones para fundición	
Serie	Aleación de aluminio
1XX.X	Al Puro
2XX.X	Al-Cu
3XX.X	Al-Si-Cu /Al-Si-Mg
4XX.X	Al-Si
5XX.X	Al-Mg
7XX.X	Al-Zn
8XX.X	Al-Tin
9XX.X	Al-otros elementos

Como se mencionó anteriormente, para la fabricación de las piezas en estudio, nos enfocaremos en las aleaciones de aluminio para fundición. Algunas de estas aleaciones básicas son las siguientes: [8]

Aleaciones de Al-Si

Estas aleaciones presentan una buena capacidad de fundición y resistencia a la corrosión. Se clasifican como hipoeutécticas si contienen menos del 12 % de silicio, como eutécticas si tienen cerca del 12 %, y como hipereutécticas si superan el 12 % de silicio. Mejorar la resistencia y ductilidad de estas aleaciones, especialmente aquellas con mayor contenido de

silicio, se logra modificando la estructura del eutéctico Al-Si. En las aleaciones hipoeutécticas, esta modificación es particularmente beneficiosa en fundiciones coladas utilizando moldes de arena, lográndose mediante la adición controlada de sodio o estroncio para refinar la fase eutéctica. También se utilizan adiciones de calcio y antimonio. Por otro lado, la pseudomodificación, que afecta la fineza del eutéctico pero no su estructura, puede lograrse regulando las velocidades de solidificación. En las aleaciones hipereutécticas Al-Si, es esencial reducir la fase de silicio proeutéctico mediante adiciones de fósforo para lograr una fundición óptima en cuanto a propiedades mecánicas del producto.

Aleaciones de Al-Cu:

Contiene entre un [4-5] % de cobre (Cu). Las impurezas más comunes suelen ser hierro, silicio y, ocasionalmente, magnesio. Admiten tratamiento térmico, logrando alcanzar elevados niveles de resistencia y ductilidad. Sin embargo, las características generales de moldeo (colabilidad, fragilidad durante la contracción) son algo bajas especialmente para mayores a 5 % de cobre. Además, muestran dificultades para ser coladas en coquilla metálica a causa del gran intervalo de solidificación y la alta propensión a formar grietas por defectos térmicos. Por lo tanto, es crucial un diseño meticuloso de las piezas que tenga en cuenta las condiciones de moldeo.

Estas aleaciones monofásicas de aluminio-cobre difieren de las aleaciones de silicio, careciendo de una segunda fase altamente fluida en las últimas etapas de solidificación. La presencia de esta segunda fase, cuando está disponible, facilita la alimentación requerida en áreas de contracción y ayuda a contrarrestar las tensiones de solidificación. Se encuentran comúnmente en aplicaciones de alto rendimiento en vehículos y maquinarias, particularmente en piezas expuestas a altas demandas mecánicas, impactos o desgaste, como las poleas para correa trapezoidal.

Aleaciones de Al-Si-Cu:

En estas aleaciones, el cobre contribuye a la resistencia y el silicio mejora la colabilidad. Por lo tanto, las aleaciones con alto contenido de silicio normalmente se utilizan para piezas fundidas más complejas y para procesos de fundición a presión y moldes permanentes (metálicos) que a menudo requieren el uso de técnicas de fundición más exigentes para evitar problemas de llenado de moldes y solidificación.

Las aleaciones de Al-Cu-Si con más de 4 % de cobre son tratables térmicamente, pero normalmente el tratamiento térmico se utiliza sólo con esas aleaciones que también contienen magnesio, lo que mejora su respuesta al tratamiento térmico. Las aleaciones Al-Si con alto contenido de silicio (mayor al 10 %) presentan una baja expansión térmica, lo que resulta ventajoso en aplicaciones de alta temperatura. Cuando el porcentaje de silicio supera el 12-13 % (alcanzando valores típicos de hasta 22 %), se forman granos primarios de silicio. Si estos se distribuyen uniformemente, y mejoran significativamente la resistencia al desgaste. Estas propiedades hacen que las aleaciones hipereutécticas sean ampliamente utilizadas en componentes como bloques de motores y pistones de automóviles.

Entre las aleaciones más comunes se encuentran la AlSi5Cu3, destacada por su alta resistencia y aptitud para procesos de moldeo en arena o coquilla, y la AlSi8Cu3, que se ha convertido en el estándar predominante para el moldeo por inyección.

Aleaciones de Al-Mg

La principal ventaja de este tipo de aleación radica en su alta resistencia a la corrosión, especialmente en ambientes marinos y frente al agua de mar. Además, muestran valores de resistencia y tenacidad que varían de moderados a altos. A diferencia de las aleaciones Al-Si, estas requieren un mayor cuidado en el diseño de los sistemas de alimentación, y un gradiente de temperatura más pronunciado durante la solidificación para lograr piezas fundidas sin defectos de colada.

Aleaciones de Al-Zn-Mg

Estas aleaciones poseen buenas propiedades mecánicas en estado bruto de colado, y pueden mejorarse mediante tratamientos de precipitación. No son adecuadas para aplicaciones a altas temperaturas y requieren precisión durante el proceso de fundición para minimizar defectos. Sin embargo, con técnicas adecuadas, es posible obtener piezas complejas de alta calidad. Una de sus principales ventajas es su capacidad para endurecerse tanto en frío como en caliente sin necesidad de recocido previo, lo que facilita la producción de piezas grandes con excelentes propiedades mecánicas, alta tenacidad, buena maquinabilidad, estabilidad dimensional y resistencia a la corrosión. La aleación AlZn5Mg es especialmente utilizada en piezas moldeadas en arena o coquilla.

Aleaciones Al-Tin

Las aleaciones de aluminio-estaño, que contienen aproximadamente un 6 % de estaño junto con trazas de cobre y níquel (añadidos para incrementar sus propiedades mecánicas), se utilizan principalmente en la fabricación de rodamientos debido a su excelente capacidad de lubricación. Para lograr una distribución uniforme del estaño y optimizar las propiedades de rodamiento, estas aleaciones requieren métodos de fundición con enfriamiento rápido. Además, pueden ser sometidas a trabajo en frío para mejorar su resistencia a la compresión.

3.2 Aleaciones de Al-Si

Debido a sus propiedades mecánicas y colabilidad, este trabajo final se centró en el uso de aleaciones de aluminio-silicio para la fabricación de la pieza Hub-Eje lento de un molino eólico de baja potencia. Estas aleaciones cumplen con los requisitos estructurales necesarios para garantizar su correcto funcionamiento y son especialmente adecuadas para piezas con geometrías complejas, gracias a su alta fluidez durante la solidificación, que ayuda a evitar defectos como los microrechupes.

Además, estas aleaciones destacan por su resistencia a la tracción y baja densidad, características que las hacen adecuadas para componentes sometidos a esfuerzos dinámicos y cíclicos. La incorporación de aleantes como el cobre (Cu) o el magnesio (Mg) mejoran aún más la resistencia al desgaste y a la fatiga, aspectos esenciales para piezas expuestas a condiciones de trabajo exigentes [9, 10].

El silicio, al formar una estructura eutéctica con el aluminio, contribuye a mejorar la colabilidad y reduce la formación de porosidad, lo que permite obtener piezas con una excelente calidad superficial y precisión dimensional, características fundamentales para garantizar el rendimiento de componentes críticos como el Hub-Eje lento.

3.2.1 El sistema Al-Si

El sistema Al-Si, representado en la Figura 4 [11], muestra un diagrama de fases típico de una aleación eutéctica. El punto de fusión del aluminio es 660 °C, mientras que el del silicio es 1430 °C. La solubilidad máxima del silicio en el aluminio es de 1,65 % en peso a la temperatura eutéctica de 577 °C. En las aleaciones hipoeutécticas, durante el inicio del proceso de solidificación, se forman dendritas de aluminio primario. La reacción eutéctica se presenta con un 12,6 % de silicio en peso, y cuando la concentración de silicio es superior a este valor, la aleación se define como hipereutéctica, lo que implica la precipitación de silicio primario antes de la solidificación eutéctica.

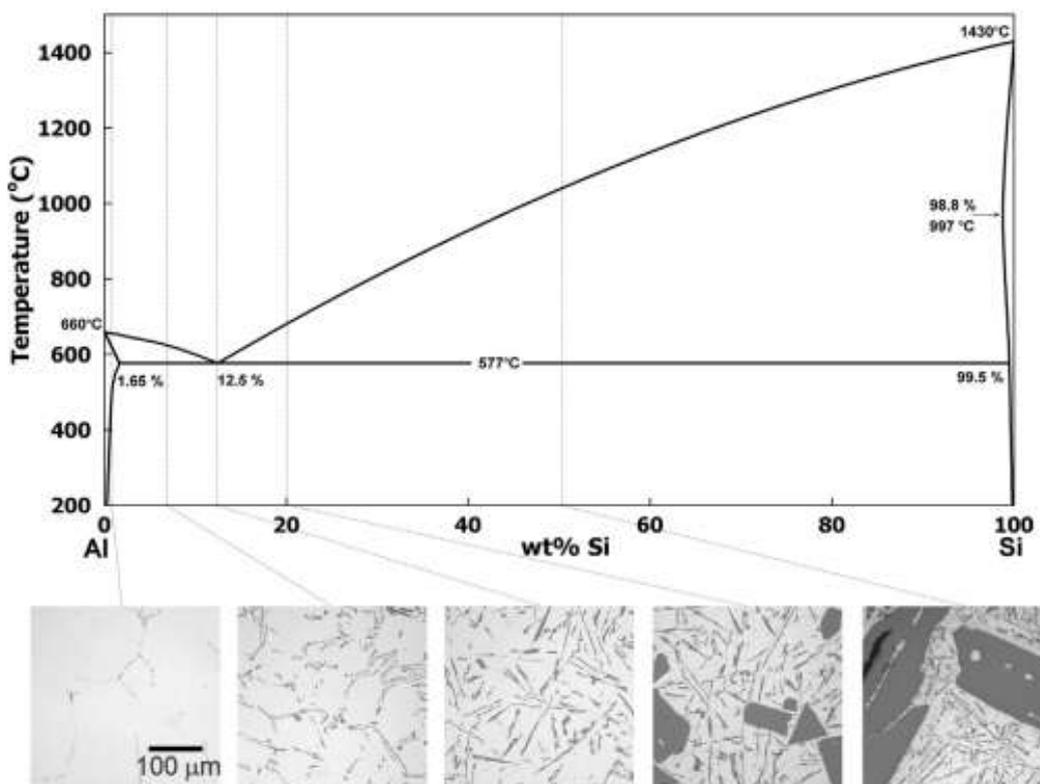


Figura 4. Diagrama Al-Si [11]

La adición de modificadores como el sodio o el estroncio altera la reacción eutéctica, desplazando el contenido de silicio a valores más altos y previniendo la formación de silicio proeutéctico. Este ajuste mejora la microestructura eutéctica, incrementando la resistencia y la ductilidad de las aleaciones. Asimismo, el incremento de la velocidad de solidificación produce granos más pequeños y una dispersión más uniforme de la fase eutéctica, lo que se traduce en propiedades mecánicas superiores.

El rendimiento mecánico de las aleaciones de aluminio depende en gran medida del tamaño, la forma y la distribución de las partículas de silicio. Como se detalla en la Figura 5, en condiciones normales de enfriamiento, el silicio suele solidificar en forma de placas o agujas gruesas, que tienden a iniciar fracturas y, como resultado, reducen las propiedades mecánicas. Este comportamiento puede modificarse a través de tratamientos térmicos prolongados a altas temperaturas o mediante la adición de elementos como estroncio (Sr) o sodio (Na). Estos modificadores transforman la morfología del silicio, cambiando las estructuras aciculares por partículas esferoidales y más finas. Esta modificación ayuda a distribuir mejor las tensiones internas del material, lo que disminuye la probabilidad de grietas y mejora considerablemente la resistencia a la fatiga y la ductilidad. [12]

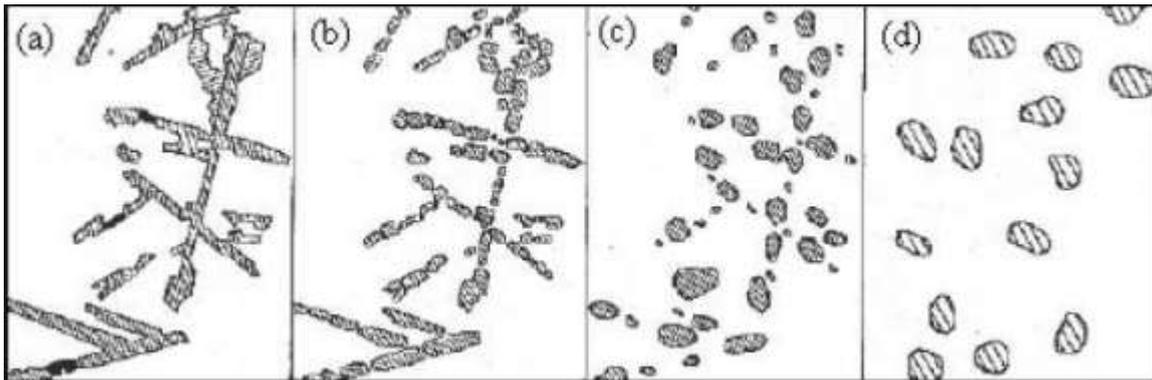


Figura 5. Cambio en la morfología del silicio a través de tratamientos térmicos prolongados a altas temperaturas o mediante la adición de elementos como estroncio (Sr) o sodio (Na) [13]

Por lo general, las aleaciones Al-Si contienen pequeñas cantidades de hierro (Fe), el cual se considera una impureza. Aunque esté presente en concentraciones relativamente bajas, el hierro puede formar fases intermetálicas que afectan de manera adversa las propiedades mecánicas de la aleación. En ausencia de silicio, las fases dominantes que se forman son Al_3Fe y Al_6Fe . Sin embargo, cuando el silicio está presente, prevalecen las fases Al_8Fe_2Si (fase α) y Al_5FeSi (fase β), siendo esta última particularmente dañina para la ductilidad debido a su morfología acicular o laminar. Adicionalmente, en presencia de magnesio, puede formarse una fase alternativa denominada π ($Al_8FeMg_3Si_6$). Estas fases tienden a adquirir una morfología tipo aguja (script), lo que las hace más frágiles bajo tensiones, reduciendo significativamente la ductilidad. [9,10]

A medida que aumenta el contenido de hierro, la ductilidad de las aleaciones de Al-Si disminuye y, además, incrementa la porosidad, lo que afecta negativamente las propiedades mecánicas. Existe un umbral crítico de concentración de hierro que, cuando se supera, empeora significativamente el comportamiento de la aleación. Este límite crítico está relacionado con la cantidad de silicio en la aleación: a mayor contenido de silicio, se tolera una mayor cantidad de hierro antes de que se forme la fase β , que es especialmente perjudicial. [10]

Otro aspecto crucial es la velocidad de enfriamiento y el espaciado dendrítico secundario (SDAS). Las altas velocidades de enfriamiento, que resultan en un menor SDAS, contribuyen a disminuir el tamaño de las partículas intermetálicas, lo que mitiga los efectos negativos del hierro. Sin embargo, bajo condiciones de enfriamiento lento, las partículas intermetálicas tienden a crecer, lo que agrava el deterioro de las propiedades mecánicas, como la resistencia y la ductilidad, y aumenta la susceptibilidad a la aparición de defectos en la aleación. [10]

3.2.2 Aleación hipoeutéctica

Durante la solidificación de una aleación hipoeutéctica de Al-Si, el aluminio primario comienza a solidificar formando una estructura dendrítica. Una vez que se alcanza el punto eutéctico, las fases Al-Si comienzan a nuclear y crecen progresivamente hasta que el proceso de solidificación concluye. A temperatura ambiente, tal como se muestra en la Figura 6, este tipo de aleaciones está compuesto por una fase primaria de aluminio que es blanda y dúctil, junto con una fase eutéctica de silicio, caracterizada por ser dura y frágil [14]. El silicio suele presentarse en forma de placas o agujas, lo que afecta negativamente la ductilidad y la resistencia del material. Sin embargo, como se explicará en detalle más adelante, la adición de elementos modificadores permite alterar esta morfología, transformando las estructuras en formas más finas o incluso esféricas. Este cambio en la microestructura mejora significativamente tanto la ductilidad como la resistencia a la tracción de la aleación.

El tamaño del espaciado dendrítico y el de las partículas de silicio dependen en gran medida de las condiciones de solidificación de la aleación, las cuales pueden describirse mediante parámetros como la velocidad de crecimiento de las puntas dendríticas (VL) y la tasa de enfriamiento (T). En particular, un enfriamiento rápido provoca una reducción en el espaciado dendrítico secundario (SDAS), lo que genera dendritas más pequeñas y una distribución eutéctica más uniforme, mejorando así tanto la resistencia como la ductilidad de la aleación. En contraste, un enfriamiento más lento produce dendritas más gruesas y partículas de silicio de mayor tamaño, lo que puede hacer que la aleación sea más frágil y perjudique sus propiedades mecánicas. [15]

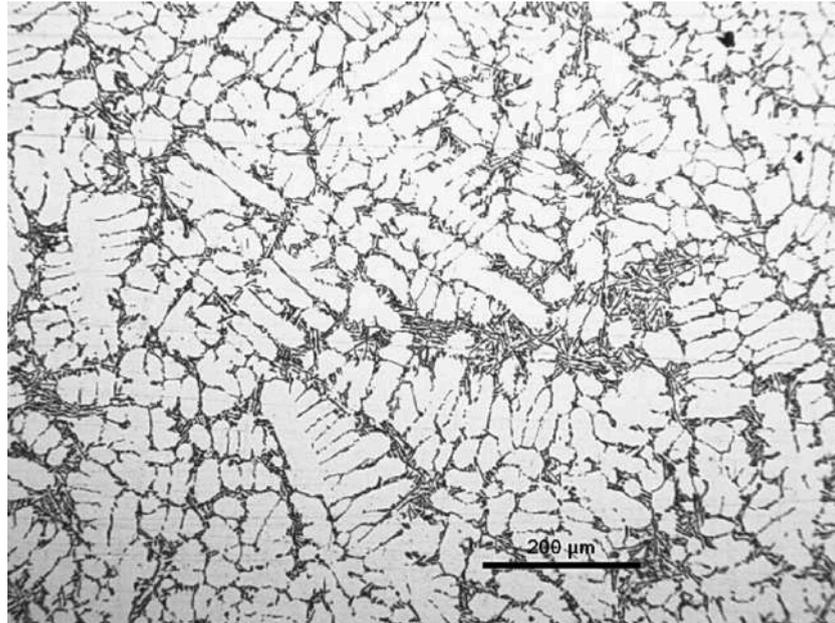


Figura 6. Microestructura de una aleación hipoeutética (aleación 357) [16]

3.2.3 Aleación eutética

Las aleaciones eutéticas de aluminio-silicio (Al-Si) se definen por su capacidad para solidificar en una composición cercana al 12,6 % de silicio en peso. Durante el proceso de solidificación, las fases de aluminio y silicio se desarrollan de manera simultánea al alcanzar la temperatura eutética de 577 °C. La microestructura resultante de esta aleación, como se detalla en la Figura 7, presenta una matriz eutética que contiene una disposición alternada de las fases de aluminio y silicio. En esta configuración, el silicio se manifiesta en forma de partículas o fibras que se distribuyen dentro de la matriz de aluminio, lo que contribuye a aumentar la rigidez y dureza del material. Sin embargo, esta misma microestructura también puede incrementar la fragilidad de la aleación en comparación con las aleaciones hipoeutéticas, que presentan características diferentes en su comportamiento mecánico. [14]

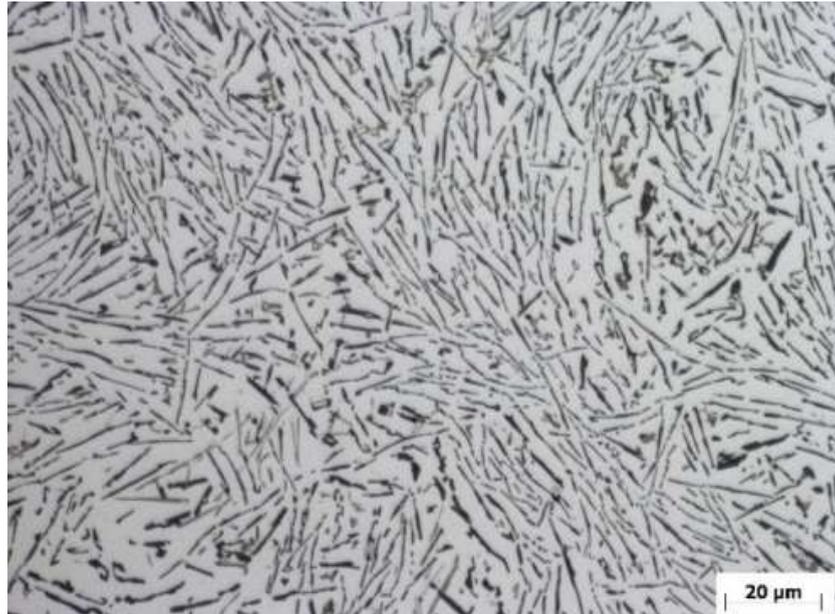


Figura 7. Microestructura de una aleación eutéctica [17]

3.2.4 Aleación hipereutéctica

Durante la solidificación de las aleaciones hipereutécticas Al-Si, el silicio primario se precipita antes de la reacción eutéctica, lo que da lugar a una distribución de cristales grandes y angulares de silicio dentro de la matriz aluminio-silicio. Estos cristales, por su tamaño y morfología, tienden a reducir la ductilidad y resistencia a la fractura de la aleación. Las propiedades mecánicas de estas aleaciones dependen fuertemente de la morfología, tamaño y distribución de los cristales de silicio primario. Para mejorar estas características, es fundamental refinar y modificar tanto el silicio primario como el eutéctico, además de optimizar los parámetros de solidificación [18]. En la Figura 8 se muestra una microestructura típica de estas aleaciones.

Debido a su baja densidad, alta rigidez específica, resistencia a altas temperaturas y desgaste, y bajo coeficiente de expansión térmica, las aleaciones hipereutécticas Al-Si son altamente apreciadas en la industria del transporte. Estas propiedades permiten que estas aleaciones sustituyan al hierro fundido en componentes críticos de motores de automóviles, como cilindros, pistones y otras partes de alto rendimiento. [19]

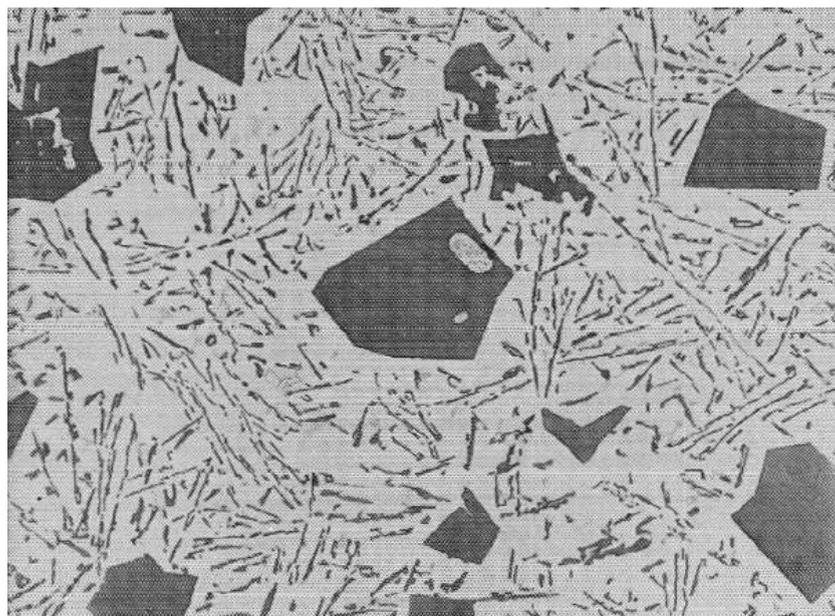


Figura 8. Microestructura de una aleación hipereutética (Al-18% Si) [20]

3.3 Tipo de aleaciones aluminio-silicio. Serie 4xx.x de aleaciones de aluminio (Norma ASTM B108)

Como se mencionó en el punto anterior, este tipo de aleaciones es una de las más importantes en la industria de la fundición debido a sus buenas propiedades mecánicas y características de procesamiento. Además, tienen alta resistencia al desgaste, bajo coeficiente de expansión térmica, excelente fluidez y maquinabilidad.

En la Tabla 3 se muestra un resumen de los diferentes aleantes que se pueden adicionar a este tipo de aleaciones, con sus respectivas composiciones, que permite ajustar sus propiedades para cumplir con diversas aplicaciones industriales.

Tabla 3. Características de diferentes aleaciones de aluminio de la serie 4xx.x [21]

Serie de aleación de aluminio	Contenido de silicio [%]	Otros componentes [%]	Características
443	5,3	-	Se puede utilizar en cualquier tipo de fundición. Buena ductilidad, resistencia a la corrosión, y estanqueidad a la presión.
413 y A413	12	-	Fundición a presión. Buena resistencia a la corrosión, buena

			estanqueidad a la presión y capacidad de fundición.
A444	7	0,2 Fe	Buena resistencia al impacto y a la corrosión.
319	6	3,5 Cu	Uso general en molde de arena. Pueden mejorar la resistencia con tratamiento T6.
380	8,5	3,5 Cu	Fundición a presión. Pueden mejorar con tratamiento T6 o T7.
333	9	3,5 Cu	Uso general en molde permanente. Pueden mejorarse la resistencia con tratamiento T6.
356 y A356	7	0,3 Mg	Excelentes características de fundición. Excelente resistencia a la corrosión, estanqueidad a la presión y soldabilidad. Pueden ser tratadas térmicamente.
A357	7	0,5 Mg	Fundición en arena y molde permanente de calidad superior.
359	9	0,6 Mg	Alta resistencia y ductilidad. Buenas características de fundición.
360	10,5	0,5 Mg	Fundición a presión. Mismas características que la aleación 359.

355	5	1,3 Cu y 0,5 Mg	Fundición en molde de arena y molde permanente.
336	12	2,5 Ni - 1 Cu - 1 Mg	Buenas propiedades a altas temperaturas. Buena resistencia al desgaste.
390	17	4,5 Cu - 0,5 Mg	Excelente resistencia al desgaste y buena resistencia.

3.3.1 Aleación de aluminio AlSi7Mg

La aleación de aluminio AlSi7 pertenece al grupo de aleaciones hipoeutécticas. En la industria, las aleaciones más comunes son la 356 y la A356, cuya principal diferencia radica en el contenido de magnesio (Mg), siendo mayor en la A356. La composición química de este tipo de aleación se presenta en la Tabla 4. Un mayor contenido de magnesio mejora las propiedades mecánicas, razón por la cual la A356 se emplea principalmente en aplicaciones que requieren una mayor resistencia a la tracción y mejor ductilidad, como en componentes estructurales de alto rendimiento para las industrias automotriz y aeroespacial: por ejemplo llantas de aluminio, soportes de suspensión, piezas de ensamblaje en aeronaves, entre otros. Por otro lado, la aleación 356 se utiliza en aplicaciones donde no se requiere tanta resistencia mecánica como cubiertas de cajas de transmisión, y soportes de motor. En la tabla 3 se presentan otras características de estas aleaciones.

Tabla 4. Composición química típica del AlSi7Mg [wt %] [8]

Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti
6,5-7,5	0,2-0,45	0,2-0,6	0,2	0,1-0,35	0,1-0,35	0,2-0,25

Estas aleaciones suelen someterse a un tratamiento térmico tipo T6 (el cual será descrito más adelante), que mejora las propiedades mecánicas mediante la disolución y precipitación de partículas de Mg_2Si en solución sólida. La efectividad del tratamiento depende en gran medida de la concentración de magnesio en la aleación [22].

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, la velocidad de enfriamiento influye significativamente en las propiedades mecánicas de estas aleaciones. En la Figura 9 se ilustra la comparación de velocidades de enfriamiento en una aleación de aluminio 356. Un mayor espacio interdendrítico tiende a reducir las propiedades mecánicas. Este espacio disminuye a medida que la composición se aproxima a la eutéctica, ya que el rango de solidificación se reduce con el aumento del contenido de silicio. Un DAS más fino mejora notablemente la

resistencia a la fatiga, debido a la reducción del tamaño de los granos y las partículas eutécticas, lo que permite una deformación más homogénea. Este efecto se explica por el endurecimiento por dispersión, ya que la interacción de las dislocaciones con las partículas eutécticas y las fronteras de los granos refuerza la resistencia mecánica y retrasa la iniciación y propagación de microgrietas, aumentando así la vida útil del material bajo condiciones de fatiga [23].

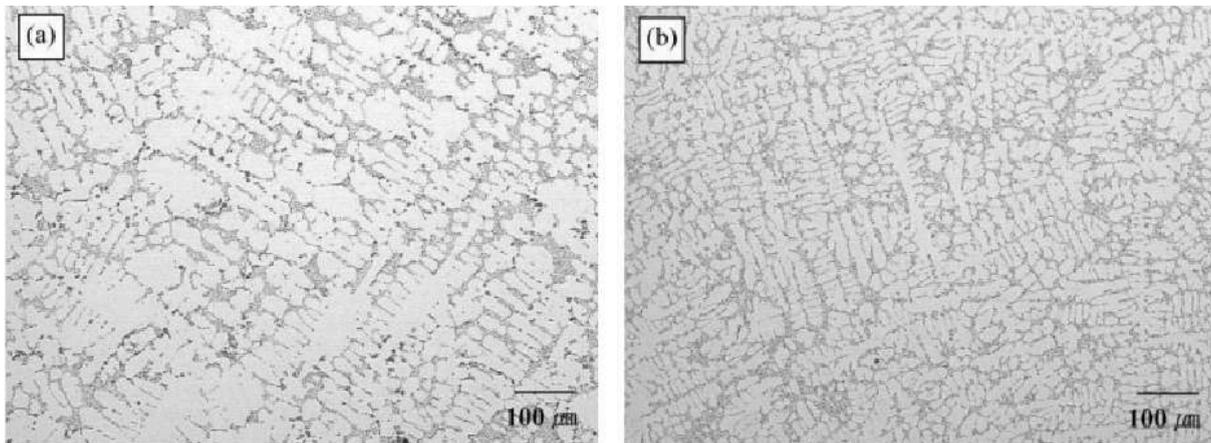


Figura 9. Aleación de aluminio A356 a) enfriamiento lento b) enfriamiento rápido [23]

3.3.2 Aleación de aluminio AlSi10Mg

La aleación de aluminio AlSi10Mg, cuya composición se presenta en la Tabla 5, con un mayor contenido de silicio respecto a la aleación AlSi7Mg, se clasifica como una aleación hipoeutéctica, similar a la aleación previamente mencionada. Su alto contenido de silicio le confiere una excelente colabilidad, lo que resulta en una fusión a temperaturas relativamente bajas y una contracción mínima durante el proceso de solidificación. Esta aleación destaca por sus propiedades mecánicas favorables, como se muestra en la Tabla 3, incluyendo baja densidad, buena resistencia a la corrosión y una notable capacidad de fundición. Por estas razones, es ampliamente utilizada en las industrias automotriz, aeronáutica y militar.

Tabla 5. Composición química típica del AlSi10Mg [wt %] [8]

Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Ni	Zn	Ti	Sn	Pb
9-10	0,25-0,45	0,55	0,05	0,45	0,05	0,1	0,15	0,05	0,05

Al igual que la aleación AlSi7Mg, las propiedades mecánicas del AlSi10Mg pueden ser mejoradas mediante un tratamiento térmico denominado T6. En la Figura 10 y Tabla 6 se presenta una comparación entre ambas aleaciones, con y sin tratamiento térmico. Este tratamiento no solo elimina tensiones residuales, sino que también modifica la morfología del silicio, transformando las agujas gruesas en partículas esféricas, como se ilustra en la Figura 10-B. En contraste, la Figura 10-A muestra la microestructura sin tratamiento térmico,

evidenciando grandes granos de alfa-Al y una fase eutéctica irregular. La transformación en la microestructura reflejada en la Figura 10-B con tratamiento T6 se traduce en mejoras significativas en las propiedades mecánicas, tal como se detalla en la Tabla 6.

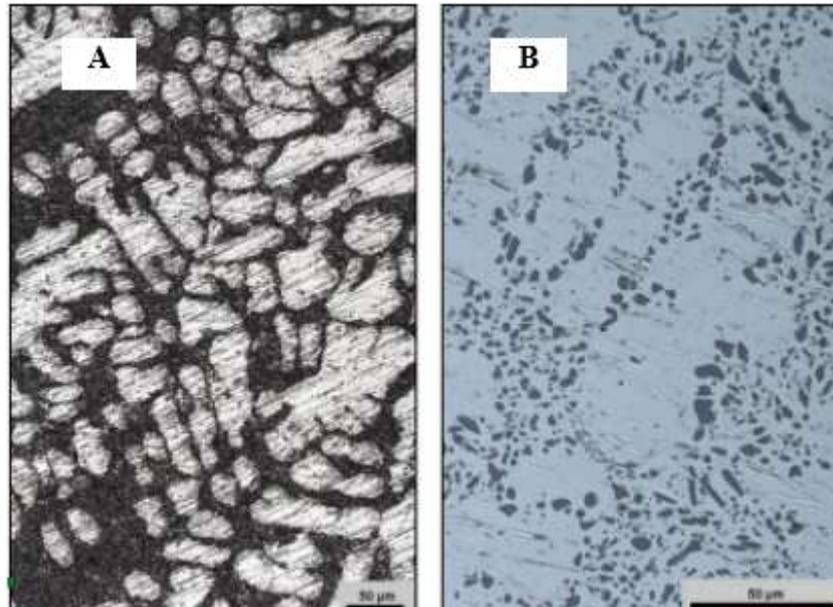


Figura 10. Microestructura del AlSi10Mg, a) Sin tratamiento térmico, b) Con tratamiento térmico T6 [24]

Tabla 6. Propiedades mecánicas reportadas en la literatura para AlSi10Mg y AlSi7Mg

Aleación	$\sigma_{0,2}$ [MPa]	σ (rotura) [MPa]	Elongación [%]	Dureza HB
AlSi10Mg*1	99	193	6	67
AlSi10Mg con T6*1	242	309	7	108
AlSi7Mg*2	124	164	6	-
AlSi7Mg con T6*2	164	228	3,5	70

*1 Los valores reportados para la aleación AlSi10Mg corresponden a la referencia [24] y *2 a [8]

3.4 Tratamientos térmicos en aleaciones de aluminio

A continuación, se describirán brevemente dos de los tratamientos térmicos a los que son sometidas las aleaciones de aluminio: solubilización y envejecimiento, y recocido.

3.4.1 Tratamiento de Solubilización y envejecimiento (también llamado de disolución):

- Tratamiento de disolución

El tratamiento de solubilización es un proceso que se utiliza en las aleaciones de aluminio, diseñado para mejorar las propiedades mecánicas y la homogeneidad de la microestructura. Durante este tratamiento, la aleación se calienta a una temperatura dentro de la región de solución sólida monofásica alfa-Al del diagrama de fases, lo que permite la disolución de los constituyentes presentes. Este paso es fundamental para eliminar o modificar las irregularidades residuales de procesos previos como la fundición.

El proceso se basa en la difusión de los elementos solubles, facilitada por la alta concentración de vacantes que se incrementa exponencialmente con la temperatura. Este mecanismo de difusión por salto de vacantes es clave para lograr una distribución homogénea de los elementos aleantes, mejorando así la uniformidad estructural y las propiedades del material. La duración y la temperatura del tratamiento varían según la aleación como se observa en la Figura 11; por ejemplo, las aleaciones Al-Si-Mg se benefician de tiempos cortos de solubilización debido a la alta difusividad del magnesio y el silicio. En contraste, las aleaciones Al-Cu-Mg requieren tiempos más prolongados para disolver completamente el cobre, un elemento de difusión lenta.

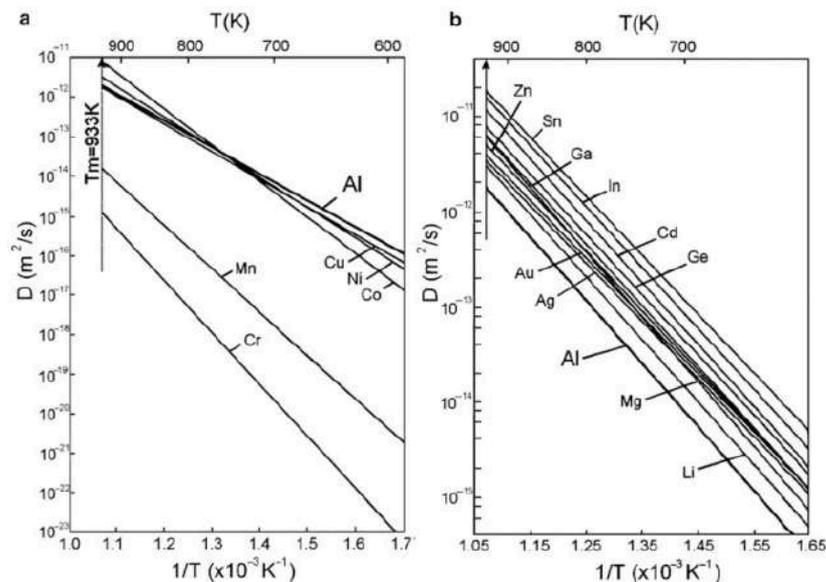


Figura 11. Difusión para aleaciones binarias de aluminio. (a) Elementos de difusión lenta, (b) Elementos de difusión rápida [25]

Es crucial controlar cuidadosamente tanto la temperatura como el tiempo de exposición durante el tratamiento. Si la aleación se mantiene demasiado tiempo a altas temperaturas, puede ocurrir un crecimiento excesivo de los granos, lo que deteriora las propiedades mecánicas. Por otro lado, un calentamiento excesivo podría provocar la fusión de fases no deseadas, afectando negativamente la microestructura.

- *Temple*

El templeado constituye la segunda fase crucial en el tratamiento térmico de las aleaciones de aluminio. Este proceso implica un enfriamiento rápido desde la temperatura de solubilización para retener una solución sólida sobresaturada y una alta concentración de vacancias, las cuales son esenciales para el posterior endurecimiento por envejecimiento. Al enfriar rápidamente el material, se logra preservar una concentración cercana al máximo de soluto disuelto, así como una densidad de vacancias significativamente mayor que la que existiría a temperaturas más bajas.

En la práctica industrial, diversos medios de enfriamiento, como agua, salmuera o aire forzado, se utilizan para el templeado. El agua es el medio más común, aunque en situaciones donde el control preciso de la velocidad de enfriamiento es crítico, se prefieren mezclas especiales como agua-glicol. Este tipo de enfriamiento controlado es fundamental para evitar defectos como la distorsión del material, especialmente en productos fabricados que requieren alta precisión.

Además, la sensibilidad al templeado, es decir, la capacidad de una aleación para soportar enfriamientos más lentos sin comprometer sus propiedades, juega un papel crucial. En este sentido, el rango de temperatura crítica, generalmente entre 290 y 400 °C, es de particular importancia para minimizar tensiones residuales y evitar distorsiones indeseadas. Productos delgados como láminas y placas suelen ser especialmente susceptibles a estas tensiones, y en muchos casos, se someterán a un proceso de estirado post-templeado para alinear y liberar tensiones.

El control estricto del proceso de templeado es fundamental para asegurar la calidad del material tratado térmicamente. Las variaciones en los tiempos de transferencia y en las condiciones de enfriamiento pueden introducir inconsistencias significativas en las propiedades del lote producido. Por lo tanto, es esencial entender las capacidades térmicas de los hornos y sistemas de templeado específicos, ya que las diferencias en el equipo y los procedimientos de manejo pueden resultar en resultados variados.

- *Envejecimiento*

El endurecimiento por precipitación, también conocido como envejecimiento, es un proceso crucial en el tratamiento térmico de aleaciones de aluminio, diseñado para mejorar significativamente sus propiedades mecánicas. Este proceso implica la descomposición de una solución sólida sobresaturada, formando una dispersión controlada de partículas finas de precipitado. Estas partículas actúan como barreras al deslizamiento cristalográfico, lo que resulta en un aumento en la resistencia y dureza del material.

Existen dos tipos principales de envejecimiento: natural y artificial. El envejecimiento natural ocurre a temperatura ambiente y es un proceso lento, mientras que el envejecimiento artificial, llevado a cabo a temperaturas elevadas, acelera la formación de precipitados. Este

último es más eficiente para controlar y optimizar las propiedades mecánicas específicas requeridas en aplicaciones industriales.

Durante el envejecimiento artificial, la clave está en ajustar cuidadosamente la temperatura y el tiempo de tratamiento. Un control inadecuado puede llevar al crecimiento excesivo de los precipitados, lo que podría deteriorar las propiedades mecánicas deseadas. Las aleaciones de aluminio tratadas térmicamente muestran mejoras significativas en resistencia y dureza, aunque suelen experimentar una reducción en la ductilidad.

En el sistema Al-Cu, por ejemplo, el endurecimiento por precipitación sigue una secuencia bien estudiada: solución sólida sobresaturada \rightarrow zonas GP \rightarrow θ'' \rightarrow θ' \rightarrow θ . Cada fase transicional contribuye a la evolución de la microestructura y las propiedades mecánicas del material. Las zonas GP, por ejemplo, son coherentes y consisten en capas finas de átomos de cobre entre capas de aluminio. Las fases θ'' y θ' son más avanzadas en la secuencia, con θ' formando directamente sobre dislocaciones, lo que refuerza aún más la aleación.

Este tratamiento es esencial en industrias como la automotriz y aeroespacial, donde se requiere un equilibrio óptimo entre resistencia, ductilidad y estabilidad dimensional. Por ejemplo, en la aleación A356 utilizada en componentes automotrices, el proceso de envejecimiento artificial mejora la resistencia al daño y la ductilidad, minimizando a la vez la distorsión durante el enfriamiento. En la Tabla 7 se presenta la secuencia de precipitación de las aleaciones de la serie Al-Mg-Si (6000), destacando las distintas fases que se forman durante el proceso de endurecimiento por precipitación. Esta secuencia incluye la formación de agrupaciones y coagrupaciones de átomos de Mg y Si, así como las fases β'' , β' , B', y β , cada una con sus características estructurales y efectos sobre las propiedades mecánicas de la aleación.

Tabla 7. Precipitación en aleación de aluminio (Al-Mg-Si) [25]

Serie Al-Mg-Si (6000)	Secuencia de Precipitación
Agrupación de átomos discretos de Mg o Si	Agrupación de Si puede ser perjudicial para la resistencia
Coagrupación de átomos de Mg y Si	Pueden ser zonas GP resultantes de la transformación por ordenamiento
β'' coherente ($Mg_2Si/MgSi$) como agujas a lo largo de $\langle 100 \rangle_a$	Monoclínico
β' semicoherente (Mg_2Si) como varillas a lo largo de $\langle 100 \rangle_a$	Hexagonal, puede formarse a partir de β''
B' semicoherente (Mg_2Si) como láminas a lo largo de $\langle 100 \rangle_a$	Hexagonal, se forma junto con β' , favorecido por relaciones altas de Si
β (Mg_2Si), como plaquetas en $\{100\}_a$	Cúbico centrado en caras; puede transformarse directamente desde β'

3.4.2 Recocido

El proceso de recocido, actualmente identificado como el temple O, se utiliza en casos donde se busca maximizar la estabilidad dimensional y física de las piezas, así como minimizar las tensiones residuales. Aunque no es común su uso, es particularmente efectivo para alcanzar estos objetivos. Normalmente, el recocido se realiza a temperaturas de al menos 345 °C (650 °F) durante un periodo breve, que varía entre 2 y 4 horas. En situaciones que requieren una reducción aún mayor de las tensiones residuales, se recurre a temperaturas más elevadas. Además, es crucial regular la tasa de enfriamiento para evitar la reintroducción de tensiones residuales y la formación de estructuras no deseadas.

3.5 Sistema de Designación de Tratamientos Térmicos

F, Fabricado: Esta designación corresponde a productos que han sido procesados mediante trabajo en frío, en caliente o fundición, sin un control específico sobre las condiciones térmicas o el endurecimiento por deformación. En el caso de los productos forjados, no se definen límites en las propiedades mecánicas.

O, Recocido: Se aplica a productos forjados que han sido recocidos para alcanzar la mínima dureza posible, así como a productos fundidos que se someten a recocido para mejorar su ductilidad y estabilidad dimensional. Este tratamiento puede ir acompañado de un dígito adicional, a excepción del cero.

H, Endurecimiento por Deformación (solo para productos forjados): Indica productos que han sido reforzados mediante deformación, con o sin un tratamiento térmico adicional para reducir su resistencia. La letra "H" siempre va seguida de dos o más dígitos que detallan el tratamiento específico.

W, Tratamiento Térmico (Solución): Se refiere a un tratamiento térmico inestable utilizado para aleaciones cuya resistencia varía con el tiempo a temperatura ambiente después de ser sometidas a un tratamiento térmico de solución. En este caso, la designación incluye el período de envejecimiento natural (por ejemplo, W 1/2 h).

T, Tratamiento Térmico (Solución): Aplica a aleaciones cuya resistencia se estabiliza en un período relativamente corto después de haber sido tratadas térmicamente por solución. La letra "T" siempre va seguida de uno o más dígitos que especifican el tratamiento realizado.

El sistema de designación para productos tratados térmicamente, tanto forjados como fundidos, se basa en las letras **W** y **T**. La **W** corresponde a un tratamiento inestable, mientras que la **T** hace referencia a un tratamiento térmico estable, diferenciándose de los tratamientos **F**, **O** y **H**. El tratamiento **T** se acompaña de un número del 1 al 10, el cual corresponde a una secuencia específica de tratamientos.

- **T1:** Se refiere a productos que han sido enfriados después de un proceso de conformado a alta temperatura (como la fundición o extrusión) y que han sido envejecidos de manera natural hasta alcanzar una condición estable. No se realiza

trabajo en frío después del proceso de conformado, y si se efectúan aplanados o enderezados, estos no influyen en las propiedades especificadas.

- **T2:** Designa productos enfriados tras un proceso de conformado a alta temperatura, que han sido trabajados en frío para mejorar su resistencia y que luego se envejecen naturalmente hasta alcanzar una condición estable. Los efectos del trabajo en frío, incluyendo el aplanado o enderezado, se consideran en las propiedades especificadas.
- **T3:** Aplica a productos tratados térmicamente por solución, que han sido trabajados en frío para mejorar su resistencia y que se envejecen naturalmente hasta estabilizarse. Se considera el efecto del trabajo en frío, incluido el aplanado o enderezado, en las propiedades.
- **T4:** Se refiere a productos tratados térmicamente por solución y envejecidos naturalmente hasta alcanzar una condición estable, sin trabajo en frío posterior. Si se realizan procesos como aplanado o enderezado, los efectos no se consideran en las propiedades especificadas.
- **T5:** Incluye productos que, después de un proceso de conformado a alta temperatura, se enfrían y envejecen artificialmente, sin trabajo en frío posterior. Los efectos del trabajo en frío, como el aplanado o enderezado, no se toman en cuenta en las propiedades especificadas.
- **T6:** Aplica a productos tratados térmicamente por solución y envejecidos artificialmente, sin trabajo en frío posterior, lo que resulta en una mejora significativa de las propiedades mecánicas o la estabilidad dimensional. Los efectos del trabajo en frío no se consideran.
- **T7:** Se refiere a productos tratados térmicamente por solución y envejecidos más allá del punto de máxima resistencia, buscando características adicionales como una mayor resistencia a la corrosión bajo tensión. También aplica a productos fundidos que se envejecen artificialmente después del tratamiento térmico por solución para estabilizar tanto la resistencia como las dimensiones.
- **T8:** Se utiliza para productos tratados térmicamente por solución, que han sido trabajados en frío para mejorar la resistencia y envejecidos artificialmente. En este caso, se tienen en cuenta los efectos del trabajo en frío sobre las propiedades.
- **T9:** Designa productos que han sido trabajados en frío específicamente para mejorar su resistencia después de haber sido envejecidos artificialmente.
- **T10:** Se refiere a productos que han sido enfriados tras un proceso de conformado a alta temperatura, trabajados en frío para mejorar su resistencia y envejecidos artificialmente, considerando los efectos del trabajo en frío sobre las propiedades especificadas.

3.6 Tecnología de la fundición

Esta técnica de manufactura consiste en formar un objeto mediante la fundición de metal, que se vierte en una cavidad moldeada. Luego, el metal se solidifica, permitiendo la reproducción precisa de la pieza deseada. Una vez solidificada, la pieza se retira del molde. Existen diversos métodos de manufactura, y dependiendo del método seleccionado, puede ser necesario realizar un acabado superficial. En la Figura 12 se muestran las diferentes técnicas

de fundición según el tipo de molde utilizado. Los moldes desechables incluyen fundición en arena, molde de yeso, evaporativa y de cera perdida. Los moldes no desechables abarcan la fundición a presión, centrífuga, por compresión y continua.

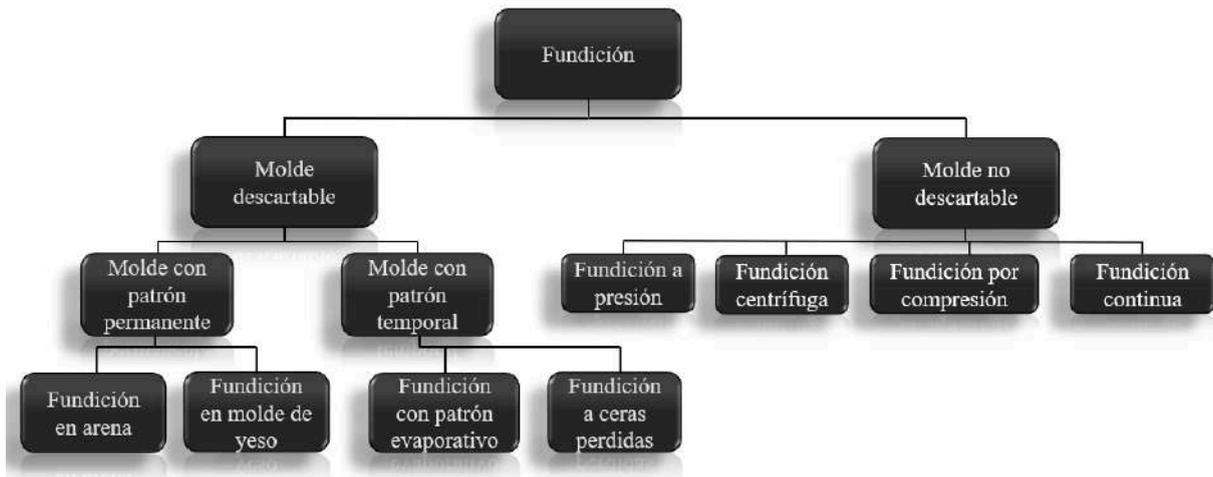


Figura 12. Principales técnicas utilizadas en la fundición

3.6.1 Ventajas de la tecnología de fusión y colado

La tecnología de fusión y colado constituye una herramienta clave en la fabricación de componentes metálicos debido a las múltiples ventajas que ofrece. Una de sus principales cualidades es la flexibilidad en el diseño, que permite la producción de piezas con geometrías complejas, características que resultan difíciles de lograr mediante otros procesos de manufactura, como el mecanizado o la forja. Esto es especialmente relevante en la fabricación de componentes con cavidades internas, paredes delgadas o detalles precisos, como aquellos utilizados en las industrias automotriz y aeronáutica.

Adicionalmente, esta tecnología es altamente versátil en términos de tamaño y peso, permitiendo la manufactura de piezas que van desde componentes pequeños y de alta precisión hasta estructuras de gran escala, dependiendo del tipo de molde y del proceso seleccionado. Asimismo, se destaca por su capacidad para trabajar con una amplia gama de materiales, tales como aleaciones de aluminio, acero, hierro, cobre y magnesio, cuya composición puede ajustarse para satisfacer requisitos específicos, como una mayor resistencia, ductilidad o conductividad. La solidificación controlada durante el proceso de colado garantiza estructuras internas uniformes, mejorando así las propiedades mecánicas de las piezas producidas.

Otra ventaja significativa es su alta productividad y su compatibilidad con el reciclaje de materiales sobrantes, particularmente en el caso de aleaciones como el aluminio. Esto no solo contribuye a la sostenibilidad del proceso, sino que también reduce los costos de fabricación. Finalmente, la diversidad de procesos de colado disponibles, como el colado en arena, a presión, en moldes permanentes o centrífugo, permite adaptar esta tecnología a las necesidades específicas de cada aplicación, maximizando su eficiencia y alcance en diversos sectores industriales. En la Figura 13 se muestran algunas piezas típicas producidas por esta técnica.



Figura 13. Piezas representativas obtenidas por tecnología de fundición y colado

3.6.2 Fundición o Moldeo en arena.

Uno de los métodos más utilizados para producir piezas coladas es el moldeo en arenas, en el cual se utiliza arena de sílice como principal material de fabricación de moldes. Este proceso es el más común y económico para lotes pequeños o medianos de producción, aplicable a casi cualquier metal o aleación, independientemente de las dimensiones de las piezas. Sin embargo, no se recomienda para piezas muy grandes, geometrías complejas, buenos acabados superficiales o tolerancias reducidas.

Las arcillas (Montmorillonita, Caolinita o Ilita) son fundamentales como agentes aglutinantes, ya que unen los granos de arena durante el proceso de fundición. En este proceso de moldeo, denominado fundición de arena verde, la resistencia de la arena a la erosión causada por el impacto y el flujo del metal es esencial. Los mecanismos claves para mantener los granos de arena en su lugar durante el flujo del metal son la acción de cuña entre los granos adyacentes y el enlace arcilla-agua.

Por otro lado, otra forma de conferir cohesión a las arenas es mediante el uso de resinas, las cuales actúan como ligantes orgánicos. Estas resinas pueden incorporarse a las arenas por

medio de mezclado directo o mediante un recubrimiento previo. Los ligantes orgánicos se clasifican en tres tipos principales: no horneadas o cocidas, curadas con calor y curadas en caja fría.

En el caso de las resinas no horneadas, inicialmente se mezclan con la arena y posteriormente se adiciona un catalizador, al que puede añadirse un acelerador si se busca reducir los tiempos de moldeo. La polimerización de las resinas en este proceso ocurre a temperatura ambiente. Existen diversos tipos de resinas utilizadas en este método, como las furánicas catalizadas con ácido, las fenólicas catalizadas con ácido, las fenólicas alcalinas catalizadas con ésteres, y combinaciones de poliéster-uretano o polioliol-isocianato, entre otras. En el caso de las resinas curadas con calor, se emplean sistemas como el proceso de cáscara o Croning, diseñado para fabricar moldes tipo cáscara. En este método, cada partícula de arena está revestida con resinas fenólicas, que se polimerizan al exponerse a temperaturas de entre 150 y 300 °C. Por último, en el caso de las resinas curadas en caja fría, la resina se mezcla con la arena y la polimerización se realiza mediante la inyección de un gas o vapor a través de la mezcla. Los ligantes más utilizados en este método incluyen resinas furánicas catalizadas con dióxido de carbono (CO₂), así como resinas tipo epoxi o acrílicas que se catalizan mediante la exposición a gases como el dióxido de azufre (SO₂).

Las propiedades de la arena son cruciales, ya que su estructura afecta directamente la permeabilidad y la densidad final del molde. Una baja permeabilidad impide la expulsión adecuada de los gases, obstaculiza el flujo del metal y puede dar lugar a defectos en la pieza, como porosidad.

El calor transferido del metal fundido a los granos de arena provoca su expansión. Es crucial permitir esta expansión para evitar alteraciones en la superficie del molde y asegurar la calidad de la fundición. Por lo tanto, la selección de granos de arena de sílice debe garantizar una expansión adecuada sin que se compacte en exceso. Las arenas más finas, con poros más pequeños, pueden tener una capacidad limitada para permitir la salida de los gases de descomposición. A pesar de ello, mejoran el acabado superficial y la reproducción de los detalles del patrón. En cambio, el uso de arena con una distribución de tamaño de malla única maximiza la acción de ventilación, pero ofrece menos protección contra la erosión o los defectos de expansión. Además, la arena fina podría requerir una mayor cantidad de agentes aglutinantes, como arcilla y agua, debido a su mayor área superficial que debe ser recubierta. Esto aumenta la producción de gas, lo que a su vez puede dificultar el paso de los gases a través de un molde menos permeable.

3.6.3 Sistema de alimentación

Para obtener piezas fundidas libres de defectos, es fundamental contar con un sistema de alimentación bien diseñado para asegurar la calidad y uniformidad de las piezas. En la Figura 14 se muestra un esquema de un sistema típico, que incluye bebederos, canales de alimentación y de ataques.

El basin, ubicado en la parte superior del molde, actúa como un depósito inicial donde se vierte el metal fundido antes de su ingreso al sistema de alimentación. Este elemento está diseñado para minimizar la turbulencia del flujo y retener impurezas superficiales del metal, como escorias. Por su parte, el bebedero tiene una forma cónica para evitar zonas de baja presión que podrían provocar la entrada de aire. Además, cuenta con un depósito en su base que reduce la velocidad del metal al llegar al fondo, disminuyendo así la turbulencia y la erosión del molde.

Los canales de alimentación son conductos que transportan el metal fundido desde el bebedero hasta las compuertas (denominados “ataques”) que conectan con la cavidad del molde. Su diseño tiene como objetivo principal garantizar un flujo uniforme y controlado, preservando la temperatura del metal para evitar enfriamientos prematuros. Finalmente, los ataques son aberturas que conectan los canales de alimentación con la cavidad del molde. Su función es distribuir el metal de manera uniforme, evitando llenados descontrolados que puedan originar defectos. El tamaño, la forma y la ubicación de los ataques son factores críticos para lograr un llenado eficiente y defectos mínimos en la pieza final.

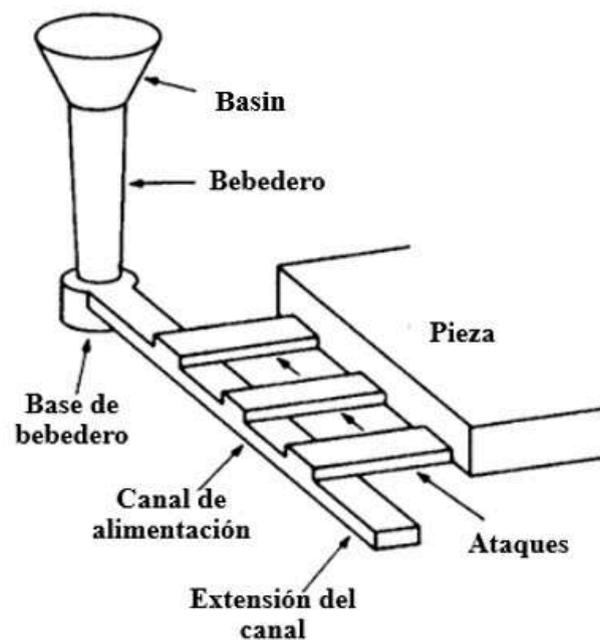


Figura 14. Esquema de un sistema de alimentación para un molde de arena [26]

En cuanto al llenado, es importante lograr un equilibrio en la temperatura de fundición. Un llenado a mayor temperatura mejora la fluidez del metal, reduciendo el riesgo de llenados incompletos. Sin embargo, una temperatura excesivamente alta puede incrementar la absorción de gases por parte del metal fundido, lo que resulta en porosidades al solidificarse, además de que podría causar la degradación del molde de arena. Asimismo, una temperatura elevada prolonga el tiempo de solidificación, lo que reduce la tasa de producción de piezas.

Otro criterio importante es evitar flujos turbulentos durante el llenado, ya que estos pueden introducir gases en la pieza. Un diseño óptimo de los canales de alimentación, que evite cambios bruscos de dirección y posicione los canales de inyección sobre los canales de alimentación, minimiza la turbulencia y reduce la probabilidad de atrapamiento de gases. Además, es recomendable incluir una extensión del runner para evitar que el primer metal líquido que ingrese al molde, propenso a contaminarse debido al contacto con el aire y las paredes del molde, entre en los puntos de ataque de la pieza. Esto asegura que el metal líquido que finalmente llegue a la cavidad sea más limpio, minimizando la presencia de óxidos e impurezas.

En el caso de aleaciones de aluminio, como las utilizadas en este proyecto, es esencial un sistema de alimentación despresurizado. Este sistema reduce la velocidad del metal fundido, promoviendo un flujo más laminar. Para implementar un sistema despresurizado, las áreas transversales relativas del bebedero, el canal de alimentación y ataques deben seguir una relación de tipo 1:2:2, 1:2:4 o 1:4:4, respectivamente. Además, es crucial considerar cuidadosamente la temperatura de fundición, como se mencionó anteriormente. [26]

3.6.3.1 Contracción durante la solidificación. Mazarotas

El fenómeno de la contracción se manifiesta en varias etapas. En primer lugar, la contracción líquida se produce cuando el metal libera calor hasta alcanzar la temperatura de solidificación. A esta fase le sigue la contracción de solidificación, que ocurre en un intervalo de temperaturas, excepto en el caso de las aleaciones eutécticas, durante la transición del estado líquido al sólido. Finalmente, se presenta la contracción sólida, en la que el metal continúa enfriándose hasta alcanzar la temperatura ambiente. En la Tabla 8 se muestran valores de contracción para distintos metales.

Tabla 8. Contracción de solidificación para diferentes metales [27]

Metal	Porcentaje de contracción volumétrica en la solidificación
Acero al carbono	2.5–3%
Acero al 1% de carbono	4%
Fundición blanca	4–5.5%
Fundición gris	Varía de 1.6% de contracción a 2.5% de expansión
Fundición nodular	Varía de 2.7 de contracción a 4.5 de expansión
Cobre	4.9
Cu-30Zn	4.5
Cu-10Al	4

Aluminio	6.6
Al-4.5Cu	6.3
Al-12Si	3.8
Magnesio	4.2
Zinc	6.5

A medida que el metal líquido se solidifica (contracción de solidificación), experimenta una contracción volumétrica debido a la falta de material suficiente para compensar la disminución del volumen en las zonas en proceso de solidificación. Estas áreas, conocidas como puntos calientes por ser las últimas en solidificar, son propensas a desarrollar porosidad si la contracción no se compensa adecuadamente. Esto se resuelve agregando al sistema de alimentación realimentadores o “mazarotas”, las cuales son reservorios de metal líquido, que tienen como función alimentar a la pieza durante la solidificación para contrarrestar la contracción volumétrica que experimentan los metales. Por este motivo, un diseño de sistema de alimentación adecuado debería permitir un llenado controlado y promover la solidificación direccional, donde las últimas áreas en solidificarse deberían ser los realimentadores o mazarotas.

Es importante recordar que las mazarotas, al igual que el sistema de alimentación, se seccionan de la pieza y se descartan después de la operación de colado. Por ello, su diseño, en términos de tamaño y geometría, es un factor clave. Un tamaño excesivo podría hacer que la fabricación de la pieza mediante el método de colado sea económicamente inviable. Así, el diseño de las mazarotas debe considerar no solo las dimensiones de la pieza a fundir, sino también el tipo de material empleado.

Además, resulta esencial dimensionar correctamente los canales que conectan la mazarota con la pieza, conocidos como cuellos del alimentador o feeder neck, para evitar una solidificación prematura que interrumpa el flujo de metal líquido. Por último, en un contexto industrial, es fundamental optimizar el número y tamaño de las mazarotas para minimizar el desperdicio de material y mejorar la eficiencia del proceso.

Las Figuras 15 y 16 muestran algunas de las geometrías típicas simplificadas de mazarotas, con sus dimensiones características. Sin embargo, para diseñar la geometría de una mazarota, en primer lugar, hay que tener en cuenta el tiempo de solidificación de una pieza o sección de la misma mediante la regla de Chvorinov, que se expresa de forma simplificada en la Ecuación 1. Donde (t) es el tiempo de solidificación de la pieza, (V_c) es el volumen de la pieza, (A_c) es el área de superficie de la pieza y (k) es una constante que depende de las propiedades del metal y el molde. (M_c) es el módulo de colada.

$$t = k^2 \left(\frac{V_c}{A_c}\right)^2 = k^2 M_c^2 = t \propto \frac{V_c}{A_c} = M_c \quad (\text{Ecuación 1})$$

La relación entre los tiempos de solidificación de las mazarotas y las piezas depende directamente de sus módulos respectivos. Una mazarota garantizará una correcta alimentación si su módulo (M_r) es significativamente mayor al de la pieza (M_c). En el caso del acero, una proporción de $M_r=1.2M_c$ asegura una alimentación efectiva. Para otras aleaciones que forman una capa superficial, como las de aluminio y cobre, se recomienda una relación M_r/M_c de 1.2 a 1. En las fundiciones de hierro con grafito libre, esta proporción varía entre 0.8:1 y 1.2:1, dependiendo del carbono equivalente, ya que la mazarota puede no ser necesaria durante todo el proceso de solidificación de la pieza.

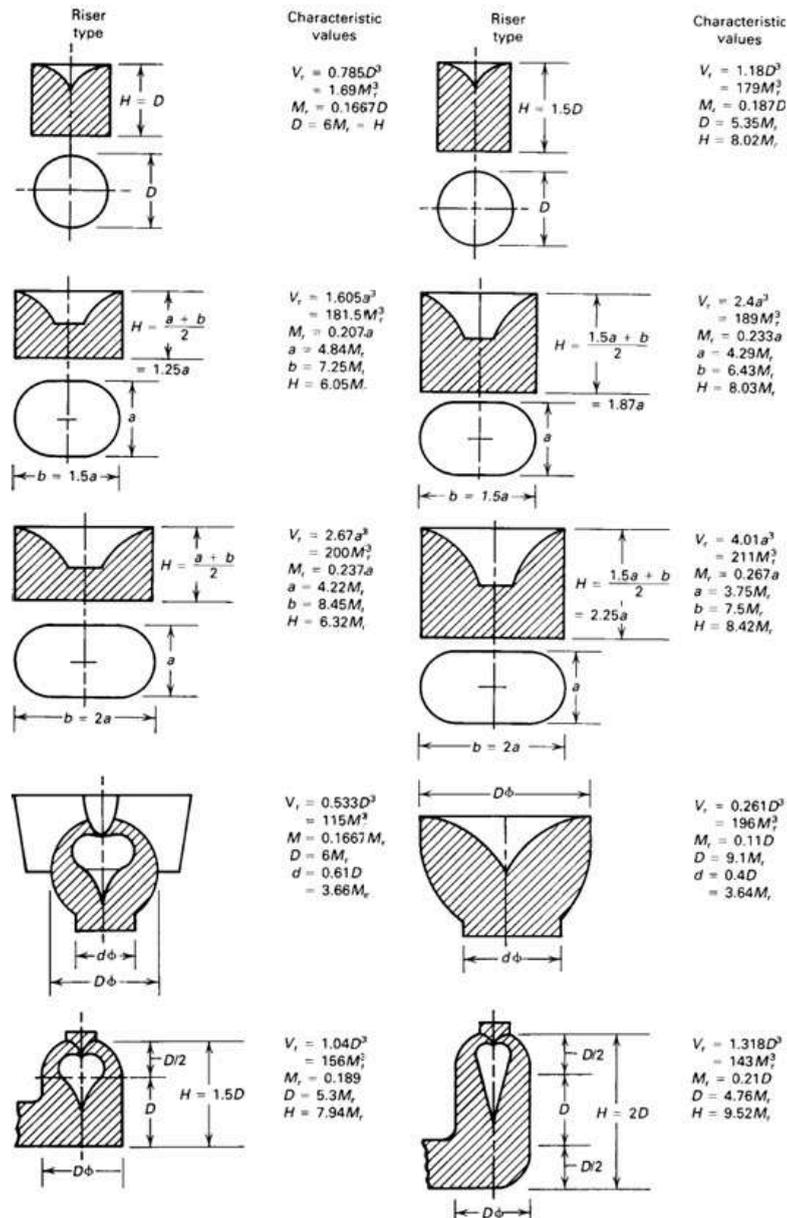


Figura 15. Diferentes configuraciones de mazarotas y sus valores característicos (M_r ; V_r ; D , H , entre otros)

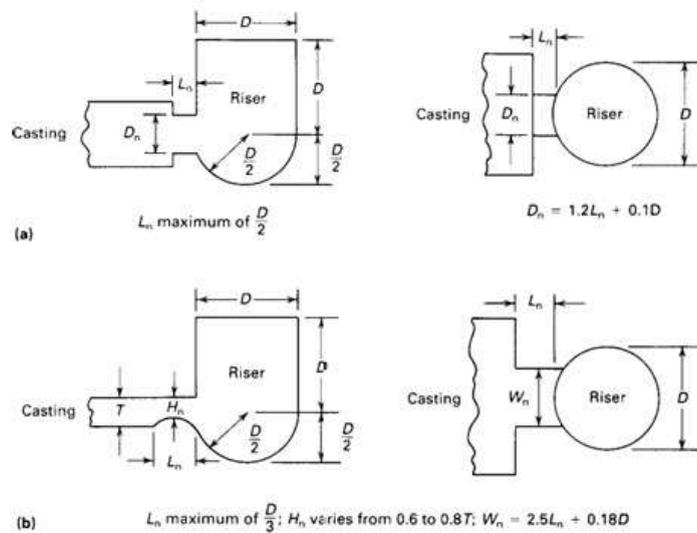


Figura 16. Principios generales de diseño para los cuellos de mazarotas empleados en la fundición de hierro (a) Diseño estándar de mazarota lateral. (b) Mazarota lateral adaptada para piezas planas o tipo placa

3.6.3.2 Enfriadores o “Chills”

Los chills o enfriadores son componentes fundamentales en el proceso de fundición, ya que permiten controlar de manera eficiente la solidificación del metal y mejorar la calidad final de las piezas fundidas. Su principal función es disipar el calor de manera acelerada en zonas específicas del molde, promoviendo una solidificación dirigida, lo que reduce defectos como la porosidad por contracción y optimiza las propiedades mecánicas en áreas críticas de la pieza. Asimismo, su uso contribuye a incrementar el rendimiento del proceso al disminuir la necesidad de material adicional para compensar posibles imperfecciones.

Los enfriadores pueden fabricarse con materiales como arenas especiales (por ejemplo, arena de cromita o de circonio), metales (como hierro gris, hierro dúctil o cobre en casos específicos) y grafito. Estos materiales deben cumplir con requisitos técnicos esenciales, como una elevada conductividad térmica y una temperatura de fusión superior a la del metal colado, garantizando su estabilidad y eficacia durante el proceso de fundición.

3.6.3.3 Filtros de cerámica

Estos filtros, como los que se presentan en la Figura 17, ayudan a eliminar partículas no deseadas, como escorias e inclusiones, del metal antes de que entre en el molde. Estas partículas pueden deteriorar tanto las propiedades mecánicas como la apariencia de las piezas fundidas. Los filtros cerámicos están hechos de materiales como mullita, alúmina y zirconia, y se presentan en formas como espumas reticuladas y tejidos de malla.



Figura 17. Filtros de cerámica

3.6.4 Defectos en piezas coladas utilizando la técnica de moldeo en arenas

Lograr una pieza libre de defectos representa un gran desafío en los procesos de fundición, ya que cualquier imperfección puede comprometer las propiedades mecánicas del producto final, lo cual es indeseable. Estos defectos pueden generarse debido a varios factores, como la composición del metal, la calidad del molde, el proceso de solidificación y los tratamientos térmicos aplicados.

Entre los defectos más comunes en la fundición en arena se encuentran la porosidad, tanto por contracción como por gases, las inclusiones no metálicas, el llenado incompleto y las deformaciones dimensionales de la pieza. A continuación, se detallan estos defectos, cuyo control y mitigación son esenciales para garantizar una correcta aplicación del producto final.

3.6.4.1 Porosidad por gas

En los procesos de fundición, la porosidad es uno de los defectos más frecuentes que afecta tanto a los metales como a las aleaciones. Este problema surge cuando los gases quedan atrapados en el material durante la etapa de solidificación, lo que puede deberse a diversas razones, como la absorción de gases por el metal en estado líquido, la descomposición de componentes del molde o las reacciones químicas entre el metal y el entorno del proceso. Los gases responsables de este tipo de defectos son principalmente el hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, según el tipo de metal involucrado. La presencia de porosidad impacta negativamente las propiedades mecánicas de las piezas fundidas, como su resistencia, ductilidad e integridad estructural.

El control de la porosidad en los procesos de fundición requiere una combinación de estrategias que varían según el tipo de material. Entre estas, destacan la regulación de la temperatura de fusión, el uso de sistemas de desgasificación eficaces y el diseño adecuado de los moldes. Estas medidas, combinadas con un enfriamiento controlado, permiten mitigar los defectos de porosidad y mejorar la calidad final de las piezas.

La porosidad es un defecto frecuente en las aleaciones de aluminio debido a la tendencia de este metal a absorber hidrógeno cuando se encuentra en estado líquido o durante el proceso de colado. La desgasificación eficaz del metal líquido es fundamental para reducir la formación de porosidad y, en general, se logra mediante el uso de gases inertes como argón o cloro. Estos gases, al burbujear a través del aluminio fundido, atraen las moléculas de hidrógeno, eliminándolas de la masa líquida. Como alternativa, se pueden emplear desgasificantes sólidos, como las pastillas de hexacloroetano, aunque su uso tiene la desventaja de generar ácido clorhídrico, un subproducto perjudicial para el medio ambiente. Los inyectores rotatorios ofrecen una opción más eficiente y efectiva, promoviendo una mejor difusión y extracción del hidrógeno.

Si el hidrógeno no se elimina adecuadamente, pueden formarse poros en la pieza final, lo que afecta tanto la resistencia a la tracción como la integridad estructural del material. Además de la desgasificación, es importante incorporar venteos en los moldes de arena para permitir la expulsión de gases durante el proceso de colada. También es crucial controlar la temperatura de fusión del aluminio, ya que una mayor temperatura, si bien aumenta la fluidez, incrementa la solubilidad del hidrógeno en el metal líquido como se detalla en la Figura 18. Esto favorece la precipitación de gas durante la solidificación, generando defectos de porosidad en el material final.

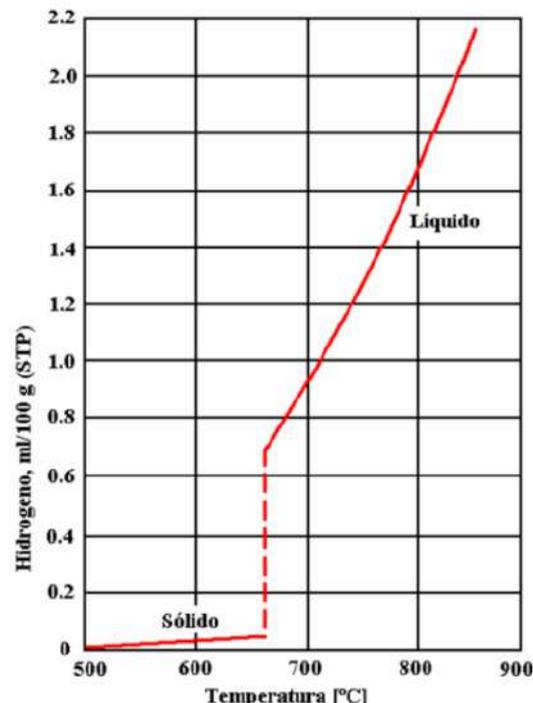


Figura 18. Influencia del hidrógeno con la temperatura [28]

La porosidad generada por la presencia de hidrógeno suele tener una forma esférica, lo que se debe a la precipitación de este gas durante la solidificación o a la entrada de burbujas de gas durante la inyección rápida del metal fundido, como ocurre en la fundición a presión. Existen dos categorías de porosidad por hidrógeno: la interdendrítica, relacionada con altos niveles de

hidrógeno, y la secundaria, que se caracteriza por la formación de cavidades subcríticas. Este tipo de porosidad afecta de manera variable las propiedades mecánicas de la aleación, dependiendo de su concentración. [29]

3.6.4.2 Porosidad por contracción

Como fue mencionado anteriormente, a medida que el metal líquido se solidifica, experimenta una contracción volumétrica debido a la falta de material suficiente para compensar el volumen en las zonas en proceso de solidificación. Estas áreas, conocidas como puntos calientes por ser las últimas en solidificar, son propensas a desarrollar porosidad si la contracción no se compensa adecuadamente, lo que genera cavidades no esféricas. En la Figura 19 se observa este tipo de defecto.

Los defectos por contracción se pueden clasificar en tres tipos principales: macrocontracción, contracción interdendrítica y porosidad en capas. La macrocontracción corresponde a cavidades grandes que se forman en las zonas de solidificación más tardía, debido a la contracción volumétrica durante el enfriamiento, lo que da lugar a superficies rugosas y esponjosas por el crecimiento interrumpido de las dendritas. La contracción interdendrítica ocurre cuando el metal líquido no alimenta adecuadamente las áreas entre dendritas, formando pequeñas discontinuidades interconectadas, como se ilustra en la Figura 20. Finalmente, la porosidad en capas se caracteriza por defectos de contracción que se alinean a lo largo del eje térmico neutral en regiones con menor gradiente térmico. [30]

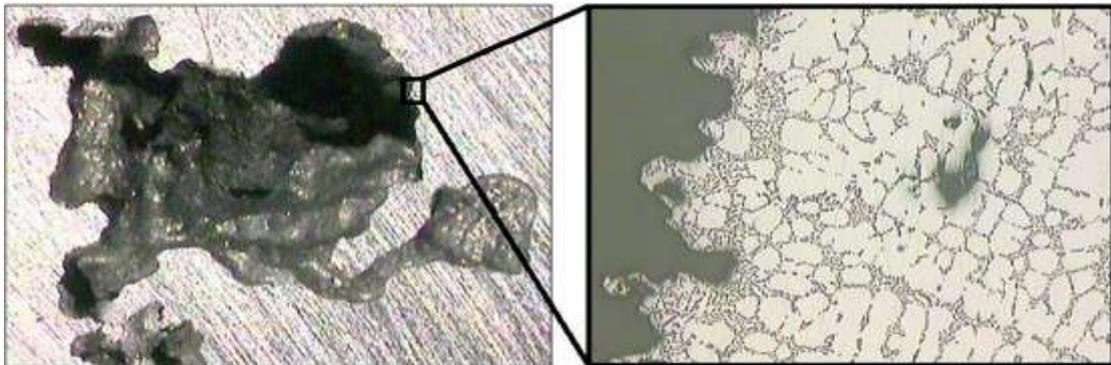


Figura 19. Macro y micrografía de la macrocontracción

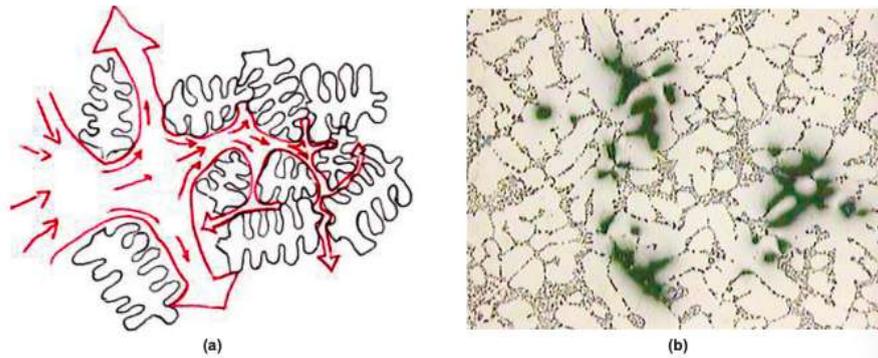


Figura 20. (a) Esquema del flujo de metal alrededor de las dendritas, (b) Micrografía de una región con porosidad interdendrítica. [30]

Es importante mencionar que la interacción entre la contracción del material y los poros de gas facilita el crecimiento de estos últimos. A medida que avanza la solidificación, la porosidad tiende a aumentar debido a la liberación de gas; además, cuando las dendritas se tocan, se interrumpe la alimentación interdendrítica, y los poros tienden a compensar la contracción asociada a la solidificación. [31]

En las aleaciones de aluminio Al-Si, un mayor contenido de silicio contribuye a reducir la porosidad, ya que acorta el intervalo de solidificación y mejora la fluidez del metal. [32]

Para minimizar la formación de porosidad por contracción, es fundamental emplear mazarotas que aseguren la correcta alimentación del metal a medida que se solidifica. Además, es recomendable fundir a la temperatura más baja posible, sin comprometer la capacidad de colado, lo cual ayudará a reducir la contracción del material.

3.6.4.3 Llenado incompleto

Este defecto se produce cuando el metal líquido no llena completamente la cavidad del molde. Las causas comunes incluyen una temperatura inadecuadamente baja del metal fundido, un sistema de alimentación deficiente, un flujo lento durante el llenado o un diseño ineficaz del sistema de alimentación.

3.6.4.4 Choque de frentes de flujos

Este fenómeno ocurre cuando dos frentes de flujo de metal líquido se encuentran dentro del molde, con uno de ellos a una temperatura superior al otro. Esta diferencia de temperatura impide la fusión completa de ambos frentes, generando zonas con porosidad, falta de cohesión o líneas de unión visibles. Estas áreas pueden comprometer tanto la resistencia mecánica como la integridad del componente.

3.6.4.5 Inclusiones

Las inclusiones en las piezas fundidas pueden ser de origen metálico, intermetálico o no metálico. Las inclusiones metálicas e intermetálicas, que presentan tamaños y microestructuras diferentes a la matriz de la aleación. Estas inclusiones pueden deberse por

ejemplo a la fusión incompleta de aleantes. En cuanto a las inclusiones no metálicas, como partículas de arena, escoria y refractarios, suelen originarse por el desgaste del molde o la presencia de impurezas en el horno o la cuchara y tienden a localizarse en la superficie de la pieza. Un diseño optimizado del sistema de colada, junto con el empleo de filtros, contribuye a prevenir estos defectos.

3.6.4.6 Erosión

La erosión del molde se presenta en las áreas donde ocurre turbulencia al ingresar el metal fundido en la cavidad del molde. Este defecto se desarrolla principalmente a lo largo de los canales de alimentación, en los puntos de entrada o en las zonas de cambio de sección dentro de la cavidad, donde la velocidad del metal aumenta. Un diseño inadecuado tanto de la pieza como de los canales de alimentación puede agravar el problema, resultando en una modificación de la forma de la pieza final y en la introducción de una mayor cantidad de inclusiones no metálicas en la microestructura, lo cual está directamente relacionado con el volumen de la zona erosionada.

3.6.4.7 Fisuras en caliente

Las fisuras en caliente se originan en las zonas aún líquidas del material, en estado pastoso, durante el proceso de solidificación. Este defecto se debe a que el material no puede resistir las tensiones internas causadas por la contracción térmica. Es particularmente común en aleaciones con un amplio rango de solidificación y en las áreas denominadas puntos calientes, aun cuando las tensiones presentes sean menores que la resistencia a la tracción de la aleación.

Capítulo 4. Resultados anteriores y discusión del desarrollo del proceso de fusión y colado de la pieza “HUB-EJE LENTO”

Como se mencionó en la introducción del presente trabajo, el desarrollo de fabricación de la pieza Hub-Eje lento mediante la técnica de fusión y colado comenzó en el año 2018 en la División Metalurgia del INTEMA (DMI). Ese desarrollo inició con un proyecto final de grado realizado por Joaquín Grisolia, en el cual se propusieron tres materiales alternativos para la fabricación de la pieza. El objetivo principal fue diseñar sistemas de alimentación y establecer condiciones de colada adecuadas para cada material, buscando obtener piezas libres de defectos en los tres casos.

Para este propósito, se realizaron varias simulaciones del proceso de colada y solidificación de la pieza utilizando el software MAGMASOFT, para el cual la DMI dispone de una licencia académica. Los materiales seleccionados a partir de la base de datos del software fueron: fundición gris (GJS 700), aleación de aluminio (AlSi7Mg) y acero (GX40CrSi13).

Durante las simulaciones del proceso de colado y solidificación de la pieza realizadas con el software, se observó que en ausencia de un sistema de alimentación (primer análisis elemental), la fundición gris presentó una menor porosidad, atribuida a la expansión gráfica.

Este fenómeno se debe a que la precipitación de grafito compensa la contracción volumétrica durante la solidificación (debido a su menor densidad), lo que reduce la formación de porosidad. En contraste, el acero y la aleación de aluminio mostraron una mayor incidencia de porosidad, como era de esperarse.

Luego, se realizaron simulaciones incorporando un sistema de alimentación, sin considerar mazarotas ni enfriadores. Se analizó moldeo vertical y horizontal, eligiendo el moldeo vertical como definitivo, ya que se observó que todos los materiales analizados seguían la misma tendencia: mostraban menores niveles de porosidad en esa configuración.

En las simulaciones posteriores, se incorporaron mazarotas y, cuando fue necesario, chills, con el fin de contrarrestar la porosidad en la pieza. A lo largo del proceso, se realizaron ajustes tanto en los volúmenes de las mazarotas como en las geometrías de los chills para optimizar la simulación y asegurar una colada adecuada de la pieza. Además, se analizaron diferentes parámetros de colada, tales como la temperatura de colada para cada material, con el objetivo de obtener resultados óptimos en términos de porosidad.

La Figura 21 muestra el sistema de alimentación diseñado para el caso de la fundición gris, en donde permitió alcanzar una pieza sin defectos como se detalla en la Figura 22. Este sistema consistió en cuatro chills y una única mazarota con un volumen de 798 cm³. La temperatura de colada fue de 1370 °C, mientras que la temperatura del molde y de los chills se mantuvo en 20 °C.

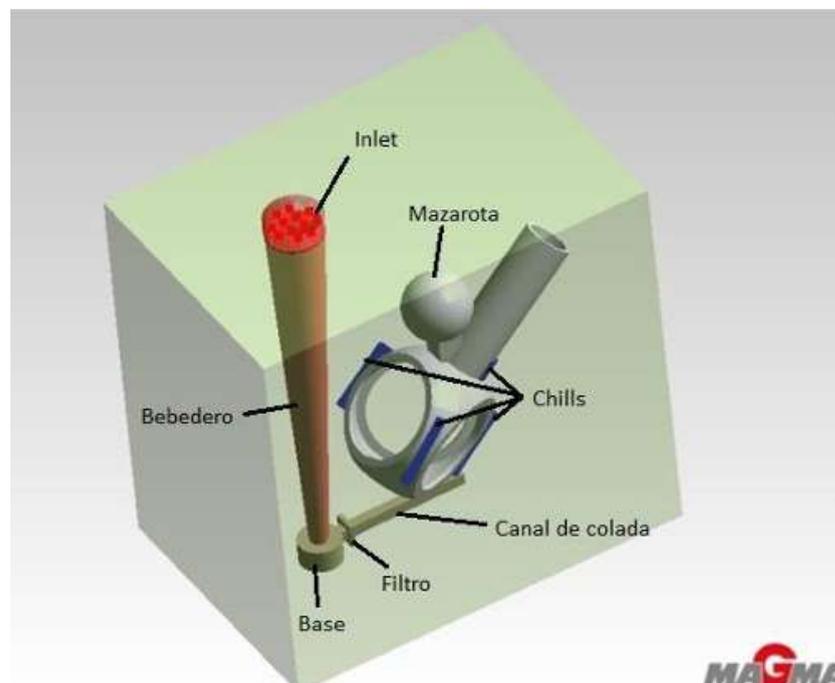


Figura 21. Sistema de alimentación diseñado para el caso de colar fundición gris

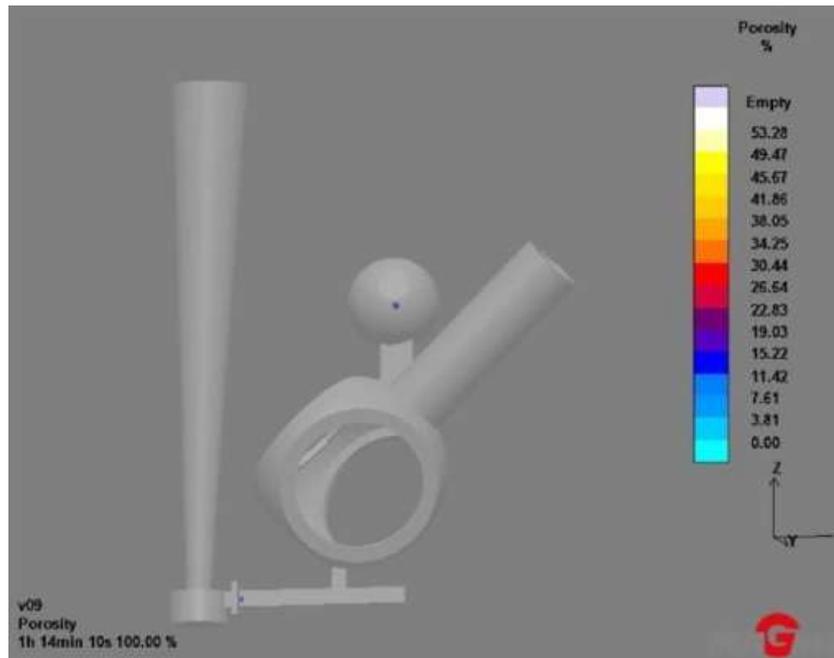


Figura 22. Resultado de simulaciones de porosidad del Hub-Eje lento fabricado en fundición gris

En el caso de la aleación de aluminio, resultó más complejo eliminar la porosidad en comparación con la fundición gris. El sistema de alimentación mostrado en la Figura 23 fue el que arrojó los mejores resultados en cuanto a la cantidad de porosidad. Dicho sistema de alimentación consistió en cinco enfriadores y dos mazarotas esféricas, cada una con un volumen de 798 cm³. Aunque no se logró obtener una pieza completamente libre de porosidad, tal como se ilustra la Figura 24, se consideró que las condiciones eran adecuadas para realizar la colada. La temperatura de colada se estableció en 850 °C, mientras que la temperatura del molde y de los enfriadores se mantuvo constante a 20 °C.

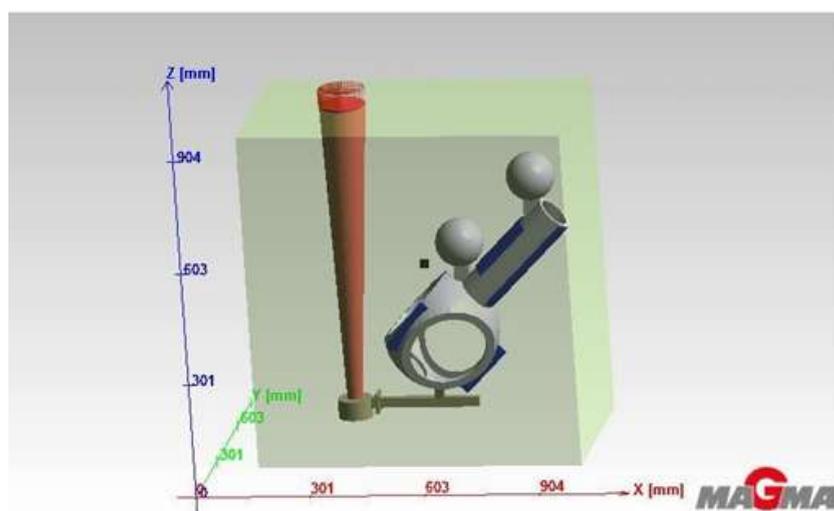


Figura 23. Sistema de alimentación diseñado para el caso de colar aleación de aluminio

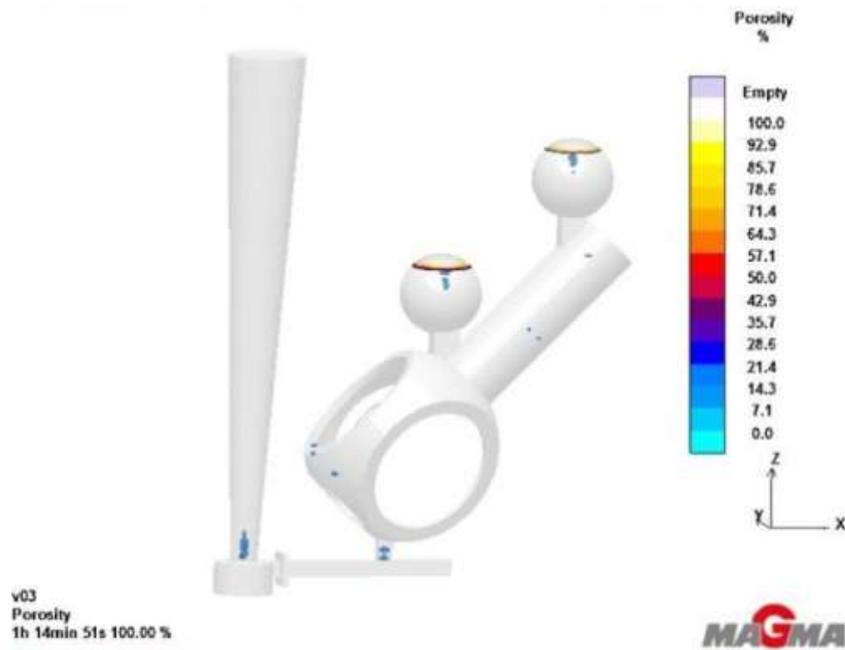


Figura 24. Porosidad (zonas celestes en la figura) del Hub-Eje lento simulado en aleación aluminio

En el caso del acero, se utilizó el sistema de alimentación mostrado en la Figura 25. Este sistema consiste en dos mazarotas con un volumen de 1064 cm³ cada una, además de cinco enfriadores. La temperatura de colada se estableció en 1600 °C, mientras que la temperatura del molde y de los enfriadores se mantuvo constante a 20 °C. En cuanto a la porosidad, como se muestra en la Figura 26, no se logró una pieza completamente libre de este defecto. Sin embargo, debido a los muy bajos niveles de porosidad predichos por el software, se consideró que los resultados obtenidos fueron aceptables.

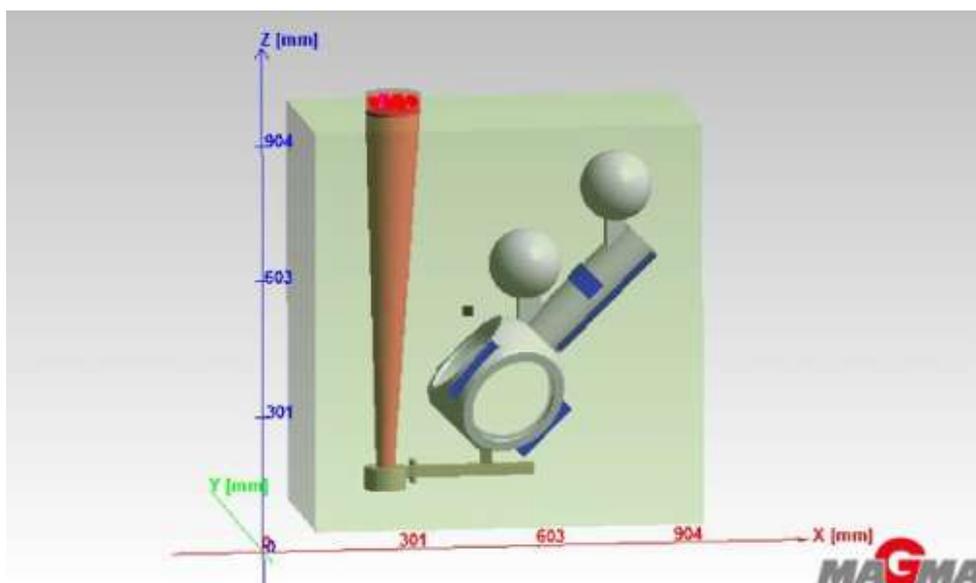


Figura 25. Sistema de alimentación diseñado para el caso de colar acero

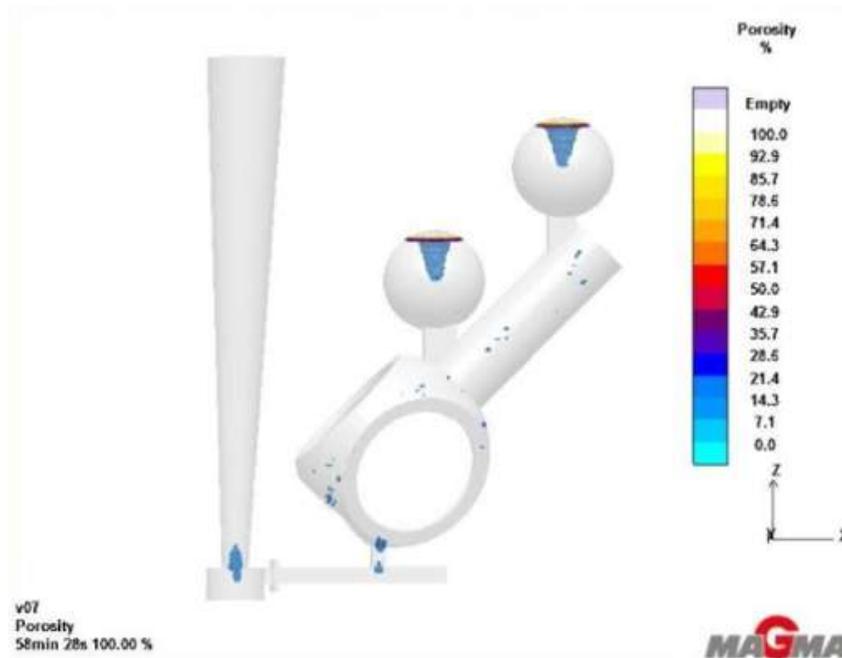


Figura 26. Porosidad (zonas celeste en la figura) del Hub-Eje lento simulado con acero

Además, se estudió el análisis estático del Hub-Eje lento junto a las aspas mediante el software Solidworks. Se utilizó como material para las aspas compuesto de epoxy con fibra de yute y para el Hub-Eje lento una aleación de aluminio similar al AlSi7Mg (denominación en el software como material C355-0-T61). Sus propiedades se observan en la Figura 27.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	6.96e+10	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.33	N/D
Módulo cortante	2.65e+10	N/m ²
Densidad de masa	2710	kg/m ³
Límite de tracción	276000000	N/m ²
Límite de compresión		N/m ²
Límite elástico	207000000	N/m ²
Coefficiente de expansión térmica	2.2e-05	/K
Conductividad térmica	151	W/(m-K)

Figura 27. Propiedades de la aleación de aluminio C355-0-T61

El análisis realizado demostró que el molino puede operar en un rango de velocidades de viento de 20 a 100 km/h aproximadamente, sin fallar según el criterio adoptado. En caso de fallo, este ocurriría en las aspas, mientras que el Hub-Eje lento, con un espesor de 10 mm, estaría sobredimensionado, garantizando la integridad estructural. La máxima tensión de Von Mises en el Hub-Eje lento, aproximadamente de 1.8 MPa, es considerablemente menor al límite de fatiga del material 60 Mpa [8], lo que confirma que el diseño asegura un funcionamiento seguro y estable bajo las condiciones establecidas.

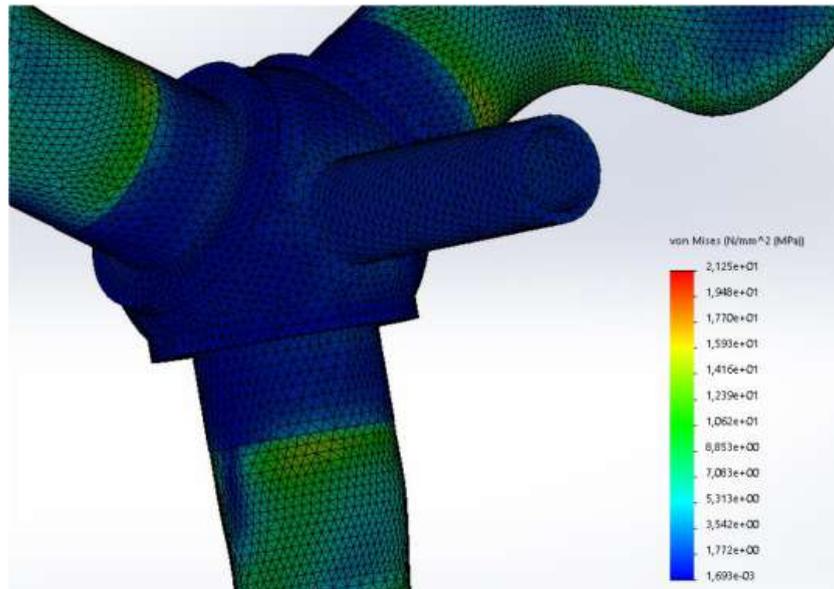


Figura 28. Perfil de tensiones de Von Mises en el Hub-Eje lento

Luego de terminar con el diseño de los sistemas de alimentación, se realizó una colada para obtener un prototipo de la pieza en estudio. La colada también tuvo el objetivo de validar las simulaciones. De los tres materiales candidatos, solo se realizó la colada utilizando la aleación de aluminio, ya que se considera que este material es el óptimo para la fabricación de la pieza por su menor densidad, respecto a los aceros y fundiciones de hierro, y que cumple holgadamente con las propiedades mecánicas requeridas por la pieza, según las simulaciones realizadas. La colada se realizó en base al sistema de alimentación mostrado en la Figura 23, y utilizando una aleación de aluminio del tipo AlSi7Mg.

De la colada experimental se obtuvieron importantes resultados y conclusiones. Se observó que el frente de metal líquido solidifica antes de llenar completamente la cavidad del molde, ya que no logró llenar completamente la longitud del eje. Esto se atribuyó a que solo se utilizó un punto de ataque, el cual se consideró insuficiente debido a las dimensiones de la pieza, y a la gran cantidad de chills empleados. Además, la pieza no presentó un espesor uniforme en el Eje lento debido al desplazamiento parcial del noyo en la cavidad de moldeo. No obstante, no se detectaron porosidades ni defectos superficiales a simple vista, y los ensayos ultrasónicos confirmaron la ausencia de defectos internos. Sin embargo, para verificar con precisión la existencia o no de porosidad interna, es necesario cortar y pulir en distintas partes la pieza y realizar una observación macro y microscópica. En la Figura 29 se observa el Hub con los defectos mencionados anteriormente.



Figura 29. Hub-Eje lento colado en AlSi7 durante el año 2019 en la DMI, utilizando moldeo vertical y sistema de alimentación mostrado en la Figura 23

Capítulo 5. Resultados y discusión de las simulaciones del proceso de fusión y colado de la BRIDA CON CAÑO Y HUB-EJE LENTO

5.1 Rutina de Simulaciones

La primera tarea experimental consistió en modelar las piezas a simular y las partes del sistema de alimentación utilizando el software SolidWorks. A partir de ello, se llevaron a cabo diversas simulaciones en Magmasoft, modificando el sistema de alimentación o los parámetros de colada hasta obtener una pieza libre de defectos.

Para cada simulación, se diseñó previamente un sistema de alimentación específico, definiendo aspectos como los puntos de ataque (lugares donde ingresa el metal), la cantidad, distribución y tamaño de las mazarotas y chills, así como la sección transversal de los runners, entre otros. Una vez diseñado, el sistema de alimentación y la pieza, se exporta el modelo en formato STL para importarlo en el Magmasoft.

Para lograr una colada exitosa, es importante comprender la función de cada elemento en el sistema de alimentación y su influencia en el proceso de solidificación. En primer lugar, se debe considerar el tipo de molde que se emplea para la colada, ya sea horizontal o vertical. En el moldeo horizontal, el plano de partición se encuentra en posición horizontal, lo que permite reducir la altura del sistema de alimentación. Esto, a su vez, disminuye la cantidad de metal líquido necesario, reduce los costos y minimiza la turbulencia del flujo, disminuyendo los riesgos de erosión y defectos en la pieza. En cambio, el moldeo vertical, donde el plano de partición se dispone en posición vertical, requiere mayor altura en el sistema de alimentación, incrementando la presión en el proceso de colada. Esta presión adicional favorece la

compactación del metal, logrando un llenado uniforme, especialmente en secciones delgadas y detalles complejos de piezas grandes.

Una vez definidos los elementos principales en Magmasoft, se procede a la asignación de configuraciones para cada uno. Estos elementos incluyen el molde, que da forma a la pieza; las mazarotas, que sirven como reservas de metal líquido para compensar la contracción durante la solidificación; y los enfriadores o chills, que aceleran la solidificación en zonas específicas. Además, el sistema de alimentación está compuesto por canales de flujo, o runners, que distribuyen el metal de forma controlada, y los puntos de entrada, o gates, que facilitan el ingreso del metal en la cavidad del molde. Finalmente, el filtro desempeña un papel importante al retener impurezas y garantizar la calidad del metal fundido.

Después de configurar estos elementos, se realiza el mallado de la geometría para aproximar la pieza y el sistema de alimentación a la realidad. Para lograr una simulación precisa, el mallado debe aproximarse lo más posible a la geometría real de la pieza, tratando de minimizar defectos como bordes finos, contactos inadecuados (edge-to-edge), áreas bloqueadas y posibles interacciones no deseadas con el ambiente. Si bien un mallado más detallado puede mejorar la precisión, también aumenta la demanda de recursos computacionales, lo cual podría ser un desafío para algunas configuraciones de hardware. Por ello, es necesario encontrar un equilibrio adecuado, ajustando el tipo de mallado para reducir o corregir estos problemas y optimizar la simulación sin sobrecargar el sistema.

Posterior al mallado, se definen los parámetros de colada, como el material de la pieza, la temperatura de colada y el tiempo de llenado. También se especifican las geometrías del filtro y el material de los enfriadores (chills) cuando son necesarios, asegurando una correcta dirección de solidificación desde la pieza hacia las mazarotas y los canales de alimentación.

Como se mencionó anteriormente, las simulaciones se llevaron a cabo con diferentes configuraciones de sistema de alimentación para cada tipo de pieza (Hub-Eje lento y Brida con caño). Inicialmente, se realizaron simulaciones sin incluir sistemas de colada o alimentadores, lo que permitió identificar las zonas de mayor riesgo de defectos. Luego, se efectuaron simulaciones adicionales incorporando el sistema de alimentación. Los parámetros de colada, como la temperatura y el tiempo de llenado, se ajustaron de acuerdo con las necesidades de cada diseño, obteniendo así ciertos parámetros de colada que facilitarían la producción de piezas con menor cantidad de defectos y mejor calidad estructural.

Es importante mencionar que el análisis de los resultados de las simulaciones sólo se centró en observar los niveles de porosidad que se encuentran en la pieza. La porosidad que predice el software corresponde a zonas donde deberían aparecer microrechupes en las piezas (porosidad por contracción), generados durante la solidificación de la misma, y no a porosidad por burbujas de gas atrapado. Se supone que la presencia de microrechupes, junto con las cavidades relacionadas con la presencia de gas atrapado, serían los principales defectos de colada, ya que generaría una marcada disminución en las propiedades mecánicas de las piezas coladas. La porosidad por gas atrapado dependerá de cuán correcta sea la degasificación del líquido durante el proceso de colada. Una correcta degasificación

permite obtener piezas de aluminio libres de hidrógeno, mientras que una incorrecta desgasificación promueve la aparición de este elemento en mayor medida.

5.2 Aleaciones de Al-Si evaluadas, diseño de moldes y parámetros de colada utilizados

Los materiales objeto de estudio son aleaciones de Al-Si-Mg, particularmente *AlSi7Mg* y *AlSi10Mg*, cuyas composiciones provienen de la base de datos del software Magmasoft. Se observa que estas composiciones son coherentes con la revisión bibliográfica y son detalladas en las Figuras 30 y 31.

Material: AlSi7Mg

LM Aluminium Composition

Copper	0.0300	%	Zinc	0.1000	%
Iron	0.5000	%	Antimony		%
Magnesium	0.4000	%	Phosphorus		%
Manganese	0.3000	%	Chromium		%
Nickel	0.1000	%	Strontium		%
Silicon	7.0000	%	Sodium		%
Titanium	0.1500	%	Hydrogen		ml/100g

Figura 30. Composición química del AlSi7Mg

Material: AlSi10Mg

LM Aluminium Composition

Copper	0.0300	%	Zinc	0.0800	%
Iron	0.4000	%	Antimony		%
Magnesium	0.3000	%	Phosphorus		%
Manganese	0.3000	%	Chromium		%
Nickel	0.0300	%	Strontium		%
Silicon	10.0000	%	Sodium		%
Titanium	0.1000	%	Hydrogen		ml/100g

Figura 31. Composición química del AlSi10Mg

Para el diseño del sistema de alimentación en las simulaciones realizadas, se optó por un sistema de moldeo horizontal debido a sus ventajas en términos de eficiencia de material y control del flujo de metal. Este tipo de configuración permite reducir la altura del sistema de alimentación, lo que disminuye la cantidad de metal líquido requerido, optimizando los costos y reduciendo el impacto del flujo de metal sobre el molde. Esta reducción en la turbulencia minimiza la erosión y el riesgo de defectos en la superficie de la pieza.

El sistema de alimentación para la Brida con caño se configuró como un sistema despresurizado, con una proporción de 1:2:2 en las dimensiones de las áreas transversales

relativas del bebedero, el canal de alimentación y el ataque, respectivamente. Esta elección fue estratégica para optimizar el flujo del aluminio en la aleación AlSi10Mg, que tiene una excelente colabilidad y, por ende, una menor tendencia a formar defectos durante el llenado.

Para el molde, se optó por una arena seleccionada de la base de datos del software, concretamente la Silica Dry Sand. Asimismo, se emplearon los parámetros recomendados por el simulador para la temperatura del molde 20 °C y la temperatura inicial de colada de la aleación de aluminio osciló entre 700 y 800 °C, para todas las simulaciones.

5.3. Diseño de la geometría de la pieza “BRIDA CON CAÑO”

La brida con caño (ver las Figuras 32 y 33) es una pieza que permite conectar el Hub-Eje lento y las aspas. Esta brida tiene un diámetro de 170 mm y un espesor de 10 mm, asegurando una resistencia estructural adecuada. El caño que se extiende desde la brida presenta un diámetro exterior de 110 mm y un diámetro interior de 90 mm. Esta configuración permite un ensamblaje sólido y duradero con las aspas, al mismo tiempo que mantiene la ligereza de la estructura.



Figura 32. Vista anterior de la Brida con caño

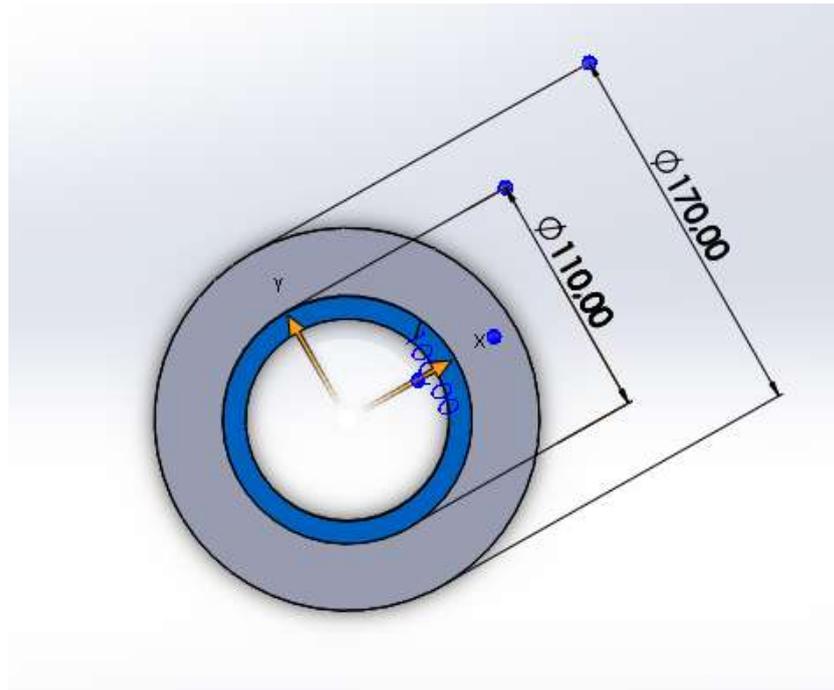


Figura 33. Vista superior de la Brida con caño

5.4 Resultados de las simulaciones de la “BRIDA CON CAÑO”

5.4.1 Brida con caño de 10 mm de espesor sin canal de alimentación-AlSi10Mg

La Figura 34 muestra los resultados de la primera simulación realizada en la Brida con caño, la cual simula la solidificación de la pieza utilizando como material la aleación AlSi10Mg sin considerar el sistema de alimentación. La primera aleación evaluada fue la AlSi10Mg debido a su mayor colabilidad y menor tendencia a la formación de defectos. La temperatura de colada elegida fue de 700 °C. La imagen muestra el nivel y la distribución de porosidad. El porcentaje de porosidad representa la probabilidad de que se presenten defectos en una región específica. En este caso, a lo largo de la pieza, se observan grandes regiones de porosidad, en un rango entre 7.1% y 90%, ubicada en el caño de la brida.

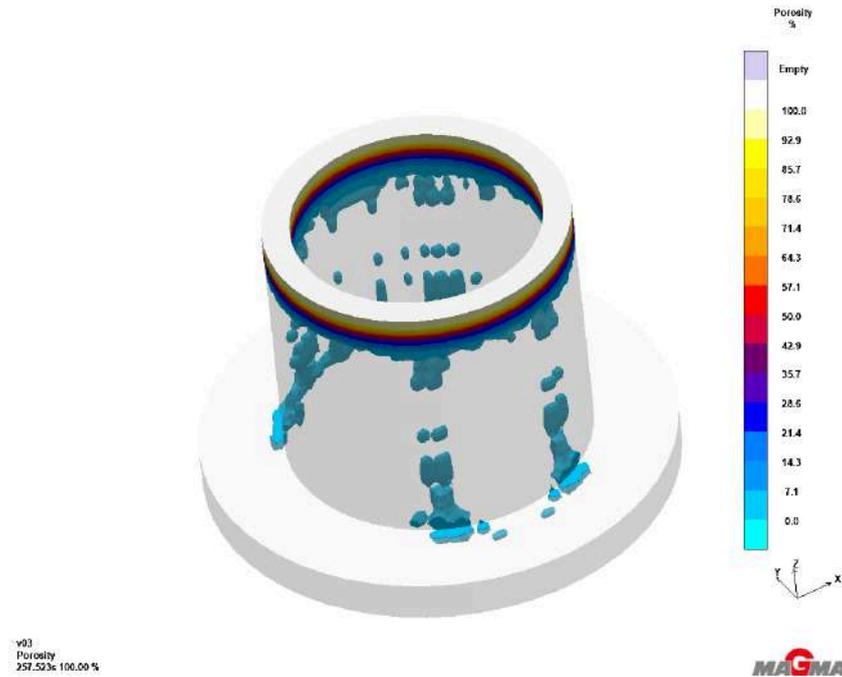


Figura 34. Ubicación y nivel de porosidad para para la Brida con caño utilizando la aleación AlSi10Mg, sin sistema de colada

5.4.2 Brida con caño de 10 mm de espesor con una mazarota. Sistema SB1

Una vez obtenido el resultado anterior, se realizó una segunda simulación incorporando un sistema de alimentación. En esta simulación, se diseñó un sistema de alimentación, como se muestra en la Figura 35. El bebedero principal tiene forma cónica, con una longitud de 300 mm, un diámetro superior de 105 mm y un diámetro inferior de 25 mm. La base del bebedero, también en forma de cono, presenta un diámetro superior de 85 mm, un diámetro inferior de 65,6 mm y una longitud de 40,6 mm. Además, se incorporó una cámara de filtro de cerámica con orificios circulares y un espesor de 10 mm, la cual está conectada a un canal de alimentación de 110 mm de longitud. Finalmente, el sistema de alimentación incluye una mazarota con un volumen total de 331,36 cm³. La temperatura de colada fue nuevamente de 700 °C.

El diseño del sistema de alimentación (SB1) y los resultados de porosidad de esta simulación se observa en la Figura 36. Los resultados evidenciaron una reducción significativa de la porosidad; sin embargo, esta no se eliminó por completo debido a la solidificación prematura del canal de alimentación. Este fenómeno interrumpió el flujo de metal líquido desde la mazarota hacia la pieza antes de que se completara el proceso de solidificación. Esto se puede observar en la Figura 37, donde se muestran los resultados de fracción de sólido para el sistema a 158 segundos de iniciada la solidificación (se encierra con un círculo negro la zona de solidificación prematura de la región de ataque a la pieza).

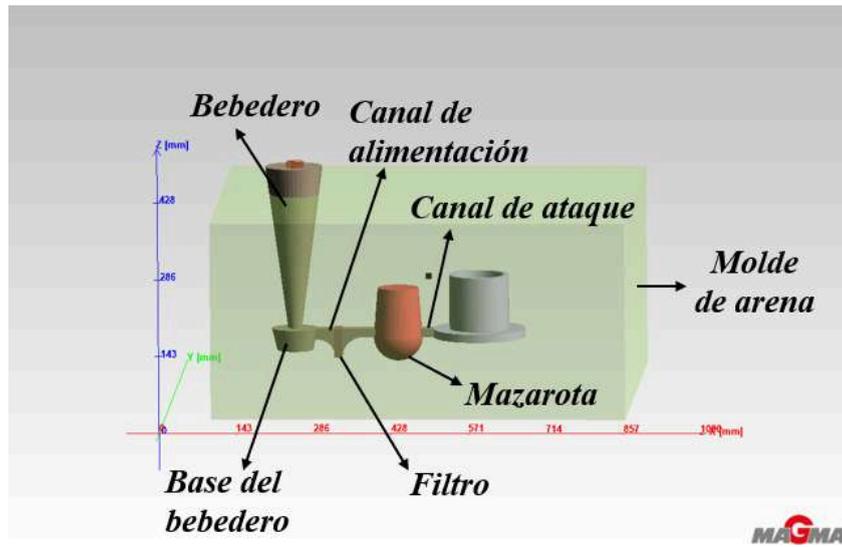


Figura 35. Principales partes que integran el Sistema de alimentación SBI para la pieza Brida con caño

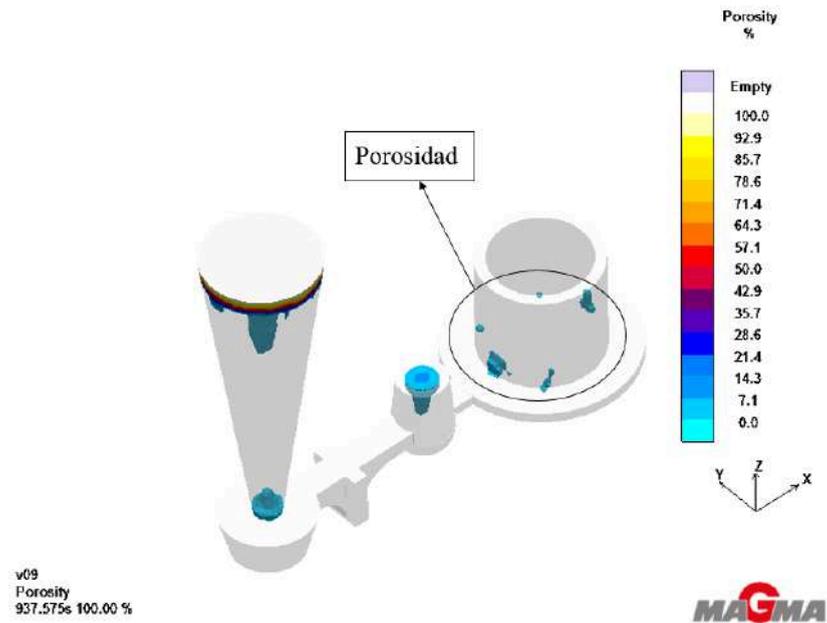


Figura 36. Sistema SBI. Porosidad de la pieza Brida con caño. Espesor de brida de 10 mm

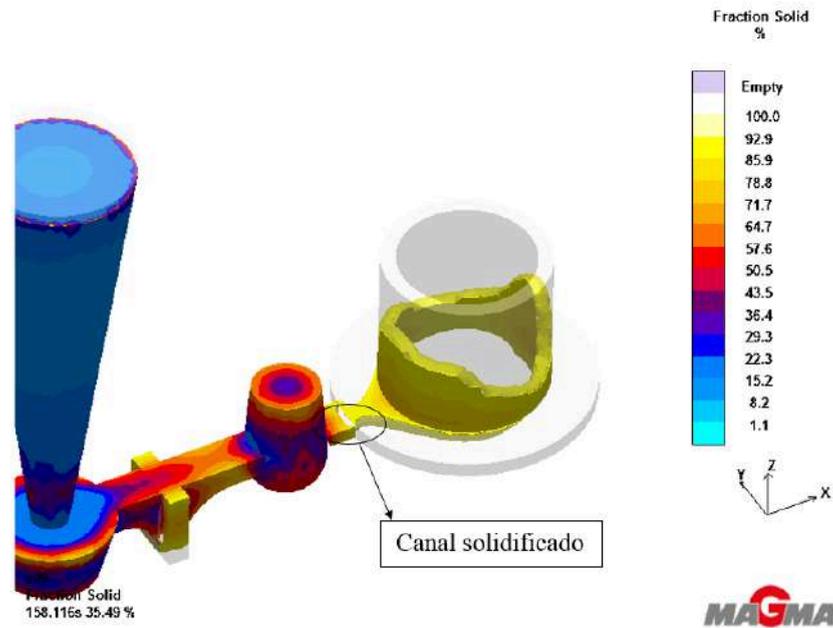


Figura 37. Sistema SBI. Fracción de sólido en la pieza Brida con caño para aproximadamente 158 seg desde el inicio de la solidificación. Espesor de brida de 10 mm

5.4.3 Brida con caño de 15 mm de espesor de brida y una mazarota de mayor volumen. Sistema SB2.

En la tercera simulación, se realizaron ajustes en el sistema de alimentación (denominado en este caso SB2), incrementando tanto el volumen de la mazarota como el espesor de la brida. Primero, se propuso aumentar el volumen de la mazarota para proporcionar un mayor suministro de metal durante la solidificación final, compensando así la contracción y limitando la formación de porosidades. El volumen de esta nueva mazarota fue de 673.28 cm³. Este cambio asegura que la mazarota permanezca líquida el tiempo suficiente para abastecer las secciones más alejadas y delgadas de la pieza. Segundo, se incrementó el espesor de la brida, con el objetivo de prolongar su tiempo de solidificación, lo cual facilita un flujo continuo de metal desde el ataque hasta las zonas más susceptibles a defectos, mejorando la distribución y minimizando la aparición de rechupes.

La Figura 38 muestra los resultados obtenidos de porosidad en función de los cambios mencionados. Se puede observar que estos cambios tuvieron un impacto significativo en la reducción de la porosidad, debido a que lograron retrasar la solidificación de la brida y mantener el canal de alimentación de líquido durante un periodo más prolongado, como se observa en la Figura 39 (la zona de ataque se mantiene con una baja fracción de sólido-color azul en la figura). Esta extensión del tiempo de solidificación permitió una alimentación continua en las áreas críticas, minimizando la porosidad en la pieza. A pesar de esta mejora sustancial en la calidad de la pieza, se detectaron pequeñas áreas residuales de porosidad (puntos celestes en la brida con caño de la Figura 38).

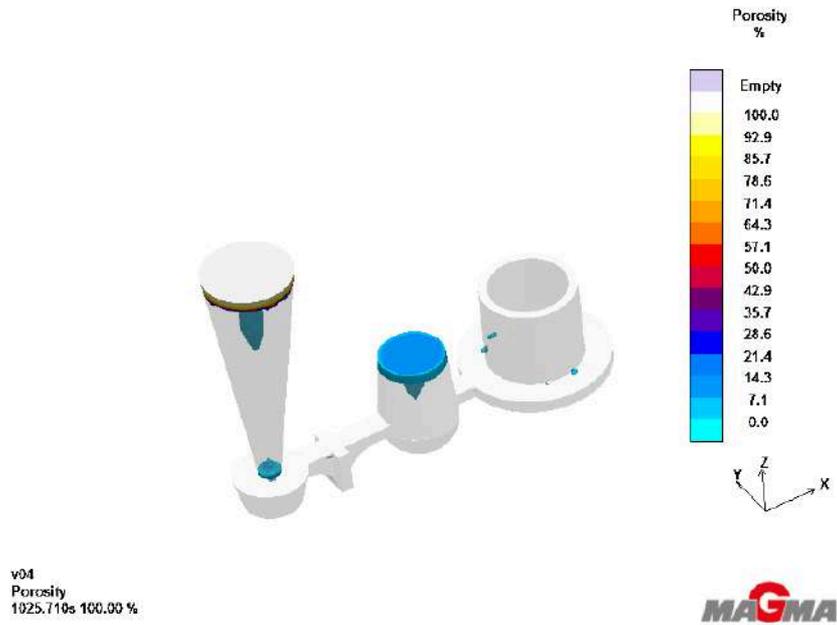


Figura 38. Sistema SB2. Porosidad de la pieza Brida con caño. Brida de 15 mm de espesor y mazarota de volumen 673.28 cm³

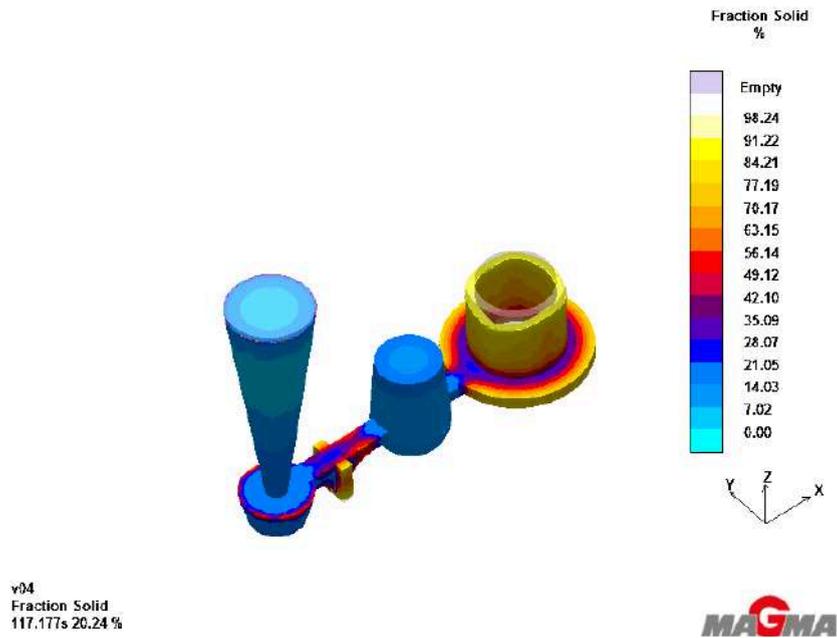


Figura 39. Sistema SB2. Fracción de sólido en la pieza Brida con caño para aproximadamente 118 seg desde el inicio de la solidificación. Espesor de brida de 15 mm. Mazarota de volumen 673.28 cm³

5.4.4 Brida con caño de 15 mm de espesor con tres mazarotas de mayor volumen. Sistema SB3.

Con el fin de eliminar por completo la porosidad de la pieza, se planteó la incorporación de dos mazarotas adicionales de volumen 673,28 cm³ en las zonas donde persisten los

problemas de porosidad. Esta modificación generó una mejora notable, logrando reducir la porosidad casi en su totalidad, tal como se puede observar en la Figura 40. La adición de estas mazarotas permitió un mayor control de la solidificación, garantizando un suministro más uniforme de material líquido y compensando de forma efectiva la contracción ocurrida durante la solidificación.

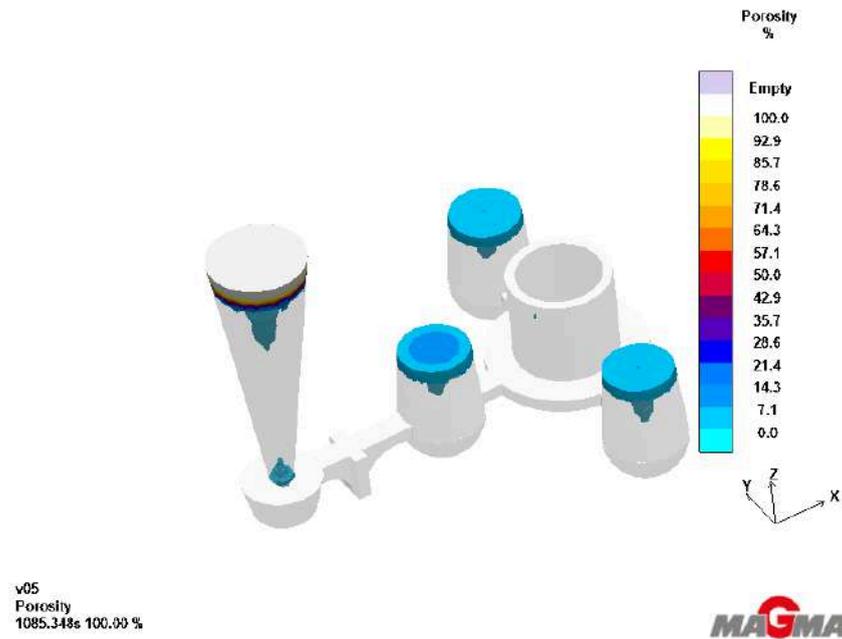


Figura 40. Sistema SB3. Porosidad de la pieza Brida con caño. Brida de 15 mm de espesor y tres mazarotas de volumen 673.28 cm³

5.4.5 Brida con caño de 15 mm de espesor con cuatro mazarotas. Sistema SB4.

Con el objetivo de eliminar la ligera porosidad restante observada en el lado izquierdo de la brida, se añadió una mazarota adicional en esa zona. En la Figura 41 se muestran los resultados obtenidos de esta nueva simulación, que permite observar una completa eliminación de la porosidad en la pieza. Esta solución técnica resultó eficaz para obtener una solidificación direccionada y uniforme (tal como se muestra en la Figura 42), lo que genera eliminar por completo la porosidad. Sin embargo, su aplicación para fabricar esta pieza a gran escala podría no ser viable en un contexto industrial debido a un excesivo volumen de sistema de alimentación y múltiples mazarotas, lo que incrementaría los costos de fabricación de la pieza. Sería conveniente estudiar un rediseño del sistema de alimentación SB4, que intente disminuir el volumen de dicho sistema, tarea que escapa al presente proyecto final. No obstante, el diseño y los resultados del sistema de alimentación SB4 fueron muy útiles en el desarrollo del presente trabajo final porque permitieron validar experimentalmente los alcances del software. Los resultados de dicha validación se muestran en el capítulo siguiente.

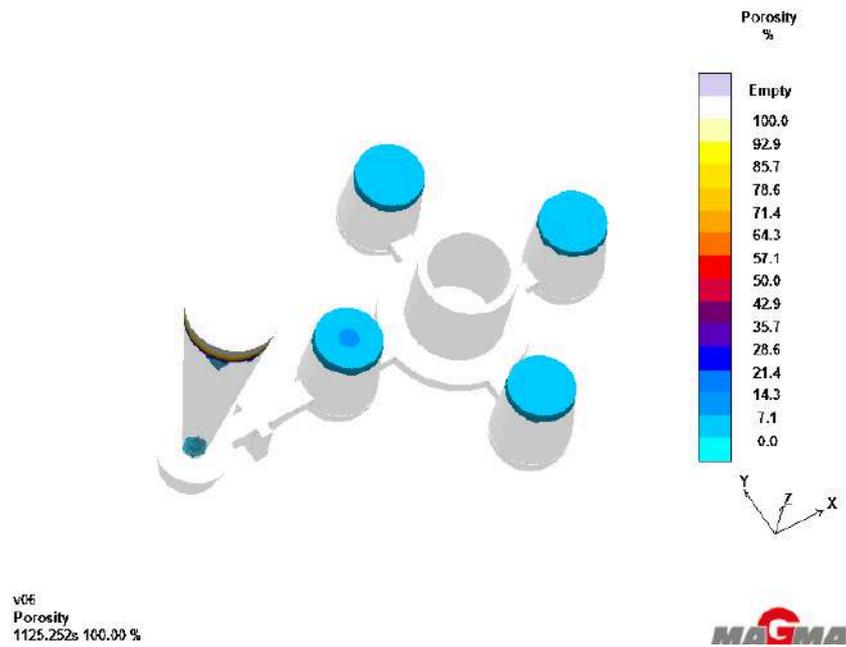


Figura 41. Sistema SB4. Porosidad de la pieza Brida con caño. Brida de 15 mm de espesor y cuatro mazarotas de volumen 673.28 cm^3

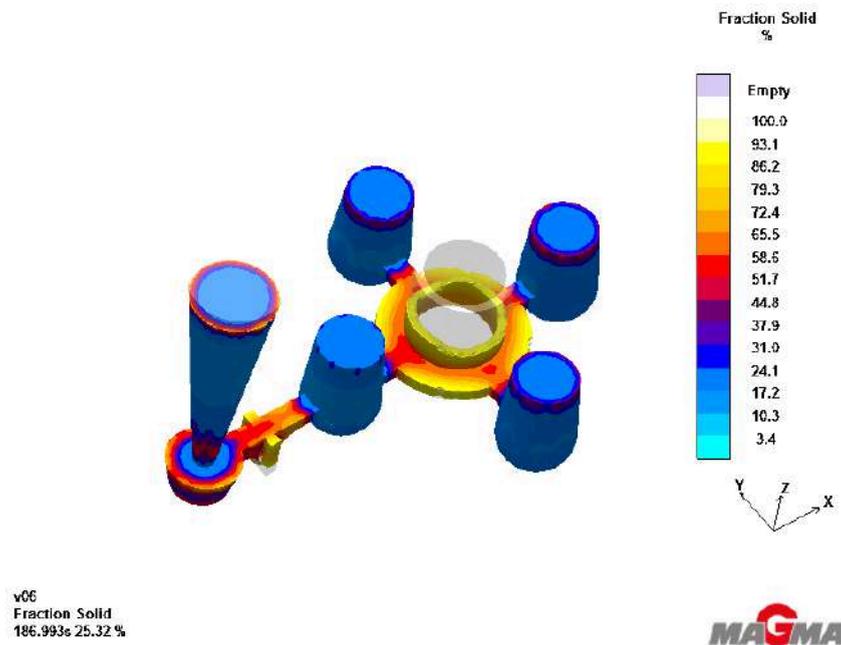


Figura 42. Sistema SB4. Fracción de sólido en la pieza Brida con caño para aproximadamente 187 seg desde el inicio de la solidificación. Espesor de brida de 15 mm. Mazarotas de volumen 673.28 cm^3

5.4.6 Brida con caño utilizando la aleación de aluminio AlSi7Mg

En una simulación posterior, utilizando el sistema de alimentación SB4, se evaluó la posibilidad de fabricación de la pieza Brida con caño utilizando la aleación AlSi7Mg. Como se menciona en la revisión bibliográfica, la aleación AlSi7Mg presenta propiedades mecánicas superiores en comparación con AlSi10Mg pero su menor colabilidad incrementa el riesgo de formación de porosidades.

En la Figura 43 se muestran los resultados de porosidad obtenidos. Se puede observar que en este caso la pieza presenta porosidad. Este fenómeno puede atribuirse a la menor colabilidad de la aleación AlSi7Mg, lo que podría dificultar el llenado completo de algunas áreas del molde y favorecer la formación de porosidades. La baja fluidez de esta aleación sugiere que, para lograr una pieza sin defectos internos usando como material la aleación AlSi7Mg, sería necesario rediseñar el diseño del sistema de alimentación o considerar otros ajustes que compensen su elevada tendencia a la formación de porosidad (micro rechupes).

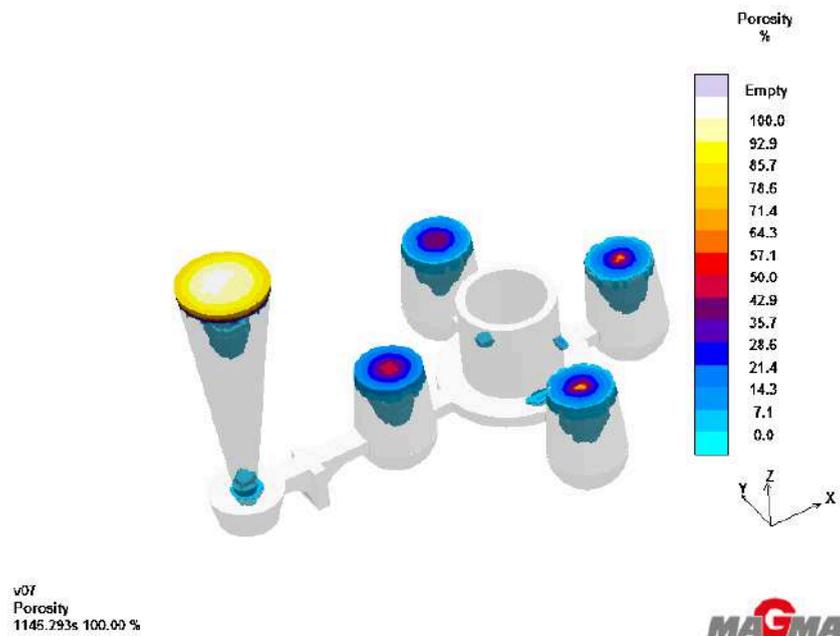


Figura 43. Sistema SB4. Porosidad de la pieza con 15 mm de espesor en la brida con cuatro mazarotas de volumen 673.28 cm³ con aleación de aluminio AlSi7Mg

5.5 Validación experimental de las simulaciones de la Brida con caño.

El uso de software de simulación de procesos, como Magmasoft, nos permite acercarnos con cierto grado de exactitud al evento real. Sin embargo, es importante destacar que los resultados predichos por el software no deben tomarse como una verdad absoluta. Para evaluar la fiabilidad de las predicciones y determinar la proximidad de los resultados simulados con los reales, es necesario compararlos con los datos obtenidos a partir de ensayos experimentales, en donde deben realizarse bajo condiciones lo más cercanas posible

a las establecidas en las simulaciones. En este sentido, con el objetivo de validar los resultados de porosidad obtenidos por el software, se llevó a cabo una colada experimental en la planta piloto de fusión del INTEMA, utilizando un buje con brida y el sistema de alimentación SB4, evaluando dos aleaciones de aluminio: AlSi10Mg y AlSi7Mg. El propósito de este ensayo fue validar la predicción del software para piezas que deberían ser completamente sanas (aleación AlSi10Mg) y aquellas con cierto grado de porosidad (aleación AlSi7Mg). Posteriormente, las piezas coladas fueron seccionadas para observar los niveles de porosidad y comparar estos resultados con los predichos por la simulación. A continuación, se detallan los resultados obtenidos en estos ensayos experimentales.

5.5.1 Colada de la Brida con caño

Una vez definidas las condiciones de colada, aleaciones y sistema de alimentación, se procedió a la fabricación de los modelos. Los modelos fueron obtenidos por impresión 3D utilizando material de PLA. La Figura 44 muestra los modelos fabricados.

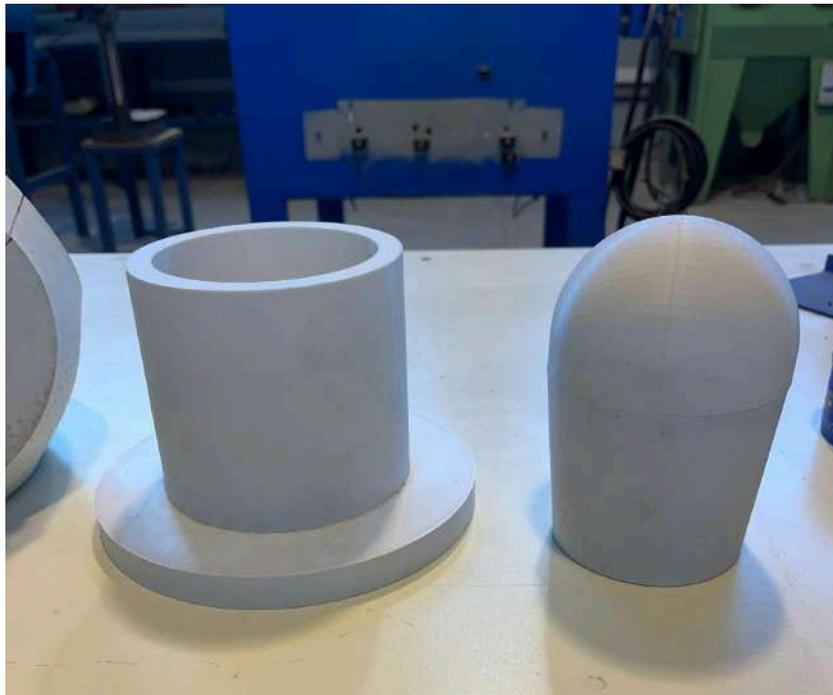


Figura 44. Modelo de buje con brida junto a una mazarota

Luego se procedió al moldeo de la parte inferior del molde, denominado bajo, lo cual se muestra en la Figura 45-a. Para la fabricación de los moldes se utilizó arena de río ligada con resina fenólica. Posteriormente se procedió al moldeo de la mitad superior del molde, denominado sobre. Ambas partes del molde se muestran en la Figura 45-b.

Finalmente, con ambas partes del molde listas, se tallaron en la arena los canales de colada que unen las mazarotas y la pieza a colar, dándoles una forma trapezoidal para mejorar el flujo del metal fundido. También se hicieron venteos estratégicos en el molde para permitir la

expulsión del aire alojado en la cavidad de moldeo durante la colada, y evitar defectos como la porosidad por gas en la pieza final. Luego, se cerró el molde. Por último, se coloca un basín para facilitar el vertido controlado del líquido durante la colada (ver Figura 45-c).

Se fabricaron un total de dos moldes de arena idénticos, con el fin de validar los resultados de las simulaciones realizadas en Magmasoft para las aleaciones de aluminio AlSi7Mg y AlSi10Mg.

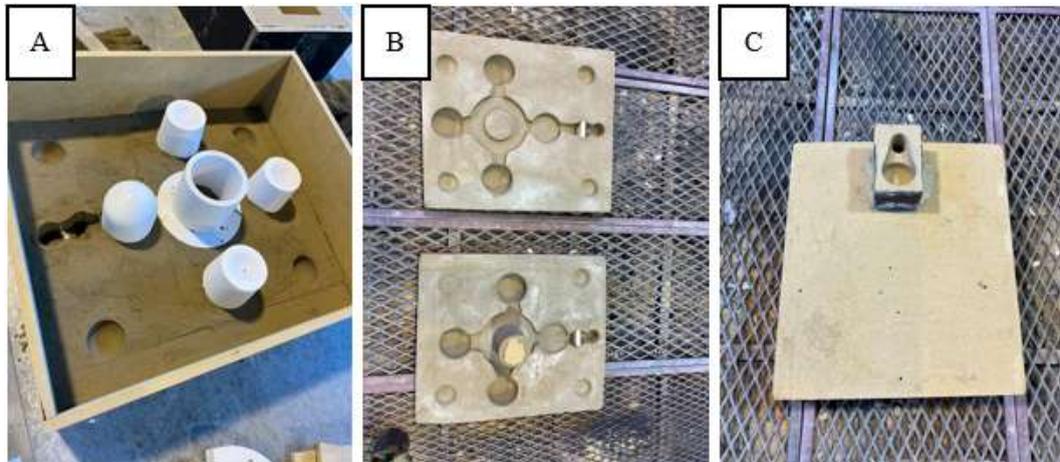


Figura 45. *Bajo del molde (a), bajo y sobre del molde (b), Molde de arena cerrado, con basín de colada (c)*

Al momento de realizar la colada, se colocaron lingotes de aleación de aluminio en un horno de crisol. Una vez que se alcanzó una temperatura cercana a los 700 °C, la cual era la temperatura de colada deseada, se añadió una pastilla desgasificante de hexacloroetano para expulsar el hidrógeno, ya que este gas tiene una alta afinidad con el aluminio. Si no se elimina el hidrógeno de forma adecuada, puede generar porosidad por gas atrapado en la pieza final. Las temperaturas de colada utilizadas fueron de 720 °C para la aleación AlSi10Mg y de 820 °C para la aleación AlSi7Mg. Esta última colada presentó un inconveniente durante el proceso de fusión, lo que generó el sobrecalentamiento del líquido; esto producirá como veremos más adelante una mayor presencia de porosidad por gas hidrógeno atrapado en la pieza colada.

Las Bridas con caño de ambas aleaciones se muestran en la Figura 46: a) AlSi10Mg, b) AlSi7Mg. Posteriormente, estas piezas fueron llevadas a una sierra de cinta para eliminar las mazarotas y el canal de alimentación solidificado (Figura 46-c). La Figura 46-d muestra una de las bridas luego de las operaciones de terminación de desbarbado. A simple vista, no se observaron defectos visibles. La composición química de ambas bridas, determinada por vía espectrométrica, se muestra en la Tabla 9. Se puede observar que ambas bridas con caño muestran pequeños porcentajes de hierro (Fe), elemento no deseado en la composición química, y que está presente como impureza.

Tabla 9. Composición química de las muestras correspondientes a las bridas con caño, según el análisis espectrométrico. Balance Al. (wt%)

	Si	Mg	Fe
AlSi7Mg	7 %	0,3 %	1 %
AlSi10Mg	11 %	0,2 %	1 %



Figura 46. Coladas de Bridas con caño: a) AlSi10Mg, b) AlSi7Mg, c) Seccionamiento de sistema de alimentación, d) Brida con caño, e) Seccionamiento para obtener probeta para estudio de porosidad, f) Sección transversal de la brida, cortada en tres partes para facilitar observación de porosidad

Para validar los resultados de la simulación, se realizaron cortes longitudinales en ambas bridas en el mismo lugar donde la simulación del AlSi7Mg indicaba porosidad. Con estos cortes, se obtuvo una sección de la brida de aproximadamente 10 mm de espesor (ver Figura 46-e). Luego, se procedió al pulido de una de las caras de las partes seccionadas con lijas al agua, comenzando con lijas de grano grueso para eliminar material superficial de forma rápida, seguidas de lijas de grano intermedio y finalmente de grano fino para obtener una superficie lisa y homogénea. Para alcanzar un pulido a espejo de la superficie que permita

verificar claramente la presencia de porosidad, ya sea por gas atrapado o microrechupes, las muestras fueron seccionadas en tres partes, tal como se muestra en la Figura 46-f, y fueron pulidas a espejo utilizando una suspensión de alúmina y agua.

5.5.2 Análisis microestructural de la brida con caño

Una vez realizado el pulido, se realizó un análisis visual de las aleaciones de aluminio. A simple vista, se observó que la aleación AlSi7Mg presentó una mayor porosidad en comparación con la aleación AlSi10Mg. Esto puede observarse en la Figura 47. Este aumento de porosidad en AlSi7Mg puede atribuirse, en parte, a una mayor retención de gas en el metal fundido a la temperatura de colada, atribuido al sobrecalentamiento del líquido mencionado anteriormente, lo cual incrementó la cantidad de hidrógeno gaseoso en la pieza colada. Además, el menor contenido de silicio, también juega un rol fundamental en esta diferencia en porosidad observada, ya que afecta tanto la fluidez del líquido como su capacidad para liberar gas durante la solidificación.

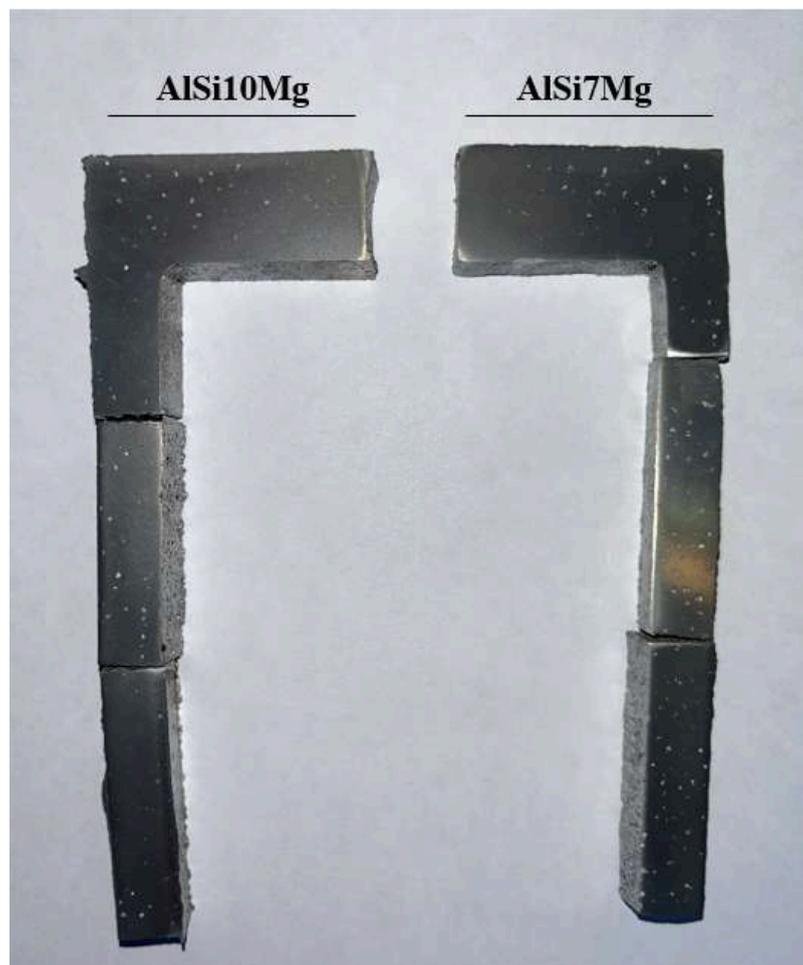


Figura 47. Porosidad de las probetas analizadas de AlSi7Mg y AlSi10Mg

Para un análisis más detallado, las muestras se observaron mediante el uso de un microscopio óptico, que permite revelar tanto la microestructura como la porosidad. La Figura 48 muestra varias micrografías correspondientes a la Brida con caño AlSi7Mg, mientras que la Figura 49 muestra micrografías correspondientes a la brida AlSi10Mg.

La microestructura de las aleaciones analizadas, está compuesta por α -aluminio que abarcan las zonas claras de las micrografías que están asociadas con el patrón dendrítico observado. Esto puede observarse en la Figura 48-a y 49-a para bajas magnificaciones. Este patrón en forma de dendritas, se produce durante el proceso de solidificación del material. Las dendritas se forman debido a la solidificación del aluminio a medida que el material se enfría, y sus ramas crecen en direcciones preferenciales, lo que genera una morfología ramificada característica. Además, se observan regiones más oscuras dispersas entre las dendritas de aluminio (α -Al), las cuales se corresponden a la presencia del eutéctico Al-Si, formado por α -Al y Si. Las Figuras 48-b y 49-b muestran un detalle de las microestructuras. Asimismo, se observan regiones blancas en la microestructura que corresponden a fases ricas en hierro (Fe), las cuales adoptan una morfología similar a agujas o placas. Estas regiones se corroboran mediante análisis espectrométricos, que, según los resultados obtenidos, confirman la presencia de dicho elemento en la aleación. Por otro lado, se puede observar en la Figura 49-c correspondiente a la aleación AlSi10Mg, la presencia de una fase gris oscura de mayor tamaño en forma de placas o agujas. Esta fase es silicio (Si) puro, el cual solidifica a partir de un líquido con elevado contenido de silicio (mayor a la composición eutéctica) producto de la segregación de este elemento en el líquido interdendrítico, que se produce durante la solidificación. Este (Si) puede influir negativamente en las propiedades mecánicas de la aleación, ya que es una fase dura y frágil. Esta morfología de (Si) no se observó en la aleación AlSi7Mg debido a su menor contenido de Si, lo que genera una menor concentración de este elemento en el líquido interdendrítico.

En lo que refiere a la porosidad encontrada en ambas muestras, en la microestructura de AlSi7Mg se observa tanto porosidad por contracción como por gas. Las Figuras 48-c y 48-d muestran un caso de cada tipo de porosidad. En contraste, en la aleación AlSi10Mg, únicamente se detecta porosidad por gas. La identificación de estos defectos se basa en su forma: la porosidad causada por gas tiene una forma esférica, mientras que la porosidad por contracción presenta formas irregulares. La presencia de porosidad por gas puede deberse a una eficiencia limitada de la pastilla desgasificante de hexacloroetano o a una aplicación inadecuada del desgasificante.

En el caso de AlSi7Mg, se observaron cavidades de contracción de mayor tamaño y en mayor cantidad, lo que puede afectar negativamente las propiedades mecánicas de las piezas, como su resistencia a la tracción y tenacidad. La diferencia en la colabilidad entre las dos aleaciones sugiere que AlSi10Mg es más adecuado para producir este tipo de piezas, gracias a su mayor colabilidad y capacidad para liberar el gas atrapado durante la solidificación.

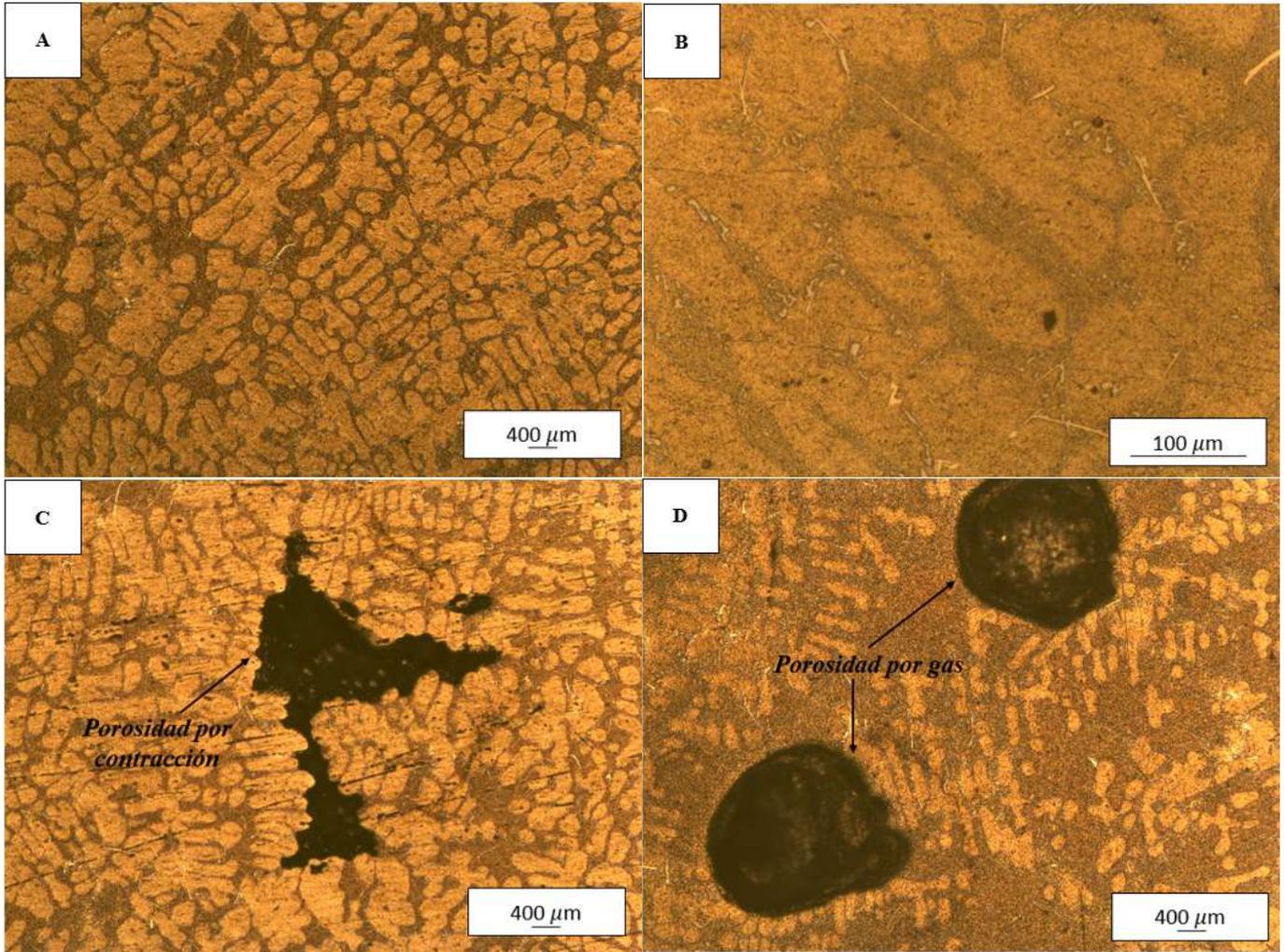


Figura 48. Microestructura del AlSi7Mg a 400 μm y 100 μm respectivamente (a,b), c) Porosidad por contracción en el AlSi7Mg y d) Porosidad por gas en AlSi10Mg

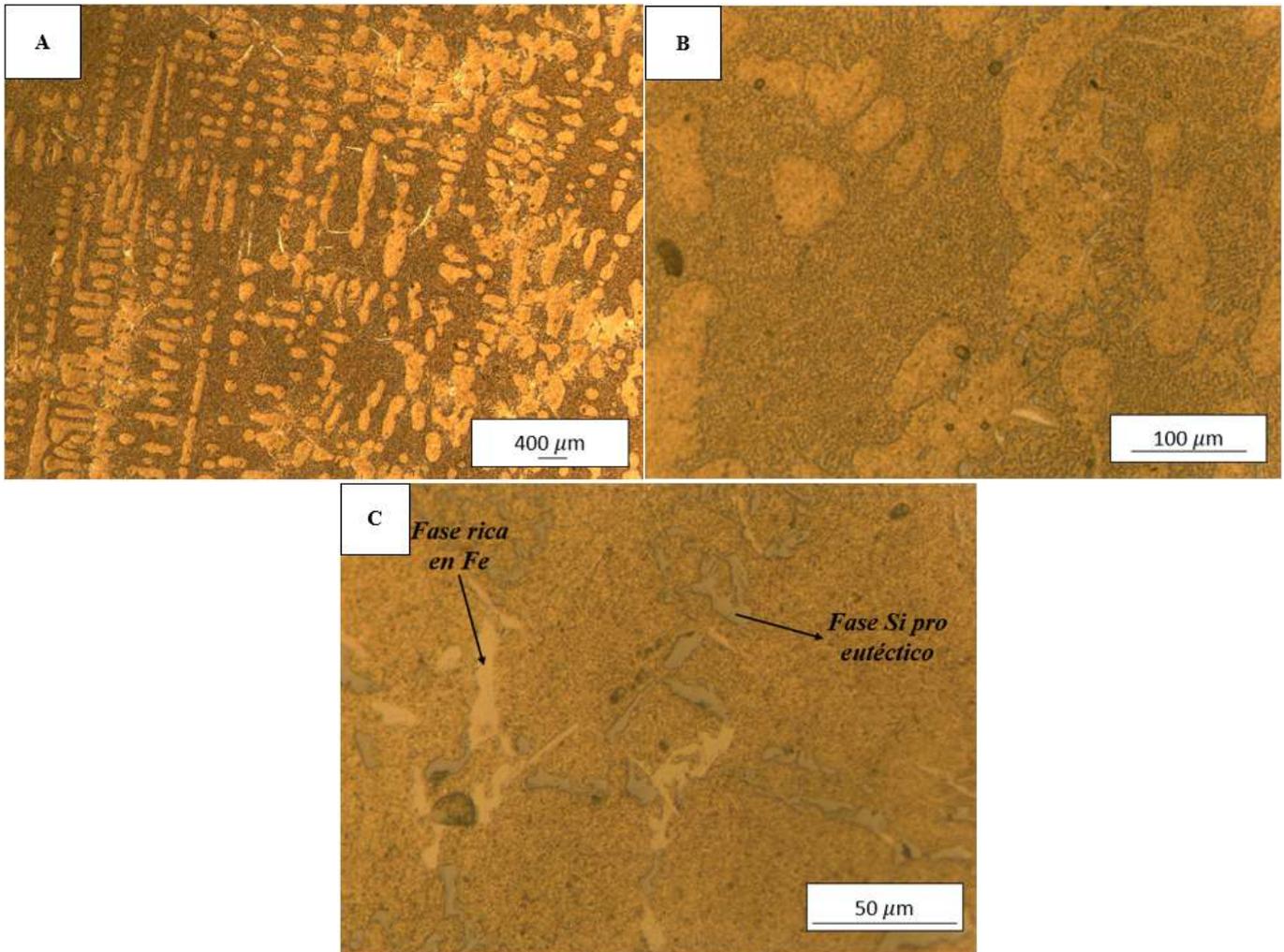


Figura 49. Microestructura del AlSi10Mg a 400 μm , 100 μm y 50 μm respectivamente a, b y c)

Los resultados obtenidos muestran una notable concordancia con las predicciones realizadas por el software en lo referente a la porosidad por contracción. En la aleación AlSi7Mg se evidenció la presencia de microrechupes, mientras que en AlSi10Mg no se observaron. La porosidad por gas atrapado, en cambio, se atribuye a un desgasificado inadecuado durante el proceso de colada. Es crucial resaltar que el software demostró una alta precisión al identificar las zonas donde se formarían microrechupes, confirmando su valor como herramienta predictiva en el análisis de defectos de solidificación.

5.6 Resultados y discusión de las simulaciones del proceso de fusión y colado de la pieza “HUB- EJE LENTO”

5.6.1 Diseño de la geometría de la pieza “HUB- EJE LENTO”

El Hub-Eje lento, diseñado durante el proyecto final del alumno Joaquín Grisolia, consiste en una esfera hueca de 300 mm de diámetro exterior y un espesor uniforme de 10 mm. La esfera está truncada en el extremo opuesto al eje y posee en este plano un orificio de 104 mm de diámetro. Por otro lado, el hub posee tres orificios, cada uno con un diámetro de 200 mm y separados entre sí por un ángulo de 120°. Estos orificios permiten el ensamblaje de las aspas mediante su conexión a la brida con caño.

El eje lento, que forma parte de esta misma pieza, es una estructura cilíndrica hueca con un diámetro interno de 80 mm, un espesor de pared de 10 mm y una longitud de 310 mm. Estas medidas del Hub-Eje lento se detallan en las Figuras 50, 51 y 52.

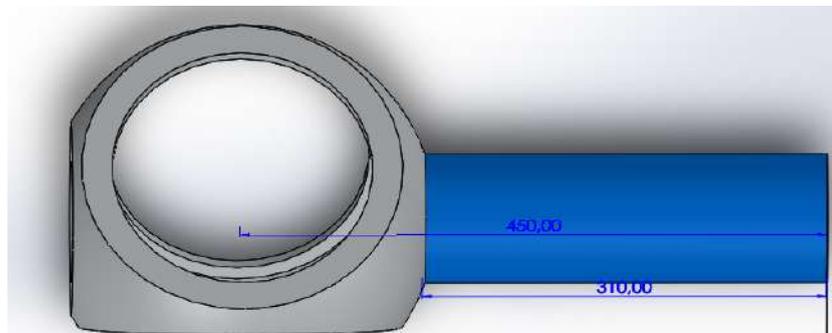


Figura 50. Vista lateral derecha del Hub-Eje lento

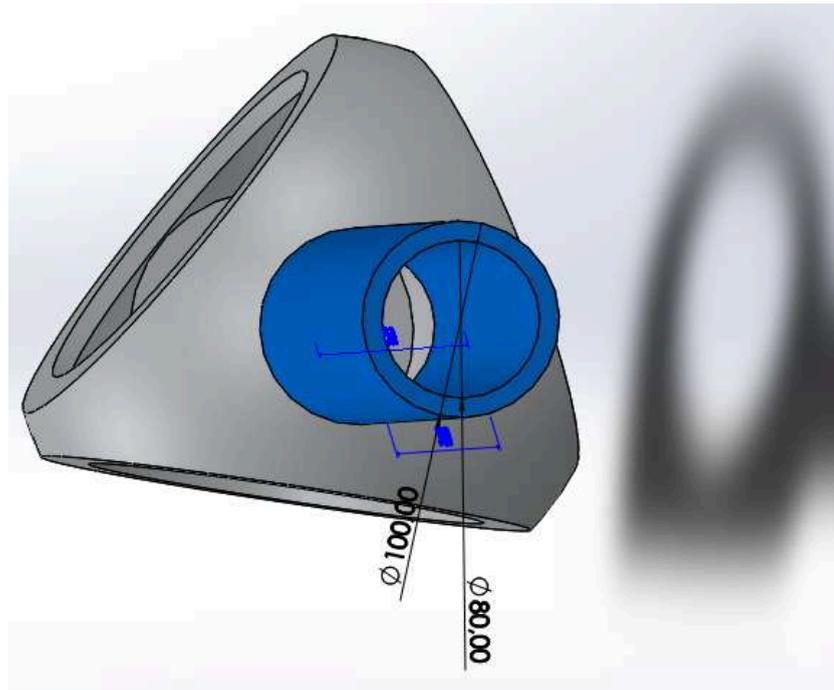


Figura 51. Vista posterior del Hub-Eje lento

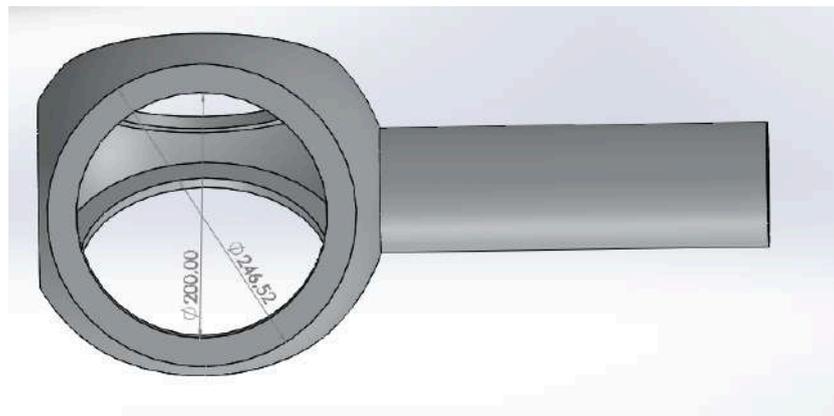


Figura 52. Vista lateral izquierda del Hub-Eje lento

5.6.2 Resultados de las simulaciones de la pieza “HUB-EJE LENTO” mediante el uso del software Magmasoft

En los resultados experimentales del trabajo final de Joaquín Grisolia se observó un llenado incompleto del hub, atribuido principalmente a que solo se utilizó un punto de ingreso de metal líquido (gate) a la pieza. Por otro lado, el moldeo vertical adoptado en esa colada resultó ser bastante problemático a la hora de la fabricación del molde, debido a sus grandes dimensiones y peso. Por ese motivo, en el presente desarrollo se determinó que la colada se realizará utilizando un moldeo horizontal. Esta orientación permitirá un recorrido de llenado más corto, disminuyendo el tamaño del sistema de alimentación y facilitando la operación de moldeo.

Por otro lado, a partir del análisis de las simulaciones de la Brida con caño y la validación de estos resultados, se decidió que la aleación de aluminio para las simulaciones del Hub será AlSi10Mg. Esta elección está respaldada por la menor tendencia a formar porosidad, una consideración crítica para la integridad estructural del Hub. La porosidad representa puntos de inicio para grietas en condiciones de fatiga; por lo tanto, una baja incidencia de este defecto es fundamental. Las grietas que se originan en los poros pueden propagarse rápidamente bajo carga, comprometiendo tanto la vida útil como la seguridad del componente.

En las siguientes secciones se presentan las simulaciones más relevantes, organizadas de manera secuencial para facilitar la comprensión de los resultados.

5.6.2.1 Primera simulación Hub-Eje lento.

Siguiendo el enfoque aplicado a la Brida con caño, se realizó la primera simulación de la pieza Hub-Eje lento sin un sistema de alimentación. El objetivo de esta simulación inicial fue analizar el comportamiento de la solidificación y localizar tanto la ubicación como el nivel de porosidad presente en la pieza. La temperatura de colada elegida fue de 700 °C.

Los resultados de porosidad en la pieza, presente en la Figura 53, evidenciaron una cantidad considerable de porosidad en el hub y en varias áreas críticas alrededor de la conexión Hub-Eje lento. Estos resultados confirman que esta zona presenta una mayor tendencia a mostrar porosidad, lo cual coincide con las conclusiones del trabajo de Joaquín Grisolia, quien señaló esta región como crítica para las propiedades mecánicas de la pieza.

La presencia de porosidad en estas áreas sugiere que, sin un sistema de alimentación adecuado, el Hub está expuesto a una disminución en su resistencia mecánica y, en particular, a una mayor susceptibilidad a fallas por fatiga. Para mitigar este riesgo, en las siguientes etapas se evaluarán configuraciones de alimentación que garanticen un flujo de material más controlado y un proceso de solidificación más uniforme. Además, se considerará la posibilidad de aumentar la temperatura de colada y ajustar el tiempo de llenado para favorecer la completa eliminación de porosidad, asegurando así una integridad estructural que cumpla con los requisitos de operación del hub.

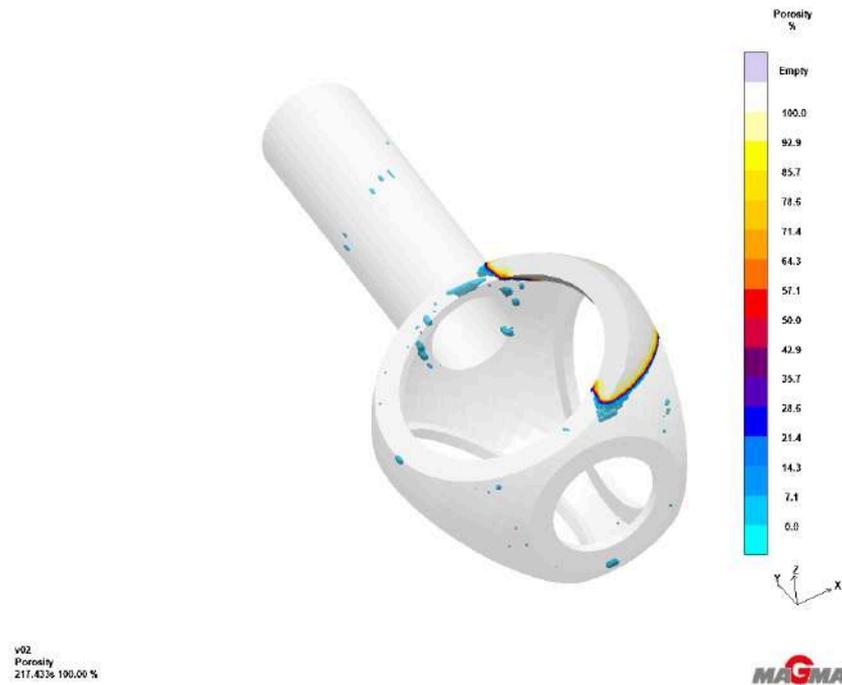


Figura 53. Ubicación y nivel de porosidad para el AlSi10Mg sin sistema de alimentación para la pieza Hub-Eje lento

5.6.2.2 Segunda simulación del Hub-Eje lento. Sistema SH1

El primer sistema de alimentación diseñado (denominado SH1) consistió en atacar la pieza por un solo gate, y colocar tres realimentadores (mazarotas) de 673,28 cm³ y dos enfriadores (chills) para mejorar el proceso de solidificación y reducir la porosidad. Las dimensiones de los enfriadores se detallan en la Figura 54. En la Figura 55 se muestra la pieza Hub-Eje lento con el sistema de alimentación SH1, donde se detalla cada parte que conforma dicho sistema. El bebedero principal tiene forma cónica, con una longitud de 200 mm, un diámetro superior de 105 mm y un diámetro inferior de 27 mm. La base del bebedero, también en forma de cono, presenta un diámetro superior de 85 mm, un diámetro inferior de 66 mm y una longitud de 40 mm. Además, se incorporó una cámara de filtro de cerámica con orificios circulares y un espesor de 10 mm, la cual está conectada a un canal de alimentación de 110 mm de longitud. Los parámetros de colada se mantuvieron iguales a los de la primera simulación (La temperatura de colada elegida fue de 700 C), con la adición de los enfriadores, que también se encontraban a temperatura ambiente.

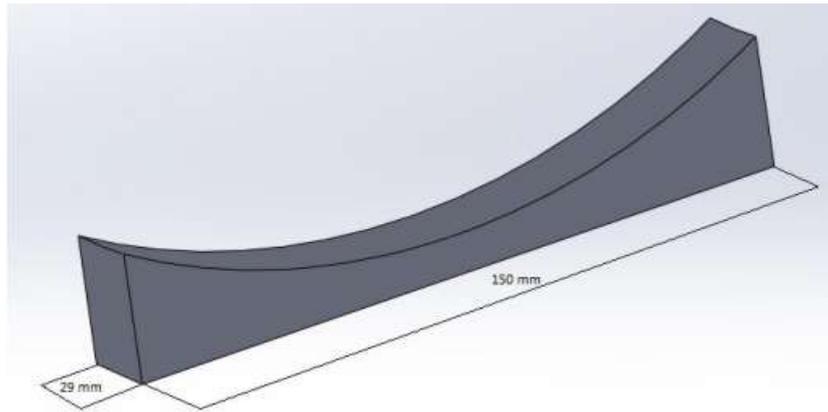


Figura 54. Dimensiones del chill

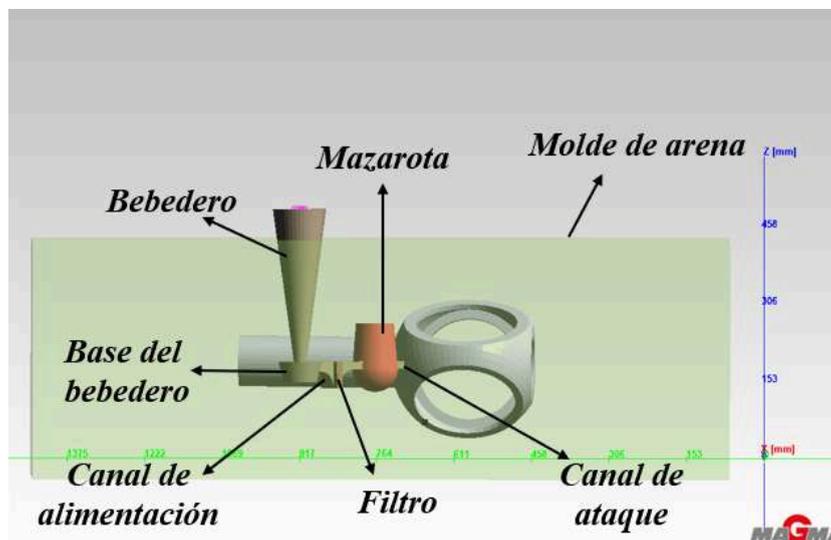


Figura 55. Sistema de alimentación SH1

Las mazarotas se ubicaron estratégicamente: una en el canal de alimentación y dos opuestas al eje del Hub, alineadas con las áreas donde se detectó mayor porosidad en la primera simulación. Por otra parte, los dos enfriadores se colocaron en posiciones específicas para dirigir la solidificación de manera más uniforme hacia las mazarotas: uno en la parte inferior de la pieza y otro en el lateral del Hub. Estos enfriadores ayudan a controlar la dirección de la solidificación, reduciendo la probabilidad de formación de poros en esas áreas.

En la Figura 56 se muestra la porosidad presente en la pieza. El diseño del sistema de alimentación SH1 no permitió eliminar por completo la porosidad en la pieza. Se observa que la porosidad se concentra principalmente en el Eje lento y en la parte inferior del Hub. Estas zonas presentan grandes volúmenes de porosidad, y según se detallan en la columna del margen derecho, el porcentaje de porosidad en la zona coloreada puede alcanzar hasta un 20 % de porosidad en dicha zona. Al analizar la imagen de fracción de sólido, Figura 57, se observa que en el eje de la pieza persisten “lagunas” de material solidificado parcialmente

que no siguen el frente de solidificación, lo que puede causar porosidad por contracción. Un fenómeno similar se presenta en la parte inferior del hub, cerca del chill, indicando que el metal líquido ubicado en las mazarotas no puede realimentar esas regiones.

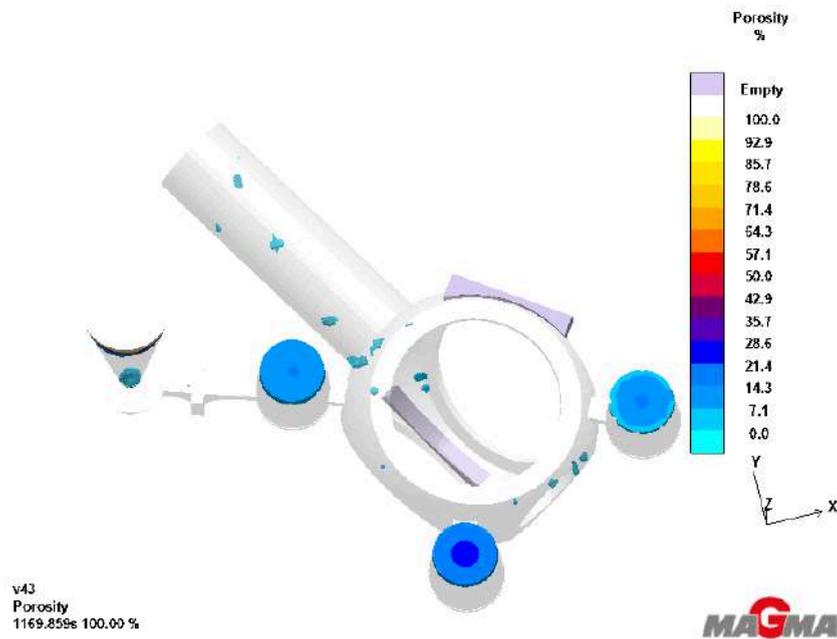


Figura 56. Porosidad en la pieza Hub-Eje lento. Sistema de alimentación SHI

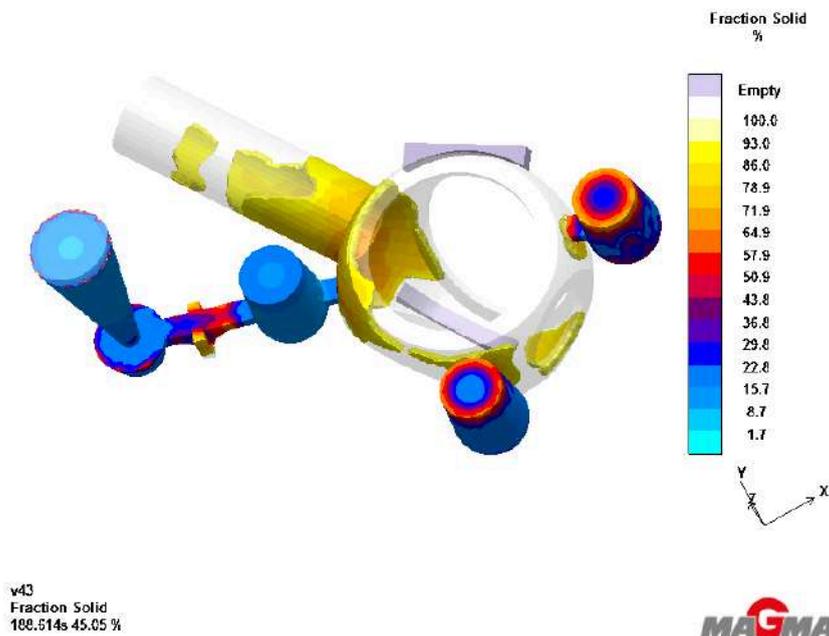


Figura 57. Fracción de sólido en la pieza Hub-Eje lento para un tiempo de solidificación de aproximadamente 188 segundos. Sistema de alimentación SHI

5.6.2.3 Tercera simulación del Hub-Eje lento. Sistema SH2

Con la finalidad de reducir la porosidad observada en el caso anterior, se diseñó un nuevo sistema de alimentación (SH2) (ver Figura 58) en el cual se optó por alimentar a la pieza por cuatro puntos, colocando antes de cada gate una mazarota de 673,28 cm³. Además se colocaron dos enfriadores: uno en la posición utilizada en simulaciones anteriores y otro en forma de anillo en donde sus dimensiones se detallan en la Figura 59. Asimismo, se añadieron dos realimentadores adicionales, ubicados en la zona opuesta a la alimentación de la pieza. Este nuevo sistema de alimentación permite un llenado más rápido de la pieza y, junto con las mazarotas, contribuyó a reducir la porosidad. En la Figura 60 se muestra la porosidad observada para el sistema de alimentación SH2.

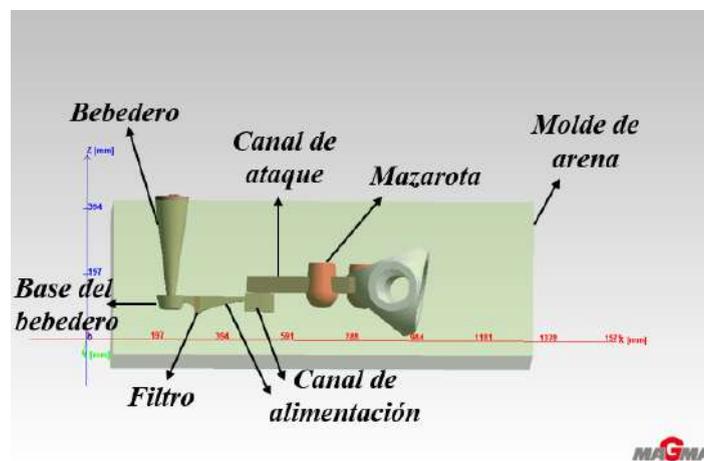


Figura 58. Sistema de alimentación SH2

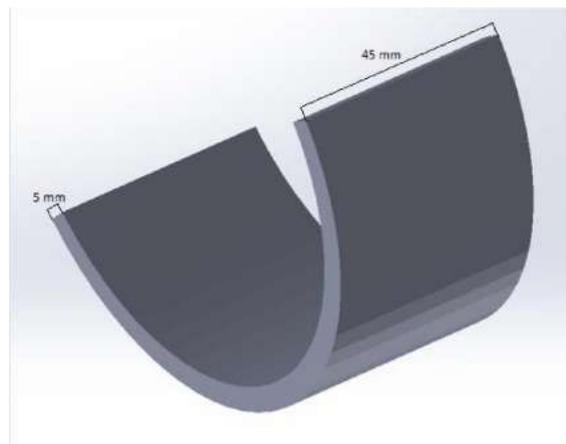


Figura 59. Enfriador utilizado en la zona del Eje lento

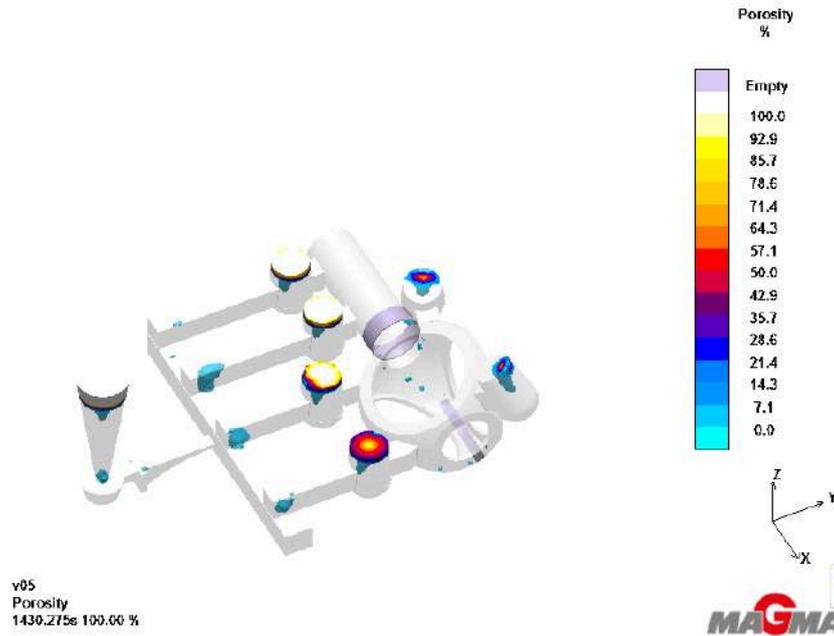


Figura 60. Porosidad en la pieza Hub-Eje lento. Sistema de alimentación SH2

A pesar de la notable reducción de porosidad lograda con esta configuración, persisten algunas áreas con defectos. Se detectó porosidad en la parte inferior del Hub, cercana al eje y opuesta a este. En la Figura 61 se observa que el frente de solidificación del material tiende a interrumpirse, generando regiones donde queda metal líquido rodeado de sólido, lo que explica la formación de porosidad por contracción en esas zonas (estas zonas quedan imposibilitadas de ser realimentadas con líquido proveniente de las mazarotas). Este inconveniente podría mitigarse mediante el uso de un enfriador de mayor tamaño o una reubicación estratégica de este para favorecer una solidificación más uniforme. También podría considerarse ajustar la ubicación de las mazarotas utilizada en esta simulación, de manera que mejore la alimentación en esas regiones.

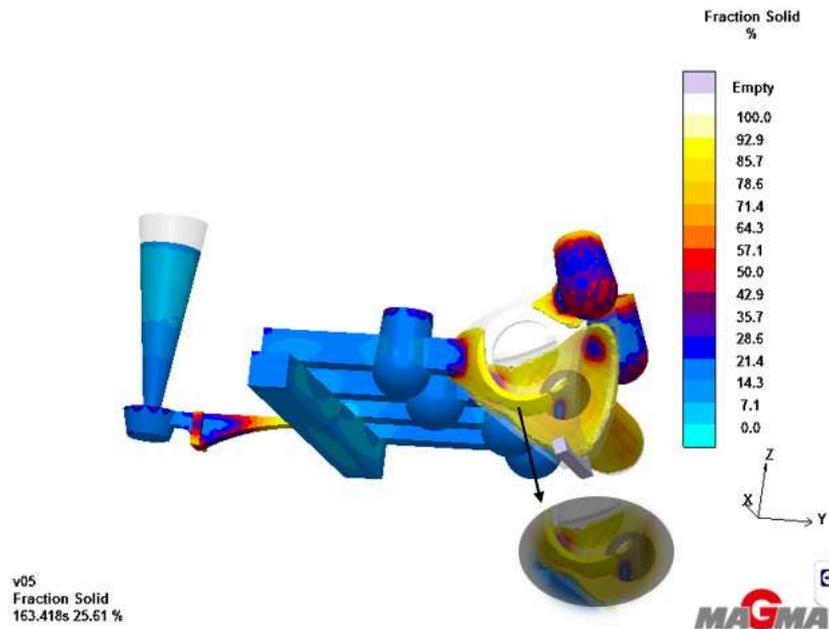


Figura 61. Fracción de sólido en la pieza Hub-Eje lento para un tiempo de solidificación de aproximadamente 163 segundos. Sistema de alimentación SH2

Este nuevo sistema de alimentación presenta un tamaño considerablemente grande, con runners con un ancho de 50 mm y una longitud de aproximadamente 300 mm. Esto se realizó de esta manera, porque se buscaba evaluar solamente el resultado de utilizar cuatro ataques, por lo que no se reparó demasiado en el diseño óptimo del sistema de alimentación para esta simulación. Sin embargo, esto sí fue tenido en cuenta para las próximas simulaciones, ya que se decidió mantener estos cuatro puntos de ataque.

5.6.2.4 Cuarta simulación Hub-Eje lento. Simulación SH3

En esta cuarta simulación, se realizaron varios ajustes importantes para mejorar la calidad de la pieza y reducir la porosidad. Se modificó la posición de la mazarota que realimenta la zona de unión del Eje lento y el Hub, ubicada del lado opuesto a los ataques de la pieza, con el objetivo de mitigar la porosidad observada en simulaciones previas. Se mantuvo solo un enfriador, posicionado en la parte inferior del Hub, con el fin de redirigir el flujo de metal de manera que las últimas zonas en solidificar sean los alimentadores, optimizando así la dirección de la solidificación. En la Figura 62 se muestra el sistema de alimentación SH3. Es importante mencionar que este sistema de alimentación es el último desarrollado. La temperatura establecida para la colada fue de 800 °C. Las restantes simulaciones solo cambian la temperatura de colada o el agregado o eliminación de chills.

Los canales de alimentación poseen una sección transversal de geometría cuadrada de 50 mm de lado, los canales de ataque se redimensionaron, con una sección transversal de geometría rectangular con un ancho de 50 mm, y un alto de 30 mm. El bebedero tiene forma cónica, con una longitud de 300 mm, un diámetro superior de 50 mm y un diámetro inferior de 40 mm. La base del bebedero, también en forma de cono, presenta un diámetro superior de 86 mm, un

diámetro inferior de 66 mm y una longitud de 70 mm. Se cumplió con la condición de que sea un sistema de alimentación despresurizado de tipo 1:2:4. Las dimensiones aproximadas fueron: 12 cm² (base del bebedero): 50 cm² (suma de la sección transversal de los runners): 90 cm² (suma de la sección transversal de los gates).

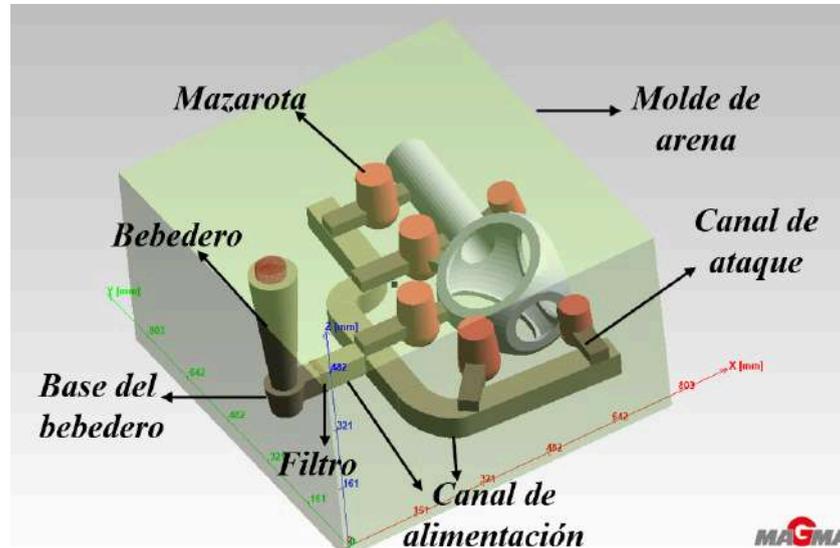


Figura 62. Sistema de alimentación SH3

Por otro lado, el análisis de la solidificación de la pieza evidenció que el metal líquido experimenta una disminución de aproximadamente 124 °C durante su recorrido desde el basín de colada hasta la última cavidad de moldeo. En esta región, correspondiente a la parte superior del Hub, se registró una temperatura de 676,7 °C. Este análisis se detalla en la Figura 63, donde también se registró que, una vez completado el llenado de la cavidad del molde, la temperatura mínima del líquido fue de 650 °C.

Estos resultados confirman que la pieza se llenaría adecuadamente, ya que la temperatura de liquidus (inicio de la solidificación) para este contenido de silicio es de aproximadamente 610 °C. Sin embargo, es importante destacar que a temperaturas elevadas el aluminio fundido presenta una mayor afinidad por la absorción de hidrógeno, lo que incrementa el riesgo de porosidad por gas. Por esta razón, es crucial realizar un control preciso en la aplicación del desgasificante, garantizando una mínima presencia de hidrógeno y reduciendo así la probabilidad de formación de porosidad.

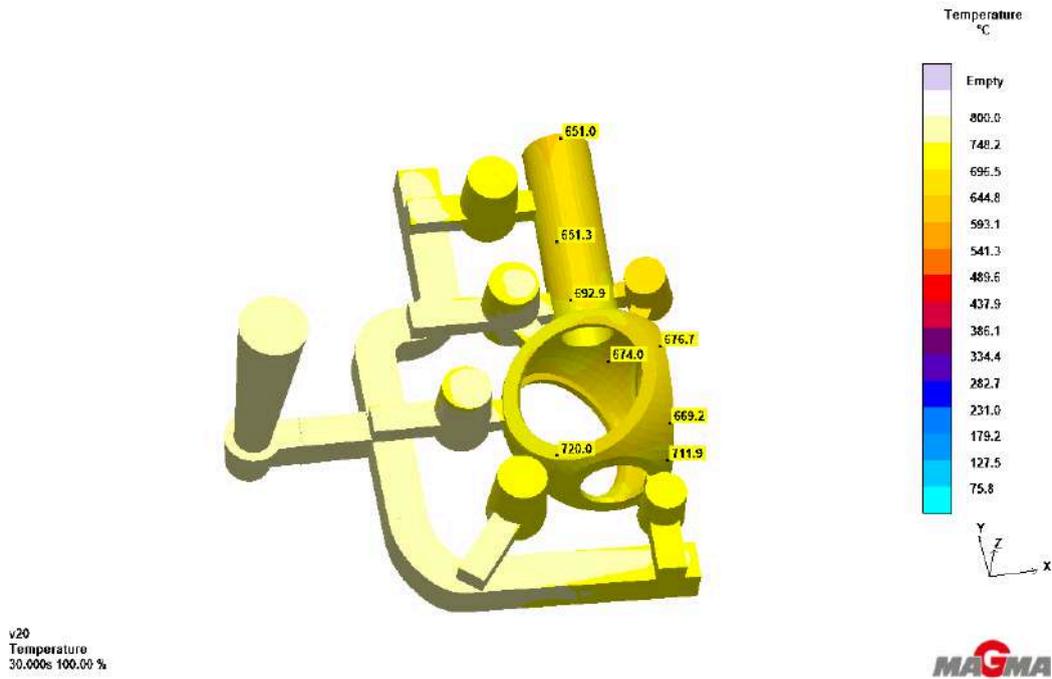


Figura 63. Temperatura del metal una vez llenado el Hub-Eje lento, cuarta simulación para una temperatura de colada a 800 °C

En las Figuras 64 y 65, se observa que la porosidad se redujo considerablemente y es prácticamente despreciable, si se la compara con los resultados de la simulación anterior. Las Figuras 65-a y 65-b detallan los valores numéricos de fracción de porosidad en cada zona de la pieza. Estos valores son menores al 7% de porosidad, lo que significa que del volumen señalado, solo ese valor correspondería a volumen de porosidad. Además, las zonas críticas en cuanto a sollicitaciones mecánicas, como la unión entre el Hub y el Eje lento, se encuentran libres de porosidad.

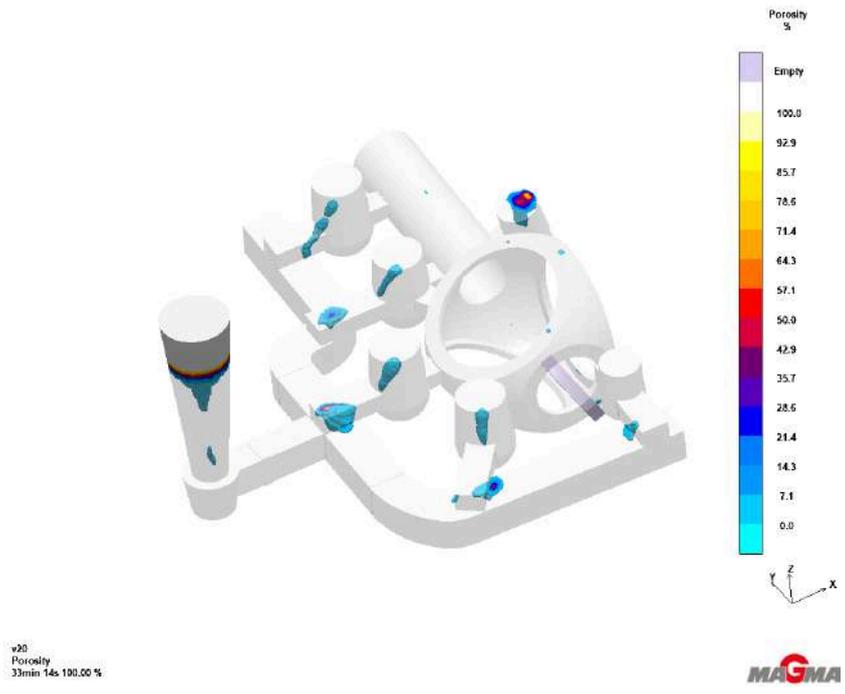


Figura 64. Porosidad de la pieza Hub-Eje lento con una temperatura de colada de 800 °C. Sistema de alimentación SH3

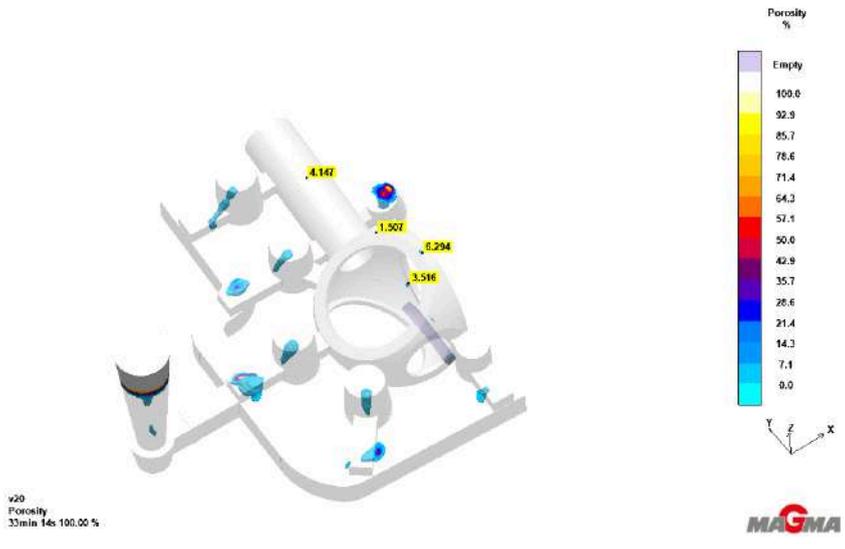


Figura 65-a. Valor porcentual de porosidad en la pieza Hub-Eje lento. Sistema de alimentación SH3 con una temperatura de colada de 800 °C

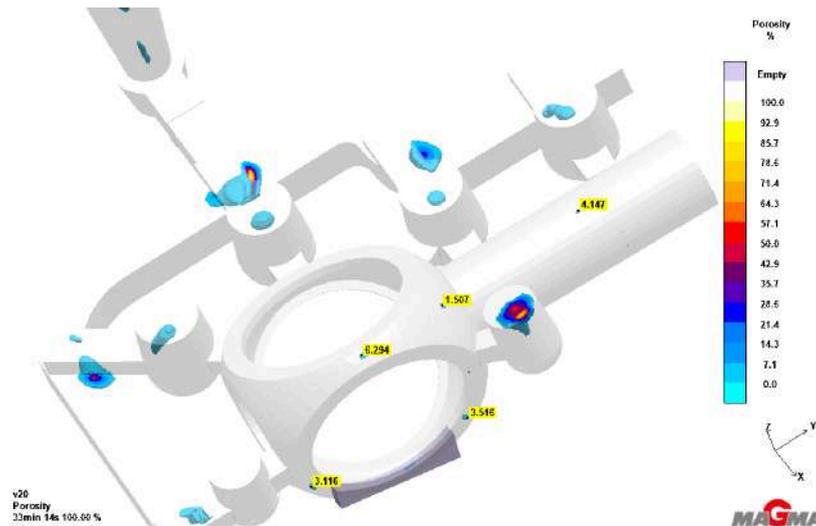


Figura 65-b. Valor porcentual de porosidad en la pieza Hub-Eje lento. Sistema de alimentación SH3 con una temperatura de colada de 800 °C

Posteriormente, se realizó una simulación con una temperatura de colada de 750 °C para analizar el efecto de una temperatura menor en la formación de porosidad. En la Figura 66, se observó un ligero aumento de la porosidad, especialmente en las paredes que conectan las aspas del molino eólico. Este incremento puede atribuirse a que, como fue mencionado anteriormente, una temperatura de colada más baja promueve más sitios de nucleación de sólido, perdiendo direccionalidad en la solidificación de la pieza, y quedando regiones sin una realimentación adecuada, lo que promueve la formación de porosidad en esos sectores. Por lo tanto, se sostiene que una temperatura de colada de 800 °C es más adecuada para el actual sistema de alimentación.

Con la finalidad de tratar de eliminar la porosidad ubicada en la parte superior del Hub (6.294%), mostrada en la Figura 65-b se realizó una nueva simulación colocando un chill en dicha zona. La hipótesis era que al ubicar un chill en esa posición, se iniciaría la solidificación en esa zona, dirigiendo el frente de solidificación hacia las mazarotas más cercanas. Al observar la porosidad resultante, se detectó un incremento en este tipo de defecto en distintas zonas de la pieza (ver Figuras 68 y 69). Esto podría deberse a una competencia en la dirección de solidificación del metal que causa la formación de defectos en esos sectores específicos. Aunque estos defectos son pequeños, aumentan la probabilidad de porosidad en el material. Sin embargo, cabe mencionar que, a medida que la pieza solidifica, el simulador no brinda cierta información relacionada con el proceso de solidificación, lo cual impide una observación precisa de las causas exactas de estas regiones con porosidad. Por lo tanto, no colocar el chill en esta zona parece ser una mejor alternativa para la colada de esta pieza

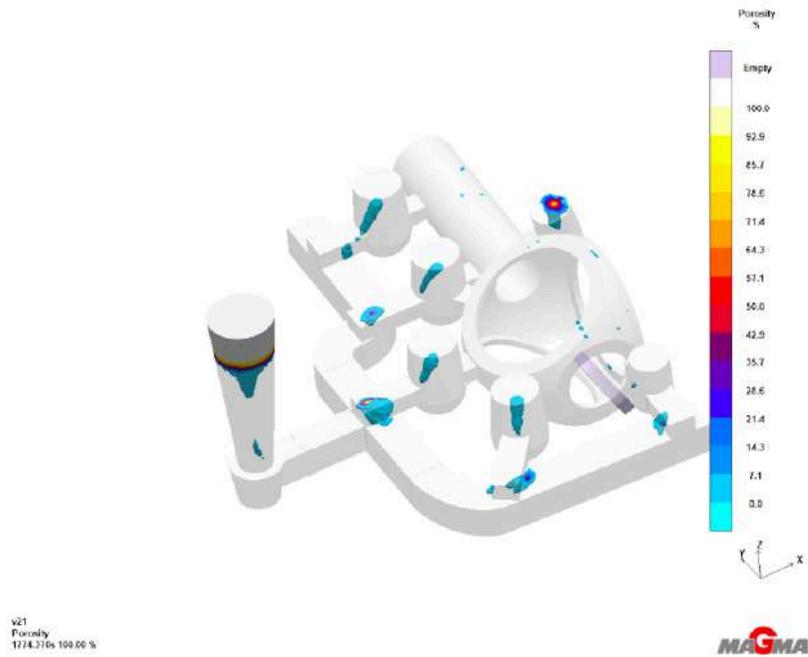


Figura 66. Porosidad de la pieza Hub-Eje lento con una temperatura de colado de 750 °C. Sistema de alimentación SH3

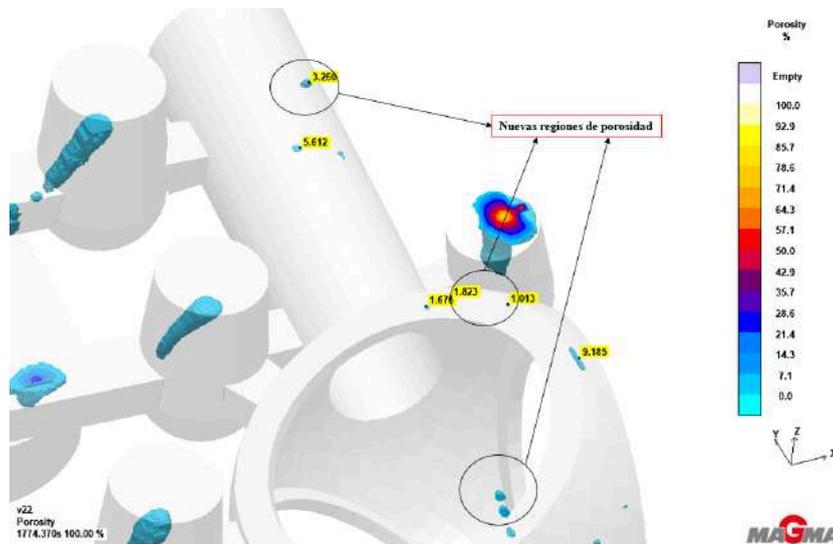


Figura 67. Valor porcentual de porosidad la pieza Hub-Eje lento con una temperatura de colado de 750 °C. Sistema de alimentación SH3

Por un lado, la utilización de chills presenta desafíos prácticos, especialmente en moldes de arena, ya que colocarlos correctamente puede ser complicado. Para que el chill funcione de manera óptima y promueva una solidificación adecuada en las áreas críticas, es fundamental asegurar un contacto preciso con el metal y la superficie de la pieza.

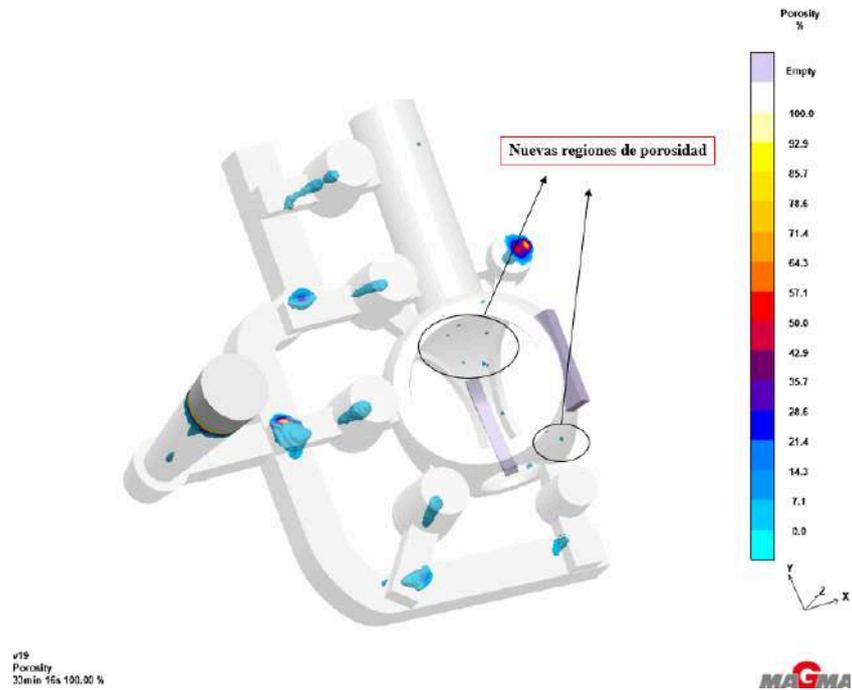


Figura 68. Porosidad de la pieza Hub-Eje lento con una temperatura de colado de 800 °C. Sistema de alimentación SH3 con chill en la parte superior del Hub

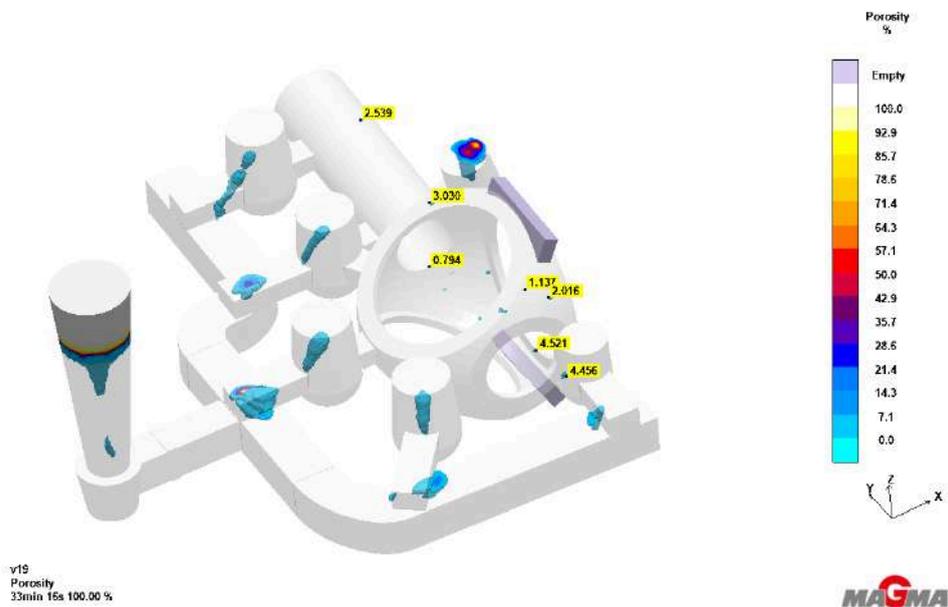


Figura 69. Valor porcentual de porosidad la pieza Hub-Eje lento con una temperatura de colado de 800 °C. Sistema de alimentación SH3 con chill en la parte superior del Hub.

Finalmente se evaluó realizar una simulación, utilizando el mismo sistema de alimentación SH3 pero sin utilizar ningún chill, y mantener la temperatura de colado en 800 °C. Al analizar la porosidad, se observa una disminución en la porosidad de la pieza, pero aparecen algunos poros en la parte inferior del Hub, lo que refleja problemas en la dirección del flujo en esa zona durante la solidificación. En la Figura 70 se observan estas pequeñas zonas de porosidad en la región inferior del Hub.

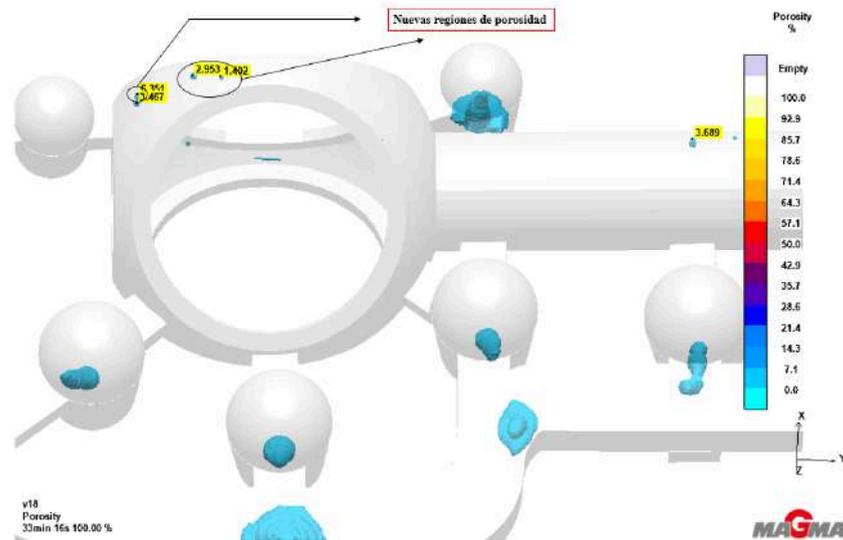


Figura 70. Valor porcentual de porosidad en la parte inferior de la pieza Hub-Eje lento con una temperatura de colado de 800 °C. Sistema de alimentación SH3 sin uso de chills

Luego, se realizó una simulación con una temperatura de colada de 750 °C, utilizando el mismo sistema de alimentación SH3 pero sin utilizar ningún chill. En la Figura 71 y 72, se observó un aumento de la porosidad en la parte inferior del Hub. Este aumento se explica por el hecho de que una temperatura de colada más baja favorece la aparición de múltiples sitios de nucleación de sólido. Esto interrumpe la direccionalidad del proceso de solidificación, dejando áreas sin una adecuada alimentación y propiciando la formación de porosidad en esas zonas. Además, la ausencia de un chill en la configuración impide guiar correctamente el flujo del material, lo que agrava este problema.



Figura 71. Porosidad de la pieza Hub-Eje lento con una temperatura de colado de 750 °C. Sistema de alimentación SH3 sin uso de chills.

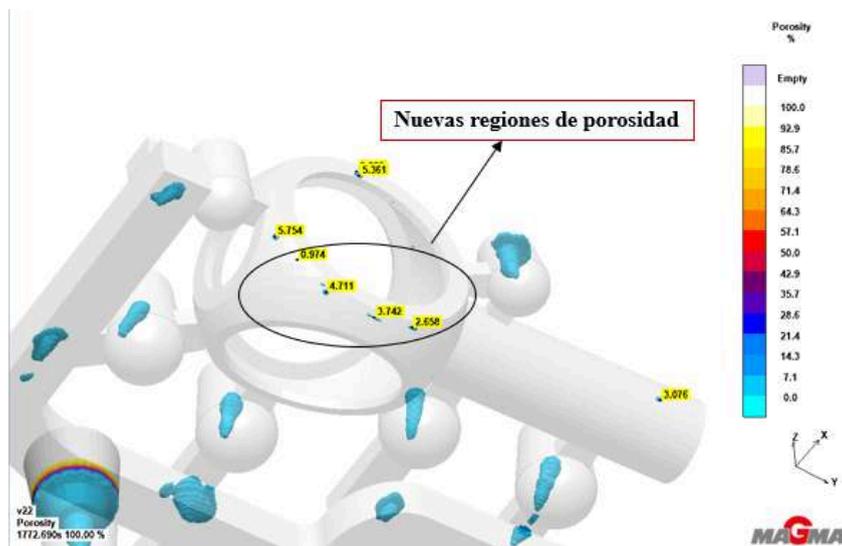
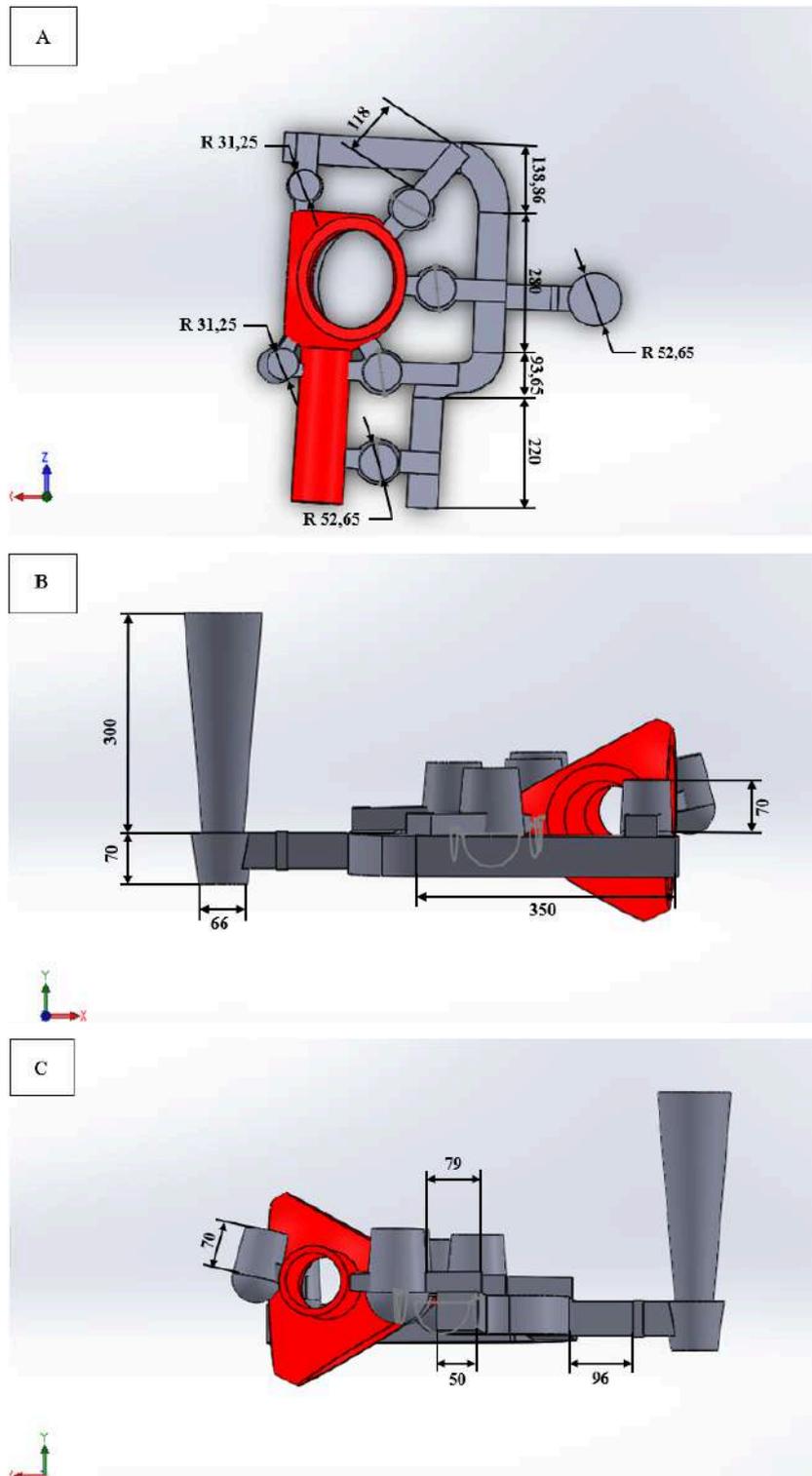


Figura 72. Valor porcentual de porosidad en la parte inferior de la pieza Hub-Eje lento con una temperatura de colado de 750 °C. Sistema de alimentación SH3 sin uso de chills

Comparando los resultados obtenidos en estas últimas simulaciones, todas utilizando el mismo sistema de alimentación SH3, se optó por seleccionar la configuración que incluye un solo chill ubicado en la parte inferior del hub, como la opción más adecuada para llevar a cabo la colada experimental. Esta elección se fundamenta en que, con esta disposición, se observó una distribución de porosidad notablemente menor lo que asegura una mejor calidad

en la pieza final. A continuación se muestra a modo de resumen 4 imágenes del sistema de alimentación SH3 (ver Figura 73) donde se detallan sus principales dimensiones, y en la Tabla 10 se muestra el volumen y peso de cada parte del sistema de alimentación y pieza.



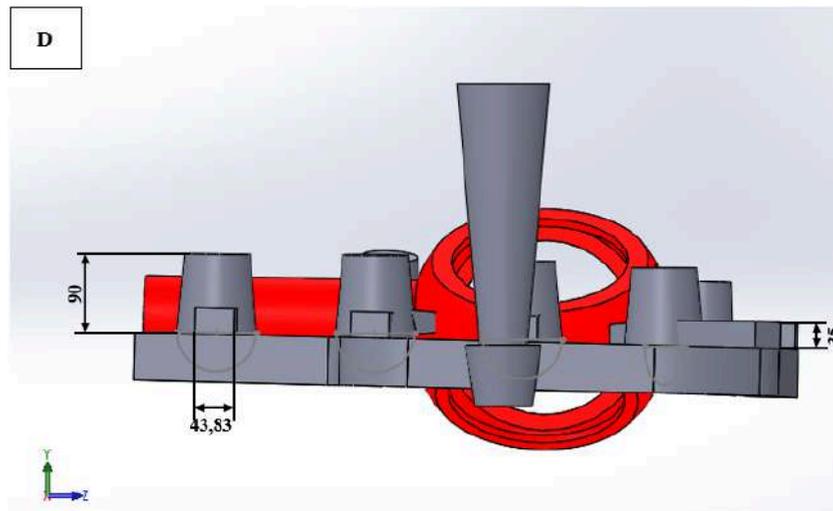


Figura 73. Sistema de alimentación SH3 con sus dimensiones en milímetros

Tabla 10. Volumen y peso de cada parte del sistema de alimentación SH3 y pieza

	Volumen [l]	Peso [Kg]
<i>Pieza</i>	2,06	5,44
<i>Canal de alimentación</i>	6.78	17.94
<i>Mazarotas</i>	3,35	8,86
Total	12,19	32,24

5.7 Colada experimental de la pieza HUB-EJE LENTO

Con la finalidad de validar las simulaciones, se realizó una colada experimental de la pieza HUB-EJE LENTO en la planta piloto de fusión del INTEMA. Los modelos que se utilizaron para fabricar el molde del HUB-EJE LENTO (modelo externo y caja de noyo) fueron aquellos desarrollados en el proyecto de Joaquín Grisolia, los cuales fueron obtenidos por impresión 3D. En la Figura 74 se muestra el modelo externo de la pieza HUB-EJE LENTO y la caja de noyo correspondiente. Asimismo, se emplearon las mismas mazarotas y partes del sistema de alimentación que se utilizaron para la fabricación de la pieza BRIDA CON CAÑO.

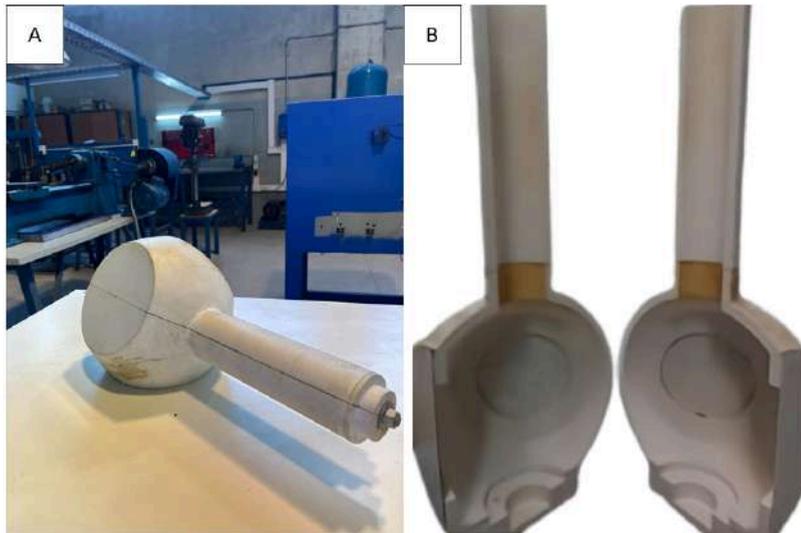


Figura 74. a) Modelo externo del Hub-Eje lento, b) Caja de noyo

Se inició el proceso de moldeo con la preparación de la parte inferior del molde, conocida como "bajo", como se muestra en la Figura 75. Para la elaboración de los moldes se empleó arena de río mezclada con resina fenólica. En esta parte del molde, se colocó cuidadosamente el chill. Luego, se procedió a moldear la mitad superior del molde, denominada "sobre".



Figura 75. Bajo del molde Hub-Eje lento

Posteriormente, se procedió al moldeo del noyo, incorporando una varilla de hierro en su interior a lo largo del eje para proporcionar mayor rigidez y prevenir fracturas durante el proceso. El procedimiento siguió los mismos pasos que el moldeo de arena, utilizando como modelo la caja de noyo. En la Figura 76 se muestra el noyo moldeado.

Una vez listas todas las partes del molde, se tallaron los gates y los neck feeders, tal como se detalla en la Figura 77. Estos canales fueron diseñados con una sección trapezoidal para optimizar el flujo del metal fundido. Además, se incorporaron venteos estratégicamente ubicados en el molde, con el propósito de facilitar la expulsión del aire atrapado en la cavidad de moldeo durante la colada y así prevenir defectos, como la porosidad por gas, en la pieza final. Una vez generadas todas las partes del molde, se realizó el cierre del mismo y se colocó un basin de colada para facilitar la operación de colado (Figura 77-c). Luego se realizó la colada.



Figura 76. Noyo del Hub-Eje lento

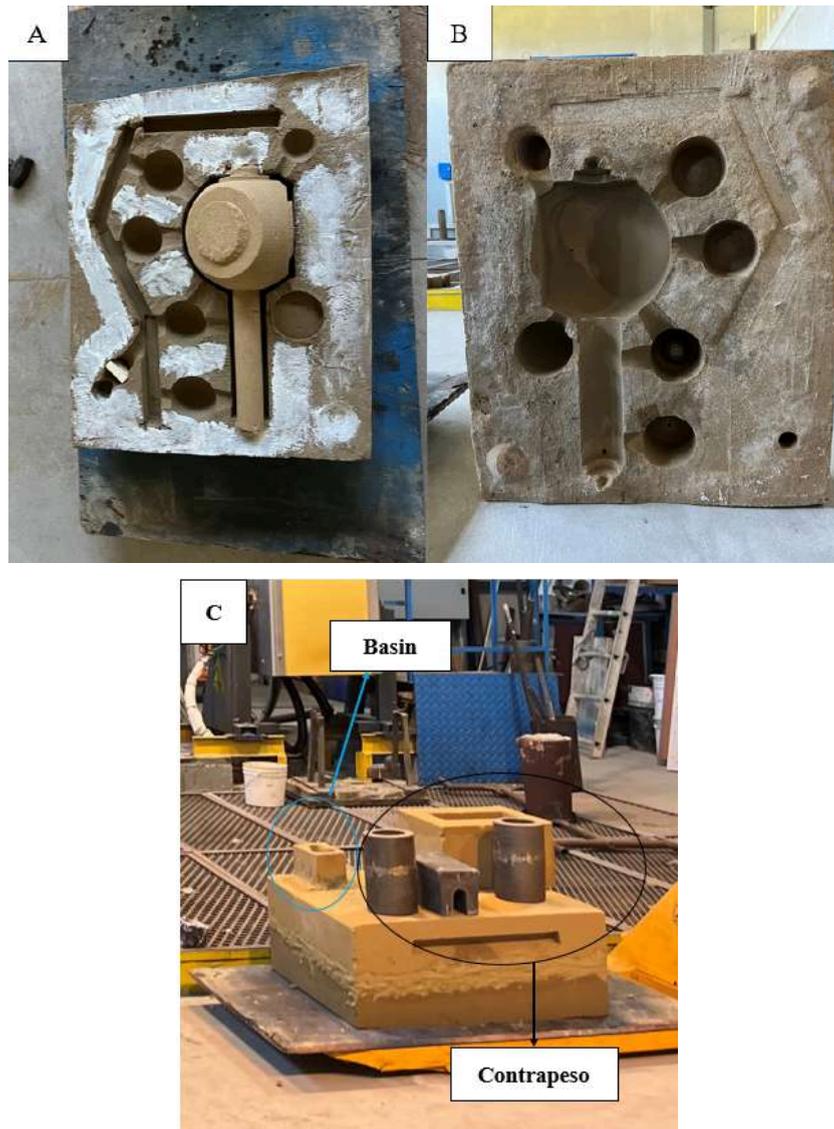


Figura 77. a) Bajo del molde con noyo, b) Sobre del molde, c) Basin de colada

Durante el proceso de colada, se presentaron algunos inconvenientes que afectaron la ejecución planificada. En primer lugar, el horno con crisol disponible en la planta piloto del INTEMA tiene una capacidad para fundir un máximo de 20 kg de aluminio. Como esa cantidad de material no es suficiente para llenar la cavidad del molde se planificó realizar la colada en dos etapas, fundiendo primero un lote de aluminio de 20 kg y luego una segunda tanda de fusión de 15 kg. Para mantener el metal líquido de la primera tanda de aluminio fundido, se utilizaría un precalentador de cuchara. La idea era transferir los primeros 20 kg del metal fundido del horno a una cuchara que se mantendría a la temperatura de colada en el precalentador, asegurando la temperatura adecuada mientras se agregaba más material al crisol para completar la cantidad necesaria de metal líquido para realizar la colada. No obstante, por inconvenientes técnicos (suministro de gas), no fue posible operar ambos equipos simultáneamente, lo que obligó a depender exclusivamente del horno de fusión.

Para mitigar este problema, se decidió utilizar una cuchara de mayor capacidad, la cual fue precalentada sobre la boca del horno, como se muestra en la Figura 78. En esta cuchara precalentada se colaron los primeros 20 kg de aluminio fundido, y se procedió a la fusión de los 15 kg restantes. El primer lote de metal líquido quedó en la cuchara a la espera de la fusión de la segunda tanda, por ello se sobrecalentó a 850 °C para compensar la pérdida de temperatura que ocurriría mientras se fundía el segundo lote.



Figura 78. Horno de crisol con la cuchara

Una vez fundida la segunda carga en el horno, y que la misma alcanzó aproximadamente 700 °C, se transfirió una parte del contenido a la cuchara y se realizó la colada. La idea era colar en dos etapas: en una primera etapa colar el líquido que estaba en la cuchara, y rápidamente en una segunda etapa, volver a llenar la cuchara con el líquido que estaba en el crisol del horno y terminar el llenado del molde. De esta manera se colaría todo el líquido necesario para completar la cavidad de moldeo. Sin embargo, durante el proceso de colado, por colar a una baja temperatura, se presentó una obstrucción en el canal de alimentación debido a una solidificación temprana de uno de los canales, lo que impidió que el molde se llenara completamente. La Figura 79 muestra la pieza colada, donde se puede observar que la parte del HUB de la pieza no logró colarse de manera correcta.



Figura 79. a) Vista inferior del Hub-Eje lento, b) Vista superior del Hub-Eje lento donde se evidencia el llenado incompleto

Debido a la improvisación realizada durante la colada, era altamente probable que la pieza resultara defectuosa, ya que no se respetó la temperatura de colada óptima para la aleación de aluminio utilizada. A pesar de lo ocurrido, se decidió igualmente llevar a cabo una validación experimental aproximada para evaluar la presencia de porosidad en la pieza. Para ello, se realizó un corte en la línea de partición del Hub-Eje lento, como se ilustra en la Figura 80, con el propósito de efectuar un análisis en este plano de corte de la misma.



Figura 80. a) Vista lateral del Hub-Eje lento, b) Vista frontal del Hub-Eje lento

Una vez realizado el corte del Hub-Eje lento, se procedió al pulido de toda la sección transversal utilizando lijas al agua. El proceso comenzó con lijas de grano grueso, continuó con lijas de grano intermedio y finalizó con lijas de grano fino (desde lijas de grano 80 a 1000), logrando una superficie lisa y homogénea, como se detalla en la Figura 81.



Figura 81. Porosidad en el plano de simetría del Hub-Eje lento después del pulido

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de la porosidad empleando un microscopio óptico y una lupa binocular para determinar el tipo de defecto presente, clasificándose como porosidad por contracción o por gas. Los resultados revelaron que, en su mayoría, los defectos corresponden a porosidad por gas, mientras que un porcentaje muy bajo está asociado con contracción. La Figura 82 muestra una macrografía de la sección transversal del eje. Se puede observar que existe una distribución inhomogénea de la porosidad, concentrándose mayormente en las zonas de los canales que unen la pieza con las mazarotas. Esto es lógico, ya que el frente de solidificación, a medida que avanza, va moviendo la porosidad por gas hacia las últimas zonas en solidificar, que deberían ser las mazarotas. Sin embargo, debido a una solidificación prematura de la pieza, esta porosidad quedó atrapada en la pieza y no pudo ubicarse en las mazarotas como era de esperar.

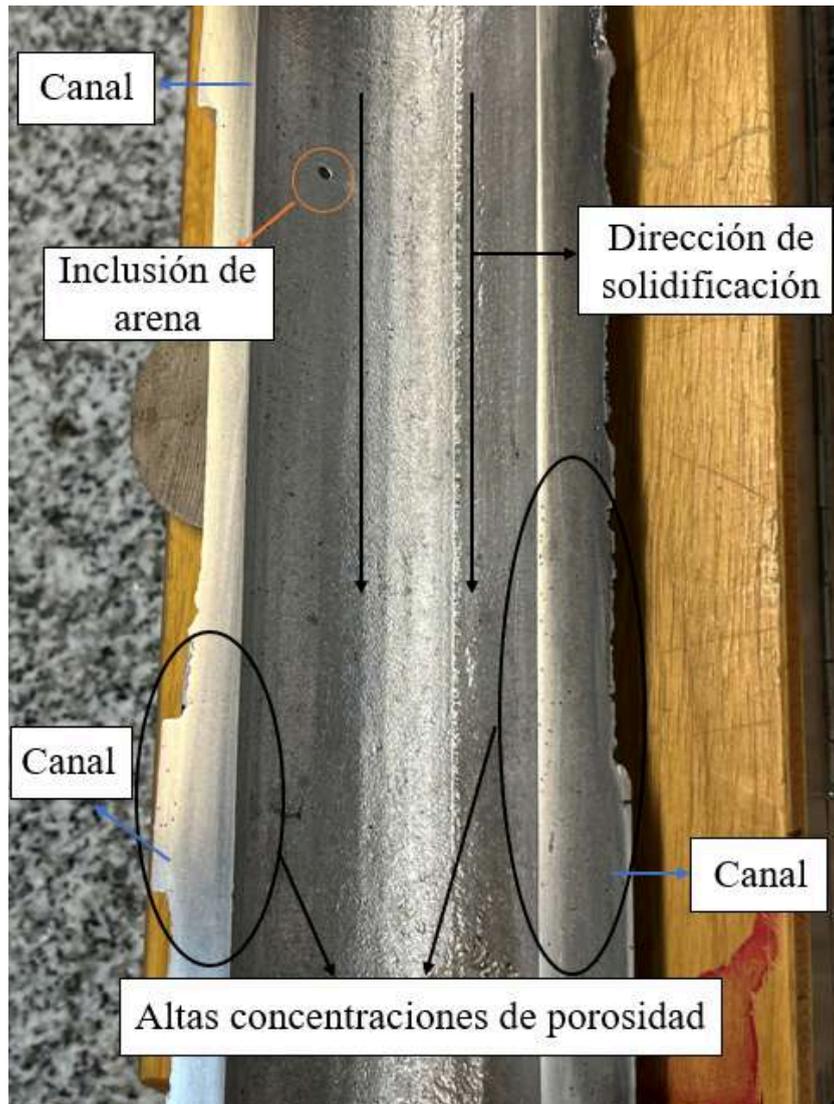


Figura 82. Sección transversal del eje lento evidenciando la porosidad presente

En la Figura 83 se presentan imágenes, a distintos aumentos, de la porosidad observada en la pieza. Este tipo de porosidad corresponde a porosidad por gas atrapado, identificable por su forma aproximadamente esférica. Su origen se atribuye a una desgasificación inadecuada del metal líquido realizada en el horno antes del proceso de colado.

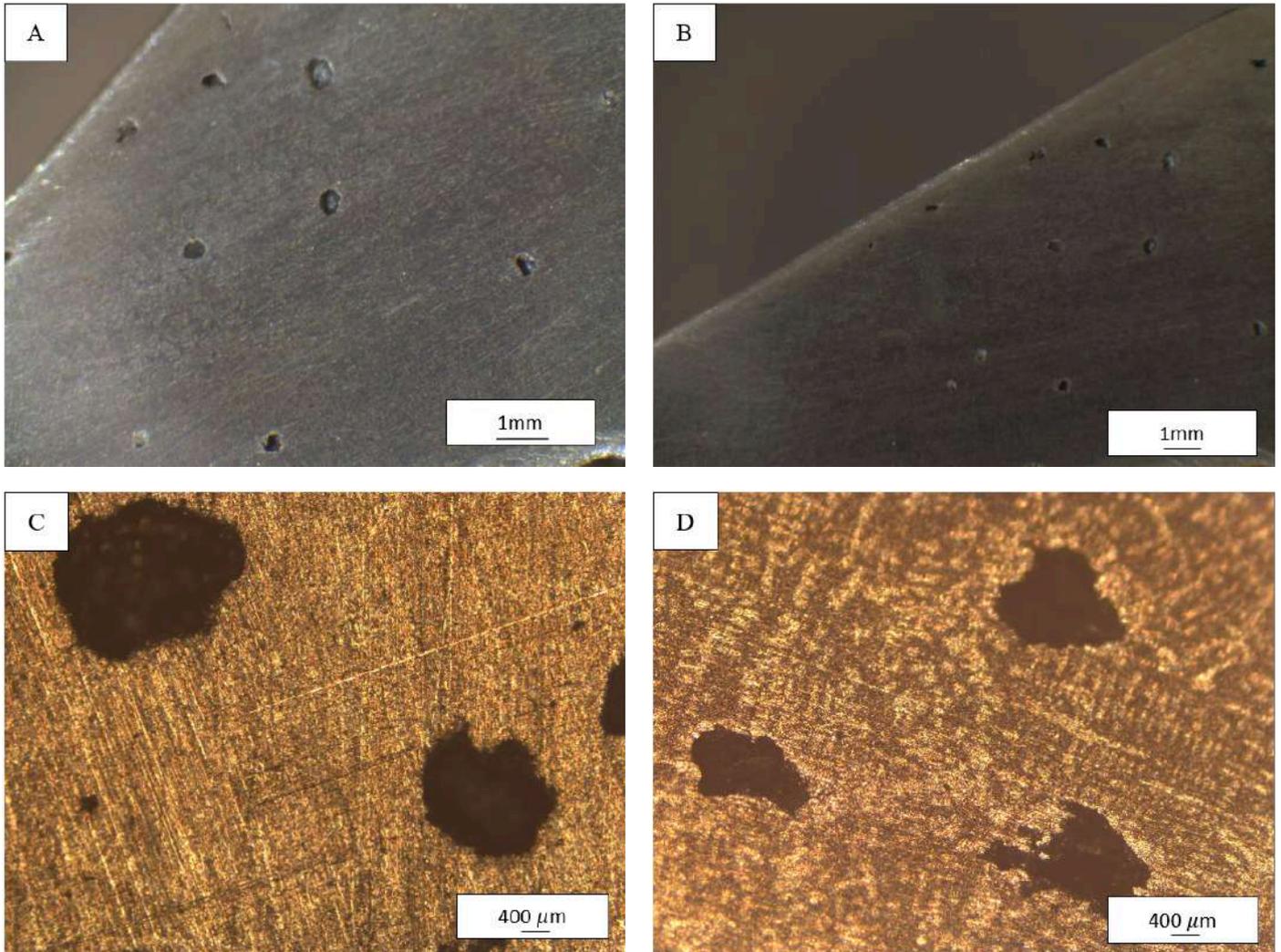


Figura 83. Porosidad por gas observada en la zona del eje

Sin embargo, en la zona posterior del HUB, en la zona más alejada a los ataques de la pieza, se observó la única porosidad por contracción, tal como se muestra en la Figura 84. Esto se atribuye a que en esta zona, el metal durante la colada era el más frío, lo que generó que solidifique prematuramente, evitando que el metal de la mazarota pueda realimentar esta zona.

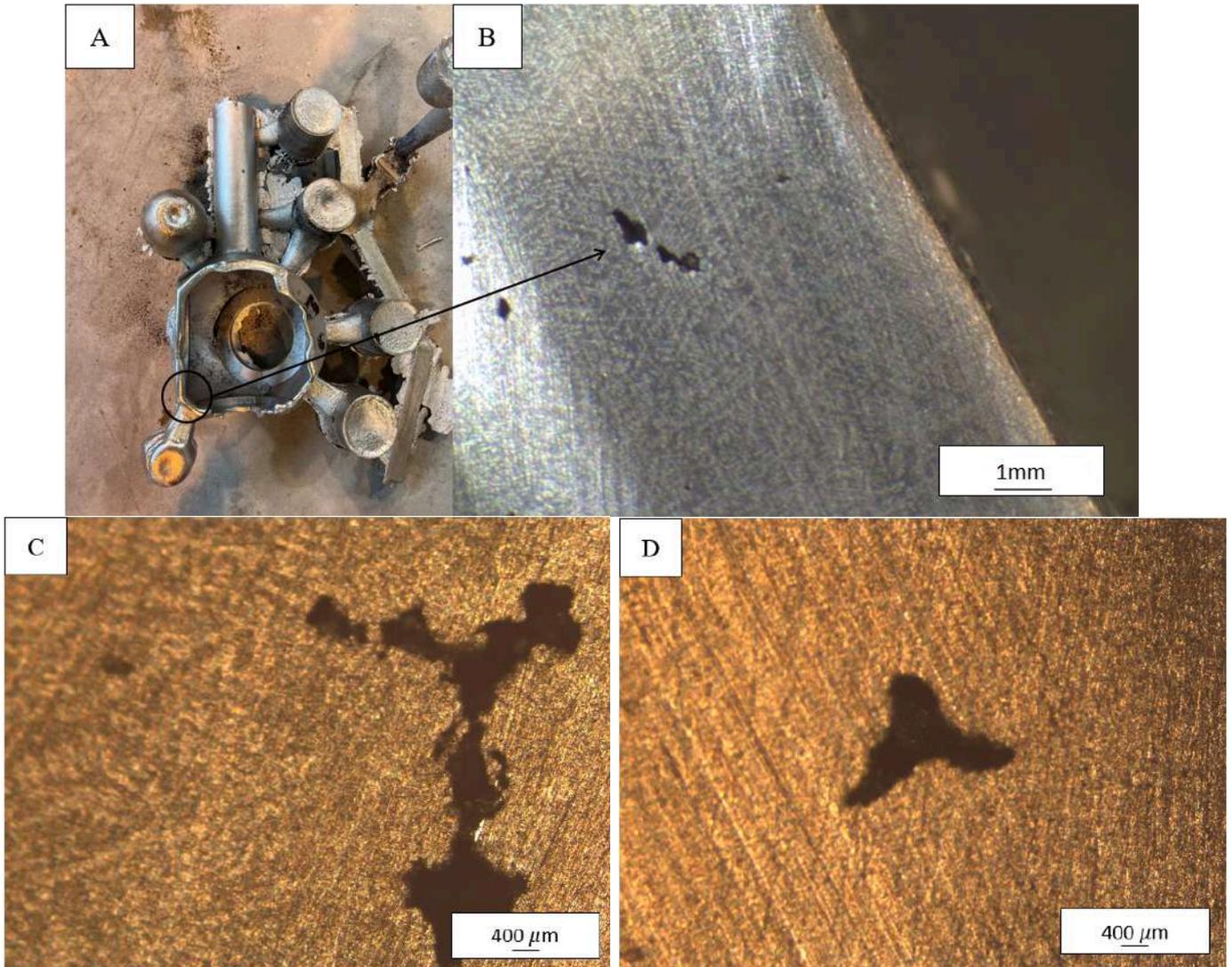


Figura 84. Porosidad por contracción observada en la pieza

Estos resultados indican que, aunque el proceso de colada fue deficiente, la pieza no mostró prácticamente porosidad por contracción, por lo que se podría inferir que si se hubieran respetado los parámetros de colada establecidos, la pieza podría estar libre de este tipo de defectos. La baja temperatura de llenado, como se observó en las simulaciones, favoreció un mayor número de sitios de nucleación de sólido, lo que provocó una pérdida de direccionalidad en la solidificación. Como consecuencia, se generaron regiones sin una realimentación adecuada, promoviendo la formación de porosidad por contracción en dichas zonas. Sin embargo, se cree que el sistema de colada desarrollado sería aplicable para la producción satisfactoria de la pieza en estudio.

6- Conclusiones

El presente trabajo abordó el diseño, simulación y validación experimental de componentes para molinos eólicos de baja potencia, específicamente la Brida con caño y el Hub-Eje lento, fabricados mediante procesos de fundición de aluminio colados en moldes de arena. A lo largo del proyecto, se emplearon herramientas de simulación como Magmasoft para identificar y mitigar defectos típicos asociados con el proceso de solidificación, como la porosidad por contracción. Estas simulaciones jugaron un papel crucial en la optimización de los diseños, permitiendo predecir y corregir posibles fallas en las fases tempranas de la fabricación.

En el caso de la brida con caño, se logró optimizar el sistema de alimentación utilizando aleaciones AlSi10Mg y AlSi7Mg. Las simulaciones mostraron que un diseño con mazas de mayor volumen y una distribución estratégica de las mismas ayudaron a reducir significativamente los defectos internos. Sin embargo, el uso de AlSi7Mg presentó limitaciones debido a su menor colabilidad, lo que promovió la aparición de defectos del tipo porosidad por contracción. A pesar de esto, la validación experimental confirmó la efectividad de las simulaciones, destacando la capacidad predictiva del software para optimizar el proceso de colada y reducir defectos típicos.

Para el Hub-Eje lento, se introdujeron mejoras en el diseño del sistema de alimentación, respecto a trabajos anteriores realizados en la DMI del INTEMA, optando por un moldeo horizontal en lugar del vertical, como se había propuesto en trabajos previos. Esta modificación permitió mejorar el llenado del molde, y los resultados iniciales indicaron que el uso de AlSi10Mg minimiza la incidencia de porosidad, asegurando la integridad estructural bajo las condiciones operativas esperadas. No obstante, debido a problemas operativos con el horno y el precalentador, la validación experimental no fue completamente exitosa. Sin embargo, se estima que si se hubieran respetado los parámetros de colada establecidos, y se hubiera realizado una correcta desgasificación del metal líquido, se podría haber logrado un llenado completo de la pieza, y la misma podría estar libre de defectos.

A pesar de los problemas experimentales encontrados en la última parte del trabajo, el mismo ha brindado valiosas lecciones sobre la importancia de un diseño adecuado del sistema de alimentación, el control de temperatura en la fundición y la correcta configuración del molde. Además, el proceso ha permitido desarrollar habilidades en la resolución de imprevistos, como ocurrió durante la colada del Hub-Eje lento, donde las soluciones planteadas en el momento fueron cruciales para continuar con el proceso.

En resumen, este trabajo no solo ha permitido validar la aplicación de las simulaciones en la fundición de componentes para molinos eólicos, sino que también ha proporcionado una comprensión más profunda de los desafíos prácticos asociados con la fabricación de piezas

complejas. Los aprendizajes obtenidos servirán como base para futuras investigaciones y mejoras en los procesos de fundición de componentes de molinos eólicos de baja potencia.

7- Trabajo a futuro

Para trabajos futuros, se propone realizar una nueva colada del Hub-Eje lento, con el objetivo de realizar una correcta validación experimental de las simulaciones realizadas. Esta colada permitirá realizar un análisis más detallado de la microestructura de la pieza, evaluando la presencia de porosidad y validando el proceso de colada de manera correcta. De confirmarse que la pieza colada esté libre de defectos, se debería realizar una colada para obtener una pieza de prototipo que permita continuar con la línea de investigación.

Además, sería importante tratar, de ser posible, de optimizar el tamaño del sistema de alimentación del Hub-Eje lento, ya que su tamaño es considerablemente mayor al de la pieza (aproximadamente 5 veces). La optimización permitirá reducir significativamente la cantidad de material requerido, lo que disminuiría los costos de producción.

Adicionalmente, se propone realizar ensayos mecánicos del material colado, enfocándose en la determinación de sus propiedades mecánicas, principalmente las propiedades en tracción. Para esto, se recomienda colar, junto con la pieza HUB-EJE LENTO, probeteros que posean un módulo térmico similar al de la pieza (para que la estructura de solidificación y la microestructura sean similares), a partir de los cuales puedan obtenerse probetas para realizar los ensayos de tracción. Estos ensayos proporcionarían información crucial sobre las características mecánicas del material, permitiendo contrastar los resultados experimentales con los valores teóricos obtenidos de la literatura, los cuales fueron utilizados para realizar las simulaciones de sollicitaciones mecánicas previas. La comparación entre los datos experimentales y los modelos predictivos ayudará a validar la metodología empleada y a identificar posibles áreas de mejora en el diseño y proceso de colada.

Finalmente, dado que en las dos coladas realizadas se presentó porosidad por gas debido a una incorrecta desgasificación del metal líquido, se sugiere explorar en detalle el uso de distintas técnicas desgasificantes para las aleaciones de aluminio. Para el caso de seguir utilizando pastillas de desgasificantes como las empleadas en este trabajo, es fundamental investigar la dosificación y el tiempo de tratamiento más adecuado para garantizar una correcta desgasificación del aluminio fundido. Por otro lado, se podrían evaluar otras técnicas de desgasificación más efectivas, como la utilización de burbujeo de gas inerte. La realización de un correcto proceso de desgasificación durante el proceso de fundición es crucial para mejorar la calidad del material, reduciendo la formación de porosidad y mejorando las propiedades mecánicas de las piezas coladas.

Bibliografía

- [1] International Renewable Energy Agency. (2020). *Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050*.
<https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>
- [2] World Economic Forum. (2022). *Future of Electricity: New technologies transforming the grid*.
<https://www.weforum.org/reports/future-of-electricity-new-technologies-transforming-the-grid>
- [3] International Energy Agency. (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- [4] Todkar, V., Shinde, G., Kamble, S., & Gunavant, P. (2017, January). An overview of wind mills. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 4(Special Issue 1), National Conference on Design, Manufacturing, Energy & Thermal Engineering (NCDMETE-2017). AGTI's Dr. Daulatrao Aher College of Engineering, Vidyanagar Extension, Kara. DOI: [10.17148/IARJSET/NCDMETE.2017.14](https://doi.org/10.17148/IARJSET/NCDMETE.2017.14)
- [5] Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). (s.f.). *Manual de instalación de aerogeneradores de baja potencia - Instaladores de aerogeneradores nivel I*. <https://www.inti.gob.ar/assets/uploads/files/certificaciones/instaladores-de-aerogeneradores-nivel-I/Manual-Instalacion.pdf>
- [6] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). *Wind energy explained: Theory, design, and application* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- [7] J.G. Kaufman, E.L. Rooy, *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*, 2004.
- [8] ASM International. (1990). *Volume 2: Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials*. The Materials Information Company.
- [9] Shankar, S., Riddle, Y. W., Makhlof, M. (2004). Eutectic Solidification of Aluminum-Silicon Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science*, 35A(9), 3038-3043.
- [10] Taylor, J. A. (2004). *The effect of iron in Al-Si casting alloys*. 35th Australian Foundry Institute National Conference. Cooperative Research Centre for Cast Metals Manufacturing (CAST), The University of Queensland, Brisbane, Australia.
- [11] Polmear, I., StJohn, D., Nie, J.-F., & Qian, M. (2017). *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals* (5a ed.). Butterworth-Heinemann. Elsevier Ltd.
- [12] Hatch, J. E. (1984). *Aluminum: Properties and physical metallurgy* (8a ed.). American Society for Metals, 320-346.
- [13] Calvo, F., Criado, A., Martínez, J., Gómez, J., & Molleda, F. (1985). Influencia de los tratamientos térmicos de esferoidización sobre la dureza de las aleaciones del sistema AlSi. *Revista de Metalurgia*, (85), 342-345.
- [14] Ye, H., 2003. "An Overview of the Development of Al-Si-Alloy Based Material for Engine Applications", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 12, p. 288.; Campbell, J. (2003). *Castings*. Butterworth-Heinemann.
- [15] Gandini, E. T. S., Donadoni, B. M. C., Antonialli, A. Í. S., & Spinelli, J. E. (2013). The effects of microstructure and hardness of hypoeutectic Al-Si alloys over their machinability.

22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013), November 3-7, 2013, Ribeirão Preto, SP, Brazil. Copyright © 2013 by ABCM.

[16] Kuzmanov, P., Dimitrova, R., Lazarova, R., Cherepanov, A., Popov, S., Petrov, R., & Manolov, V. (2014). Investigation of the structure and mechanical properties of castings of alloy AlSi7Mg, cast irons GG15 and GG25, and steel GX120Mn12, modified by nanosized powders. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanoengineering and Nanosystems*, 228(1), 11–18. <https://doi.org/10.1177/1740349913510295>

[17] Pastirčák, R., Brůna, M., & Bolibruchová, D. (2018). The influence of different wall thicknesses of the casting in the direct squeeze casting. Department of Technological Engineering, University of Zilina. Received March 8, 2018; accepted July 12, 2018.

[18] Korojy, B., & Fredriksson, H. (2009). On solidification of hypereutectic Al-Si alloys. *Transactions of The Indian Institute of Metals*, 62(4-5), 361-365. <https://doi.org/10.1007/s12666-009-0066-1>

[19] Vijeesh, V., & Prabhu, K. N. (2014). Review of microstructure evolution in hypereutectic Al-Si alloys and its effect on wear properties. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 67(1), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s12666-013-0327-x>

[20] Debandi, C., Priotti, C., Lebón, G., & Gargano, J. (1984). Estructuras modificadas en aleaciones hipereutéticas Al-Si. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 4(1), 1–37.

[21] Hatch, J. E. (Ed.). (1984). *Aluminum properties and physical metallurgy* (pp. 1-24). ASM International. <https://doi.org/10.1361/appm1984p001>

[22] Loizaga, A., de la Fuente, E., Niklas, A., Barrenengoa, J., & Fernández-Calvo, A. I. (2010). *Mechanical properties optimization of alloys AlSi7Mg casting in sand moulds*. *Revista de Metalurgia*, 46, Article Number. <https://doi.org/10.3989/revmetalmadrid.06XIIPMS>

[23] Jeong, C. Y., Kang, C.-S., Cho, J.-I., Oh, I.-H., & Kim, Y.-C. (2008). Effect of microstructure on mechanical properties for A356 casting alloy. *International Journal of Cast Metals Research*, 21(1-4), 193–197.

[24] Zyguła, K., Nosek, B., Pasiowiec, H., & Szysiak, N. (2018). Mechanical properties and microstructure of AlSi10Mg alloy obtained by casting and SLM technique. Faculty of Metals Engineering and Industrial Computer Science, AGH University of Science and Technology. Av. Mickiewicza 30, 30-059 Cracow, Poland.

[25] Lumley, R. N. (2014). *Heat treatment of aluminum alloys*. En *Encyclopedia of thermal stresses* (pp. 2190–2203). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2739-7_431

[26] Campbell, J. (2009). *Complete casting handbook: Metal casting processes, metallurgy, techniques and design*. ASM International.

[27] Flinn, R. A. (1963). *Fundamentals of metal casting*. Addison-Wesley.

[28] ASM International. (1988). Nonferrous casting alloys. En *Metals Handbook* (9.^a ed., Vol. 15: Casting, pp. 1-2002). ASM International.

[29] Samuel, A. M., Samuel, E., Songmene, V., & Samuel, F. H. (2023). A review on porosity formation in aluminum-based alloys. *Materials*, 16(5), 2047. <https://doi.org/10.3390/ma1605204>

- [30] Fiorese, E., Bonollo, F., Timelli, G., Arnberg, L., & Gariboldi, E. (n.d.). *New classification of defects and imperfections for aluminum alloy castings*. Department of Management and Engineering, University of Padova.
- [31] Samuel, A. M., Doty, H. W., Valtierra, S., & Samuel, F. H. (2017). Porosity formation in Al–Si sand mold castings. *International Journal of Metalcasting*, 11(4), 812–822. <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0129-0>
- [32] Bahmani, A., Hatami, N., Varahram, N., Davami, P., & Shabani, M. O. (2013). A mathematical model for prediction of microporosity in aluminum alloy A356. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(5-8), 1313–1321. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4091-2>