

PROYECTO FINAL PARA OPTAR AL GRADO DE INGENIERO EN
MATERIALES

**SIMULACIÓN DEL PROCESO DE FUSIÓN Y
COLADA Y ANÁLISIS TENSIONAL ESTÁTICO
DE “HUB” Y EJE LENTO PARA MOLINO
EÓLICO DE BAJA POTENCIA**

Autor: Grisolia Joaquín

DNI: 39170132

Legajo: 10886

Mail: joaquingrisolia.9565@gmail.com

Director: Dr. Ing. Alejandro D. Basso

Codirectores: Dr. Ing. Leandro Ludueña, Dr. Ing. Gastón Francucci

Ciudad: Mar del Plata

Fecha de la defensa: 11/10/2022

División Metalurgia – INTEMA

UNMDP - Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional de Mar del Plata

Departamento de Ingeniería en Materiales



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/).

PROYECTO FINAL PARA OPTAR AL GRADO DE INGENIERO EN
MATERIALES

**SIMULACIÓN DEL PROCESO DE FUSIÓN Y
COLADA Y ANÁLISIS TENSIONAL ESTÁTICO
DE “HUB” Y EJE LENTO PARA MOLINO
EÓLICO DE BAJA POTENCIA**

Autor: Grisolia Joaquín

DNI: 39170132

Legajo: 10886

Mail: joaquingrisolia.9565@gmail.com

Director: Dr. Ing. Alejandro D. Basso

Codirectores: Dr. Ing. Leandro Ludueña, Dr. Ing. Gastón Francucci

Ciudad: Mar del Plata

Fecha de la defensa: 11/10/2022

División Metalurgia – INTEMA

UNMDP - Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional de Mar del Plata

Departamento de Ingeniería en Materiales

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	9
CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 DEFINICIÓN DE MOLINO EÓLICO O AEROGENERADOR.....	11
1.2 AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL Y HORIZONTAL.....	11
1.3 POTENCIA Y RENDIMIENTO	13
1.4 MATERIALES USADOS EN AEROGENERADORES DE ALTA Y BAJA POTENCIA.....	14
CAPÍTULO 2 - MOTIVACIÓN	17
CAPÍTULO 3 - REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1 IMPORTANCIA DEL <i>HUB</i> Y EJE LENTO EN EL MOLINO EÓLICO.....	19
3.2 TECNOLOGÍA DE FUSIÓN Y COLADA.....	19
3.2.1 ETAPAS DEL PROCESO	20
3.2.1.1 MODELO.....	20
3.2.1.2 MOLDE	20
3.2.1.2.1 MOLDEO EN ARENA.....	21
3.2.1.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA ARENA DE SÍLICE.....	22
3.2.1.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN Y CONSIDERACIONES DE DISEÑO.....	22
3.2.1.4 SISTEMA DE REALIMENTACIÓN O MAZAROTA	24
3.2.2 DESVENTAJAS DE LA TECNOLOGÍA DE FUSIÓN Y COLADA	25
3.2.2.1 POROSIDAD POR GAS	25
3.2.2.2 POROSIDAD POR CONTRACCIÓN.....	25
3.2.3 VENTAJAS DE LA TECNOLOGÍA DE FUSIÓN Y COLADA	27
3.2.4 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES EN LA TECNOLOGÍA DE LA FUNDICIÓN	28
3.3 MATERIALES CANDIDATOS PARA LA FABRICACIÓN DE LA PIEZA “HUB-EJE LENTO”	28
3.3.1 ALEACIÓN DE ALUMINIO 3XX.X	29
3.3.1.1 TRATAMIENTOS TÉRMICOS.....	31
3.3.1.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA TÍPICA DE ALEACIÓN DE ALUMINIO PARA FORJA	32
UTILIZADA EN HUBS	32
3.3.1.3 ALEACIÓN DE ALUMINIO PARA COLADA PROPUESTA PARA LA FABRICACIÓN DE	33
"HUB-EJE LENTO": ALEACIÓN DE LA SERIE 3XX.X	33
3.3.2 FUNDICIONES Y ACEROS.....	33

3.3.2.1 SOLIDIFICACIÓN DE LAS FUNDICIONES DE HIERRO	35
3.3.2.2 PROPIEDADES DE LAS FUNDICIONES DE HIERRO	36
3.3.2.2.1 FUNDICIONES GRISES ESFEROIDALES	37
3.3.2.2.1.1 FUNDICIONES ESFEROIDALES ADI.....	37
3.3.2.2.1.1.1 PROPIEDADES MECÁNICAS FUNDICIONES ADI.....	38
3.3.2.2.1.1.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS FUNDICIONES ADI	39
3.3.2.2.1.1.3 EFECTO DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN	40
3.3.2.3 USO DE FUNDICIONES NODULARES EN LA FABRICACIÓN DE HUBS.....	40
3.3.2.4 ACEROS DE ULTRA ALTA RESISTENCIA.....	41
3.3.2.4.1 ACEROS MARAGING.....	41
3.3.2.4.2 ACEROS MICROALEADOS	42
3.3.2.4.3 ACEROS DUAL PHASE	42
3.3.2.4.4 ACEROS TRIP (<i>TR</i> ansformation-Induced Plasticity).....	42
3.3.2.4.5 ACEROS BAINÍTICOS.....	43
3.3.2.4.5.1 ACEROS BAINÍTICOS CONVENCIONALES	43
3.3.2.4.5.2 ACEROS BAINÍTICOS LIBRES DE CARBUROS.....	43
3.3.2.4.5.3 EFECTO DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN.....	44
3.3.2.4.5.4 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS BAINÍTICOS LIBRES DE	44
CARBUROS	44
3.3.2.4.5.5 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS BAINÍTICOS LIBRES DE	44
CARBUROS	44
3.3.2.5 USO DE ACEROS EN LA FABRICACIÓN DE HUBS	45
CAPÍTULO 4 - OBJETIVOS GENERALES Y PARTICULARES.....	46
4.1 GENERALES	46
4.2 PARTICULARES	46
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LAS SIMULACIONES DEL PROCESO DE FUSIÓN Y COLADA DEL “HUB-EJE LENTO”.....	47
5.1.1 DISEÑO DE LA GEOMETRÍA DE LA PIEZA MONOLÍTICA HUB-EJE LENTO.....	47
5.1.2 DESARROLLO DE SISTEMA DE ALIMENTACIÓN PARA LA FABRICACIÓN DEL “HUB- EJE LENTO” UTILIZANDO EL <i>SOFTWARE</i> MAGMASOFT.....	49
5.1.3 MATERIALES ESTUDIADOS Y PARÁMETROS DE COLADA UTILIZADOS	52
5.1.4 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES UTILIZANDO EL <i>SOFTWARE</i> MAGMASOFT.....	56
5.1.4.1 PRIMER GRUPO: SOLIDIFICACIÓN SIN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN (FUNDICIÓN	56
GRIS, ALUMINIO Y ACERO).....	56
5.1.4.2 SEGUNDO GRUPO: SELECCIÓN DEL TIPO DE COLADA (MOLDEO HORIZONTAL O	58
VERTICAL).....	58
5.1.4.3 TERCER GRUPO: SIMULACIONES FUNDICIÓN GRIS GJS 700	60
5.1.4.4 CUARTO GRUPO: SIMULACIONES ALEACIÓN DE ALUMINIO AISi7Mg.....	68
5.1.4.5 QUINTO GRUPO: SIMULACIONES ACERO GX40CrSi13	72

5.2 SIMULACIÓN ESTÁTICA DE SOLICITACIONES MECÁNICAS UTILIZANDO EL <i>SOFTWARE</i>	79
<i>SOLIDWORKS</i> DE COMPONENTES: HUB-EJE LENTO-ASPAS.....	79
5.2.1 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DISEÑO	80
5.2.2 DETERMINACIÓN DE LA FUERZA APLICADA	81
5.2.3 ENSAMBLAJE DEL CONJUNTO “HUB-EJE LENTO-ASPAS”	82
5.2.4 CRITERIO DE FALLA MECÁNICA.....	84
5.2.5 ETAPAS ANÁLISIS ESTÁTICO EN <i>SOLIDWORKS</i>	84
5.2.5.1 MALLADO	84
5.2.5.2 DEFINICIÓN DE MATERIALES.....	85
5.2.5.3 CONDICIONES DE CONTORNO	86
5.2.5.4 APLICACIÓN DE FUERZA DISTRIBUIDA EN EL ENSAMBLE	86
5.2.5.5 PERFIL DE TENSIONES DE VON MISES.....	86
5.3 FABRICACIÓN DE UN PROTOTIPO FUNCIONAL DE LA PIEZA MONOLÍTICA “HUB-EJE LENTO” Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL PARCIAL DE LAS SIMULACIONES EN <i>MAGMASOFT</i>	90
CONCLUSIONES	97
TRABAJO A FUTURO	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

RESUMEN

El creciente uso y extensión de los molinos eólicos para la producción de energía requiere de avances en investigación y desarrollo de materiales que puedan aportar mejoras de propiedades mecánicas en sus componentes frente a los comúnmente utilizados. En este sentido, en este trabajo se plantea la posibilidad de simular el proceso de fusión y colada de una pieza denominada “HUB-EJE LENTO” utilizando tres materiales con potenciales propiedades mecánicas para la aplicación. Se busca obtener piezas sanas (con nula o baja porosidad) para los tres materiales candidatos. Los materiales son: acero con composición química apta para obtener una estructura bainítica libre de carburos, aleación de Aluminio 3xx.x (aleaciones aptas para fabricar piezas coladas, aleadas con Si, Cu y Mg) y fundición Gris Nodular con composición química apta para obtener una microestructura ausferrítica (Fundiciones ADI-*Austempered Ductile Irons*).

Tradicionalmente, se suele fabricar el hub y el eje lento por separados, por lo que la producción de ambos componentes en una única pieza monolítica resulta un aspecto innovador en este trabajo. Si bien fabricar ambas partes como una pieza solidaria puede traer alguna dificultad con respecto al diseño del molde y colada del metal líquido, esto se compensa con el hecho de evitar un aspecto negativo como la eventual soldadura para promover la unión de ambas partes fabricadas individualmente. El proceso de soldadura puede dar lugar a la generación de concentradores de tensiones, lo que puede llevar a una falla prematura de la pieza y, por ende, a una disminución de su vida útil.

En el presente trabajo, primeramente, se diseñó el conjunto “HUB- EJE LENTO” como una pieza monolítica utilizando el *software Solidworks* para un molino de baja potencia. Luego, se desarrollaron los sistemas de colada, con los enfriadores y los sistemas de alimentación y realimentación para cada material propuesto. Se propusieron dos alternativas de moldeo para la fabricación de este producto: en moldeo horizontal y vertical. Después, según un criterio adoptado, se optó por la elección de uno para efectuar las simulaciones. Una vez hecho esto, se importaron todos los elementos a *MAGMASOFT* en un formato adecuado para realizar las simulaciones. De esta manera, se utilizaron las variables de colada predeterminadas que ofrecía el programa y se analizó la calidad de las piezas obtenidas en función de la distribución y cantidad de porosidad. Consecuentemente, se modificaron parámetros geométricos de diseño (correspondientes a los enfriadores o al sistema de realimentación) y condiciones de colada para refinar aún más los resultados. Las simulaciones realizadas permitieron obtener una configuración de sistema de colada que permitiría fabricar la pieza “HUB- EJE LENTO “libre de defectos de colada.

Posteriormente se realizó una simulación mecánica, con el que se buscó llevar a cabo una simulación estática de la pieza “HUB-EJE LENTO”, utilizando como material de fabricación la aleación de aluminio propuesta. Estas simulaciones se realizaron utilizando un complemento disponible en el *software Solidworks*, buscando identificar la región más solicitada y verificar si las solicitaciones aplicadas superaban a las propiedades mecánicas del material propuesto para su construcción. Las simulaciones mostraron que la pieza “HUB- EJE LENTO “diseñada en aleación de aluminio soportaría las condiciones mecánicas de servicio.

Por último, se fabricó un prototipo funcional de la pieza monolítica “HUB-EJE LENTO “con uno de los materiales de interés usando la técnica de fusión y colada, a partir de las condiciones de proceso optimizadas en las simulaciones efectuadas con el programa *MAGMASOFT*.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principio de Funcionamiento de molino eólico.....	11
Figura 2. Aerogenerador de eje vertical.....	12
Figura 3. Partes de un aerogenerador de eje horizontal.....	12
Figura 4. Aerogeneradores de eje horizontal a barlovento y a sotavento.....	13
Figura 5. Rotor y eje principal.....	15
Figura 6. Diseño CAD completo del aspa.....	17
Figura 7. Molde con noyo para producir pieza hueca.....	21
Figura 8. Componentes de sistema de alimentación.....	23
Figura 9. Distintas geometrías de mazarotas con sus rendimientos.....	24
Figura 10. Contracciones del metal al enfriarse y solidificar.....	26
Figura 11. Cambio volumétrico vs Carbono Equivalente.....	27
Figura 12. Piezas con geometría compleja obtenidas por fusión y colada.....	28
Figura 13. Clasificación de las aleaciones según el diagrama de fases.....	30
Figura 14. Tratamientos térmicos.....	32
Figura 15. Esquema del diagrama de fases Fe-C estable: — metaestable: - - - - -.....	34
Figura 16. Micrografía de una Fundición blanca hipoeutéctica.....	35
Figura 17. Distintas morfologías del grafito en fundiciones de hierro.....	36
Figura 18. Tratamiento térmico de Austemperizado.....	38
Figura 19.A- Tensión de fluencia vs Temperatura de austemperizado. B- Elongación a la rotura vs Temperatura de Austemperizado.....	39
Figura 20. Clasificación de aceros y propiedades mecánicas.....	41
Figura 21. Tratamiento térmico para obtener Aceros DP.....	42
Figura 22. Condición termodinámica para que la cementita precipite desde la austenita.....	43
Figura 23. Elongación vs Tensión de rotura de las distintas familias de aceros.....	45
Figura 24. A- Vista del HUB-EJE LENTO. B- Detalle del HUB. C- Detalle del EJE LENTO.....	48
Figura 25. Moldeo horizontal (dimensiones en mm).....	50
Figura 26. Moldeo vertical (dimensiones en mm).....	51
Figura 27. Geometría mazarota.....	51
Figura 28. Plano de partición moldeo vertical.....	55
Figura 29. Plano de partición moldeo horizontal.....	55
Figura 30. Ubicación y nivel de porosidad en Fundición Gris GJS 700 para la situación sin sistema de colada.....	57

Figura 31. Ubicación y nivel de porosidad en Aleación de Aluminio AlSi7Mg para la situación sin sistema de colada.....	57
Figura 32. Ubicación y nivel de porosidad en Acero GX40CrSi13 para la situación sin sistema de colada.....	58
Figura 33. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Fundición Gris GJS 700, Temperatura de colada: 1450°C, Temperatura de molde: 25°C, Moldeo: horizontal.....	59
Figura 34. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Fundición Gris GJS 700, Temperatura de colada: 1450°C, Temperatura de molde: 25°C, Moldeo: vertical.....	59
Figura 35. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Fundición Gris GJS 700, Temperatura de colada: 1450°C, Mazarota: Sí (Volumen: 532cm ³), Chills: No, Lado de la sección cuadrada del sistema de realimentación: 10mm, Temperatura de molde: 25°C.....	61
Figura 36. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Fundición Gris GJS 700, Temperatura de colada: 1450°C, Mazarota: Sí (Volumen: 798cm ³), Chills: No, Lado de la sección cuadrada del sistema de realimentación: 20mm, Temperatura de molde: 25°C.....	61
Figura 37. Porosidad en la pieza una vez solidificada Material: Fundición Gris GJS 700, Temperatura de colada: 1400°C, Mazarota: Sí (Volumen: 798cm ³), Chills: No, Lado de la sección cuadrada del sistema de realimentación: 20mm, Temperatura de molde: 25°C.....	62
Figura 38. Porcentaje de Fracción de Líquido para 2min, 42 seg del inicio de la solidificación. Material: Fundición Gris GJS 700. Temperatura de colada: 1400°C, Mazarota: Sí (Volumen: 798cm ³), Chills: No, Lado de la sección cuadrada del sistema de realimentación: 20mm, Temperatura de molde: 25°C.....	63
Figura 39. Sistema de alimentación para Fundición Gris GJS 700, que incluye <i>chills</i> (enfriadores) y mazarota. Mazarota: Sí (Volumen: 798cm ³), <i>Chills</i> : Sí (3 en ligamentos del <i>hub</i> y 1 transversal en el eje), Lado de la sección cuadrada del sistema de realimentación: 20mm.....	64
Figura 40-A. Dimensiones de los <i>chills</i> o enfriadores ubicados sobre el HUB.....	64
Figura 40-B. Dimensiones del <i>chill</i> ubicado sobre el eje lento, en la zona de unión con el HUB....	65
Figura 41. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Fundición Gris GJS 700, Temperatura de colada: 1370°C, Mazarota: Sí (Volumen: 798cm ³), Chills: Sí (3 en ligamentos del hub y 1 transversal en el eje), Lado de la sección cuadrada del sistema de realimentación: 20mm, Temperatura de molde: 25°C, Temperatura de chills: 25°C.....	66
Figura 42. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Fundición Gris GJS 700, Temperatura de colada: 1370°C, Mazarota: Sí (Volumen: 798cm ³), Chills: Sí (3 en ligamentos del hub y 1 transversal en el eje), Lado de la sección cuadrada del sistema de realimentación: 20mm, Temperatura de molde: 20°C, Temperatura de chills: 20°C.....	67
Figura 43. Porcentaje de fracción de líquido para 4 min, 29 seg desde el inicio de la solidificación (correlación con Figura 42).....	68
Figura 44. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Aleación de Aluminio AlSi7Mg, Temperatura de colada: 850°C, Mazarota: No, Chills: No, Temperatura de molde: 25°C.....	69
Figura 45. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Aleación de Aluminio AlSi7Mg, Temperatura de colada: 850°C, Mazarota: Si (Volumen: 532cm ³), Chills: No, Temperatura de molde: 25°C.....	69
Figura 46. Sistema de alimentación para Aleación de Aluminio AlSi7Mg, Temperatura de colada: 850°C, Mazarota: Si (Cantidad:2, Volumen: 798cm ³), Chills: Si (Cantidad:5).....	70

Figura 47. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Aleación de Aluminio AlSi7Mg, Temperatura de colada: 850°C, Mazarota: Si (Volumen: 798cm ³), Chills: Si, Temperatura de molde y chills: 20°C.....	71
Figura 48. Fracción de líquido para 5 min, 11 seg luego del inicio de la solidificación. Se puede verificar una correcta direccionalidad de solidificación para Aleación de Aluminio AlSi7Mg utilizando el sistema de alimentación mostrado en la Figura 46.....	72
Figura 49. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Acero GX40CrSi13, Temperatura de colada: 1600°C, Mazarota: No, Chills: No, Temperatura de molde: 20°C.....	73
Figura 50. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Acero GX40CrSi13, Temperatura de colada: 1600°C, Mazarota: Sí (Cantidad:1, Volumen: 798cm ³), Chills: No, Temperatura de molde: 20°C.....	74
Figura 51. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Acero GX40CrSi13, Disposición de chills y mazarotas utilizadas para Fundición gris, según Figura 39. Temperatura de colada: 1600°C, Mazarota: Sí (Cantidad:1, Volumen: 1064 cm ³), Chills: Sí (Cantidad: 4; 3 en los ligamentos y 1 en la unión "HUB- EJE LENTO"), Temperatura de molde y chills: 25°C.....	75
Figura 52. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Acero GX40CrSi13, Disposición de chills y mazarotas utilizadas para Aleación de Aluminio, según Figura 46. Temperatura de colada: 1600°C, Mazarota: Sí (Cantidad:2, Volumen: 1064 cm ³), Chills: Sí (Cantidad: 5; 3 en los ligamentos y 2 a lo largo del Eje), Temperatura de molde y chills: 25°C.....	76
Figura 53. Fracción de líquido para 3 min, 5 seg luego del inicio de la solidificación asociada a la simulación de la Figura 52.....	77
Figura 54. Sistema de alimentación para Acero GX40CrSi13, consistente con el sistema desarrollado para la Aleación de Aluminio AlSi7Mg, con modificación en el chill superior ubicado en el eje lento.....	78
Figura 55. Descripción Ídem Figura 52 con modificación de chill superior.....	79
Figura 56. Dimensiones principales del aspa (en mm).....	80
Figura 57. Variación de la velocidad del viento con la altura sobre el suelo, para diferentes topografías de terreno.....	80
Figura 58. Curva de distribución de energía del viento.....	81
Figura 59. Área proyectada aspa.....	82
Figura 60. Capas cilíndricas para facilitar el ensamblaje.....	82
Figura 61. Regiones geométricas características del aspa.....	83
Figura 62. Ubicación cilindro macizo en las aspas.....	83
Figura 63. Plano de rotación del aspa.....	84
Figura 64. Mallado.....	85

Figura 65. Propiedades Epoxy/ Fibra de Yute.....	85
Figura 66. Propiedades aleación de aluminio C355-0-T61.....	85
Figura 67. Empotramiento en el eje.....	86
Figura 68. Fuerza distribuida sobre el conjunto de piezas HUB-EJE LENTO-ASPAS.....	86
Figura 69-A. Perfil de tensiones de Von Mises.....	87
Figura 69-B. Perfil de tensiones de Von Mises.....	87
Figura 70. Comparación del comportamiento a la fatiga de materiales compuestos frente al acero.....	88
Figura 71. Máxima tensión de Von Mises para $V= 29.41$ m/s.....	89
Figura 72. Perfil de tensiones de Von Mises en el “HUB- EJE LENTO”	90
Figura 73. Modelos impresos en PLA de: A- Sistema de alimentación. B- Modelo. C- Caja de noyo.....	91
Figura 74. Operación de moldeo del bajero (semi-molde inferior).....	92
Figura 75. Noyo del “HUB-EJE LENTO”	93
Figura 76.A- Semi-molde inferior (con modelos, mazarotas y chills) preparado para la fabricación del semi-molde superior. B- Colocación del noyo en el semi-molde inferior. C- Vista superior del molde cerrado. D- Vista lateral del molde cerrado.....	94
Figura 77.A- Horno de fusión. B- Pieza prototipo” HUB- EJE LENTO” junto al sistema de alimentación y realimentación.....	95
Figura 78. A- Pieza “HUB-EJE LENTO” con espesor no uniforme en el EJE LENTO. B- Pieza “HUBEJE LENTO” orientada con el EJE LENTO en dirección vertical. C- Pieza “HUB-EJE LENTO” con espesor uniforme en el <i>hub</i>	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porcentaje de materiales usados en componentes de molinos eólicos en la actualidad [8].....	13
Tabla 2. Solubilidad de los elementos de aleación más comunes.....	27
Tabla 3. Aleaciones de aluminio forjadas.....	28
Tabla 4. Aleaciones coladas.....	28
Tabla 5. Composición química de aleación de aluminio típica usada para la fabricación de <i>hubs</i> [15].....	30
Tabla 6. Propiedades mecánicas aleación A356.0.....	31

Tabla 7. Composiciones típicas de aleaciones de aluminio aptas para ser coladas.....	31
Tabla 8. Propiedades mecánicas de las fundiciones ADI según norma ASTM A 897M-06.....	37
Tabla 9. Rango de elementos de aleación utilizados en fundiciones ADI coladas [18].....	38
Tabla 10. Rango de elementos de aleación utilizados en aceros bainíticos libres de carburos [20].....	42
Tabla 11. Determinación de coeficiente S según el espesor de la pieza para Fundiciones de Hierro Grises.....	54
Tabla 12. Determinación de constante B según el espesor de la pieza para Aleaciones base Aluminio.....	54

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

Desde la revolución industrial hasta la actualidad la humanidad ha utilizado recursos no renovables con el objetivo de generar energía para todo tipo de aplicaciones. Esto ha llevado a un consumo y disminución drástica de los mismos a lo largo de los años, lo que ha desencadenado una crisis ambiental y energética que busca ser solucionada con el uso de energías limpias y renovables como lo son la eólica y la solar, entre otras.

El desarrollo tecnológico vinculado a las formas de producción energética amigables con el medio ambiente apunta a su adopción como reemplazo de la generación de energía eléctrica convencional a base de hidrocarburos. Por ejemplo, se estima que hoy en día sólo un 2% de la energía eléctrica a nivel mundial es generada a través de energía eólica, aunque, según la Agencia Internacional de Energía se predice que para 2050 ésta podría representar un 18% [1].

En particular, la energía eólica se caracteriza por ser una de las fuentes naturales más limpias (no contaminante) que existen y es inagotable, por lo que su utilización de manera eficiente contribuiría con el desarrollo sostenible. Si bien como concepto existe ya hace muchos años, su impacto y desarrollo se ha dado en las últimas décadas, sin llegar a reemplazar en su totalidad el uso de fuentes energéticas convencionales (petróleo y derivados), debido a su baja conversión en energía eléctrica. En este contexto, resulta indispensable la necesidad de implementar mejoras ambientales y tecnológicas en lo que se refiere a la producción energética.

1.1 DEFINICIÓN DE MOLINO EÓLICO O AEROGENERADOR

Un molino eólico es un dispositivo capaz de transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica gracias a las fuerzas aerodinámicas que produce el mismo sobre las aspas. El principio de funcionamiento es similar al que produce la elevación de un avión, la diferencia en la presión de aire en ambos lados de las aspas, que ocurre gracias al diseño que poseen las mismas, genera dos fuerzas: una de elevación (perpendicular a la dirección del viento incidente) y otra de arrastre (paralela a la dirección del viento incidente). La fuerza de elevación es superior a la de arrastre lo cual conlleva a que las aspas roten [2]. Esto se puede ver en la Figura 1.

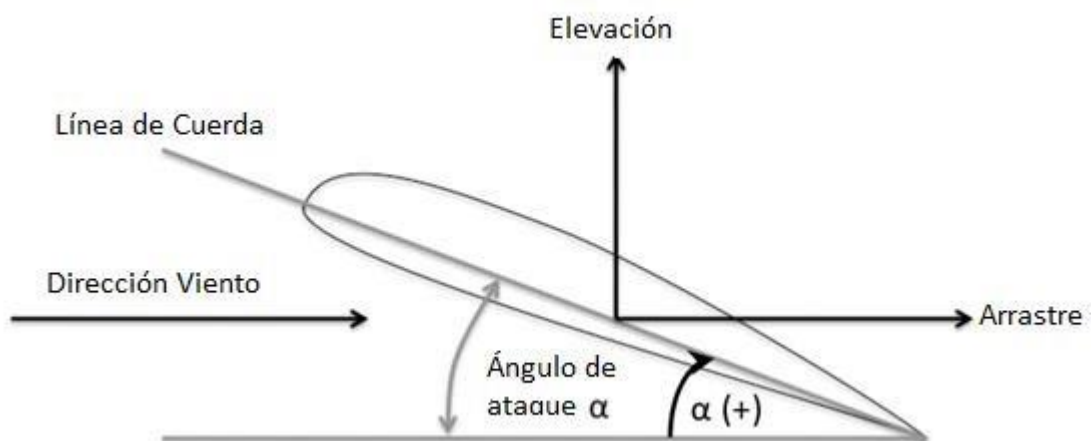


Figura 1. Principio de Funcionamiento de molino eólico

1.2 AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL Y HORIZONTAL

Los aerogeneradores se pueden clasificar en 2 tipos [3]:

Aerogeneradores de eje vertical: el eje de rotación se encuentra perpendicular a la dirección de incidencia del viento (ver Figura 2). Como ventaja, no necesitan orientarse respecto a la dirección

donde sopla el viento (útiles en regiones de vientos con direcciones cambiantes), como si lo requieren los aerogeneradores de eje horizontal. Esta tipología de aerogenerador tiene una eficiencia de conversión energética menor que los aerogeneradores de eje horizontal. Por otro lado, su fabricación requiere generalmente una menor inversión con respecto al otro tipo, y son resistentes y robustos, por lo que no requieren elevado mantenimiento.



Figura 2. Aerogenerador de eje vertical

Aerogeneradores de eje horizontal: en este caso, el eje de rotación se encuentra paralelo a la dirección de incidencia del viento. En la Figura 3 se muestra un esquema de un aerogenerador con sus partes principales.

Las aspas están unidas a un rotor (*hub*) el cual a su vez está conectado a un eje lento, que gira a la misma velocidad angular a la que lo hacen las aspas. Como las revoluciones por minuto (RPM) de este eje no son suficientes para generar grandes cantidades de energía, este eje, gracias a un multiplicador (sucesión de engranajes) se combina con un eje rápido, el cual rota a mayores revoluciones por minuto con respecto al eje lento. Producto de la presencia de un generador se aprovecha la rotación del eje rápido para la conversión en energía eléctrica. Cabe destacar la presencia del freno de disco en el eje de alta velocidad que se utiliza para detener el rotor en casos de mantenimiento o emergencia.

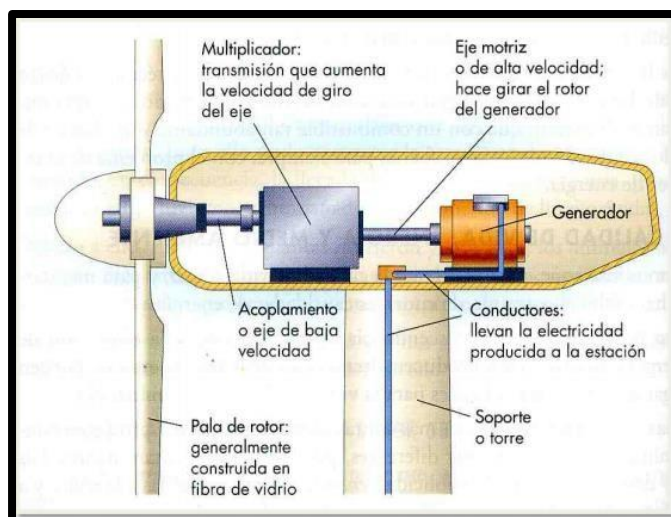


Figura 3. Partes de un aerogenerador de eje horizontal.

A su vez, este tipo de aerogeneradores se subclasifican en aerogeneradores de eje horizontal a barlovento y a sotavento. En Sotavento el flujo de aire incide sobre el rotor del aerogenerador, mientras que a Barlovento incide sobre las aspas, por lo que el rotor, en este caso, actúa como dispositivo direccional. Esto se puede observar en la Figura 4:

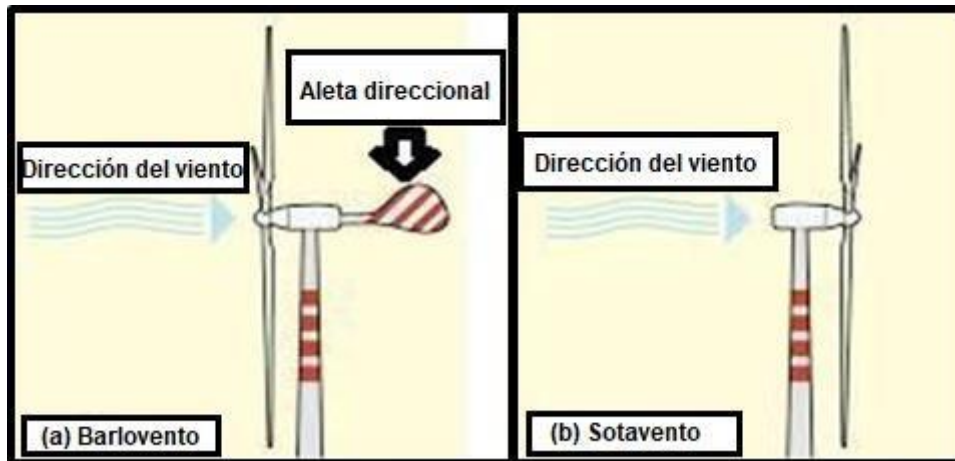


Figura 4. Aerogeneradores de eje horizontal a barlovento y a sotavento.

En general, este formato de aerogeneradores permite abarcar áreas más amplias que los de eje vertical, por lo que desarrollan potencias mayores, y en cuanto a su altura se aprovecha eficientemente el aumento de la velocidad del viento al alejarse del suelo. De esta manera, los molinos de eje horizontal son los más difundidos y los que han permitido obtener las mayores eficiencias de conversión energética [4]. Por otro lado, este tipo de molinos pueden estar formados por una, dos, o tres aspas. Al aumentar la cantidad de aspas, la velocidad de rotación de las mismas disminuye, ya que cada aspa genera una estela que disminuye el rendimiento de la que sigue. Como el objetivo es maximizar la generación de energía eléctrica se debe maximizar la velocidad de rotación de las aspas, por lo que en este sentido se busca un mínimo en la cantidad de aspas que estarán vinculadas al rotor (*Hub*). De todas maneras, los inconvenientes de estabilidad que presentan los rotores monopala o bipalas lleva a que los rotores tripalas sean los más utilizados en la actualidad [3].

1.3 POTENCIA Y RENDIMIENTO

Además de la clasificación anterior de aerogeneradores, puede resultar apropiado diferenciarlos según la potencia que generan. De esta forma surgen tres categorías:

- Aerogeneradores de potencia baja: son aquellos que entregan una potencia de hasta 100 Kw. Se utilizan principalmente para abastecer viviendas, así como establecimientos de pequeño tamaño, reservándose casi exclusivamente al ámbito privado. Se encuentran ubicados de manera dispersa alrededor del país.
- Aerogeneradores de potencia media: poseen una potencia de salida entre 100 Kw y 30 Mw, su aplicación se da generalmente en pequeños desarrollos comunitarios.
- Aerogeneradores de potencia alta: son aquellos capaces de generar más de 30 Mw. Son utilizados para proveer electricidad a la red nacional, por ello se encuentran comúnmente en zonas con gran potencial eólico. En general, se instalan varios aerogeneradores juntos, formando un parque eólico. El tamaño del aerogenerador está directamente ligado a la potencia que posee el mismo. Por lo tanto, un aerogenerador de baja potencia será considerablemente más pequeño que uno de alta potencia.

La potencia máxima que desarrolla un aerogenerador está ligada a la longitud de las aspas, la velocidad del viento y densidad del aire (Ver Ec.1).

$$P_{max} = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho_{aire} A v^3$$

(Ecuación. 1)

Donde P_{max} (potencia máxima) es la energía máxima por unidad de tiempo, ρ_{aire} es la densidad del aire, A es el área de barrido circular (la cual se calcula como π multiplicado por la longitud del aspa elevada al cuadrado), y v es la velocidad del flujo de aire. La longitud del aspa funciona como radio de circunferencia para el cálculo del área de barrido.

Particularmente para los molinos de baja potencia se aplica la norma *IEC 61400-2* la cual define a un molino pequeño de eje horizontal a aquel que tiene un área de barrido de rotación menor a 200 m². Esto corresponde a una longitud de aspa menor a 8 m y una potencia máxima por debajo de 50 Kw.

Esta potencia máxima mencionada no puede ser alcanzada en la realidad por limitaciones físicas. De esta manera surge el análisis del límite de Betz el cual enuncia que la máxima eficiencia teórica que un aerogenerador puede alcanzar es del 59.3% [5].

1.4 MATERIALES USADOS EN AEROGENERADORES DE ALTA Y BAJA POTENCIA

En los aerogeneradores siempre se busca reducir el peso de los materiales utilizados con el objetivo de reducir costos de producción y mejorar el rendimiento, para que este tipo de energía resulte cada vez más competitiva con respecto a las tradicionales. En la Tabla 1 se muestran los materiales más utilizados en los componentes tanto para molinos de alta y baja potencia:

Componente/Material(%Peso)	Grandes Turbinas (Pequeñas Turbinas)							Plástico reforzado con fibras de carbono
	Materiales Magnéticos Permanentes	Concreto Pretensado	Acero	Aluminio	Cobre	Plástico reforzado con fibra de vidrio	Epoxi con madera	
Rotor			(95)-100	(5)				
Aspas			5			95	(95)	(95)
Caja de cambio			98-(100)	(0)-2	(<1)-2			
Generador	(50)		(20)-65		(30)35			
Marco, carcasa			85-(74)	9-(50)	4-(12)	3-(5)		
Torre		2	98	(2)				

Tabla 1. Porcentaje de materiales usados en componentes de molinos eólicos en la actualidad [8].

Con respecto a las aspas que conforman los molinos eólicos de alta y baja potencia, estas se fabrican a partir de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de vidrio o carbono debido a sus excelentes propiedades mecánicas, bajo peso y su capacidad de poder ser conformados en geometrías complejas a partir del uso de técnicas de procesamiento como infusión por vacío. El hecho de utilizar este tipo de materiales en los aerogeneradores (los cuales tienen una vida útil de aproximadamente 20 años) genera cierta incertidumbre con los desechos hacia el medio ambiente y las consecuencias negativas que esto puede provocar, ya que por un lado, si bien la energía eólica busca reemplazar las formas tradicionales de generación de energía eléctrica con el uso de carbón y petróleo que son recursos no renovables, por otro lado está generando un impacto en el medio ambiente por los desechos de materiales una vez que el dispositivo llega al final de su vida útil [6]. De esta manera surge un gran potencial de desarrollo

en busca de materiales compuestos para la fabricación de las aspas que resulten biodegradables y amigables con el medio ambiente.

Otros componentes considerados con capacidades de desarrollo, y estrechamente vinculados con las aspas, son el rotor o *hub* (pieza sobre la que se fijan las aspas) y el eje lento, o también llamado eje principal del molino. Ambas partes son obtenidas por separado mediante la técnica de fusión y colada. La Figura 5 muestra un esquema de las piezas mencionadas dentro de un molino eólico.

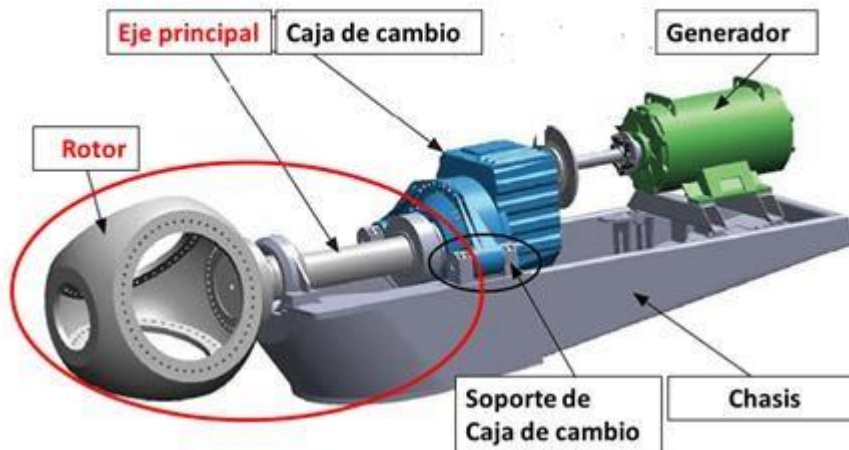


Figura 5. Rotor y eje principal.

Para molinos de alta potencia se utiliza, en su mayoría, acero como material de fabricación para el hub y eje, ya que con este material se logran alcanzar los requerimientos estructurales necesarios de fatiga y resistencia mecánica. Por otro lado, para los de baja potencia se utiliza un 95% de acero y un 5% de aluminio y sus aleaciones, con el fin de reducir el peso de ambas partes y por ende reducir los costos de producción, cumpliendo de todas maneras con los requerimientos estructurales para un desempeño óptimo de la estructura [7],[8]. Sin embargo, en todos los casos, estas piezas (rotor y eje lento o principal) son independientes, y necesitan ser ensambladas mediante abulonado, remachado o soldado. Estas operaciones incrementan el costo de fabricación de los molinos y en ocasiones pueden introducir defectos que deterioren sus propiedades mecánicas.

CAPÍTULO 2 - MOTIVACIÓN

Este trabajo se encuentra englobado en un proyecto de investigación titulado: DESARROLLO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS DE PROCESAMIENTO PARA LA FABRICACIÓN DE COMPONENTES UTILIZADOS EN MOLINOS EÓLICOS DE BAJA POTENCIA (PICT 2013-2017, Director: Dr. Gastón Francucci, co-director Dr. Leandro Ludueña), que se desarrolla de manera conjunta entre la División Metalurgia, la División Compuestos Estructurales Termorrígidos y la División Materiales Compuestos Termoplásticos del INTEMA; proyecto que estudia la fabricación de distintos componentes de molinos eólicos de baja potencia. Como se mencionó, en este tipo de molinos en particular, las aspas que los conforman se fabrican tradicionalmente utilizando materiales compuestos de matriz polimérica debido a sus excelentes propiedades específicas y la capacidad de ser conformados en geometrías complejas de gran tamaño. Pero, el uso cada vez más masivo y globalizado de energía eólica, y la vida útil programada de los molinos, ha generado un nuevo problema en la industria, relacionado con el uso y disposición final de enormes cantidades de materiales sintéticos provenientes de fuentes no renovables para la fabricación de las aspas de molinos eólicos. La problemática fue abarcada inicialmente en el mencionado proyecto de investigación a través de una Práctica Profesional Supervisada dirigida por los Dres. Ludueña y Francucci, y realizada por la alumna de Ingeniería en Materiales Catalina Miranda, titulada: "Diseño CAD de un aspa de molino eólico para la fabricación de prototipo por rotomoldeo". En ese trabajo se desarrolló y optimizó el diseño de las aspas pudiendo ser potencialmente fabricadas como un núcleo termoplástico de pared fina obtenido por rotomoldeo y recubierto con pieles rígidas y resistentes de materiales compuestos de matriz termorrígida reforzada con fibras de origen vegetal (ver Figura 6) [21].

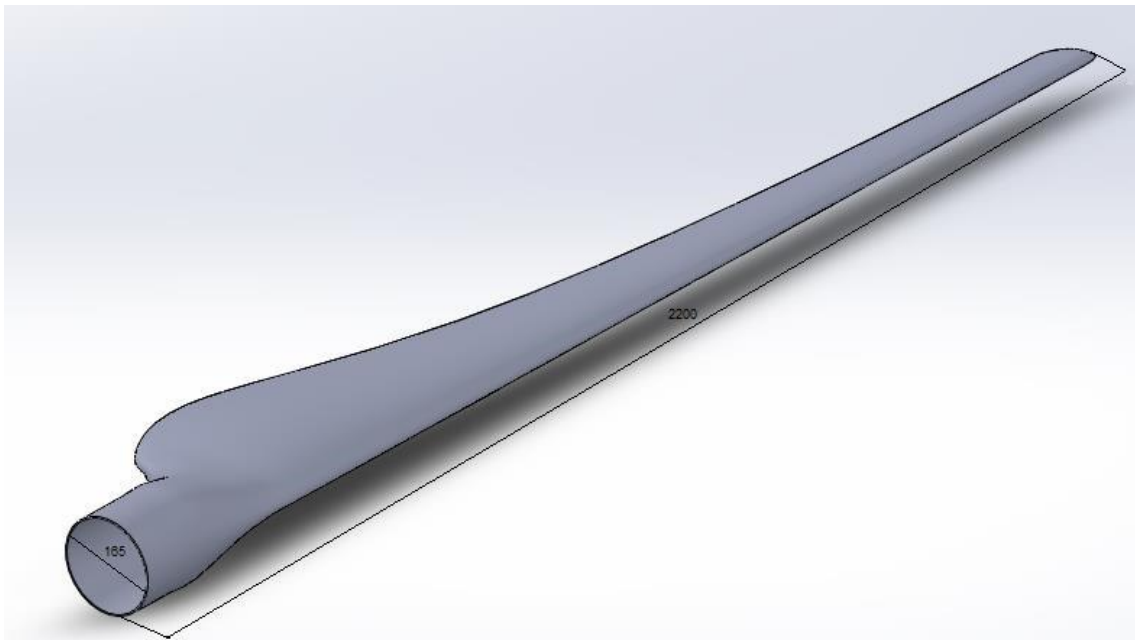


Figura 6. Diseño CAD completo del aspa.

Las aspas diseñadas tienen una longitud de 2.2m y la materia prima que se utilizaría para su fabricación sería Policaprolactona (PCL) como núcleo termoplástico, bio-epoxi como matriz del compuesto y fibras de yute o lino como refuerzos de origen vegetal, en forma de refuerzos unidireccionales y/o bidireccionales.

CAPÍTULO 3 - REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 IMPORTANCIA DEL *HUB* Y EJE LENTO EN EL MOLINO EÓLICO

El *hub* es un elemento esencial en la fabricación de molinos eólicos en cuanto a la función estructural que cumple como soporte de todas las cargas generadas sobre las aspas que están ancladas al mismo. El hecho de mantener a las aspas en su posición adecuada permite que se alcance la máxima eficiencia aerodinámica (para la cual fueron diseñadas). Además, el *hub* actúa como conector con el resto del tren de transmisión.

Generalmente están hechos de acero y pueden fabricarse en distintas configuraciones, las cuales difieren según el diseño de las aspas y del tipo de generador utilizado [9], pero en general hay tres tipos básicos: '*Rigid Hubs*', '*Teetering Hubs*' y '*Hubs for hinged blades*'.

El '*Rigid Hub*' está diseñado para mantener todas las piezas principales en una posición fija con respecto al eje principal. Debe ser lo suficientemente fuerte para soportar todas las cargas que puedan surgir de cualquier carga aerodinámica en las aspas.

El '*Teetering Hub*' se utiliza en casi todas las turbinas eólicas de dos palas. Esto se debe a que puede reducir las cargas debidas a los desequilibrios aerodinámicos o las cargas debidas a los efectos dinámicos de la rotación del rotor.

Por último, el '*Hub for hinged blades*' es una mezcla entre un *Rigid Hub* y un *Teetering Hub*. Básicamente es un *hub* rígido con "bisagras" para las aspas. Los *Teetering Hubs* tienen la ventaja de que las dos palas tienden a equilibrarse entre sí, por lo que la falta de rigidez centrífuga durante el funcionamiento a bajas revoluciones no es un problema importante. Sin embargo, no existe tal equilibrio en los '*Hubs for hinged blades*', por lo que se debe proporcionar algún mecanismo para evitar que las aspas se caigan durante una velocidad de rotación baja.

Dentro de esta clasificación, el tipo de *Hub* que se desarrollará en este proyecto es el *Rigid Hub*.

3.2 TECNOLOGÍA DE FUSIÓN Y COLADA

La tecnología de fusión y colada es una de las técnicas más antiguas para darle forma a un determinado material. Es una técnica que se usa para todo tipo de metales: aceros, fundiciones de hierro, aluminio, etc. Consiste, como su nombre lo indica, en alcanzar la temperatura de fusión del material para luego verterlo en un molde refractario que reproduce la forma de la pieza a fabricar. Una vez que transcurre el tiempo suficiente para que el material solidifique, la pieza es extraída del molde.

La técnica resultó revolucionaria en su época opacando métodos más tradicionales como lo son la forja y el estampado, haciéndola única entre los procesos de conformado de metales. En términos de volumen de producción, ocupa el segundo lugar después del laminado de acero en la industria, y una cualidad única es su versatilidad en la obtención de piezas de distintos pesos, yendo desde unos pocos a gramos a cientos de toneladas.

La diversidad de aplicaciones de los productos obtenidos por esta técnica es un resultado directo de las muchas ventajas funcionales y beneficios económicos que ofrecen las piezas obtenidas por esta vía, en comparación con otros métodos de conformado de metales. Se pueden distinguir cinco categorías como métodos de manufactura dentro de la tecnología de fusión y colada [10]. Estos son:

- Procesos de moldeo convencionales (arena en verde)

- Procesos de moldeo y fundición de precisión (*investment casting, permanent mold, die casting*) · Procesos especiales de moldeo y colada (*vacuum molding, evaporative pattern casting, centrifugal casting*)
- Moldeo de arena autoajustable, químicamente adherida (sin hornear, silicato de sodio)
- Innovadores procesos de moldeo y fundición (*rheocasting, squeeze casting, electroslag casting*)

3.2.1 ETAPAS DEL PROCESO

Generalmente, los pasos a seguir para realizar este método de conformado son:

- Diseño de la pieza que se desea fabricar.
- Construcción del modelo.
- Construcción del molde, sistema de alimentación y realimentación (mazarotas).
- Colada del metal líquido.
- Extracción de la pieza del molde una vez solidificada, eliminación del canal de colada y mazarotas.

3.2.1.1 MODELO

El modelo es la pieza que permite dar forma a la cavidad del molde. Suele ser fabricado de metal, madera, material polimérico o material compuesto. El aspecto más destacable en su fabricación es la necesidad de considerar un sobredimensionamiento debido a la contracción durante la solidificación del metal líquido y la contracción en estado sólido, y de esta manera, obtener las dimensiones requeridas de la pieza. Además, es importante destacar la presencia de ángulos de salida en los modelos con el fin de no dañar al molde durante su extracción (se suelen usar ángulos de salida entre 0.5° y 2°).

Cabe destacar la importancia de considerar durante la fabricación de los modelos las portadas de noyos, las cuales permiten generar en el molde los sitios para que puedan ser ubicados los mismos.

3.2.1.2 MOLDE

Los moldes pueden clasificarse en permanentes o descartables. Aquellos realizados en arena son destruidos y desechados una vez que la pieza se encuentra solidificada, a excepción del moldeo en verde, donde las arenas suelen ser reutilizadas y mezcladas con arenas nuevas, luego de un proceso de desterronado y reciclado. Los que se fabrican con metal o algún material refractario son moldes permanentes que permiten su continua reutilización, y, además, proveen una mejor terminación superficial que aquellos realizados en arena. Poseen limitaciones en cuanto a la fabricación de objetos con geometrías complejas y pueden resultar muy costosos, aunque, de todas maneras, esta última característica puede ser compensada en el caso de producciones masivas (en serie).

Entonces, los moldes son recipientes que presentan una cavidad que es rellena con metal líquido, y que, al solidificar, permite la obtención de la geometría de pieza buscada. Deben ser moldeados de antemano para poder reproducir fielmente la forma del modelo. En el caso de moldeo en arena, para que los moldes tengan la geometría deseada es necesario moldearlos con el uso de modelos que posean la forma y dimensiones de la pieza a colar (teniendo en cuenta el sobredimensionamiento mencionado anteriormente). También se conoce el moldeo en matriz, donde usualmente la cavidad es mecanizada.

La elección del material y el método utilizado para confeccionar el molde impacta drásticamente en la calidad del producto final. Por este motivo es muy importante tener en claro la aplicación de la pieza a fabricar y los costos de producción que se puedan requerir.

Muchas veces, las piezas a fabricar presentan huecos por lo que es necesario realizar un modelo interno o caja de noyos, para fabricar otras partes del molde que luego serán insertadas dentro del mismo, denominadas noyos. Los noyos actúan como elementos de volumen en el molde cuando el material está siendo colado; de esta manera una vez se haya realizado la colada, el volumen que ocupaba el noyo pasará a ser un hueco en la pieza. Esto se puede observar en la Figura 7.

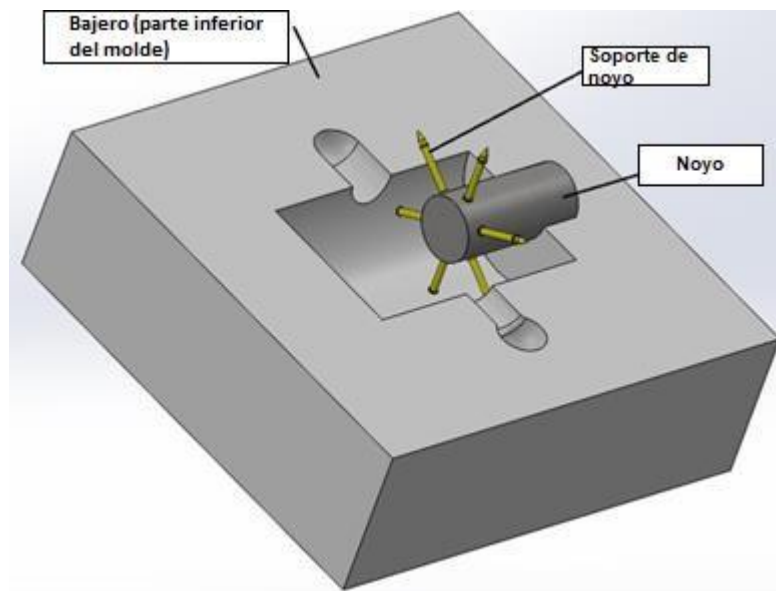


Figura 7. Molde con noyo para producir pieza hueca.

3.2.1.2.1 MOLDEO EN ARENA

Los moldes de arena son los más utilizados y consisten principalmente de arena de sílice unida con algún tipo de ligante. Los ligantes pueden ser divididos en dos categorías [10]:

- A. Arcillas: principalmente bentonita hidratada.
- B. Resinas: (B.1) sistema ligante sin horneado, (B.2) sistema ligante curado térmicamente, (B.3) sistema ligante de caja fría.

A. Las arcillas son los ligantes más utilizados en las arenas de fundición ya que desarrollan plasticidad cuando se las mezcla con agua. Esta propiedad le otorga trabajabilidad al sistema arcilla-arena-agua, facilitando el proceso de moldeo.

B. La resina es un polímero que recubre la arena, y actúa como ligante una vez se realice el curado de la misma. El proceso de curado de la resina puede consistir en la aplicación de calor o un catalizador químico.

(B.1) Sistema ligante sin horneado: el curado de la resina ocurre a temperatura ambiente, una vez que los reactivos (resina, catalizador y acelerador) son mezclados con la arena. Luego, cuando la mezcla todavía presenta trabajabilidad, el modelo es colocado sobre el molde para darle la forma apropiada. Una vez que la resina cura, el modelo se retira.

(B.2) Sistema ligante curado térmicamente: se destaca la técnica Shell, la cual consiste en el recubrimiento de arena con resina fenólica y de un calentamiento del sistema para que la resina cure a una temperatura que puede variar entre 150 y 280°C, un tiempo entre 10 y 30 segundos.

(B.3) Sistema ligante de caja fría: la resina cura a temperatura ambiente (al igual que en los sistemas de ligante sin horneado). La reacción es acelerada por gas o vapor, que actúa como catalizador de la reacción.

3.2.1.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA ARENA DE SÍLICE

Las arenas de fundición están compuestas principalmente por sílice, y en menor medida, por compuestos que cumplen el rol de impurezas como ilmenita, magnetita, etc. Son utilizadas por su alta disponibilidad y bajo costo. Se destacan mezclas de moldeo de arena en verde y mezclas con resina.

La arena en verde como mezcla de moldeo consiste en la mezcla de arena de sílice y bentonita (un derivado de la arcilla) con una cantidad moderada de agua. Esta primera elaboración de la mezcla se denomina arena de contacto. Luego, tras una primera utilización esta mezcla es reutilizable como arena de relleno, la cual al añadirle agua vuelve a recuperar las condiciones para el moldeo de piezas. De esta manera, se puede crear un circuito cerrado de arenería.

En este sentido, algunas características de las arenas de fundición son importantes a tener en cuenta para una óptima y exitosa fabricación de la cavidad de moldeo, como permeabilidad, distribución de tamaño de grano, fluidez, refractariedad, resistencia, etc.

Permeabilidad

La distribución de tamaños de los granos de arena controla la porosidad y por ende la permeabilidad del molde. De esta manera, una adecuada permeabilidad es un aspecto a tener en cuenta, ya que facilita la evacuación de gases de la cavidad de moldeo. Si los granos fuesen del mismo tamaño la permeabilidad sería máxima, y si tuviesen un rango de tamaños más amplio, los granos más chicos se ubicarían en los huecos de los más grandes, disminuyendo la permeabilidad. Generalmente se busca una alta permeabilidad, aunque, si es muy elevada, puede provocar penetración del metal líquido en el molde de arena, lo cual corresponde a un defecto de colada. *Fluidez*

Es la capacidad de fluir que presente la arena, determina la precisión de la cavidad de moldeo. Una alta fluidez otorga una alta conformabilidad lo que da lugar a moldes de mayor calidad y detalle.

Refractariedad

Es la capacidad de la arena para soportar elevadas temperaturas manteniendo sus propiedades físicas y químicas. *Resistencia*

Es la capacidad de la arena de fundición de mantener la forma bajo la aplicación de esfuerzos.

3.2.1.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN Y CONSIDERACIONES DE DISEÑO

El sistema de alimentación corresponde al canal a través del cual el metal líquido ingresa a la cavidad moldeada. Para que el mismo desempeñe su función correctamente se deben tener en cuenta ciertos detalles de diseño [11]:

- El metal debe entrar y llenar la cavidad de moldeo de manera controlada y sin turbulencia para evitar la erosión del molde, la oxidación del metal y el ingreso de aire.
- El primer chorro de metal líquido debe ser retenido en un reservorio, producto de su enfriamiento y arrastre de arena suelta, y que solo entre en la cavidad de moldeo el metal líquido “limpio” (a correcta temperatura y sin contenido de arena).

- El metal líquido debe ser distribuido en la cavidad de moldeo de manera que produzca un gradiente de temperatura que favorezca una solidificación direccional apropiada.
- El sistema de alimentación debe ser económico. En este sentido, se debe poner énfasis en las dimensiones del mismo para no usar más metal del necesario, ya que el material que quede atrapado en el sistema de alimentación corresponderá a desperdicios del proceso de colada.

En principio, un sistema de alimentación está conformado por diferentes partes: el bacín de colada, el bebedero cónico, la base del bebedero, el canal de colada y los ataques. Las mismas se pueden observar en la Figura 8.

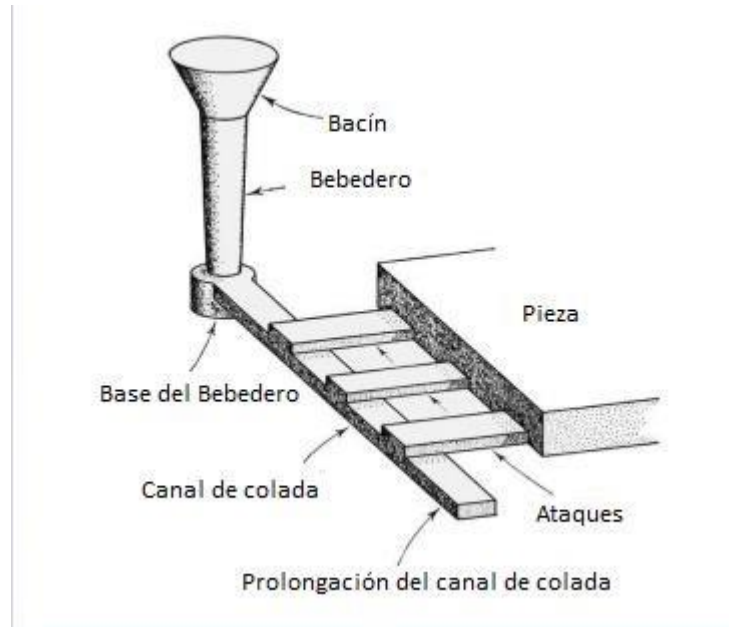


Figura 8. Componentes de sistema de alimentación.

Inicialmente, el metal líquido ingresa a través del bacín de colada. Su función es mantener un reservorio de metal líquido por encima del bebedero. Luego el metal pasa por el bebedero, normalmente de geometría cónica, para evitar el ingreso de aire al molde y para promover que el canal se llene rápidamente. Debe tener una altura adecuada para poder generar la presión metalostática suficiente para un correcto llenado de la cavidad. Una vez que el material alcanza la base del bebedero, ocurre una transición de flujo vertical de metal a un flujo horizontal con un mínimo de turbulencia hacia el canal de colada. Este elemento alimenta los distintos ataques (entradas) que tenga la cavidad de moldeo. En general, estos últimos son de sección rectangular, en general más altos que anchos, aunque en algunos casos son más anchos que altos, dependiendo de la estrategia para atrapar las inclusiones.

A continuación, se nombran algunos requisitos y relaciones de diseño para las partes que componen el sistema de alimentación:

- Bebedero: el área transversal de la base debe ser de entre $1/3$ y $1/2$ de la sección superior.
- Base del bebedero: Debe ser de 5 veces la sección transversal inferior y dos veces más profundo que los canales horizontales.
- Canal de colada: Debe decrecer su sección luego de cada ataque. Debe ubicarse en el bajero (semi-molde inferior) y los ataques en el sobre (semi-molde superior). Esto garantiza que el canal esté lleno antes de que el metal alcance los ataques y estos actúen

todos juntos. El mismo se debe prolongar luego del último ataque o poseer sumideros donde quede retenido el primer chorro de metal líquido.

- Ataques: En piezas grandes se recomienda el uso de múltiples ataques. Se recomienda que la longitud de los ataques sea de 3-5 veces mayor al espesor de los mismos. Evitar ataques con geometría curva en lo posible. No se colocan en la parte superior del molde para evitar un ingreso brusco y turbulento del metal, con altas posibilidades de erosión y gases atrapados.

Para el diseño del sistema de alimentación resulta útil considerar el módulo de la pieza a colar. El módulo se expresa matemáticamente como la relación entre el volumen de un cuerpo y su área superficial, aunque conceptualmente, en la técnica de fusión y colada, está asociado a la cantidad de calor disipado por la pieza [12]. Generalmente, se utiliza como criterio que el módulo del sistema de alimentación resulte 1.2 o 1.5 veces mayor al módulo de la pieza.

3.2.1.4 SISTEMA DE REALIMENTACIÓN O MAZAROTA

Como se mencionó anteriormente en las consideraciones de diseño, es muy importante que se produzca una solidificación direccional, la cual debe ir desde la cavidad de moldeo hacia el sistema de alimentación y la mazarota (también conocida como sistema de realimentación), los cuales deben ser los últimos elementos en solidificar.

A continuación, se detallan algunos aspectos a tener en cuenta para una correcta aplicación de la mazarota [11]:

- Debe solidificar en forma suficientemente lenta para asegurar que se dispondrá de metal líquido a lo largo de la solidificación de la sección realimentada, permitiendo así que la solidificación direccional continúe desde la pieza hacia la mazarota. Muchas veces se recubren con elementos aislantes para disminuir su extracción de calor hacia el molde.
- Debe ser capaz de suministrar un volumen suficiente de líquido para compensar la contracción de solidificación y del líquido: el volumen a realimentar debe ser mayor al volumen de contracción de pieza, sin embargo, se debe tener en cuenta que las mazarotas no vierten durante su solidificación todo su volumen, por lo que se determinan los rendimientos de las mazarotas como la fracción de volumen que pueden entregar a la pieza como líquido. En la Figura 9 se observan tres mazarotas, con diferentes rendimientos: cilíndrico (14%), semiesférico (20%) y cilíndrico con camisa aislante y/o exotérmica (67%); estos valores son aproximados.
- Debe mantener una diferencia de presión que permita realimentar continuamente a lo largo de la solidificación.
- Por último, debe considerarse el rango de realimentación. Es decir, no sólo cuánto volumen debe alimentar sino hasta dónde; con este criterio, el volumen total puede ser dividido entre varias mazarotas de acuerdo con el rango efectivo de cada una de ellas.

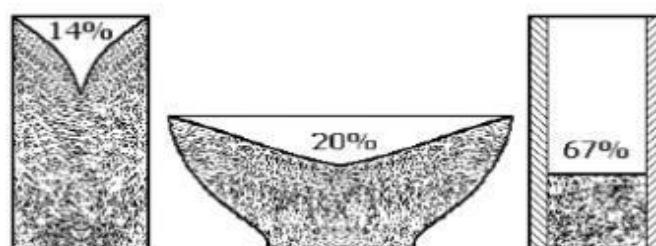


Figura 9. Distintas geometrías de mazarotas con sus rendimientos.

3.2.2 DESVENTAJAS DE LA TECNOLOGÍA DE FUSIÓN Y COLADA

Posiblemente la mayor desventaja de la tecnología de fusión y colada con respecto a otras técnicas de procesamiento de metales como lo son laminado y forjado es la alta cantidad de defectos presentes una vez obtenida la pieza. La presencia de estos defectos impacta negativamente en la performance de estos materiales en términos de durabilidad y desempeño mecánico, ya que actúan como concentradores de tensiones. Algunos de los defectos más importantes son la porosidad, la macro y microsegregación de inclusiones, y elementos de aleación e impurezas.

La porosidad en piezas coladas es ocasionada principalmente por dos fenómenos. Uno de ellos es la disminución de la capacidad de disolver gases que quedan atrapados durante la solidificación, fenómeno llamado porosidad por gas. El otro proceso es debido a una deficiencia en la alimentación requerida para compensar la contracción del metal durante la solidificación y el enfriamiento, y se lo denomina porosidad por contracción.

3.2.2.1 POROSIDAD POR GAS

Cuando el metal líquido solidifica no puede contener tantos gases como en estado líquido, por lo que son liberados, y esa es la razón principal por la cual la permeabilidad del molde es muy importante para permitir una correcta evacuación de estos gases. Si esto no ocurre, los gases quedan atrapados en la estructura sólida formando agujeros. Pueden estar asociados a arena con demasiada humedad, o por la temperatura demasiado alta del metal líquido, lo que conduce a una liberación excesiva de gas.

3.2.2.2 POROSIDAD POR CONTRACCIÓN

Como se dijo anteriormente, el metal líquido atraviesa un período de contracción volumétrica a medida que la temperatura disminuye. Este proceso es inevitable y debe ser considerado en el diseño. El escenario ideal es que el material se contraiga regularmente, ya que, de otra manera, se puede distorsionar la forma final del producto o crear agujeros internos. Hay dos causas posibles para que se produzca este defecto: el metal que se vierte en el molde está demasiado caliente o el metal se solidifica de manera desigual.

Esta porosidad se debe a una deficiencia en la alimentación requerida para compensar la contracción del metal durante la solidificación y el enfriamiento. Las transformaciones que sufre el metal durante la solidificación y el posterior enfriamiento son responsables de una serie de contracciones que inducen defectos.

El metal líquido en el horno ocupa un volumen mayor que en estado sólido, siendo éste un problema importante a la hora de colar el metal en un molde. Hay tres diferentes tipos de contracciones a tratar, como ilustra la Figura 10. Las mismas son contracción en estado líquido, contracción de solidificación y la contracción en estado sólido [13]. A medida que se reduce la temperatura, el metal en estado líquido se contrae, reduciendo su volumen linealmente.

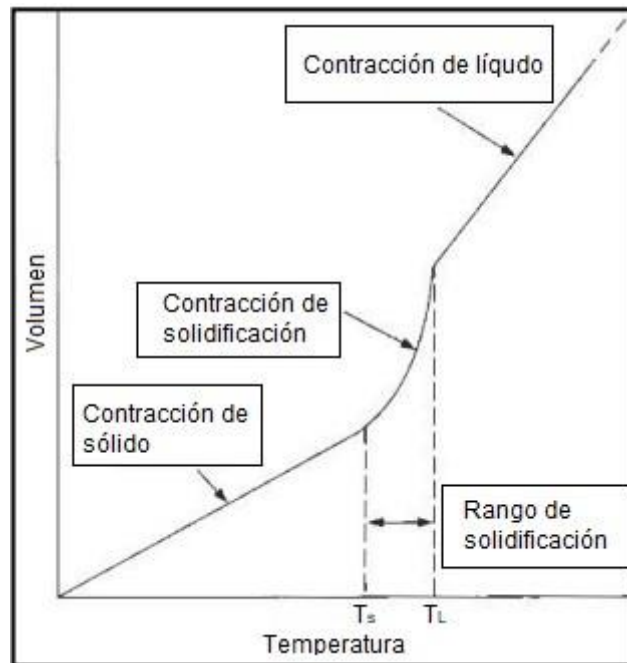


Figura 10. Contracciones del metal al enfriarse y solidificar.

En procesos de colada la contracción del líquido no genera grandes inconvenientes, ya que el líquido que compensa esta pequeña reducción en volumen puede ser provisto sin dificultad con la extensión del tiempo de llenado. Por otra parte, la contracción durante la solidificación es bastante más compleja, debido a la mayor densidad del sólido comparada con la del líquido. La dificultad de reponer el volumen de metal que se contrae a través de los canales de alimentación es el principal problema, que desencadena la presencia de porosidad como resultado de la alimentación deficiente.

La etapa final de la contracción en el estado sólido puede causar otra serie de problemas. A medida que la temperatura disminuye, la pieza tiende a reducir su tamaño. Esta reducción se puede ver limitada por el molde, o por partes de la misma pieza que hayan solidificado anteriormente y que no permitan una contracción libre. Esto conduce a una forma irregular de la pieza, y a dificultades para predecir la sobredimensión de la pieza a fin de obtener las dimensiones finales requeridas. La restricción del molde durante la contracción de estado sólido también puede conducir a problemas más localizados tales como desgarramiento o agrietamiento en caliente de la pieza colada.

Las fundiciones de hierro grises, con carbono a partir de 3,6%, presentan un aumento en el volumen debido a la precipitación de la fase grafito de baja densidad, mejor conocida como expansión gráfitica. Esta expansión gráfitica disminuye en cierta medida la alimentación extra necesaria, ya que compensa la contracción debido al enfriamiento [13]. El fenómeno puede observarse en la Figura 11:

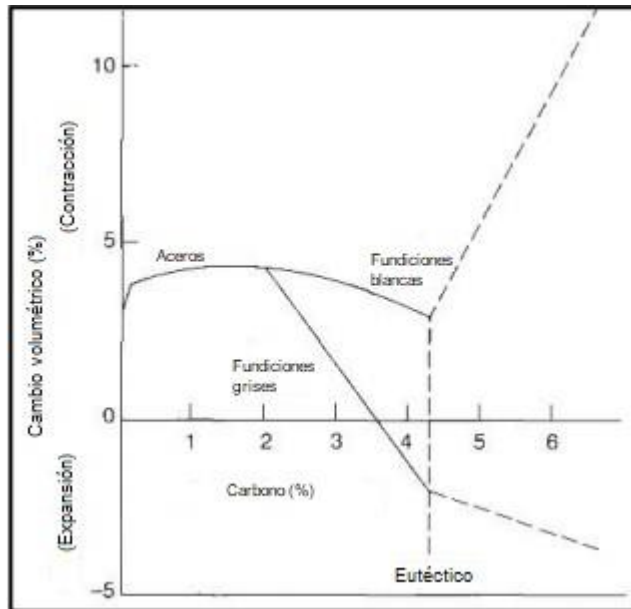


Figura 11. Cambio volumétrico vs Carbono Equivalente.

En coladas de aluminio, la presencia de pequeños cristales de Al_2O_3 (alúmina u óxido de aluminio) en el aluminio líquido aumenta el riesgo de aparición de porosidad en la pieza tras su solidificación. Este efecto se debe a que dichos microcristales cumplen la función de núcleos en los que puede formarse el gas cuando éste satura su solubilidad debido al enfriamiento del metal. En la práctica, es necesario eliminar la presencia de estas partículas en la aleación antes del proceso de colada [14].

3.2.3 VENTAJAS DE LA TECNOLOGÍA DE FUSIÓN Y COLADA

El proceso de fusión y colada se destaca frente a otras técnicas de conformado de metales por el hecho de que permite la fabricación de piezas con geometrías complejas (ver Figura 12) y diversos tamaños. Estos aspectos son esenciales en términos de diseño de componentes y le otorgan al diseñador la posibilidad de adaptar el proceso a su conveniencia para una aplicación dada. Algunas de estas posibilidades son:

- Combinar un conjunto de partes individuales en una pieza única e integral, lo cual reduce costos en términos de procesos de unión entre las partes (soldadura, abulonado, etc).
- Conseguir fácilmente una terminación superficial atractiva y funcional sin necesidad de un posterior mecanizado (menores costos).
- Existen técnicas particulares que permiten la producción tanto para grandes series de piezas como para producción a pequeña escala.

La factibilidad de aproximarse a la geometría y dimensiones finales lo vuelve una opción muy económica en el caso de que el diseño conlleve a una geometría irregular, lo cual es una de sus grandes ventajas respecto de otros procesos de conformado.

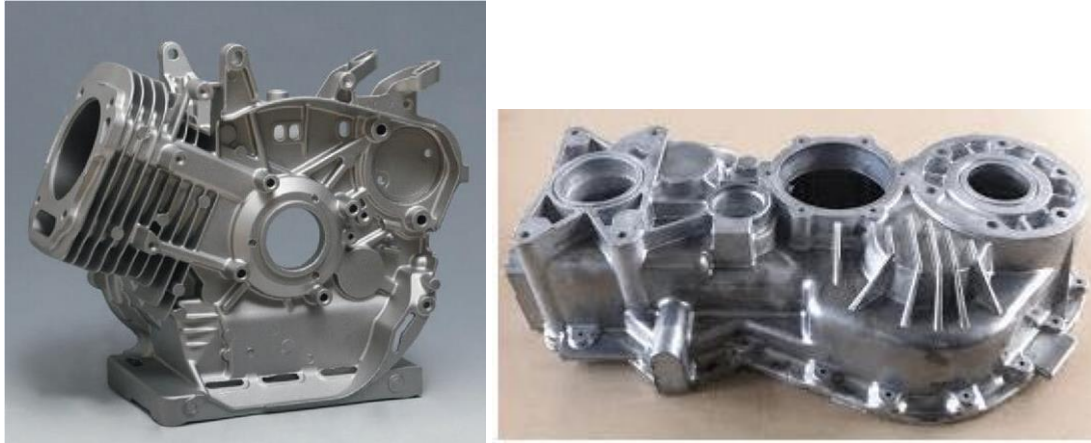


Figura 12. Piezas con geometría compleja obtenidas por fusión y colada.

3.2.4 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES EN LA TECNOLOGÍA DE LA FUNDICIÓN

La utilización de recursos computacionales ha crecido drásticamente en las últimas décadas, desde el diseño de piezas utilizando herramientas *CAD* (Diseño Asistido por Computadora) hasta la simulación de flujos de calor, gradientes de temperatura, distribución de tensiones bajo diferentes sollicitaciones, etc.

En particular, en la tecnología de fusión y colada, es útil su uso en el diseño de los moldes y sistemas de alimentación y de realimentación para evaluar el proceso de llenado de una manera óptima y sin pérdida de material. A través de simulaciones consecutivas se pueden ir refinando aspectos geométricos y eliminando los defectos de colada propios del proceso hasta obtener la calidad de la pieza buscada. En este sentido, se ahorran costos de producción y disminuyen los tiempos de procesamiento. Por ejemplo, *MAGMASOFT* es un *software* comercial muy utilizado para simulaciones en lo que respecta a la tecnología de la fundición, el cual ha sido utilizado en el desarrollo del presente trabajo final.

3.3 MATERIALES CANDIDATOS PARA LA FABRICACIÓN DE LA PIEZA “HUB-EJE LENTO”

Para la fabricación del *hub* con el eje lento en una única pieza se considerarán tres materiales candidatos. Ellos son:

- Acero con composición química apta para obtener una estructura bainítica libre de carburos.
- Aleación de Aluminio 3xx.x (aleaciones aptas para fabricar piezas coladas, aleadas con Si, Cu y Mg).
- Fundición Gris Nodular con composición química apta para obtener una microestructura ausferrítica (Fundiciones ADI-*Austempered Ductile Irons*).

Los motivos principales de la elección de estos materiales se basan en la posibilidad de ser colados y al cumplimiento de los requerimientos mecánicos y estructurales que resultan indispensables para la sustentabilidad de un molino eólico de baja potencia. En efecto, los materiales a utilizar en el proceso de fusión y colada deben poseer la composición química adecuada para que una vez efectuado el mismo, y cuando se realice el posterior tratamiento térmico correspondiente, se obtengan las microestructuras específicas para cada uno de ellos. Por ello, se buscaron materiales capaces de ser colados con elevadas propiedades mecánicas, tratando de disminuir el peso y abaratar los costos de producción con respecto a los materiales tradicionales utilizados para este tipo de dispositivos. A continuación, se describirán sus principales características y propiedades.

3.3.1 ALEACIÓN DE ALUMINIO 3XX.X

El desarrollo y la producción de aluminio y sus aleaciones ha tenido un incremento excepcional desde sus inicios a finales del siglo XIX. Los primeros productos comerciales fueron utensilios de cocina y piezas decorativas fabricados a partir de la técnica de fundición y colada. Rápidamente se extendió su aplicación al campo de la ingeniería, donde el hecho de modificar la composición y condiciones de procesamiento permiten obtener productos con requerimientos específicos.

Su principal inconveniente es que resulta más caro que el acero debido a los costos de refinación desde la materia prima (generalmente a partir de bauxita) hasta obtener aluminio puro, ya que es un proceso durante el cual se consume mucha energía. De todas maneras, esto se compensa por el hecho de que es completamente reciclable, por lo que los usos posteriores a partir de objetos ya utilizados son mucho más económicos.

Es muy utilizado en transporte debido a que posee aproximadamente $\frac{1}{3}$ de la densidad del acero (densidad aluminio = $2,7 \text{ g/cm}^3$), lo cual ahorra peso y consumo energético. Su conductividad eléctrica es muy buena, tiene un valor un poco menor que la del cobre, pero debido a la baja densidad del aluminio, la conductividad específica (conductividad/densidad) es el doble de la del cobre, y el aluminio reemplaza prácticamente al cobre en las líneas de transmisión. Tiene un valor de calor específico muy alto, lo cual significa que para calentar al aluminio hay que gastar más energía que en otros metales (que el cobre, por ejemplo). Tiene un punto de fusión intermedio dentro de la familia de los metales (600°C), mucho menor que el del hierro. Por eso no se lo suele utilizar a más de 200°C . Esto ahorra mucha energía en los procesos posteriores a su obtención. Presenta una baja tensión de fluencia que puede ser aumentada al alear el metal puro o endurecerlo por deformación. También debido a su baja densidad, el aluminio tiene muy buena tensión de fluencia específica. En lo que respecta a ductilidad, presenta un valor alto, lo cual lo hace un buen material para ser mecanizado y deformado en frío. Su módulo de elasticidad es relativamente bajo. Sin embargo, la relación rigidez/peso es buena, lo cual lo hace apto para aplicaciones donde el peso es importante. La dureza es muy baja, pero se puede aumentar mediante tratamientos térmicos, endurecimiento por deformación o al alearlo. Por último, su resistencia a la corrosión es muy buena ya que se forma una película protectora sobre su superficie. Cuanto más puro es el aluminio mayor es la resistencia a la corrosión. Las principales impurezas son el hierro y el silicio [10].

Como se nombró recientemente, el aluminio puede ser aleado para mejorar la tensión de fluencia o la dureza. Algunas de las aleaciones de aluminio solo se endurecen por solución sólida y otras basan su alta resistencia en modificar la microestructura mediante tratamientos de solubilización y envejecimiento para alcanzar relaciones tensión de rotura/densidad que son muy superiores a las de los aceros. La influencia de los elementos aleantes va a depender de su poder endurecedor y de su límite de solubilidad. La solubilidad de los elementos de aleación más comunes se muestra en la Tabla 2.

Alta	Baja
Cu, Mg, Mn, Si, Zn	Cr, Fe, Ti

Tabla 2. Solubilidad de los elementos de aleación más comunes.

Las aleaciones de aluminio se clasifican en aleaciones fundidas (*cast alloys*) y aleaciones forjadas (*wrought alloys*). La delimitación entre las aleaciones de estos dos grupos está determinada por el límite de saturación de la solución sólida a la temperatura eutéctica (Punto a) en la Figura 13.



Figura 13. Clasificación de las aleaciones según el diagrama de fases.

Las aleaciones cuyo contenido de componente es menor que el límite de solubilidad a alta temperatura, poseen la mayor plasticidad y la menor resistencia a alta temperatura, y, por consiguiente, soportan bien el trabajo en caliente por presión. Las aleaciones para colada (o *cast alloy*) (Tabla 4) son aleaciones que se utilizan en la producción de piezas obtenidas por la técnica de fusión y colada. Una de las cosas que se busca en este tipo de aleaciones es que el punto de fusión sea lo más bajo posible para que el procesamiento sea económico. Las aleaciones para forja (*wrought alloys*) son aleaciones que obtienen sus propiedades a través de trabajado termomecánico, por lo que no guardan los patrones característicos de la estructura de solidificación (Tabla 3).

Elementos de aleación	Nomenclatura	Posibilidad de tratamiento térmico	Propiedades
99% de Al	1xxx	No	Alta conductividad eléctrica y térmica. Malas propiedades mecánicas. Buena maquinabilidad. Buena resistencia a la corrosión.
Al-Cu-(Mg)	2xxx	Si	No tienen buena resistencia a la corrosión Propiedades mecánicas similares a las del acero templado
Al-Mn-(Mg)	3xxx	No	Resistencia media
Al-Si	4xxx	No	Baja ductilidad que puede mejorar con la adición de Sr o P
Al-Mg	5xxx	No	Resistencia media-alta Buena resistencia a la corrosión, gracias a la adición de magnesio El magnesio disminuye la densidad de la aleación Buena capacidad de ser soldada Si hay un porcentaje mayor a 3% de Magnesio presenta susceptibilidad a la corrosión. Se utiliza para recipientes de almacenamiento químico y para construir barcos, en general, cascos de lanchas (sumamente liviano).
Al-Mg-Si	6xxx	Si	Menor resistencia que las 2xxx y las 7xxx Buena resistencia a la corrosión
Al-Zn-Mg-(Cu)	7xxx	Si	Alta resistencia Baja resistencia a la corrosión Resistencia moderada a la fatiga Se utiliza en fuselajes de aviones
Otros	8xxx	-	Se utiliza en tapas de botellas de vino (impermeable al O ₂).

Tabla 3. Aleaciones de aluminio forjadas.

Elementos de aleación	Nomenclatura
99% Al	1xx.x
Cu	2xx.x
Si + Cu/Mg	3xx.x
Si	4xx.x
Mg	5xx.x
Zn	7xx.x
Sn	8xx.x
Otros	9xx.x

Tabla 4. Aleaciones coladas.

Las aleaciones de aluminio también se pueden dividir en tratables térmicamente (TT) y no tratables térmicamente (NTT), clasificación que se basa en su diagrama de equilibrio. Las propiedades finales son dadas por tratamiento térmico, por modificación de la composición química para poder aumentar la dureza por solución sólida, o aplicar deformación plástica para tener endurecimiento por deformación. El endurecimiento por solución sólida se debe a la distorsión que produce en la red un átomo de mayor o menor tamaño. Si el soluto es más grande que el solvente va a producir esfuerzos de compresión en los alrededores del átomo. En cambio, si el soluto es más pequeño va a producir esfuerzos de tracción. Sin embargo, ambos producen una distorsión de la red que dificulta el movimiento de las dislocaciones. Cuando los átomos son intersticiales, la probabilidad de tener mucha concentración de soluto es baja porque estos átomos pequeños se ubican en los intersticios de la red. En el caso del aluminio no hay ninguna aleación comercial que tenga solubilidad total. La solubilidad depende de la diferencia entre los radios atómicos de los elementos. El elemento que se usa con mayor frecuencia como endurecedor es el que tiene mayor diferencia de radio con la matriz (para distorsionar más la red) y mayor solubilidad (mejor combinación posible). Si el desarreglo es grande pero la solubilidad es baja el efecto será limitado.

3.3.1.1 TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los tratamientos térmicos se basan en la variación de la solubilidad y en el posterior envejecimiento. Existen 9 tratamientos, los cuales se nombran a continuación y se esquematizan en la Figura 14:

T1: calentamiento hasta temperaturas elevadas, donde ocurre el proceso de conformado, y luego disminución brusca de la temperatura. Ocurre un envejecimiento natural hasta la condición de estado estacionario. Es el tratamiento más barato que existe y es aplicable a aleaciones que tengan elementos de aleación con una movilidad suficiente como para que puedan difundir aún a temperatura ambiente (no es fija por lo que es probable que estas aleaciones tienen una cierta dispersión de propiedades porque dependen mucho de la temperatura).

T2: calentamiento hasta temperaturas elevadas, donde ocurre el proceso de conformado, y luego una disminución brusca de la temperatura para continuar con deformado en frío. Se da el envejecimiento natural. La deformación en frío entre el tratamiento de solubilización y el tratamiento de envejecimiento se realiza para aumentar la resistencia.

T3: calentamiento hasta temperaturas elevadas (solubilización) y enfriamiento para realizar trabajado en frío. Envejecimiento natural con deformación.

T4: calentamiento hasta altas temperaturas y luego enfriamiento. Envejecimiento natural sin deformación.

T5: calentamiento hasta temperaturas elevadas, donde se realiza el conformado, y luego enfriamiento rápido. Recocido. Envejecimiento artificial.

T6: calentamiento hasta temperaturas elevadas y luego enfriamiento rápido. Posterior recocido.

T7: calentamiento hasta temperaturas elevadas y luego enfriamiento rápido. Recocido a temperaturas muy elevadas.

T8: calentamiento hasta temperaturas elevadas y luego enfriamiento rápido para realizar trabajado en frío. Recocido.

T9: calentamiento hasta temperaturas elevadas y luego enfriamiento rápido. Posterior recocido para realizar trabajo en frío.

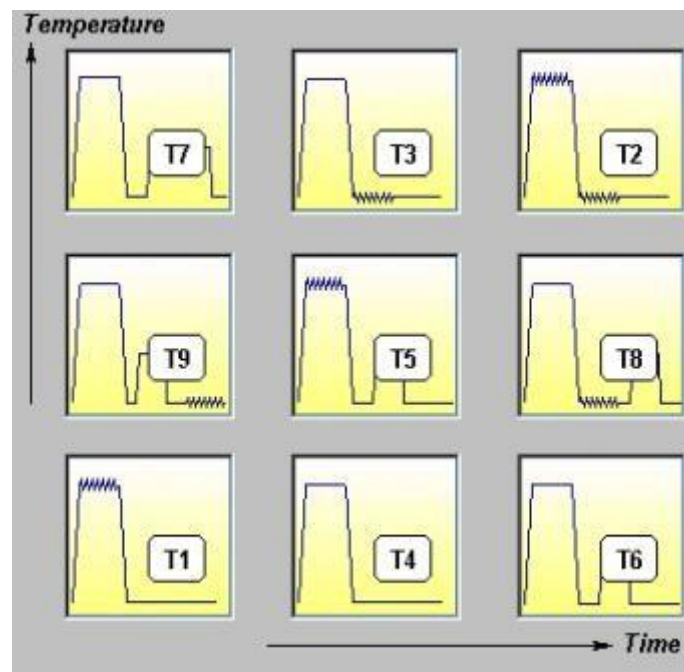


Figura 14. Tratamientos térmicos.

3.3.1.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA TÍPICA DE ALEACIÓN DE ALUMINIO PARA FORJA UTILIZADA EN HUBS

La aleación de aluminio comúnmente utilizada en la fabricación de los *hubs* en molinos eólicos es la aleación 6061-T6, la cual es una aleación para forja endurecida por precipitación [15]. Los elementos de aleación en mayor proporción son el Magnesio (Mg) y el Silicio (Si) y su composición se puede ver en la Tabla 6. Estas aleaciones presentan una tensión de rotura de 310 MPa aproximadamente, con una tensión de fluencia en el rango de los 210-220 MPa.

Aluminium alloy 6061 T6	
Mg	0.937
Si	0.535
Fe	0.139
Ti	0.012
Mn	0.022
Zn	0.0983
Cr	0.022
Ni	0.005
Al	98.096

Tabla 5. Composición química de aleación de aluminio típica usada para la fabricación de *hubs* [15].

3.3.1.3 ALEACIÓN DE ALUMINIO PARA COLADA PROPUESTA PARA LA FABRICACIÓN DE "HUB-EJE LENTO": ALEACIÓN DE LA SERIE 3XX.X

Las aleaciones de aluminio de la serie 3xx.x son aleaciones aluminio-silicio aptas para ser coladas. Presentan excelentes atributos en términos de propiedades mecánicas (aunque algo menores con respecto a las aleaciones para forja), resistencia a la corrosión, maquinabilidad y soldabilidad.

En la Tabla 6 se pueden ver valores de tensión de rotura, tensión de fluencia y elongación para la aleación A356.0 (la más utilizada dentro de la serie 3xx.x) para coladas en molde de arena, en condición de líquido y luego del tratamiento térmico T6 (explicado en la sección 3.3.1.1) [10].

Proceso de colada	Condición	Tensión de rotura (Mpa)	Tensión de fluencia (Mpa)	Elongación (%)
Molde de arena	Líquido	130	50	5
Molde de arena	T6	234	166	3.5

Tabla 6. Propiedades mecánicas aleación A356.0

Las composiciones típicas de este tipo de aleaciones para moldes de arena se pueden observar en la Tabla 7 [10].

Aleación	Cu (%)	Mg (%)	Mn (%)	Si (%)	Otros (%)
355.0	1.20	0.50	0.50	5.0	0.15Ti
A356.0	-	0.35	0.35	7.0	-
A357.0	-	0.60	0.03	7.0	0.15Ti,0.04Be

Tabla 7. Composiciones típicas de aleaciones de aluminio aptas para ser coladas.

3.3.2 FUNDICIONES Y ACEROS

Las aleaciones Hierro- Carbono son las más importantes a nivel industrial debido principalmente a sus costos relativamente bajos y elevadas propiedades mecánicas, dando excelentes cualidades como resistencia al desgaste y alta durabilidad.

Bajo un análisis termodinámico la solidificación puede ocurrir de acuerdo al diagrama Fe-C estable o metaestable. El diagrama Fe-C metaestable (con líneas punteadas) y el diagrama Fe-C estable (con líneas llenas) se muestran en la Figura 15.

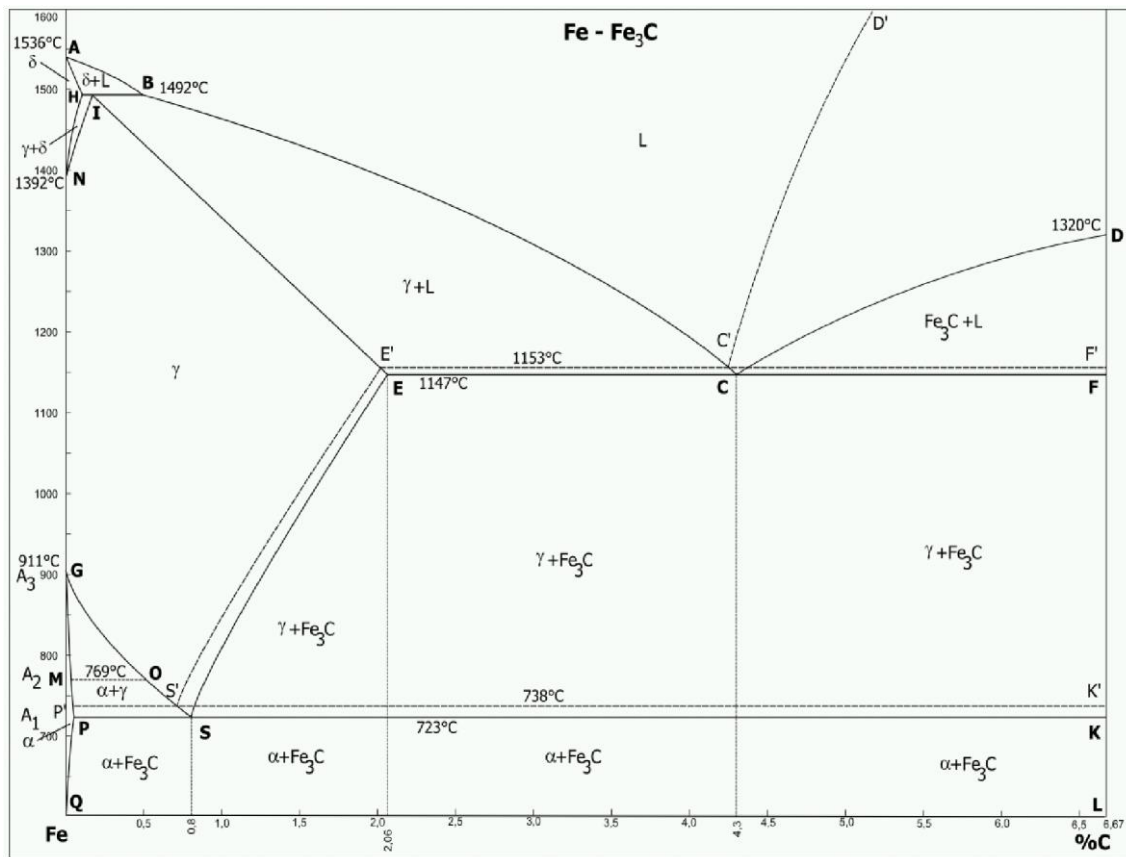


Figura 15. Esquema del diagrama de fases Fe-C estable: — metaestable: - - - - -.

Este diagrama no es un diagrama completo puesto que está trazado hasta concentraciones de 6.67% C, la composición del compuesto intermetálico denominado cementita Fe_3C . La parte del diagrama conteniendo más del 6.67% C tiene poca importancia tecnológica y usualmente es ignorada. En este diagrama Fe- Fe_3C se observa que hay tres reacciones invariantes: una reacción peritética ($\delta + L = \gamma$), otra eutéctica ($L = \gamma + Fe_3C$) y una eutectoide ($\gamma = \alpha + Fe_3C$).

La solubilidad máxima de carbono en la austenita es de 2.06% C. Este límite marca la división entre aceros y fundiciones. Los aceros presentan contenidos de carbono menores a este valor y las fundiciones presentan contenidos de carbono mayores al mismo. La composición del punto eutectoide es 0.8% C por lo que los aceros de esta composición son llamados eutectoides. Los aceros de menor composición a 0.8% C son llamados hipoeutectoides y los de mayor, hipereutectoides.

Las fundiciones son todas aquellas que durante un enfriamiento desde su estado líquido experimentan una transformación eutéctica (punto C en la Figura 15). Las fundiciones que siguen el diagrama metaestable son llamadas fundiciones blancas. Estas se denominan así por el aspecto blanco mate de su superficie de fractura. Análogamente a los aceros, existen fundiciones blancas eutécticas, hipereutécticas e hipoeutécticas. Las eutécticas corresponden a aleaciones con un contenido de carbono de 4.3%, las que contienen porcentajes de C menores a este valor son hipoeutécticas, y las que se encuentran por encima de dicho valor se llaman hipereutécticas. Estas se obtienen a partir del diagrama metaestable (líneas punteadas en el gráfico), ya que, por cuestiones cinéticas, son las que se obtienen espontáneamente.

El diagrama estable (con líneas continuas) de Fe-C muestra el equilibrio entre el Fe puro y el C puro en forma de grafito. Las fundiciones que siguen el diagrama estable se conocen como fundiciones grises. Si bien estas estructuras tienen menor energía libre, son difíciles de alcanzar

por cuestiones cinéticas y para obtenerlas se debe agregar algún elemento de aleación (habitualmente silicio) al sistema en ciertas cantidades y/o enfriar a velocidades bajas. Nuevamente, se pueden obtener fundiciones grises eutécticas, hipereutécticas e hipoeutécticas.

3.3.2.1 SOLIDIFICACIÓN DE LAS FUNDICIONES DE HIERRO

La solidificación puede ocurrir siguiendo el diagrama metaestable Fe-Cm, en cuyo caso el eutéctico que se forma será austenita + cementita (ledeburita) y el material resultante será una “fundición blanca” (Figura 16). Para el caso de que la solidificación ocurra de acuerdo al diagrama estable, el eutéctico que se forma será austenita-grafito, dando lugar a las denominadas “fundiciones con grafito libre”.

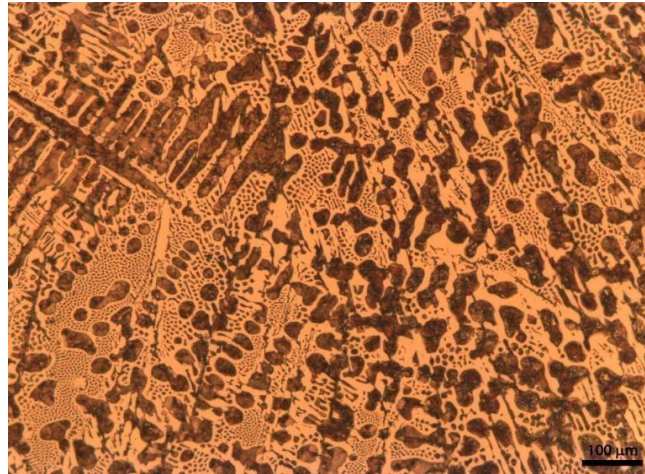


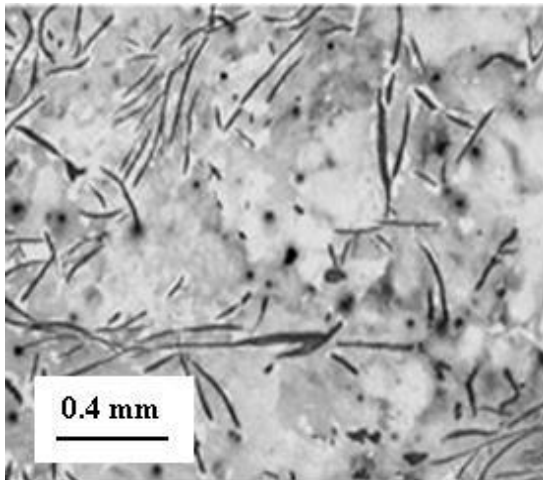
Figura 16. Micrografía de una Fundición blanca hipoeutéctica.

Además, la solidificación puede ocurrir en parte a través del diagrama de equilibrio estable y en parte a través del diagrama metaestable, lo que da lugar a las denominadas “fundiciones atruchadas”. Las mismas corresponden a un híbrido entre las fundiciones blancas y las fundiciones grises por lo que el carbono estará presente tanto en cementita (Fe_3C) como en grafito (carbono libre).

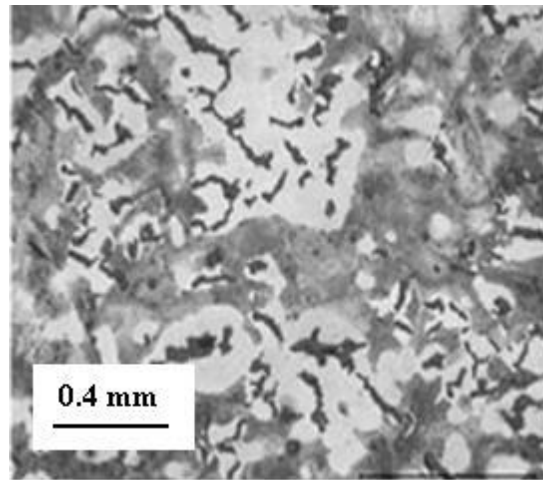
Como se dijo anteriormente, el agregado de silicio a la composición es crucial para la obtención de fundiciones grises, ya que tiene la función de alejar las temperaturas de transformación eutéctica y eutectoide estables de las metaestables, dándole una ventaja cinética al sistema. De esta forma, al llegar a la temperatura eutéctica, el grafito, que requiere mucha mayor difusión de carbono que la cementita para formarse, tiene tiempo de nuclear y crecer. Este fenómeno puede darse cuando la solidificación ocurre en un rango de temperaturas existente entre las temperaturas de transformación estable y metaestable, generado por la presencia del silicio.

Las fundiciones grises se caracterizan por tener el grafito inmerso en una matriz metálica, la cual puede ser ferrítica, ferrítico-perlítica o perlítica. La naturaleza de la matriz dependerá de la velocidad de enfriamiento al pasar por el rango de la temperatura eutectoide y de la cantidad de silicio. Para bajas velocidades de enfriamiento se obtienen matrices ferríticas y a altas velocidades de enfriamiento matrices perlíticas.

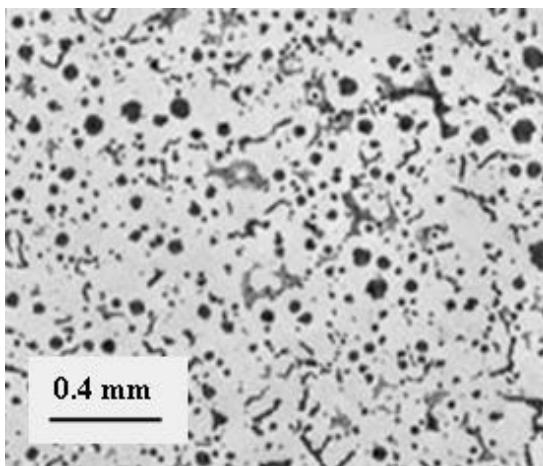
Según la morfología del grafito libre se pueden distinguir distintos tipos de fundiciones de hierro de gran interés industrial, tales como fundiciones grises laminares (con grafito laminar), fundiciones esferoidales o nodulares (con grafito esferoidal) y fundiciones vermiculares (con grafito en forma de “vermes” o “gusanos”) [16]. Estos tipos de fundiciones se muestran en la Figura 17. Cabe mencionar la existencia de las fundiciones maleables las cuales son obtenidas durante un tratamiento térmico de recocido sobre fundiciones blancas, donde el grafito presenta una morfología denominada floccular.



Grafito Laminar



Grafito Vermicular



Grafito Esferoidal o Nodular

Figura 17. Distintas morfologías del grafito en fundiciones de hierro.

3.3.2.2 PROPIEDADES DE LAS FUNDICIONES DE HIERRO

La presencia de cementita en la microestructura de las fundiciones blancas favorece a que las mismas tengan una elevada resistencia al desgaste y dureza, pero, al mismo tiempo, las hacen extremadamente frágiles, careciendo de deformación plástica.

Por otro lado, parámetros microestructurales como la naturaleza de la matriz y la cantidad, morfología y distribución del grafito presente en las fundiciones grises influyen sobre las propiedades mecánicas de este tipo de fundiciones. Esto es así debido a que dichas propiedades del grafito son mucho menores con respecto a la de la matriz de la fundición, por lo que se puede considerar al mismo como un defecto o grieta en el sólido.

Dentro de las fundiciones grises, las laminares son las que poseen las menores propiedades mecánicas ya que, el grafito, al estar presente con una morfología laminar, actúa como entallas o grietas agudas dando lugar a elevados concentradores de tensiones, reflejando valores muy pobres a lo que ductilidad y tenacidad se refiere. De todos modos, las láminas de grafito pequeñas y homogéneamente distribuidas resultan menos perjudiciales. Por otro lado, las fundiciones grises laminares tienen importantes propiedades físicas, tales como una alta conductividad térmica, además de buena colabilidad, excelente maquinabilidad y una buena capacidad para absorber vibraciones (“damping capacity”). Este tipo de fundiciones tienen una

tensión de rotura que oscila entre 150 y 450 MPa, dependiendo de su microestructura. Son muy usadas en partes de motores de combustión interna.

Por su parte, en las fundiciones esferoidales (FE), como su nombre lo indica, el grafito se encuentra presente en forma de nódulos o esferoides gracias al agregado de elementos nodulizantes como el Magnesio (Mg). Esto conlleva a que el efecto de concentrador de tensiones que ejerce el grafito sobre la matriz metálica se vea drásticamente disminuido obteniéndose valores de tensión de rotura entre 700 y 900 MPa, comparables a los de aceros de alta resistencia.

Las fundiciones vermiculares presentan propiedades mecánicas intermedias entre las fundiciones grises laminares y las fundiciones grises esferoidales. Para obtenerlas es necesario, nuevamente, el agregado de elementos nodulizantes como el Magnesio (Mg), pero en menor cantidad que en las FE. De este modo las tensiones de rotura oscilan entre 300 y 700 MPa. Además, poseen buena ductilidad y propiedades térmicas lo que da lugar a una elevada resistencia a la fatiga térmica. Algunas aplicaciones son en lingoteras para acerías, campanas y discos de freno.

3.3.2.2.1 FUNDICIONES GRISES ESFEROIDALES

Las fundiciones grises con grafito esferoidal son las de mayor interés industrial hoy en día, debido principalmente a que presentan un excelente balance entre resistencia mecánica, dureza, ductilidad y tenacidad a la fractura. El principal enfoque de su desarrollo e investigación fue la obtención de propiedades mecánicas iguales o superiores a las de las fundiciones maleables, pero sin tener que sobrellevar un largo y costoso tratamiento térmico. Incluso, en ciertas aplicaciones, pueden competir contra los aceros.

El desempeño mecánico de las FE con bajo contenido de grafito, depende principalmente de las características de la matriz, la cual puede ser ferrítica o perlítica, o una mezcla de ambas, dependiendo de parámetros como la velocidad de enfriamiento y la composición química. De todas maneras, la matriz puede ser modificada a través de la aplicación de un tratamiento térmico, y ajustar las propiedades mecánicas como resulte conveniente. Los tratamientos térmicos más utilizados son el normalizado, el ferritizado, el temple y revenido, y el austemperizado. Se profundizará sobre este último, ya que es el que permite obtener la microestructura característica de las fundiciones esferoidales ADI, las cuales poseen una excelente combinación de propiedades mecánicas.

3.3.2.2.1.1 FUNDICIONES ESFEROIDALES ADI

Las fundiciones esferoidales ADI se obtienen gracias al proceso de fusión y colada seguido de un tratamiento térmico de austemperizado. El tratamiento térmico consta de tres partes:

Austenización: calentamiento y mantenimiento a aproximadamente 900°C durante un tiempo suficiente según el tamaño de la pieza (varía entre 2 y 4 horas), obteniendo austenita con un contenido de carbono controlado y homogéneo.

Temple: enfriamiento rápido (con el objetivo de evitar transformaciones ferrítico-perlíticas que ocurren en el rango de 550 y 700°C) hasta la temperatura de austemperizado.

Austemperizado: período isotérmico comprendido en el rango de temperaturas de 220-400 °C para que la austenita se transforme en ausferrita. La ausferrita consiste en una mezcla de ferrita acicular inmersa en austenita retenida, enriquecida en carbono. La etapa de formación de ausferrita comienza con la nucleación de ferrita en los bordes de los granos austeníticos y crece hacia el centro de los mismos reyectando carbono hacia la austenita circundante, la cual puede alcanzar hasta un 2% de carbono. Una vez que se alcanza la concentración máxima de solubilidad

de carbono en la austenita para esa temperatura de austemperizado, se inhibe el crecimiento de la ferrita. Una vez completa la transformación, la fundición se enfría normalmente al aire hasta temperatura ambiente. Es importante tener en cuenta que, si el tiempo de la transformación no es controlado y resulta prolongado, la austenita enriquecida en carbono se descompondrá en ferrita y carburos (bainita), los cuales son productos indeseados para la microestructura buscada (Figura 18) [17].

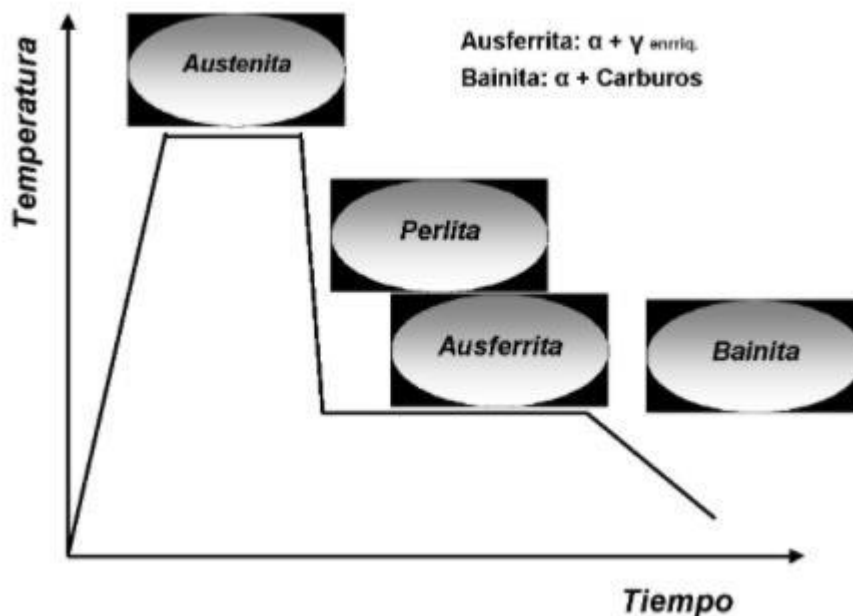


Figura 18. Tratamiento térmico de Austemperizado.

La austenización se puede lograr mediante el uso de muflas eléctricas. El austemperado se lleva a cabo más típicamente en un baño de sales fundidas de nitrito/nitrato, pero en casos especiales se puede lograr en aceite caliente [17].

La austenita retenida que forma la ausferrita podrá estar en dos configuraciones: como austenita enriquecida o “reactada”, o como austenita “no reactada”.

La austenita enriquecida es aquella buscada y desarrollada durante la formación de ausferrita durante el inicio del mantenimiento isotérmico en la temperatura de austemperizado y la austenita “no reactada” es austenita retenida, la cual se transformará, total o parcialmente, en martensita durante el enfriamiento hasta la temperatura ambiente. Esta austenita deteriora las propiedades mecánicas, y, por lo tanto, no es deseada.

3.3.2.2.1.1 PROPIEDADES MECÁNICAS FUNDICIONES ADI

Las fundiciones ADI presentan una amplia versatilidad a lo que propiedades mecánicas se refiere, ya que pueden variar en un rango extenso según la elección de temperaturas y tiempos involucrados en el tratamiento térmico. La Figura 19-A ilustra la correlación entre la temperatura de austemperizado y la tensión de fluencia, mientras que la Figura 19-B muestra la correlación de la temperatura de austemperizado con la elongación a la rotura. Una alta temperatura de austemperizado (alrededor de 400°C o 750F), produce ADI con alta ductilidad, y buena resistencia a la fatiga y al impacto. Una temperatura de transformación más baja (en torno a los 260°C o 500F), da como resultado una ADI con un límite elástico muy alto, alta dureza, excelente resistencia al desgaste y resistencia a la fatiga de contacto por rodadura. Por lo tanto, mediante un control relativamente simple de las condiciones del tratamiento térmico, se puede modificar

la microestructura de las ADI, dando lugar a una gama de propiedades mecánicas comparables a la de aceros de alta resistencia y tenacidad.

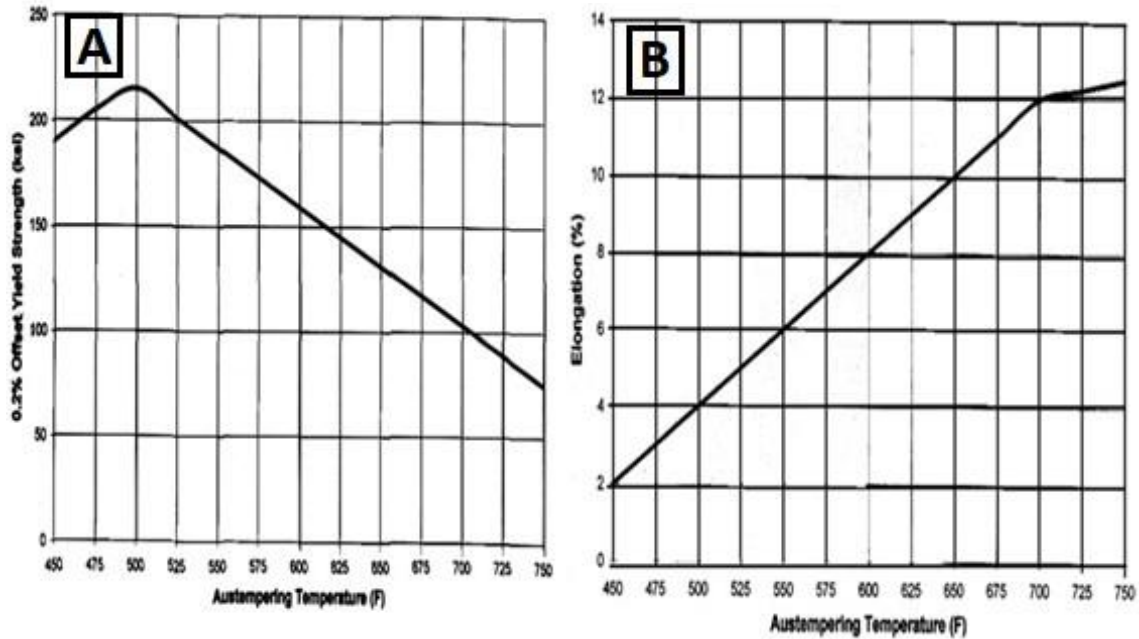


Figura 19.A- Tensión de fluencia vs Temperatura de austemperizado. B- Elongación a la rotura vs Temperatura de Austemperizado.

Según la norma ASTM A 897M las propiedades mecánicas de las fundiciones ADI se pueden dividir en seis grados. Las propiedades de estos diversos tipos se muestran en la Tabla 8.

ASTM	σ_{rot}	$\sigma_{0.2}$	δ	dureza	Energía absorbida ¹⁾
A897M-06	[MPa]	[MPa]	[%]	[HB]	[J]
750-500-11	750	500	11	241-302	110
900-650-09	900	650	9	269 - 341	100
1050-750-07	1050	750	7	302 - 375	80
1200-850-04	1200	850	4	341 - 444	60
1400-1100-02	1400	1100	2	388 - 477	35
1600-1300-01	1600	1300	1	402 - 512	20

¹⁾ probetas de Charpy, no entallada, temperatura ambiente

Tabla 8. Propiedades mecánicas de las fundiciones ADI según norma ASTM A 897M-06.

Las ADI de baja temperatura pueden alcanzar valores de tensión de rotura y dureza muy altos, pero reflejando, a su vez, tenacidades a la fractura muy bajas. Por esta última razón, no son muy aplicados en la industria, exceptuando casos donde se requiera una alta resistencia al desgaste. En su contraparte, las ADI de alta temperatura con valores de tensión de rotura menor a 1200 MPa presentan valores de tenacidad y ductilidad aptos para diversas aplicaciones industriales, como en ejes bridados, soportes de suspensión, cigüeñales, etc [18].

3.3.2.2.1.1.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS FUNDICIONES ADI

En cuanto a las composiciones químicas de las fundiciones esferoidales ADI típicamente se utilizan los rangos de elementos de aleación mostrados en la Tabla 9.

%C	% Si	% Mn	% S	% P	% Mg	% Cu	% Ni
3.19-3.4	2.3-3.21	0.2-0.8	0.02- 0.047	0.02- 0.04	0.04- 0.082	0.09- 0.99	0.1-0.87

Tabla 9. Rango de elementos de aleación utilizados en fundiciones ADI coladas [18].

De esta manera, el porcentaje de carbono equivalente (% C. E), el cual se calcula como $(\% C. E = \% C + 1/3\% Si)$ da un rango entre 3.95% y 4.3%. Un valor de 4.3% de carbono equivalente indica que la fundición se comporta como si tuviese una composición eutéctica.

3.3.2.2.1.1.3 EFECTO DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN

A la hora de seleccionar la composición para una fundición ADI es importante tener en cuenta, en primera instancia, los elementos que afecten negativamente a la calidad de la fundición mediante la producción de grafito no esferoidal. La segunda consideración es el control de carburos, silicio y los principales elementos de aleación que controlan la templabilidad de la fundición y las propiedades de la microestructura obtenida [18].

Carbono: El aumento de carbono dentro del rango informado aumenta la resistencia mecánica, pero disminuye el alargamiento. Su contenido debería estar controlado entre 3.19 y 3.4%, excepto que tenga que ser alterado para lograr una colada libre de defectos.

Silicio: Como se dijo anteriormente, el silicio es indispensable en las fundiciones nodulares ya que promueve la formación de grafito. Disminuir su contenido incrementa la resistencia al impacto y disminuye la temperatura de transición dúctil-frágil.

Manganeso: Tiene efectos positivos y negativos en la producción de fundiciones ADI. Su incorporación incrementa la dureza, ya que favorece la formación de carburos e incrementa la templabilidad, lo que evita la formación de fases de alta temperatura durante el temple, pero retarda la etapa de austemperizado.

Cobre: Se suele agregar hasta 0.8-1% en las fundiciones ADI para incrementar su templabilidad. No genera aumentos significativos en las propiedades mecánicas, pero sí aumenta la ductilidad para temperaturas de austemperizado menores a 350° C.

Níquel: Se suele agregar hasta 1% en las fundiciones ADI para incrementar también su templabilidad. Para temperaturas de austemperizado menores a 350° C reduce ligeramente la resistencia mecánica, pero incrementa la ductilidad y la tenacidad a la fractura.

3.3.2.3 USO DE FUNDICIONES NODULARES EN LA FABRICACIÓN DE HUBS

Las fundiciones nodulares ferríticas son muy utilizadas en la fabricación de *hubs* en molinos eólicos de alta potencia debido a su capacidad de cumplir con los requerimientos mecánicos necesarios. Ofrecen un 10% de reducción de peso en comparación con los aceros. Presentan tensiones de rotura de aproximadamente 400 Mpa. Se caracterizan por una alta ductilidad ($\approx 18\%$ de elongación) y tenacidad [19].

La composición química típica de las fundiciones nodulares ferríticas en la fabricación de *hubs* varía en los siguientes rangos: C (3.3-3.5%), S (0.008-0.012%), Si (1.9-2.2%), P (0.03%), Mn (0.15%) y Mg (0.04%).

Las características microestructurales de este tipo de fundiciones podrían ser logradas directamente en el proceso de colada, evitando costosos tratamientos térmicos, a partir de ajustes en la composición química y en los parámetros del proceso.

Por su parte, las fundiciones nodulares ADI podrían tener un potencial de desempeño aun mayor que las fundiciones nodulares ferríticas, debido a sus superiores propiedades mecánicas, principalmente mayor tensión de fluencia y resistencia a la fatiga para valores similares de ductilidad y tenacidad que las fundiciones nodulares ferríticas. Esto permitiría diseñar piezas de menor sección y por lo tanto de menor peso. Por ese motivo, las fundiciones nodulares ADI son uno de los materiales elegidos como candidatos en este trabajo final.

3.3.2.4 ACEROS DE ULTRA ALTA RESISTENCIA

Como se observa en la Figura 20, los aceros se pueden clasificar según su grado de resistencia mecánica, en aceros de baja resistencia (*Low Strength*), alta resistencia (*High Strength*) y ultra alta resistencia (*Ultra High Strength*).

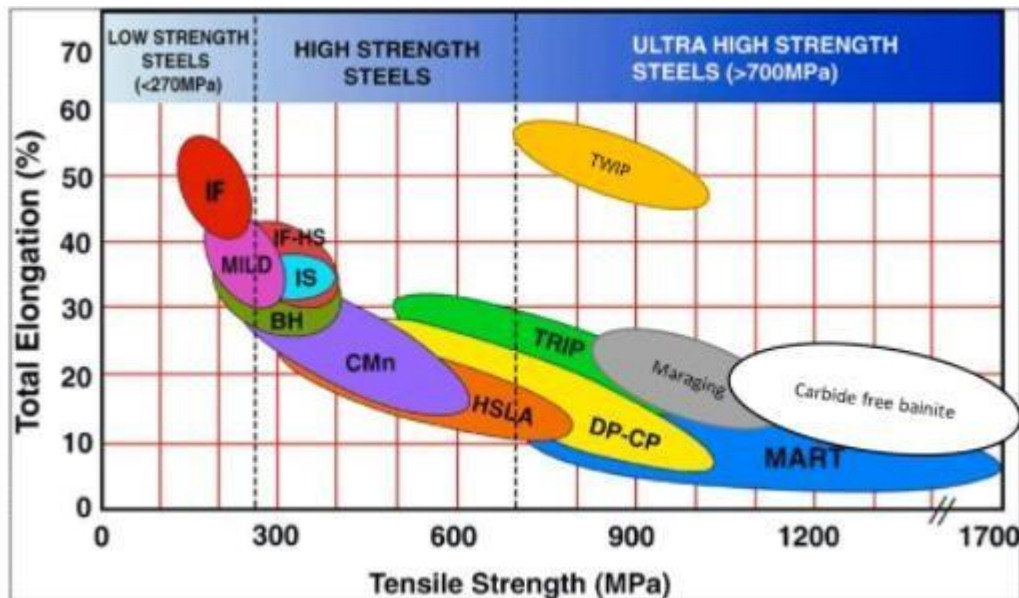


Figura 20. Clasificación de aceros y propiedades mecánicas.

En comparación a los aceros convencionales, los aceros UHS (de la sigla en inglés) pueden alcanzar tensiones de rotura mayores a 700 Mpa sin comprometer la ductilidad y tenacidad a la fractura, lo cual permite la reducción de espesores y costos de producción en componentes sometidos a solicitaciones mecánicas. Deben sus elevadas resistencias mecánicas a la presencia de una microestructura muy fina formada por constituyentes como ferrita, martensita, bainita y austenita retenida en cantidades variadas. Dentro de este grupo se encuentran: Aceros Martensíticos, *Dual Phase*, Aceros Microaleados, Aceros TRIP, Aceros *Maraging*, Aceros con Bainita libre de Carburos y Aceros TWIP. Las mayores resistencias mecánicas son alcanzadas por los Aceros Martensíticos y los Aceros Baíniticos libres de Carburos, y la mayor elongación a la rotura por los Aceros TWIP.

3.3.2.4.1 ACEROS MARAGING

Los Aceros *Maraging* son un tipo de acero de ultra alta resistencia, pero esta propiedad no deriva del contenido de carbono (su contenido es muy bajo, alrededor de 0.03%), sino de la precipitación de compuestos intermetálicos, debido a la presencia elementos de aleación: 17-19% Ni, 7-9% Co, 4.5-5% Mo y 0.6-0.9% Ti en la composición química. El endurecimiento por precipitación se logra templando la aleación desde la temperatura de austenización para obtener una microestructura martensítica para luego revenirla a 480-500°C un lapso de tiempo conveniente. El revenido favorece la formación de precipitados intermetálicos ya que la martensita se encuentra sobresaturada en elementos de aleación.

3.3.2.4.2 ACEROS MICROALEADOS

Los Aceros Microaleados (HSLA por *High Strength Low Alloy*) son aceros de bajo carbono con muy bajo contenido de elementos de aleación como Ti, Nb, V que son conformados a partir de un tratamiento termomecánico. La función de estos microaleantes es formar carburos muy finos y dispersos en una microestructura ferrítica. Estos precipitan durante el tratamiento termomecánico a temperaturas alrededor de 900°C contribuyendo a un endurecimiento por precipitación. A su vez, los precipitados restringen el crecimiento de los granos austeníticos, por lo cual contribuyen también a un aumento de resistencia y tenacidad por refinamiento de grano.

3.3.2.4.3 ACEROS DUAL PHASE

Los Aceros *Dual Phase* son aceros hipoeutectoides de bajo contenido de carbono que presentan una microestructura de matriz ferrítica con una fracción variable de martensita. La ferrita le otorga elevada ductilidad a este tipo de aceros mientras que la martensita aporta alta dureza y resistencia mecánica. Se obtienen a partir de un tratamiento térmico de austenizado intercrítico (en el campo bifásico ferrita/austenita que muestra el diagrama Fe-C comprendido entre las temperaturas A1 y A3)) seguido de un temple, donde la austenita se transforma en martensita (ver Figura 21). Además, pueden contener pequeños porcentajes de bainita y austenita retenida. Estos aceros presentan buena soldabilidad, mejor relación resistencia/alargamiento y mayor resistencia a la fatiga con respecto a los aceros convencionales.

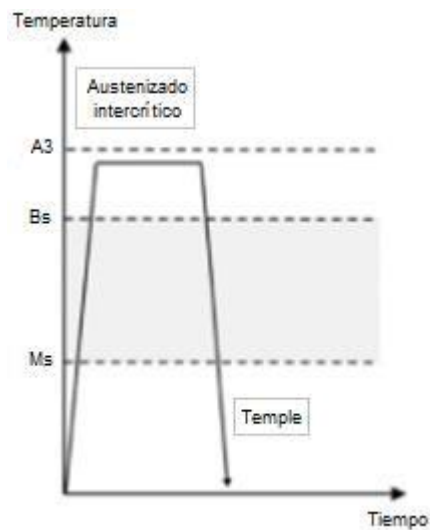


Figura 21. Tratamiento térmico para obtener Aceros DP.

3.3.2.4.4 ACEROS TRIP (*Transformation-Induced Plasticity*)

En general, tienen alto contenido de aleantes (típicamente, 0.3%C, 8%Cr, 7-24%Ni, 4%Mo, 2%Si). En relación a su microestructura, presentan una matriz ferrítica con islas de bainita y alrededor de un 5% de austenita retenida. Esta austenita retenida da lugar al efecto TRIP, la cual se transforma en martensita cuando se somete al material a una deformación (endurecimiento por deformación). Para su obtención, al igual que en los Aceros Dual Phase, se someten a un austenizado intercrítico, pero luego, en vez de temprar, se realiza un austemperizado para obtener bainita libre de carburos. Estos aceros se desarrollaron para aumentar la capacidad de absorción de energía en el impacto.

Presenta altos valores de ductilidad y formabilidad, alto límite de fatiga y elevada tenacidad a la fractura. De esta manera, los aceros TRIP son excelentes para piezas automotrices que requieren un alto endurecimiento durante la deformación por choque y grandes cantidades de absorción de energía.

3.3.2.4.5 ACEROS BAINÍTICOS

3.3.2.4.5.1 ACEROS BAINÍTICOS CONVENCIONALES

El acero es el material más conocido utilizado en la industria por su versatilidad en cuanto a la posibilidad de modificar los distintos aspectos de procesamiento y composición química, los cuales repercuten directamente sobre la microestructura obtenida, y, por ende, en las propiedades mecánicas del acero obtenido. Además, se destacan por su bajo costo relativo frente a otros productos metalúrgicos.

Los aceros bainíticos se han destacado con excelentes combinaciones de resistencia mecánica y ductilidad frente a aceros martensíticos revenidos (elevada resistencia mecánica y dureza, pero con menores valores de tenacidad).

En los aceros bainíticos convencionales, se forman las subunidades ferríticas en los bordes de grano austeníticos, y se reyecta el carbono en exceso hacia la austenita circundante y finaliza cuando la concentración en carbono de la misma llega a la composición dada por la línea T_0 (Figura 22). La misma marca que la austenita enriquecida en carbono y la ferrita tienen la misma energía libre y por lo tanto no hay fuerza impulsora para que continúe la transformación de austenita en ferrita.

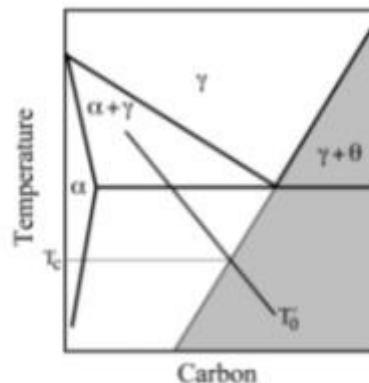


Figura 22. Condición termodinámica para que la cementita precipite desde la austenita.

Luego, se produce la precipitación de cementita. Es importante destacar que su distribución y tamaño depende de la velocidad de enfriamiento y permite la distinción entre bainita superior y bainita inferior. En la bainita superior la velocidad de enfriamiento es menor que en el caso de obtención de bainita inferior, lo que permite una mayor difusión del carbono y las subunidades de ferrita se encuentran rodeadas por láminas de cementita. Por otro lado, en la bainita inferior, como la velocidad de enfriamiento es más severa, la difusión del carbono es más limitada, lo que hace que la cementita precipite también como partículas muy finas y dispersas dentro de las subunidades ferríticas. La obtención de microestructuras con precipitados más finos y dispersos de cementita mejoran notablemente propiedades como la resistencia mecánica y dureza de estos aceros, pero con menores valores de ductilidad y tenacidad a la fractura respecto a la bainita obtenida a mayores temperaturas. De todas maneras, la ductilidad y tenacidad pueden ser mejoradas modificando la composición química de estos aceros, como se verá más adelante, en los aceros bainíticos libres de carburos.

3.3.2.4.5.2 ACEROS BAINÍTICOS LIBRES DE CARBUROS

La presencia de cementita (fase muy dura y frágil) entre las subunidades de ferrita en los aceros bainíticos convencionales reduce notablemente su ductilidad y tenacidad a la fractura. De aquí surge la importancia del silicio como elemento de aleación, el cual cumple un rol clave, ya que inhibe la precipitación de cementita, dando lugar a aceros bainíticos libres de carburos

(cementita) con propiedades mecánicas optimizadas. El agregado de silicio en la composición química ronda entre un 1.5 y un 3%.

Como se mencionó recientemente, en los aceros bainíticos libres de carburos el silicio aporta un efecto inhibitor de carburos, lo que genera un enriquecimiento en carbono de la austenita circundante a medida que avanza la transformación. Cuanto mayor es el contenido de carbono en la austenita menor es la temperatura de inicio de transformación martensítica (M_s) por lo que resulta muy posible encontrar austenita retenida en la microestructura final a temperatura ambiente. Esta microestructura le otorga al material excelentes propiedades de resistencia mecánica, ductilidad y tenacidad simultáneamente, en comparación con los aceros bainíticos convencionales [20].

Estos aceros se obtienen a partir de un tratamiento térmico de austemperizado similar a las fundiciones *ADI*. Esta microestructura puede ser obtenida en aceros poco aleados, el único requerimiento es que el contenido de silicio sea suficiente para inhibir la precipitación de carburos durante la transformación bainítica.

3.3.2.4.5.3 EFECTO DE LOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN

Sin dejar de lado la importancia de la presencia de silicio en la composición química de cualquier acero a la hora de obtener un acero bainítico libre de carburos, se pueden alea con otros elementos con el fin de mejorar la templabilidad, propiedades mecánicas y aspectos cinéticos con respecto a la transformación bainítica.

- Los elementos como Mn, Cr, Ni, Mo, producen un corrimiento de las curvas TTT o también llamadas curvas de la “C” hacia mayores tiempos, permitiendo obtener estructuras bainíticas y martensíticas para un rango mucho mayor de velocidades de enfriamiento, mejorando la templabilidad del material.
- Los elementos como Co, Al, tienen un efecto opuesto: desplazan las curvas TTT hacia tiempos menores, disminuyendo la templabilidad y favoreciendo la formación de microestructuras de alta temperatura como las ferríticas o perlíticas.

3.3.2.4.5.4 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS BAINÍTICOS LIBRES DE CARBUROS

Típicamente, en las composiciones de aceros bainíticos libres de carburos se utilizan los rangos de elementos de aleación que se muestran en la Tabla 10.

%C	% Si	% Mn	% Cr	% Ni	% Mo	% Cu
0.4-1	2-3.5	0.4-1.0	0-1	0.2-1	0-0.3	0-0.5

Tabla 10. Rango de elementos de aleación utilizados en aceros bainíticos libres de carburos [20].

3.3.2.4.5.5 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS BAINÍTICOS LIBRES DE CARBUROS

Según información bibliográfica obtenida del *American Iron and Steel Institute (AISI)* (www.steel.org) los aceros bainíticos libres de carburos presentan excelentes valores de tensión de rotura pudiendo alcanzar los 1600 MPa. Estos valores son mucho mayores que otros tipos de aceros como los Dual Phase o TRIP (ver Figura 23).

Por otro lado, si bien en cuanto a elongación máxima existen otras familias de aceros con mayores valores como los aceros inoxidable austeníticos o los TWIP, las deformaciones máximas son considerablemente altas en relación a las tensiones de rotura.

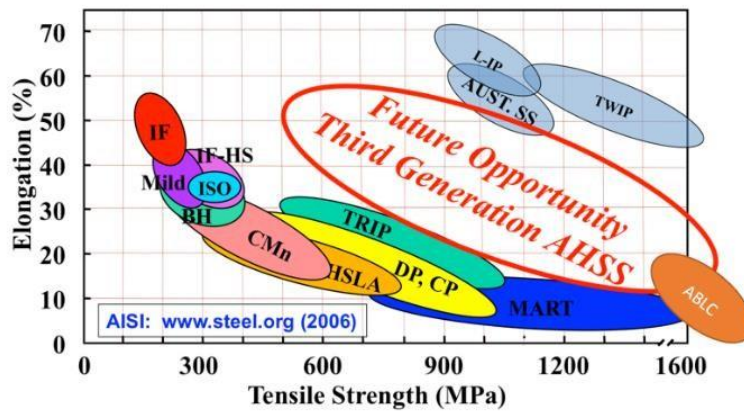


Figura 23. Elongación vs Tensión de rotura de las distintas familias de aceros.

3.3.2.5 USO DE ACEROS EN LA FABRICACIÓN DE HUBS

A pesar de que sea conocido el uso de aceros en la fabricación de *hubs* (según lo informado en la revisión bibliográfica), no se encontraron publicaciones que aportaran información específica asociada a aceros con microestructura bainítica.

Por este motivo, en este trabajo final se propone como tercer material alternativo, analizar la factibilidad de desarrollar la pieza bajo estudio HUB-EJE LENTO, utilizando la técnica de fusión y colada con un acero cuya composición química permita obtener estructuras bainíticas libres de carburos, debido a las elevadas propiedades mecánicas que muestran y a la experiencia que tiene la División Metalurgia del INTEMA en este tipo de aceros.

CAPÍTULO 4 - OBJETIVOS GENERALES Y PARTICULARES

4.1 GENERALES

- Aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera, principalmente en la materia Propiedades Estructurales I y Procesamiento de Metales y sus Aleaciones, a problemas concretos de la industria.
- Profundizar los conocimientos sobre metalurgia y simulación numérica.
- Adquirir y profundizar conocimientos en *softwares* comerciales: *Solidworks* y *MAGMASOFT*.
- Incorporar conceptos de los materiales tratados: aceros bainíticos libres de carburos, fundiciones esferoidales ADI y aleaciones de aluminio.
- Integración personal a un grupo de investigación y desarrollo, a fin de ganar experiencia sobre la metodología de trabajo, las técnicas aplicadas, las limitaciones habitualmente existentes en el sistema nacional de investigación y desarrollo, tanto en lo referido a disponibilidad de medios económicos como técnicos, y conocimiento de las dificultades propias de la integración a un grupo de trabajo en el que participan técnicos y profesionales.

4.2 PARTICULARES

- Desarrollar un diseño del proceso de colada que permita fabricar la pieza monolítica “HUB-EJE LENTO” para evitar operaciones de ensamble como abulonado, remachado o soldado.
- Para las simulaciones del proceso de colada se plantea la obtención de piezas sanas (con nula o baja porosidad) analizando el efecto de las variables que corresponden a las condiciones de colada y parámetros geométricos, los cuales repercuten en la direccionalidad de solidificación y la distribución de porosidad obtenida en la pieza.
- Para la simulación mecánica se busca llevar a cabo una simulación estática del conjunto de piezas ASPAS-HUB-EJE LENTO con el objetivo de identificar la región más solicitada y verificar si las solicitaciones aplicadas superan a las propiedades mecánicas de los materiales propuestos para su construcción.
- Obtener un prototipo funcional de la pieza monolítica “HUB-EJE LENTO” que permita validar las simulaciones del proceso de colada.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LAS SIMULACIONES DEL PROCESO DE FUSIÓN Y COLADA DEL “HUB-EJE LENTO”

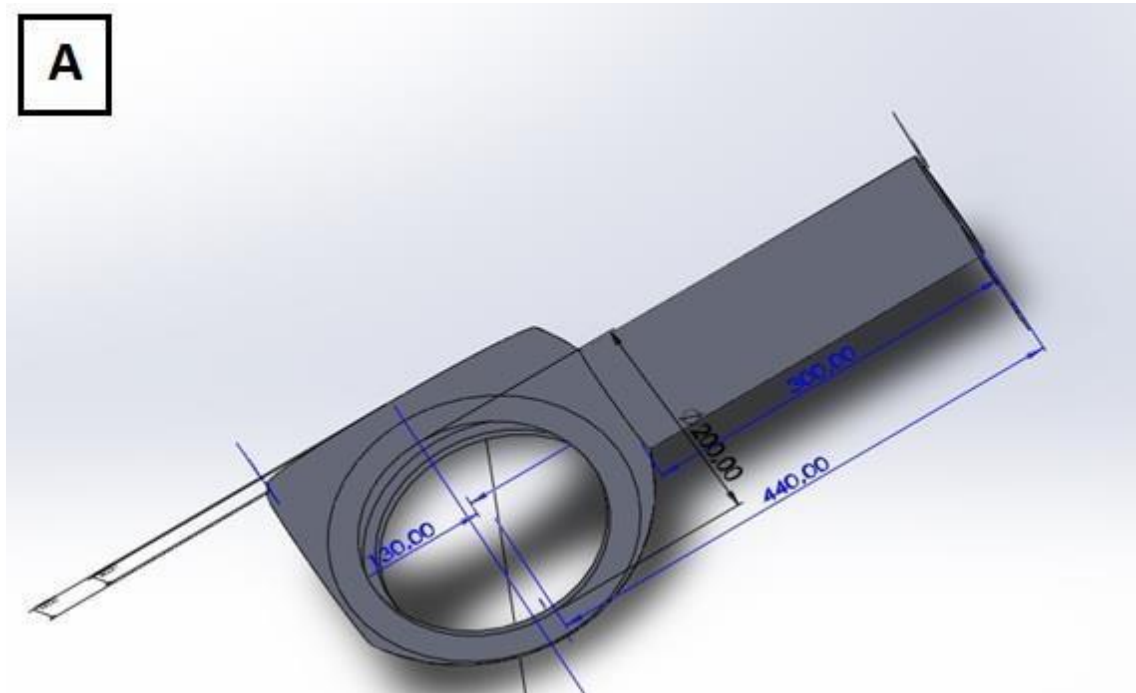
5.1.1 DISEÑO DE LA GEOMETRÍA DE LA PIEZA MONOLÍTICA HUB-EJE LENTO

Si bien fabricar el *hub* y el eje como una única pieza puede traer alguna dificultad con respecto al diseño del molde y colada del metal líquido, esto se compensa con el hecho de evitar un aspecto negativo como la eventual soldadura para promover la unión de ambas partes coladas individualmente. El proceso de soldadura puede dar lugar a la generación de concentradores de tensiones, los cuales pueden producir una falla prematura de las piezas y por ende una disminución de la vida útil del conjunto.

Para efectuar el diseño del *hub* junto al eje se recurrió al uso de un *software CAD* de uso comercial llamado *Solidworks*. El procedimiento para la obtención de la pieza se explica a continuación.

Tomando como referencia las medidas del aspa mostrada en la Figura 24, en primer lugar, se partió por el truncamiento de una esfera hueca (de 300 mm de diámetro exterior y 10 mm de espesor) en cuatro lados, tres de los cuales irán unidos a las tres aspas del molino. El truncamiento se realizó gracias a la intersección y posterior operación de extrusión de distintos planos. El diámetro de cada círculo de fijación donde estarían atornilladas las aspas es de 200 mm. Cada círculo de fijación de las aspas está separado uno de otro por un ángulo de 120°. El eje es una estructura cilíndrica hueca con el fin de alivianar el componente, de 80 mm de diámetro interno y un espesor de 10 mm (mismo espesor que el *hub*) con un largo de 300 mm (ver Figura 24). Para el círculo frontal (extremo opuesto al eje) se optó por un diámetro de 104 mm con el objetivo de minimizar el peso de la pieza.

Cabe destacar que se eligió 10 mm de espesor en toda la pieza como valor arbitrario o semilla pero que podría ser modificado según necesidades futuras de rediseño. Valores menores harían muy dificultosa la operación de fabricación propuesta (fusión y colada), mientras que valores mayores incrementarían el peso del componente.



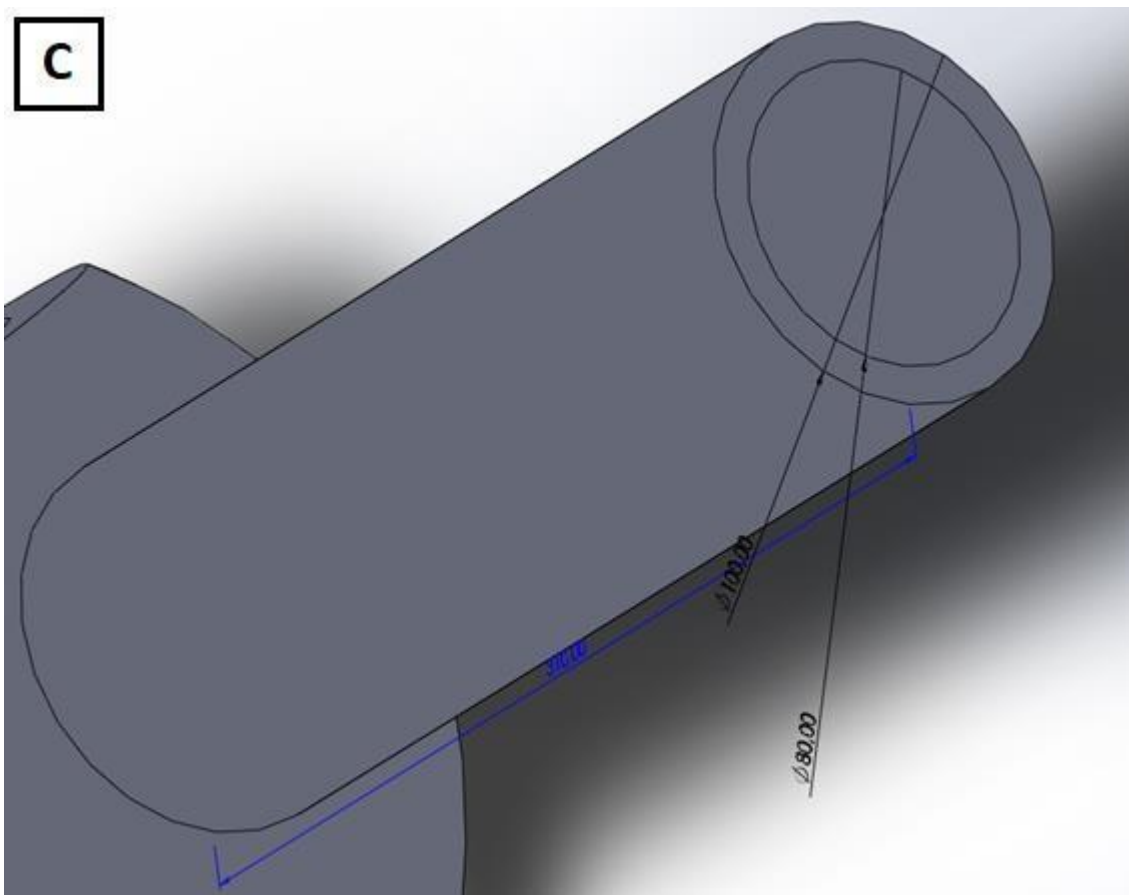
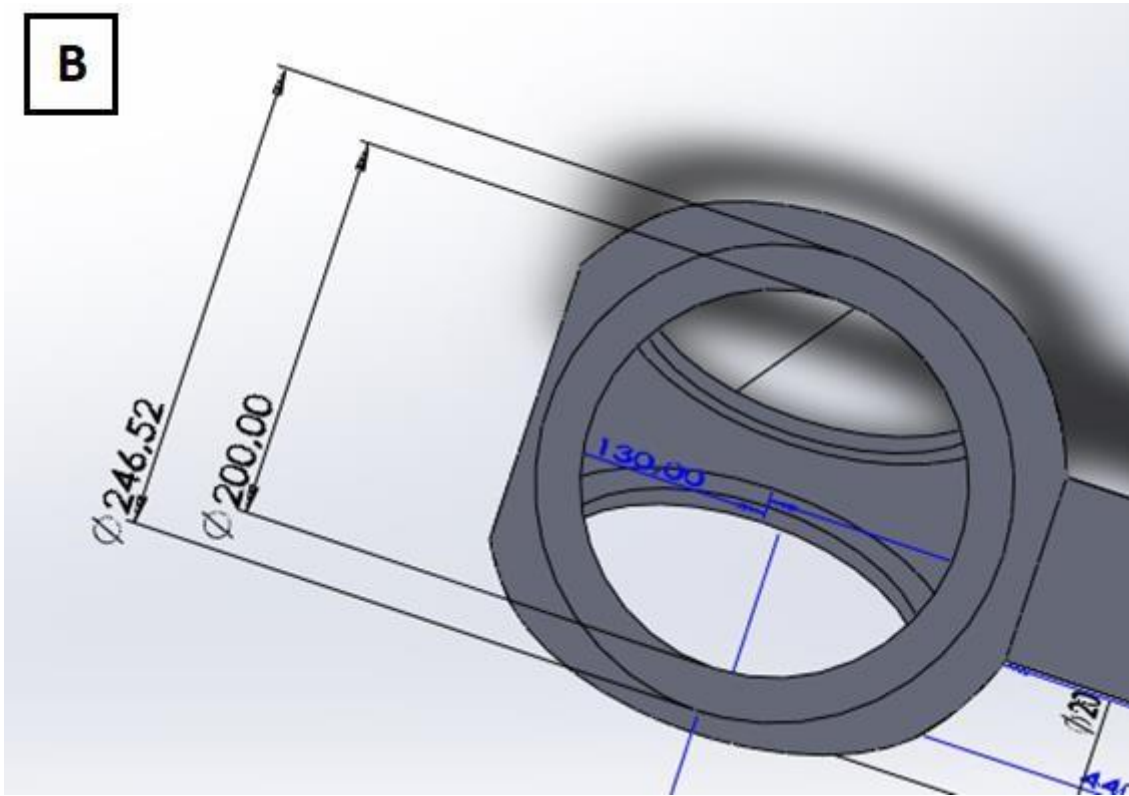


Figura 24. A- Vista del HUB-EJE LENTO. B- Detalle del HUB. C- Detalle del EJE LENTO.

5.1.2 DESARROLLO DE SISTEMA DE ALIMENTACIÓN PARA LA FABRICACIÓN DEL “HUB-EJE LENTO” UTILIZANDO EL SOFTWARE MAGMASOFT

La idea de diseñar un sistema de alimentación correctamente es crítica para poder colar de manera exitosa (sin defectos de colada) la pieza en estudio. Para ello se describen a continuación los elementos utilizados en *MAGMASOFT* para el desarrollo del mismo:

Inlet(entrada): este elemento en la realidad no existe, es simplemente una geometría que permite indicar al programa *MAGMASOFT* por donde se realiza la colada del metal líquido y un tamaño aproximado de chorro de metal.

Sistema de alimentación: son los canales responsables de llevar el metal líquido desde el basín de colada hasta la pieza en forma controlada, sin generar turbulencias o erosión del molde.

Molde: responsable de dar la forma a la pieza a colar. En las simulaciones se utilizó como material una arena seleccionada de la base de datos del programa.

Mazarotas: si bien no forman parte de la pieza, integran el sistema de realimentación, y se utilizan con el objetivo de que sean las últimas zonas en solidificar, convirtiéndose de esta forma en un reservorio de líquido para compensar la contracción volumétrica producto de la solidificación, minimizando la porosidad final de la pieza.

Enfriadores (chills): como su nombre lo dice, su función es la de mejorar la extracción de calor, aumentando la velocidad de solidificación local, razón por la cual son colocados en zonas cuidadosamente elegidas para direccionar la solidificación desde la pieza hacia las mazarotas y sistema de alimentación (*gates*). Estos elementos están hechos del mismo material que la pieza a colar, el cual es provisto por la base de datos del programa, con una temperatura inicial igual a la del molde.

Las simulaciones en este *software* requieren pasos específicos definidos. Ellos son: importación del diseño y del sistema de alimentación, definición del molde, mallado de la estructura, selección de los materiales del molde y de la pieza colada, definición del proceso de colada (temperatura de colada, tiempo de llenado, definición del criterio de solidificación) y definición de resultados.

Para la importación del *hub* y del sistema de alimentación se tuvo que tener en consideración la ubicación del diseño en el primer octante en el *software CAD* utilizado para que la importación en *MAGMASOFT* se realice efectivamente, importando el sistema en una única unidad.

El primer paso para el desarrollo del sistema de alimentación más apropiado para la colada de la pieza fue el de definir si el moldeo se haría vertical u horizontal.

El moldeo vertical es llamado de esta manera porque el plano de partición del sistema se encuentra en posición vertical. Lo mismo ocurre respectivamente con el moldeo horizontal. A la hora de elegir una de estas opciones de moldeo se debe tener en consideración: la ubicación del ataque (*gate*) y la complejidad y el tamaño de la pieza a colar.

El moldeo horizontal requiere, en general, una menor altura del sistema de alimentación para llevar a cabo el proceso de colada en comparación con el moldeo vertical, y, por ende, necesita menos metal líquido para el llenado. Además, al colar de una menor altura, el impacto del metal líquido contra el molde no es tan abrupto, lo que, en caso contrario, podría provocar un flujo turbulento con erosión en el molde y arrastre de arena, desencadenando defectos en la pieza colada.

Por su parte, a pesar de estos aspectos negativos, el moldeo vertical permite una extracción de gases más eficiente que el moldeo horizontal, lo cual es particularmente importante cuando se pretende obtener un producto libre de porosidad.

En las Figuras 25 y 26 se muestran los dos primeros sistemas de alimentación propuestos, siguiendo las dos variantes de moldeo. Se utilizaron dos variantes de colada: una horizontal (Fig. 25) y otra vertical (Fig. 26). En estas figuras se muestran algunas de sus dimensiones características.

Es importante mencionar que en estas primeras simulaciones no se utilizaron mazarotas, ya que se buscaba localizar cuales eran las regiones donde aparecen los defectos de colada (porosidad y rechupes), y en base a estos resultados, ubicar en posteriores simulaciones las mazarotas en lugares estratégicos para tratar de eliminar estos defectos. Cuando se requirió el uso de mazarotas, las mismas fueron incorporadas directamente al sistema "HUB-EJE LENTO". El diseño de las mismas fue proporcionado por el Departamento de Metalurgia del INTEMA en formatos volumétricos de 183, 324 y 532 cm³ (ver Figura 27).

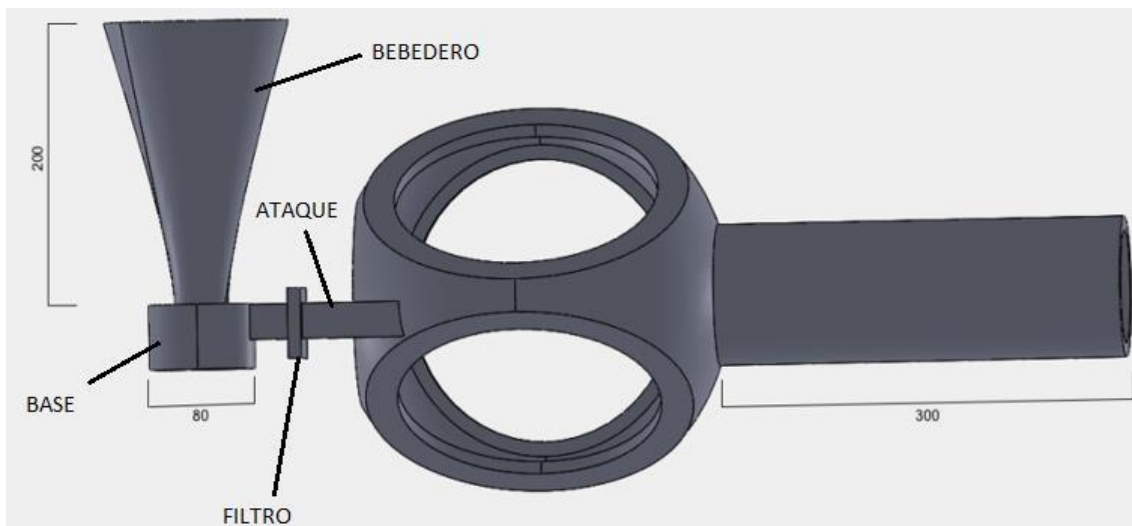


Figura 25. Moldeo horizontal (dimensiones en mm).

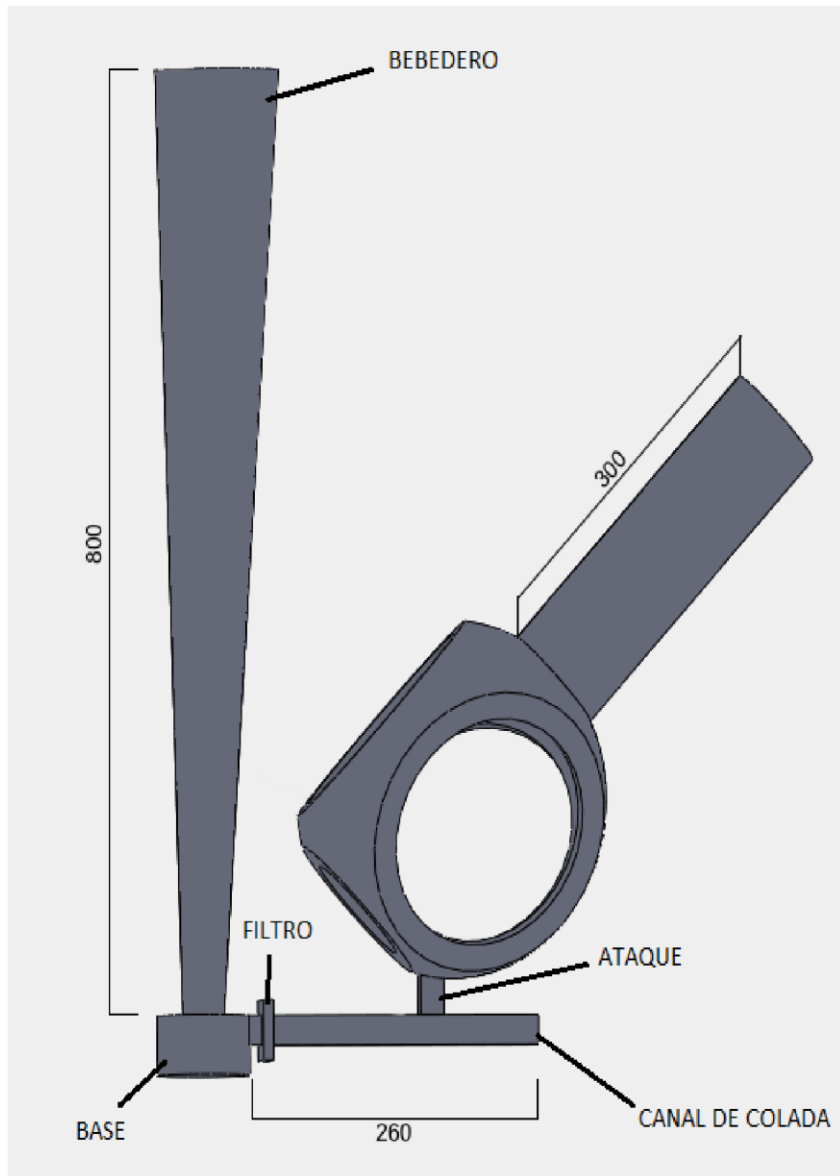


Figura 26. Moldeo vertical (dimensiones en mm).

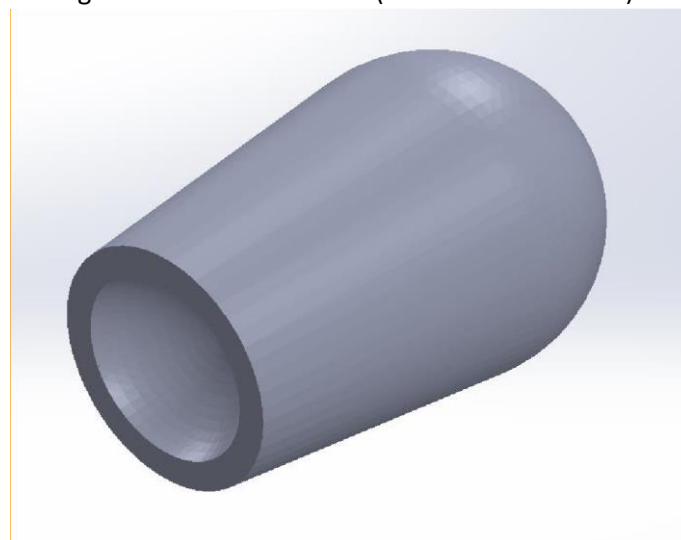


Figura 27. Geometría mazarota.

Sin embargo, debido a inconvenientes en el ensamblaje con esta geometría de mazarota, para el caso del moldeo horizontal, se optó por una mazarota de geometría cilíndrica y para el moldeo vertical, una de geometría esférica.

Para realizar las simulaciones, el molde puede ser definido de dos maneras posibles: importado o definido en *MAGMASOFT*. En este caso se optó por la segunda opción y la geometría utilizada fue un prisma con dimensiones acordes a la pieza a colar y al sistema de alimentación. Para el caso del moldeo vertical, el molde tiene dimensiones de 850 mm de altura, 550 mm de largo y 300 mm de ancho y para el moldeo horizontal las dimensiones son de 350 mm de altura, 750 mm de largo y 300 mm de ancho.

La configuración de mallado que propone el programa es muy simplificada permitiendo únicamente la modificación del tamaño de elemento de mallado. Se utilizó la cantidad de elementos recomendada por el *software* en todas las simulaciones.

5.1.3 MATERIALES ESTUDIADOS Y PARÁMETROS DE COLADA UTILIZADOS

Con respecto a la selección de los materiales de las piezas a colar se utilizaron las opciones disponibles en la base de datos del programa que se asemejaban con la composición química de los materiales de interés tratados en la revisión bibliográfica. Los materiales seleccionados fueron: AlSi7Mg para la aleación de aluminio, GX40CrSi13 para el acero y GJS-700 para la fundición gris. Las composiciones de cada material se muestran a continuación:

COMPOSICIÓN FUNDICIÓN GRIS GJS-700:

Material: GJS-700					
Iron Composition					
Carbon	3.6000	%	Tin	0.0000	%
Silicon	2.5000	%	Magnesium	0.0480	%
Manganese	0.1200	%	Molybdenum	7.0000e-003	%
Phosphorus	0.0180	%	Nickel	0.0290	%
Sulfur	0.0000	%	Cerium	0.0000	%
Chromium	0.0000	%	Antimony		%
Copper	0.8000	%	Nitrogen		ppm

COMPOSICIÓN ALEACIÓN ALUMINIO AlSi7Mg:

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

COMPOSICIÓN ACERO GX40CrSi13:

Material: GX40CrSi13

Steel Composition

Carbon	0.4000	%	Chromium	13.0000	%
Silicon	1.0000	%	Copper	0.0000	%
Manganese	1.0000	%	Molybdenum	0.0000	%
Phosphorus	0.0450	%	Nickel	0.0000	%
Sulfur	0.0300	%	Titanium	0.0000	%
Aluminium	0.0000	%	Vanadium	0.0000	%
Cobalt	0.0000	%	Tungsten	0.0000	%

Para el molde se optó por un molde de arena con una arena seleccionada nuevamente de la base de datos del *software* (*Silica Dry Sand*).

Para la temperatura inicial de colada se utilizó la recomendada por el *software* para cada material ($T_0=1400^\circ\text{C}$ para la fundición gris, $T_0=1600^\circ\text{C}$ para el acero y $T_0=700^\circ\text{C}$ para la aleación de aluminio). Una temperatura de colada mayor favorece a un aumento en la colabilidad del material, pero un valor excesivamente alto promueve un incremento en la cantidad de gases atrapados en la pieza, incrementando la porosidad.

El tiempo de llenado es establecido como parámetro de entrada en la simulación. El mismo fue obtenido a partir de distintos criterios utilizados para cada material [9]. Los mismos se explican a continuación:

- Fundiciones de Hierro Grises:

Para piezas con espesor mínimo entre 2.5-15 mm y W (peso) menores a 450 Kg:

$$t(\text{seg}) = S \times \sqrt{w(\text{Kg})} \text{ (Ecuación. 2)}$$

Donde: S= coeficiente que tiene en cuenta el espesor mínimo de la pieza colada tal como se indica en la Tabla 11.

Espesor de la pieza [mm]	2,5-3,5	3,5-8,0	8,0-15,0
S	1,63	1,85	2,2

Tabla 11. Determinación de coeficiente S según el espesor de la pieza para Fundiciones de Hierro Grises.

Para este caso particular, el espesor del *hub* es constante en toda la pieza y es de 10 mm, por lo que de la Tabla 11. se obtiene que $S= 2,2$. Por otro lado, a partir de la densidad de la fundición ($7,2 \text{ g/cm}^3$) y del volumen de la pieza ($2065,3 \text{ cm}^3$) se obtuvo la masa de la misma ($w= 14,87 \text{ Kg}$). De esta manera, con la Ecuación. 3 se obtuvo el tiempo de llenado de $t= 8,5 \text{ seg}$.

- Aceros

$$t(\text{seg}) = K1 \times \sqrt{w(\text{Kg})} \text{ (Ecuación. 3)}$$

Donde:

$K1= 1.8$ (para secciones entre 9.5-25.4mm)

$K1=1.4$ (para menores secciones)

$K1=2.0$ (para mayores secciones)

Como el espesor del *hub* es de 10 mm se eligió el valor de $K1= 1.8$. La densidad del acero utilizado es de $7,87 \text{ g/cm}^3$ por lo que la masa obtenida resultó de $w= 16,25 \text{ Kg}$. Usando la Ecuación. 4 se obtuvo un valor de tiempo de llenado de $t= 7,25 \text{ seg}$.

- Aleaciones base Aluminio

$$t(\text{seg}) = \frac{w(\text{Kg})}{R(\text{Kg/seg})} \text{ (Ecuación. 4)}$$

Donde:

$$R(\text{Kg/seg}) = B \times \sqrt{w(\text{Kg})} \text{ (Ecuación. 5)}$$

B= constante que depende del espesor de la pieza, con valores típicos de (ver Tabla 12):

Espesor de la pieza	Por debajo de 6mm	Entre 6 y 12 mm	Superior a 12mm
Constante B	0.99	0.87	0.47

Tabla 12. Determinación de constante B según el espesor de la pieza para Aleaciones base Aluminio.

En este caso, el valor de B corresponde a 0,87 (espesor=10 mm) y a partir de la densidad de la aleación de aluminio ($2,7 \text{ g/cm}^3$) se obtuvo la masa, $w=5,5 \text{ Kg}$. De esta manera, se obtuvo el valor de $R= 2 \text{ Kg/seg}$ (Ecuación. 5) y el tiempo de llenado, $t= 2,8 \text{ seg}$.

Los tiempos de llenado se mantuvieron fijos durante todas las simulaciones para cada material correspondiente.

El criterio para la finalización de la simulación (fin de la etapa de solidificación) fue el mismo para los tres materiales candidatos, donde la temperatura del punto más caliente debía caer por debajo de cierto valor. Esta temperatura es distinta para cada material:

- Fundición de Hierro Gris: $T_{\text{fin}}= 1166^\circ\text{C}$.
- Aleación de Aluminio: $T_{\text{fin}}=542^\circ\text{C}$.
- Acero: $T_{\text{fin}}=1229^\circ\text{C}$.

Por último, con respecto a la definición de los resultados, el *software* de manera predeterminada informa los tiempos y temperaturas tanto de la colada como del proceso de solidificación. Particularmente, conocer el gradiente de temperaturas del material a medida que se encuentra solidificando permite analizar la direccionalidad de la solidificación y tomar medidas para mejorarla en caso de que la misma no sea la correcta. Además, pero no menos importante, permite obtener la distribución de porosidades en toda la pieza, lo cual es una herramienta destacable a la hora de obtener piezas sanas. La direccionalidad de solidificación es un aspecto clave para identificar puntos calientes (*hotspots*) o piletas de líquido en la pieza que posteriormente aportarían porosidad a la misma, producto de la contracción por solidificación.

La necesidad del uso de un plano de partición que deben poseer los sistemas de alimentación y modelos en el moldeo tanto en posición horizontal como vertical surge de la separación habitual de las partes que conforman el molde: el sobre y el bajero. Esto es así para que, durante las

operaciones de moldeo, el modelo pueda ser retirado del molde (operación de desmodelado) sin mayores dificultades.

El plano de partición seleccionado corresponde a un plano de simetría del sistema "HUB-EJE LENTO". En las Figuras 28 y 29 se pueden observar los planos de partición adoptados en las dos configuraciones (Plano 1 en ambos sistemas), vertical y horizontal respectivamente.

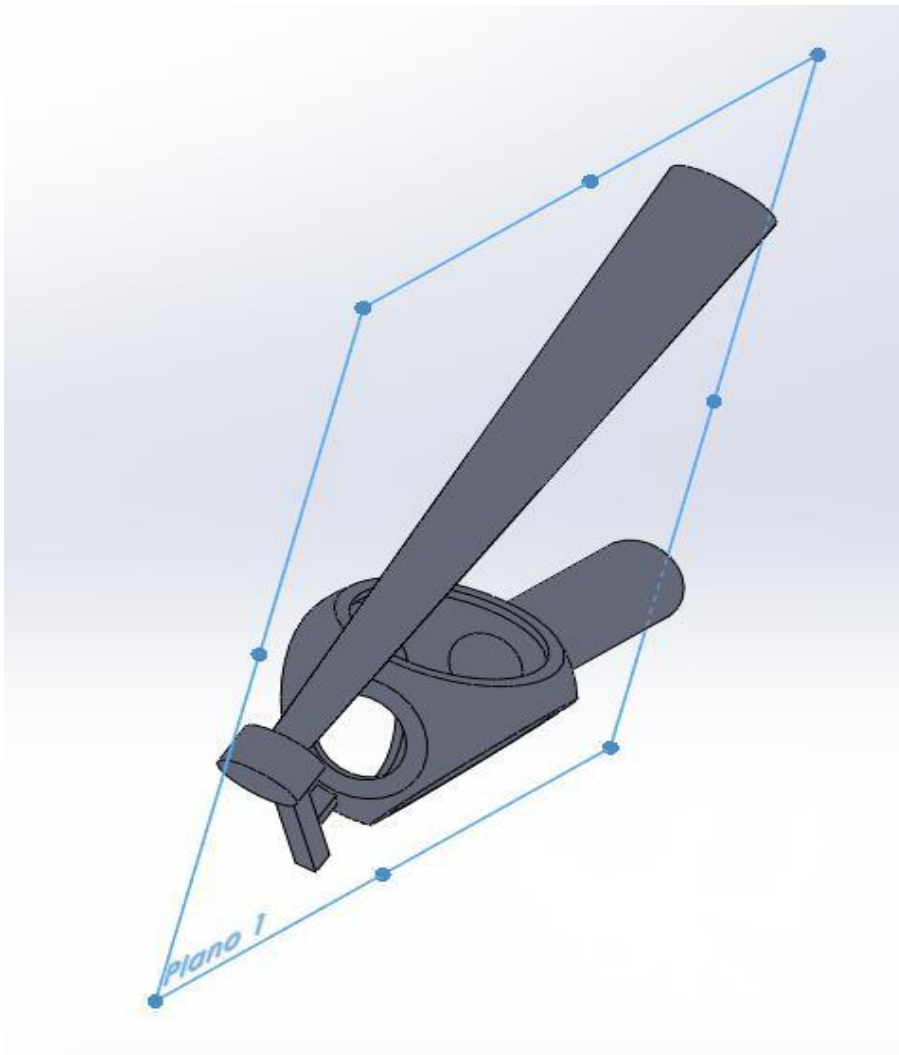


Figura 28. Plano de partición moldeo vertical.

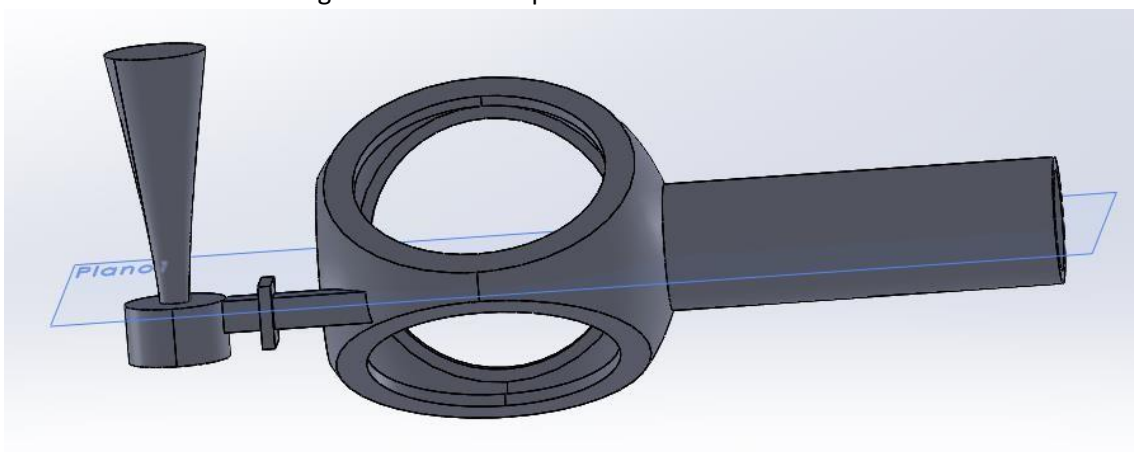


Figura 29. Plano de partición moldeo horizontal.

Antes de comenzar con la descripción de los resultados de las simulaciones, se recuerda que estos no han sido completamente verificados experimentalmente, lo cual es un punto crítico de toda simulación y permite verificar su aproximación con la realidad. Por cuestiones de tiempo y de disponibilidad de funcionamiento del horno de inducción que se utiliza en la planta de fusión de la División Metalurgia del INTEMA para fundir aceros y fundiciones de hierro, solo se ha podido validar las simulaciones correspondientes al desarrollo de la pieza HUB-EJE LENTO en aleación de aluminio. Los resultados de estas validaciones experimentales se detallan en el capítulo 6.

5.1.4 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES UTILIZANDO EL SOFTWARE MAGMASOFT

Los resultados de las simulaciones se dividieron en grupos, según el sistema de colada propuesto. En un principio se realizaron simulaciones simplemente de la solidificación del sistema "HUB-EJE LENTO" sin sistema de colada, por lo que no se utilizaron sistemas de alimentación (sección 4.4.1), ni de realimentación, ni enfriadores. Esto se hizo para poder tener una situación inicial que permita evaluar el nivel de porosidad y su ubicación en la pieza.

En las posteriores simulaciones se analizaron: el efecto del agregado y ubicación de mazarotas con distintos volúmenes de reservorio, la adición de enfriadores en distintas geometrías y cantidades, y el efecto de la temperatura inicial del molde y enfriadores (sección 4.4.2 en adelante). Todos estos estudios, realizados mediante diversas simulaciones, se realizaron para los tres materiales candidatos.

5.1.4.1 PRIMER GRUPO: SOLIDIFICACIÓN SIN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN (FUNDICIÓN GRIS, ALUMINIO Y ACERO)

En las Figuras 30, 31 y 32 se muestran los resultados de las simulaciones de la solidificación del metal líquido en la cavidad moldeada sin tener en cuenta una etapa previa de llenado, tanto para la fundición gris, la aleación de aluminio y el acero respectivamente. Se observa la cantidad y distribución de porosidad o microrechupes en la pieza. Este defecto será el único aspecto a analizar en las simulaciones realizadas, ya que es considerado el defecto más relevante en la tecnología de fusión y colada. Es importante destacar que el porcentaje que se informa de porosidad en la escala adjunta en todas las figuras de las simulaciones indica la porosidad localizada en cada región coloreada (en la mayoría de los casos entre 2-15%).

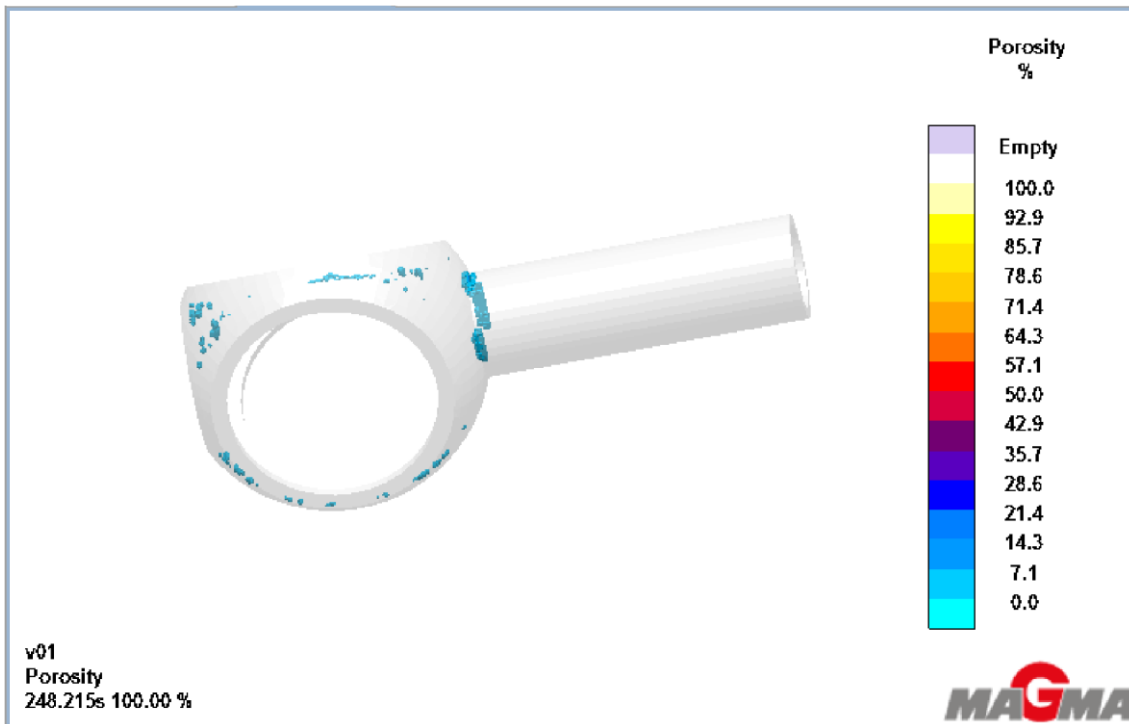


Figura 30. Ubicación y nivel de porosidad en Fundición Gris GJS 700 para la situación sin sistema de colada.



Figura 31. Ubicación y nivel de porosidad en Aleación de Aluminio AlSi7Mg para la situación sin sistema de colada.

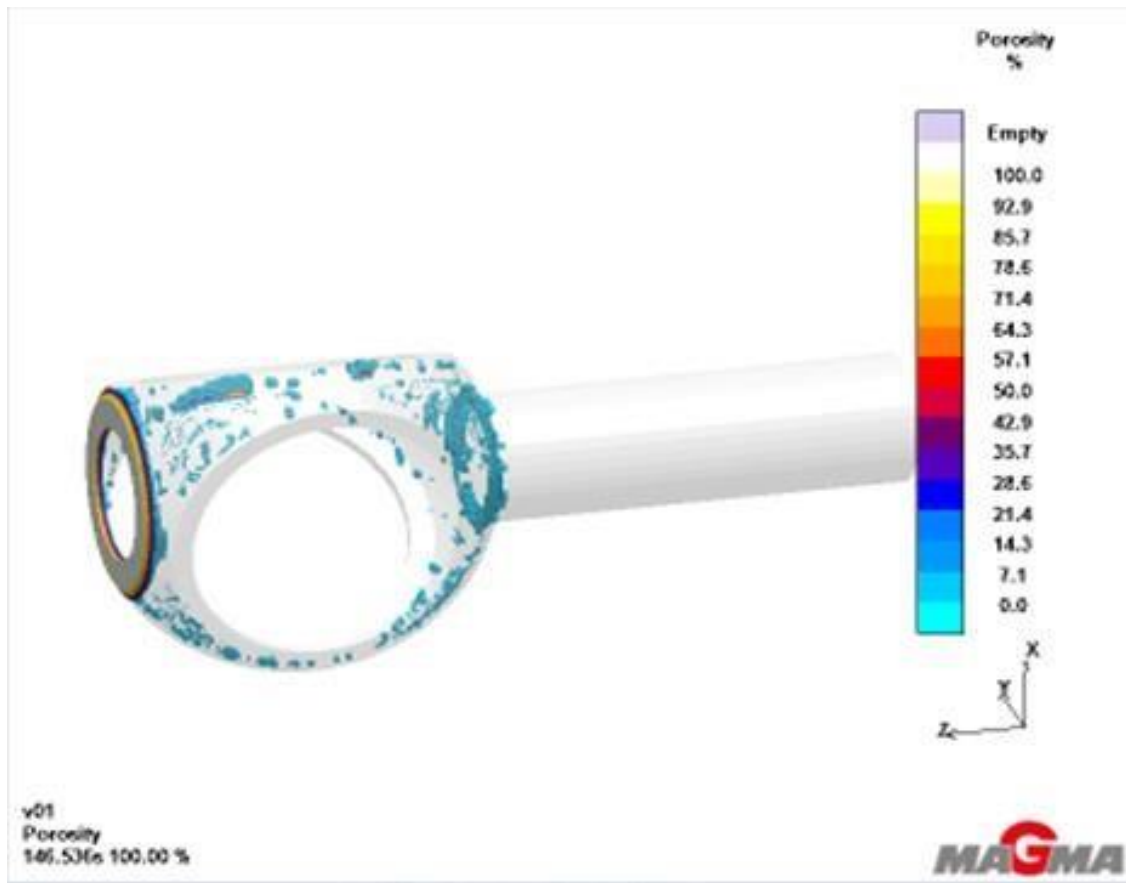


Figura 32. Ubicación y nivel de porosidad en Acero GX40CrSi13 para la situación sin sistema de colada.

Se observa que la porosidad obtenida en la fundición de hierro resulta menor que en la aleación de aluminio y el acero. Esto se puede asociar principalmente a que la fundición de hierro presenta el fenómeno de expansión grafitica, el cual consiste en un aumento de volumen producto de la precipitación de grafito en la microestructura, ya que el grafito es una fase de menor densidad con respecto al líquido del cual proviene. De esta manera, este efecto permite compensar la contracción (y por ende la futura porosidad) que ocurre a medida que la pieza solidifica.

Es importante destacar que en las tres simulaciones la porosidad se ubicó principalmente en el *hub* y en la unión entre el eje y el *hub*, de manera que las mismas se consideran como las zonas más críticas en cuanto a propiedades mecánicas.

5.1.4.2 SEGUNDO GRUPO: SELECCIÓN DEL TIPO DE COLADA (MOLDEO HORIZONTAL O VERTICAL)

Una vez analizada la solidificación de la pieza, se evaluó la posibilidad de colar la pieza utilizando moldes verticales u horizontales. Para el diseño del sistema de alimentación se cumplió el criterio establecido en la revisión bibliográfica, en el cual el módulo del sistema de alimentación resultó 1.2 veces mayor al módulo de la pieza en el moldeo horizontal y 1.8 veces mayor en el moldeo vertical.

Se partió, en un principio, con las configuraciones más simples planteadas: sistema de alimentación y modelo, como primera aproximación para evaluar la porosidad inicial de la pieza. No se consideraron ni mazarotas ni enfriadores. Este análisis se hizo inicialmente para el material

Fundición Gris GJS 700. La temperatura de colada fue de 1450°C y la temperatura del molde de 25°C en ambos casos. Las Figuras 33 y 34 muestran los niveles de porosidad para el caso del moldeo horizontal y vertical respectivamente.

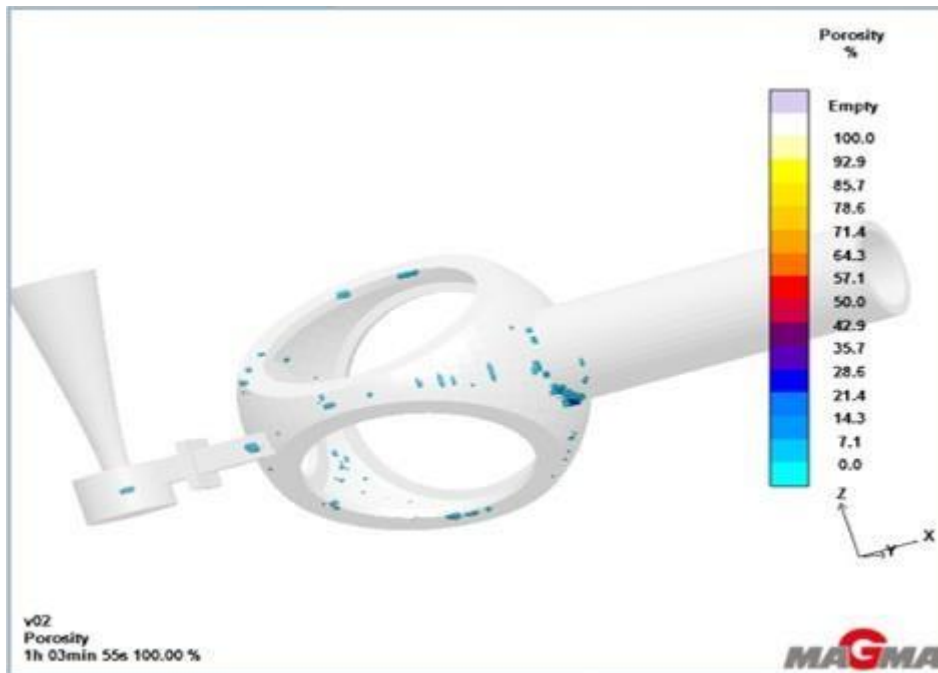


Figura 33. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Fundición Gris GJS 700, Temperatura de colada: 1450°C, Temperatura de molde: 25°C, Moldeo: horizontal.



Figura 34. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Fundición Gris GJS 700, Temperatura de colada: 1450°C, Temperatura de molde: 25°C, Moldeo: vertical.

Comparando los resultados obtenidos en las Figuras 33 y 34 para la fundición gris, se observó una principal acumulación de porosidad en la unión del *hub* y el eje en el caso del moldeo horizontal mientras que este efecto resultó menos notorio en el moldeo vertical. Este mismo análisis entre configuraciones se realizó también para la aleación de aluminio y el acero, y el resultado mostró la misma tendencia. Debido a este hecho, se eligió para el desarrollo de la

pieza HUB-EJE LENTO la configuración de moldeo vertical para todos los materiales y se descartó la configuración de moldeo horizontal.

Siguiendo con la comparación entre estas dos simulaciones mostradas, resulta importante destacar que el bebedero que se utiliza en el moldeo vertical (Figura 34) requirió de una mayor altura y volumen que el utilizado en el moldeo horizontal (Figura 33) debido a la necesidad de generar la presión metalostática suficiente para un llenado completo del molde. Es decir, que, si bien la calidad de la pieza obtenida en el moldeo vertical es superior a la obtenida en el moldeo horizontal, debe suministrarse una mayor cantidad de metal líquido, lo cual aumenta los costos.

5.1.4.3 TERCER GRUPO: SIMULACIONES FUNDICIÓN GRIS GJS 700

Observando en detalle los resultados de porosidad para el caso de la Fundición gris GJS 700 mostrados en la Figura 34, si bien la porosidad obtenida en esta corrida resulta pequeña es posible mejorar el resultado agregando un sistema de realimentación (mazarota), enfriadores (*chills*), o modificar las temperaturas iniciales de colada, molde o enfriadores. En algunos casos también se optó por alterar las dimensiones de la mazarota (modificando el área de sección cuadrada de entrada y volumen de la esfera de realimentación); y la cantidad, ubicación y dimensiones de los enfriadores. En la Figura 35 se muestran los resultados de porosidad para el caso de la adición de una mazarota de 532 cm³ de volumen en la unión del eje y el *hub* con el fin de reducir la porosidad en esa región, la cual es la más crítica. En esta nueva configuración, se mantuvo constante la temperatura de colada y del molde. Se puede observar, comparando con la Figura 34 que la mejora es irrelevante, lo que permitió suponer en una primera instancia que el tamaño de la mazarota era insuficiente.

En este sentido, se procedió a duplicar la sección transversal (cuadrada) de ataque de la mazarota a la pieza y aumentar en 1.5 veces el volumen de la mazarota (Volumen= 798 cm³), para evaluar si un aumento más significativo de las dimensiones del sistema de realimentación ayudaba a promover una disminución de la porosidad. Se mantuvo constante la temperatura de colada y del molde. En este caso, el aumento de las dimensiones de la mazarota y del canal de ataque a la pieza ayudó a disminuir la porosidad en el *hub* con respecto al caso anterior, pero se mantuvo la porosidad a lo largo del eje. Los resultados en la porosidad luego de realizar estos cambios se pueden observar en la Figura 36.

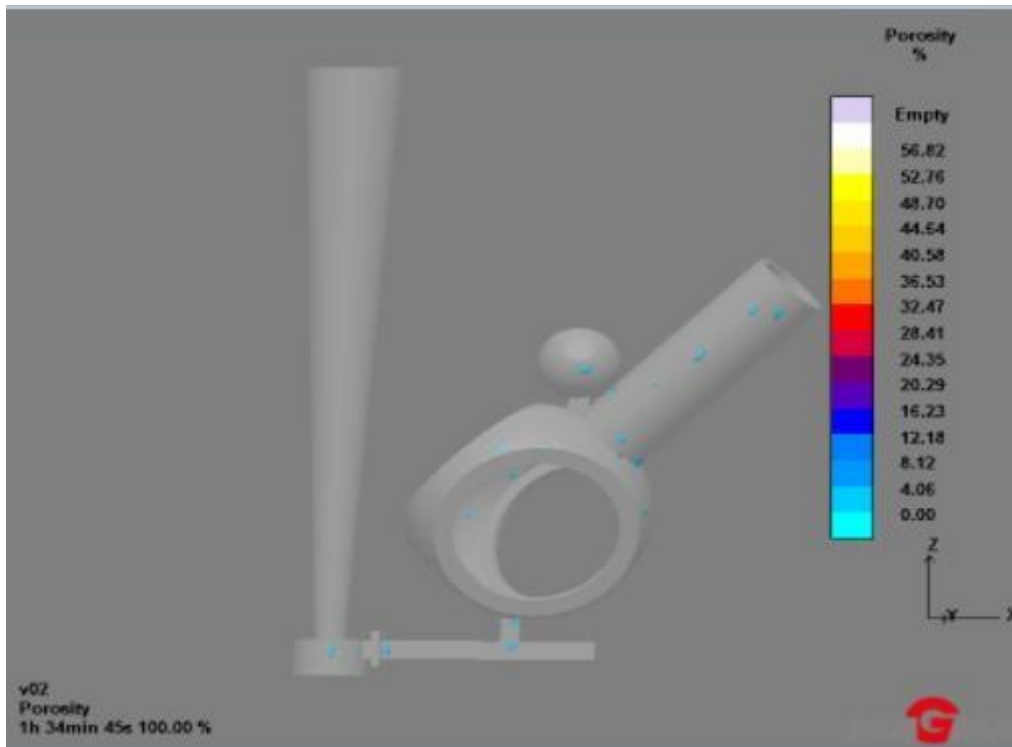


Figura 35. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Fundición Gris GJS 700, Temperatura de colada: 1450°C, Mazarota: Sí (Volumen: 532cm³), Chills: No, Lado de la sección cuadrada del sistema de realimentación: 10mm, Temperatura de molde: 25°C.

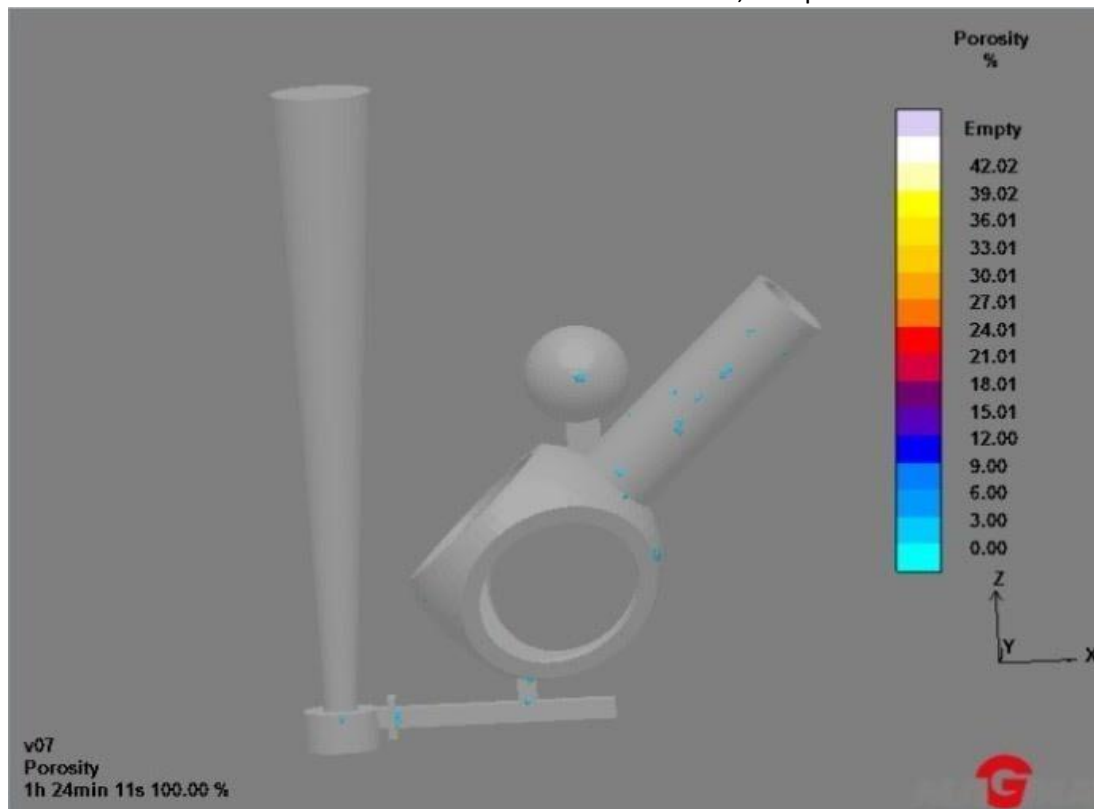


Figura 36. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Fundición Gris GJS 700, Temperatura de colada: 1450°C, Mazarota: Sí (Volumen: 798cm³), Chills: No, Lado de la sección cuadrada del sistema de realimentación: 20mm, Temperatura de molde: 25°C.

Con estos resultados, en la siguiente simulación se optó por mantener la misma configuración, exceptuando la temperatura de colada (fue reducida a 1400°C). Al disminuir la temperatura de colada 50° C (de 1450°C a 1400°C) se obtuvo una mejora en la calidad de la pieza, debido a la menor porosidad en el *hub* y a lo largo del eje. Esto se puede observar comparando las Figuras 36 y 37. Acorde a lo informado en la revisión bibliográfica, una disminución de la temperatura de colada favoreció a la obtención de una pieza más sana. De todas maneras, quedaron regiones con porosidad en la unión entre ambas partes, y en uno de los ligamentos del *hub*. Esto se puede observar con mayor claridad en la Figura 38, en la cual aparecen zonas internas de líquido remanente, las cuales, luego de la solidificación, generarían porosidad en la pieza.

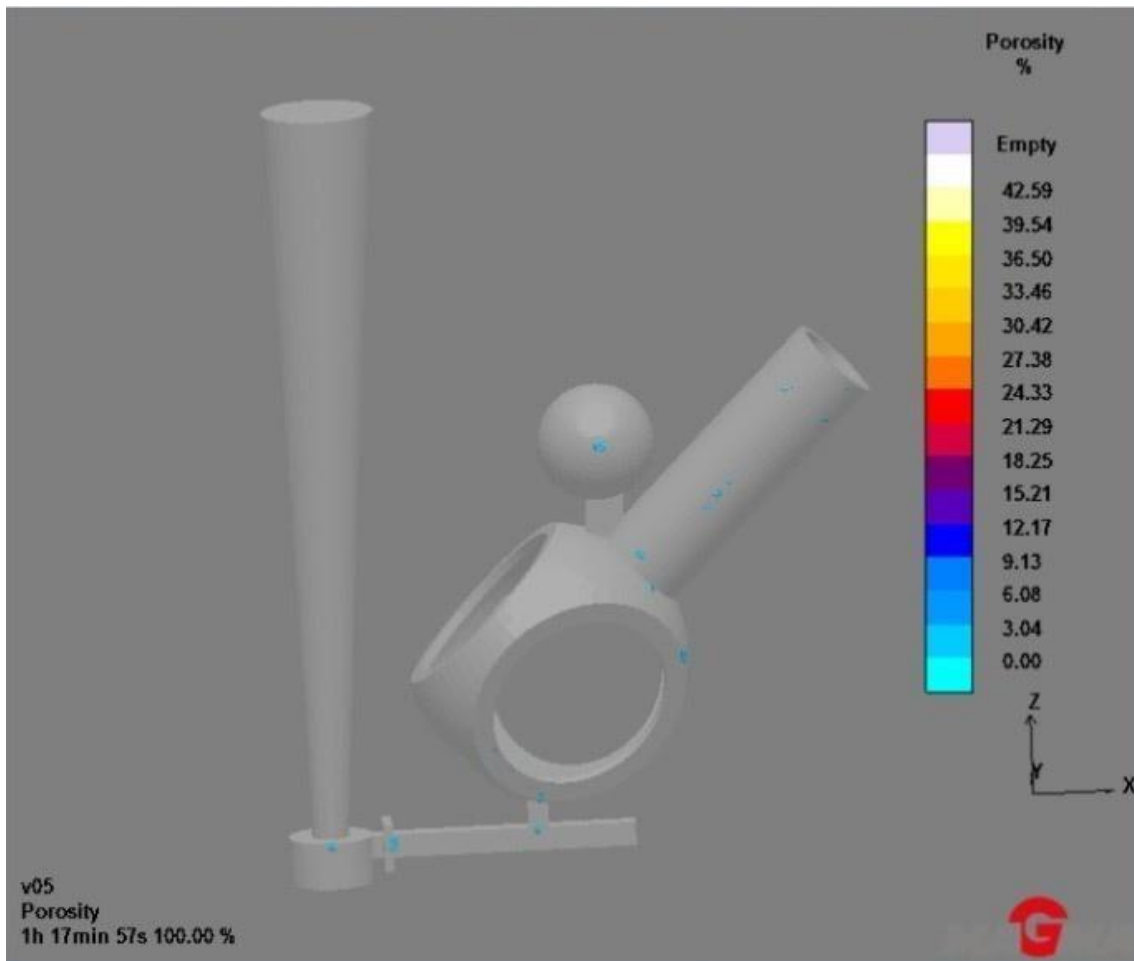


Figura 37. Porosidad en la pieza una vez solidificada Material: Fundición Gris GJS 700, Temperatura de colada: 1400°C, Mazarota: Sí (Volumen: 798cm³), Chills: No, Lado de la sección cuadrada del sistema de realimentación: 20mm, Temperatura de molde: 25°C.

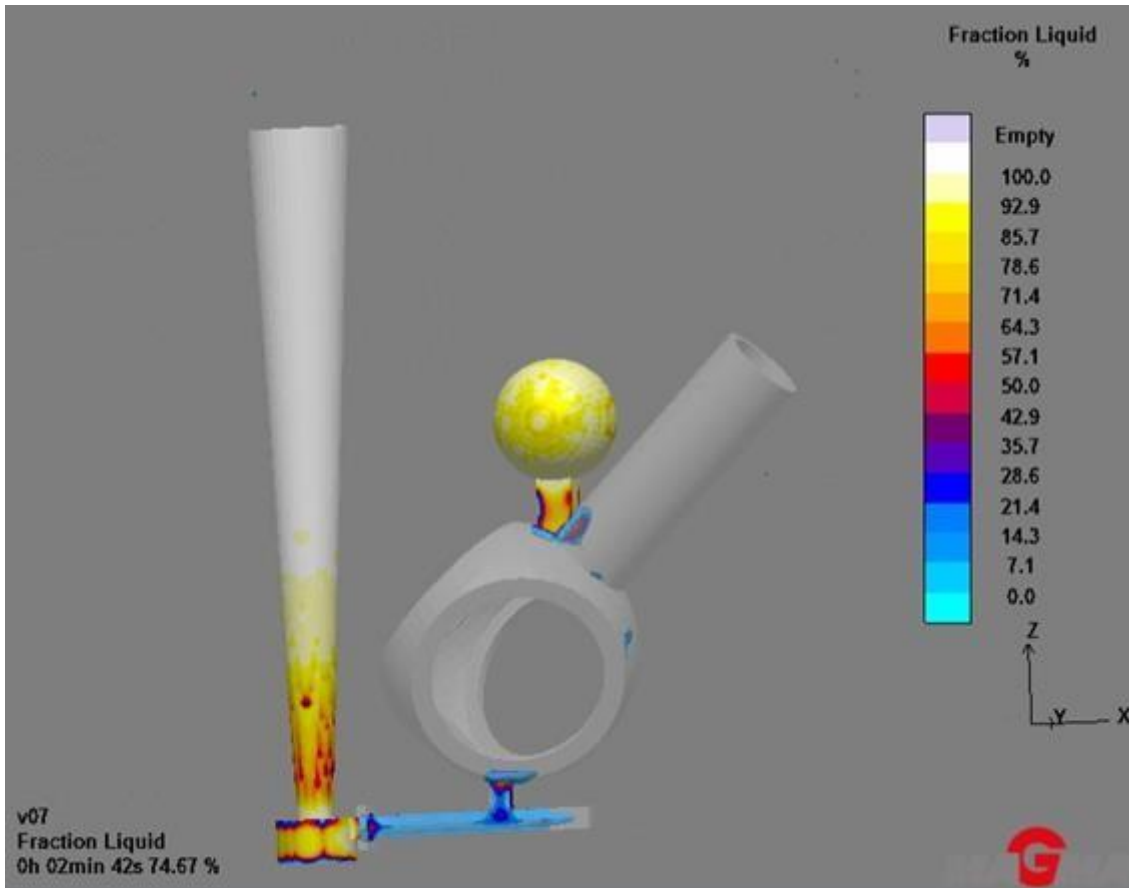


Figura 38. Porcentaje de Fracción de Líquido para 2min, 42 seg del inicio de la solidificación. Material: Fundición Gris GJS 700. Temperatura de colada: 1400°C, Mazarota: Sí (Volumen: 798cm³), Chills: No, Lado de la sección cuadrada del sistema de realimentación: 20mm, Temperatura de molde: 25°C.

Finalmente, y con el objetivo de obtener una pieza totalmente libre de porosidad, se combinaron y efectuaron dos acciones simultáneas. Las mismas fueron:

- Disminución de la temperatura de colada a 1370° C (no es recomendable bajar la temperatura por debajo de estos valores para fundiciones grises, ya que disminuye la colabilidad del material y promueve la generación de defectos).
- Agregado de cuatro enfriadores (ver elementos azules en la Figura 39) para direccionar la solidificación hacia los *gates* y mazarotas. Si bien, en principio, sería necesario solo la adición de un enfriador en el ligamento con líquido remanente mostrado en la Figura 38, se optó por colocar un enfriador en cada ligamento del *HUB*, y uno en la unión de ambas partes (*HUB* Y *EJE LENTO*), con el objetivo de asegurar una correcta direccionalidad de la solidificación hacia la mazarota, y de esta manera no correr el riesgo de que se generen zonas con líquido retenido en la pieza.

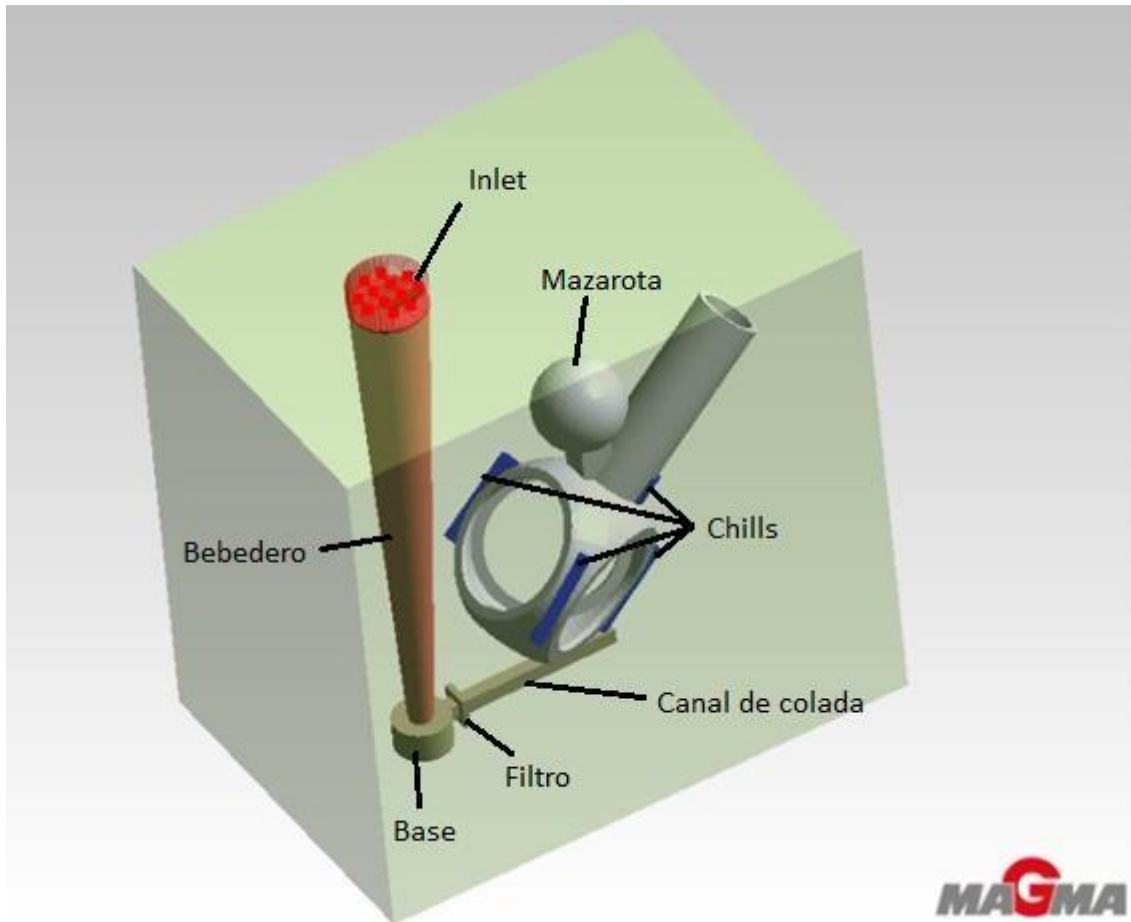


Figura 39. Sistema de alimentación para Fundición Gris GJS 700, que incluye *chills* (enfriadores) y mazarota. Mazarota: Sí (Volumen: 798cm³), *Chills*: Sí (3 en ligamentos del *hub* y 1 transversal en el eje), Lado de la sección cuadrada del sistema de realimentación: 20mm.

Los *chills* utilizados en los ligamentos del *hub* tienen las dimensiones mostradas en la Figura 40A (el radio interno es de 150 mm). El chill colocado sobre el eje tiene las dimensiones marcadas en la Figura 40-B (el radio interno es de 35 mm). El material utilizado para los *chills* es el mismo que el utilizado en la pieza. En este caso, se usó Fundición Gris GJS700.

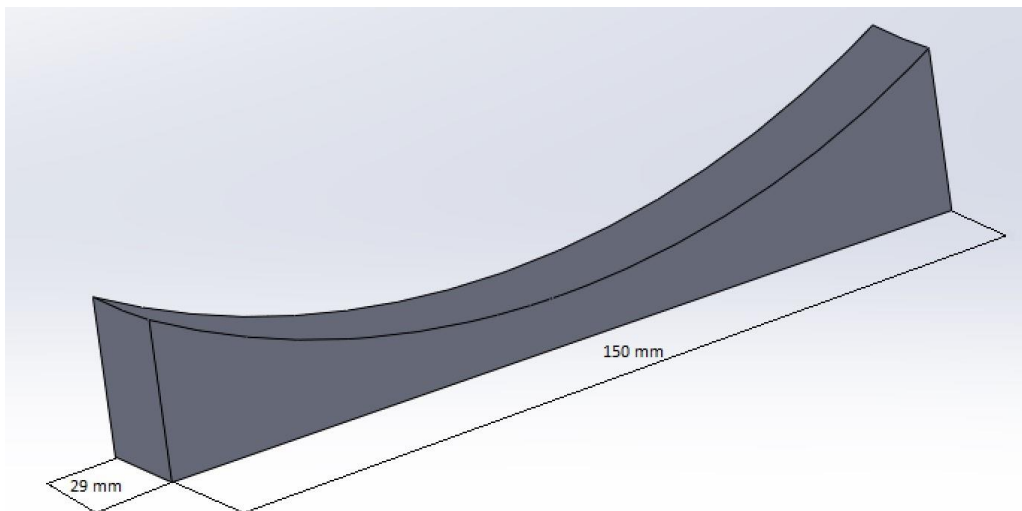


Figura 40-A. Dimensiones de los *chills* o enfriadores ubicados sobre el *hub*.

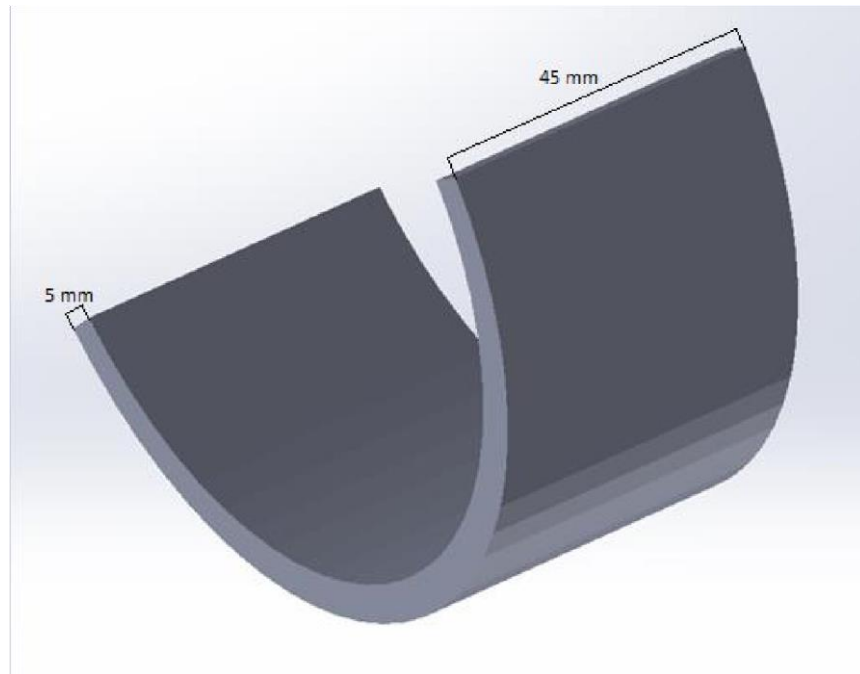


Figura 40-B. Dimensiones del *chill* ubicado sobre el eje lento, en la zona de unión con el *hub*.

En la Figura 41 se muestran los resultados de la porosidad obtenida correspondientes a la configuración de colada mostrada en la Figura 39. Se puede observar una disminución en la porosidad con respecto a los casos analizados anteriormente, pero no se logró obtener una pieza completamente libre de porosidad. Por ello, se realizó un último intento de modificación de alguna de las variables para cumplir con el objetivo planteado. En esta última simulación se disminuyó la temperatura inicial de los enfriadores y del molde a 20^o C, manteniendo el resto de los parámetros constantes con respecto a la configuración de la simulación anterior. Los resultados de porosidad se muestran en la Figura 42, en donde se puede observar que se obtiene exitosamente una pieza libre de porosidad.

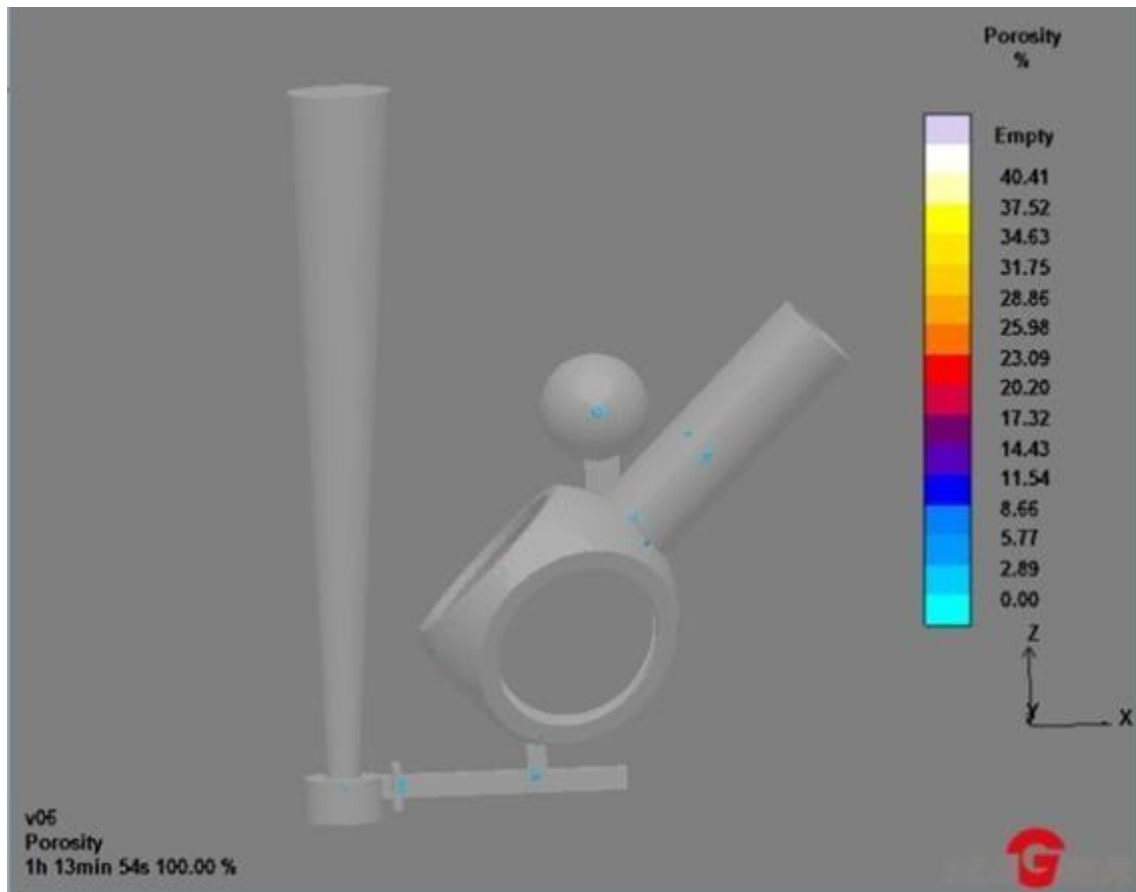


Figura 41. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Fundición Gris GJS 700, Temperatura de colada: 1370°C, Mazarota: Sí (Volumen: 798cm³), Chills: Sí (3 en ligamentos del *hub* y 1 transversal en el eje), Lado de la sección cuadrada del sistema de realimentación: 20mm, Temperatura de molde: 25°C, Temperatura de chills: 25°C.

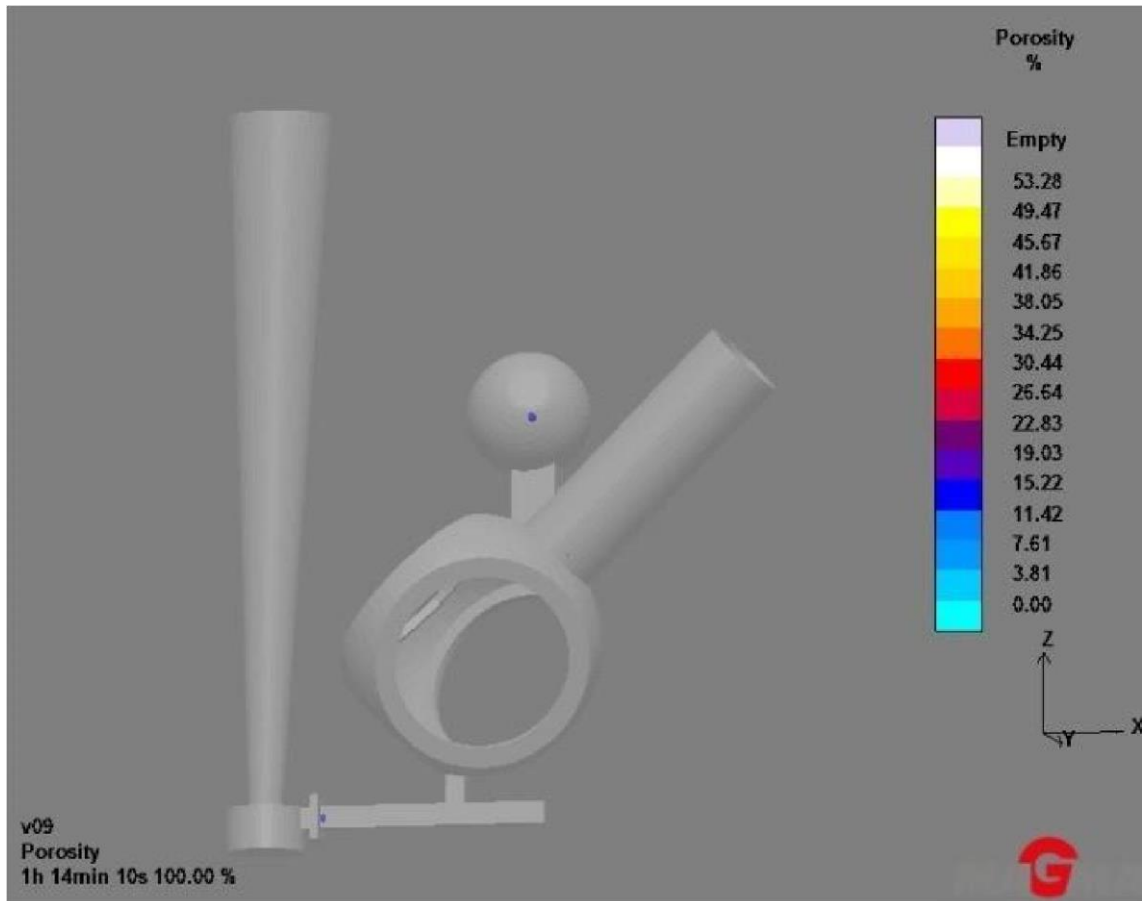


Figura 42. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Fundición Gris GJS 700, Temperatura de colada: 1370°C, Mazarota: Sí (Volumen: 798cm³), Chills: Sí (3 en ligamentos del *hub* y 1 transversal en el eje), Lado de la sección cuadrada del sistema de realimentación: 20mm, Temperatura de molde: 20°C, Temperatura de chills: 20°C.

En la Figura 43 se observa la correcta direccionalidad de la solidificación de la pieza (el color gris corresponde a material sólido). El canal de alimentación y la mazarota resultaron las últimas regiones en solidificar, acumulando los defectos de contracción en esas zonas.

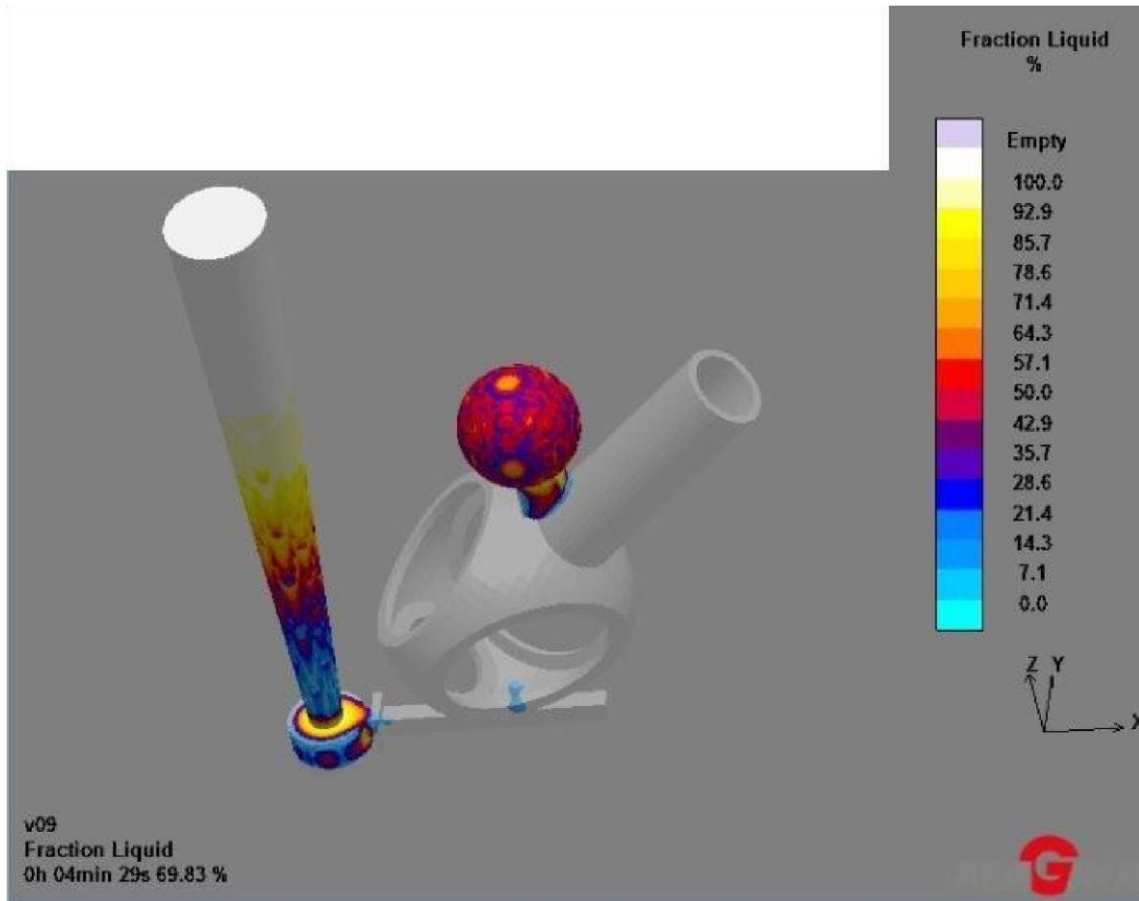


Figura 43. Porcentaje de fracción de líquido para 4 min, 29 seg desde el inicio de la solidificación (correlación con Figura 42).

En base a estas primeras simulaciones, se pudo desarrollar un sistema de alimentación y establecer parámetros de colada que permitieron predecir el desarrollo de la pieza "HUB-EJE LENTO" en fundición gris libre de porosidad. De todas maneras, el análisis debe ser correspondido por un desarrollo experimental que permita confirmar los resultados obtenidos a partir del uso del programa *MAGMASOFT*.

5.1.4.4 CUARTO GRUPO: SIMULACIONES ALEACIÓN DE ALUMINIO AISi7Mg

De manera análoga al caso de la fundición gris, se realizaron distintas simulaciones para determinar la porosidad para la aleación de aluminio seleccionada. Para la primera simulación, la temperatura de colada y del molde fueron de 850° C y 25° C respectivamente. No se colocaron mazarotas ni chills en el sistema de alimentación. En la Figura 44 se muestran los resultados para esta situación. Se puede observar que se obtiene una porosidad mayor en comparación con las fundiciones grises.

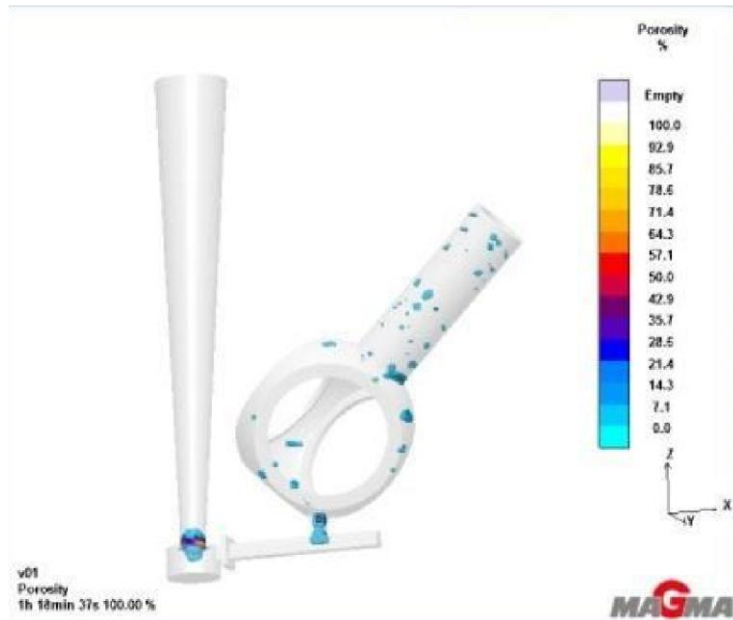


Figura 44. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Aleación de Aluminio AlSi7Mg, Temperatura de colada: 850°C, Mazarota: No, Chills: No, Temperatura de molde: 25°C.

En la siguiente simulación se agregó una mazarota de volumen 532 cm³ con el fin de evitar porosidad concentrada en la unión entre el eje y el *hub*, y como se puede ver en la Figura 45, el propósito se cumple en gran medida, aunque queda aún gran cantidad de porosidad retenida en la pieza.

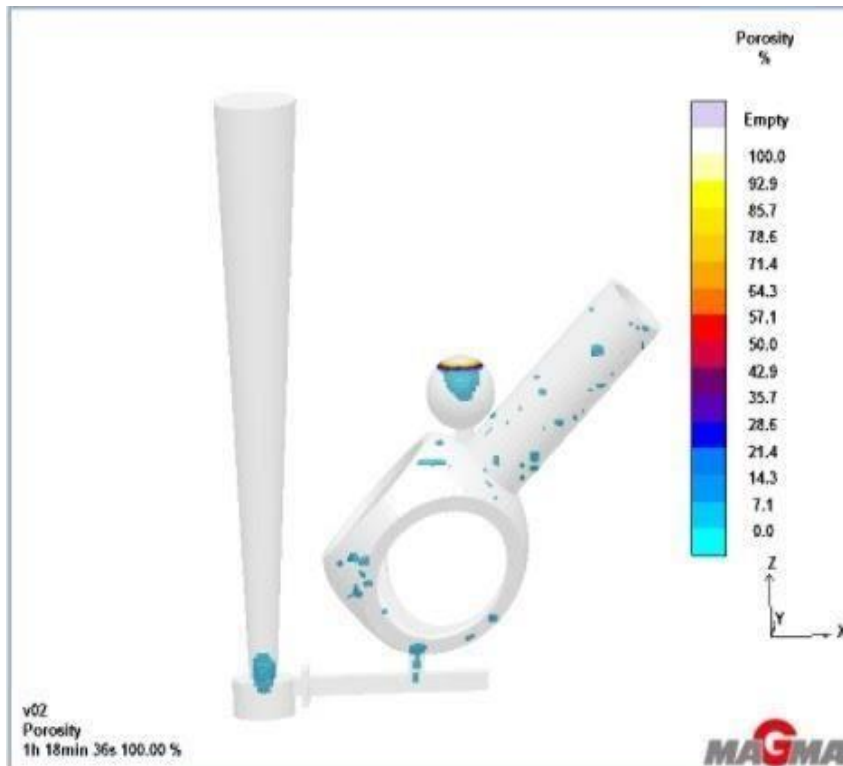


Figura 45. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Aleación de Aluminio AlSi7Mg, Temperatura de colada: 850°C, Mazarota: Si (Volumen: 532cm³), Chills: No, Temperatura de molde: 25°C.

Posteriormente, se llevó a cabo una última iteración para obtener una pieza lo más sana posible. Se eligió una configuración como la que se muestra en la Figura 46, compuesta por cinco enfriadores y dos mazarotas esféricas de volumen 798 cm^3 cada una y se disminuyó la temperatura de los enfriadores y del molde en 5° C . Los tres enfriadores colocados sobre los ligamentos del *hub* presentan la misma geometría que la reflejada en la Figura 40-A, mientras que los dos enfriadores dispuestos a lo largo del eje tienen geometrías distintas. El que se encuentra colocado en la región superior del eje (entre ambas mazarotas) tiene una longitud de 140 mm, un espesor de 4.5 mm y un radio interno de 50 mm, y el que se encuentra en la parte inferior del eje presenta el mismo espesor y radio interno, modificando únicamente su longitud, que es de 280 mm.

Estos cambios fueron propuestos en función de la gran cantidad de porosidad aún retenida en la pieza, y con la finalidad de forzar la solidificación del metal líquido hacia las mazarotas y al canal de alimentación. Esta configuración dio lugar a una mejora notable en cuanto a la porosidad retenida en el producto y la zona crítica resultó completamente sana, como se puede corroborar en la Figura 47.

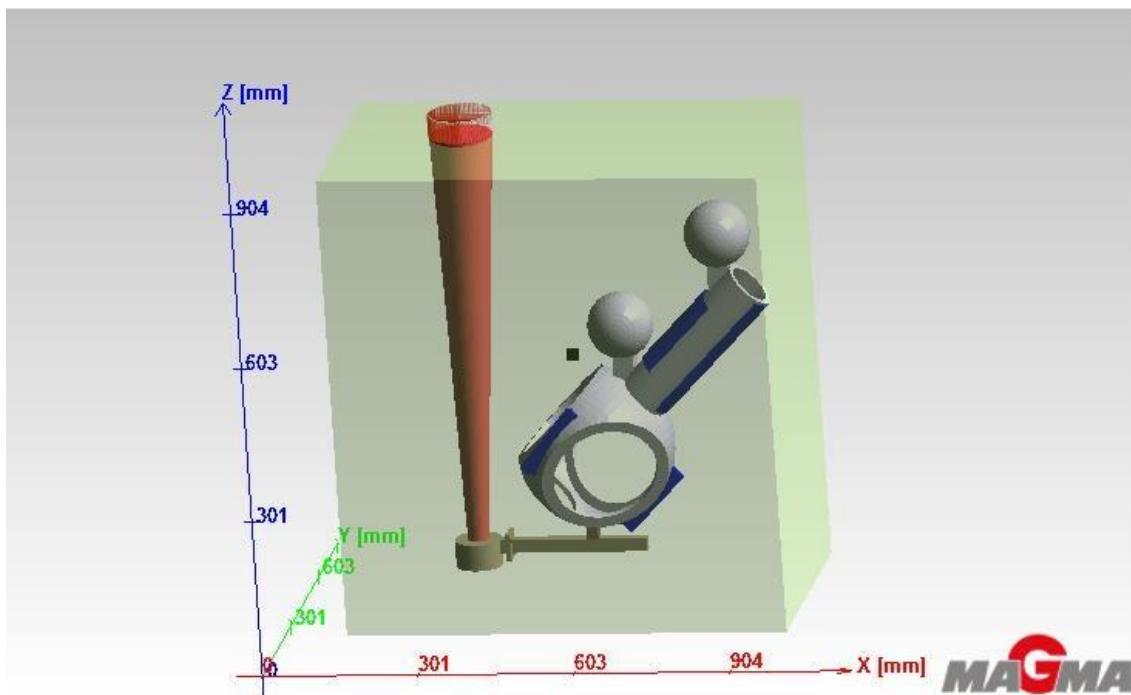


Figura 46. Sistema de alimentación para Aleación de Aluminio AlSi7Mg, Temperatura de colada: 850° C , Mazarota: Si (Cantidad:2, Volumen: 798 cm^3), Chills: Si (Cantidad:5).

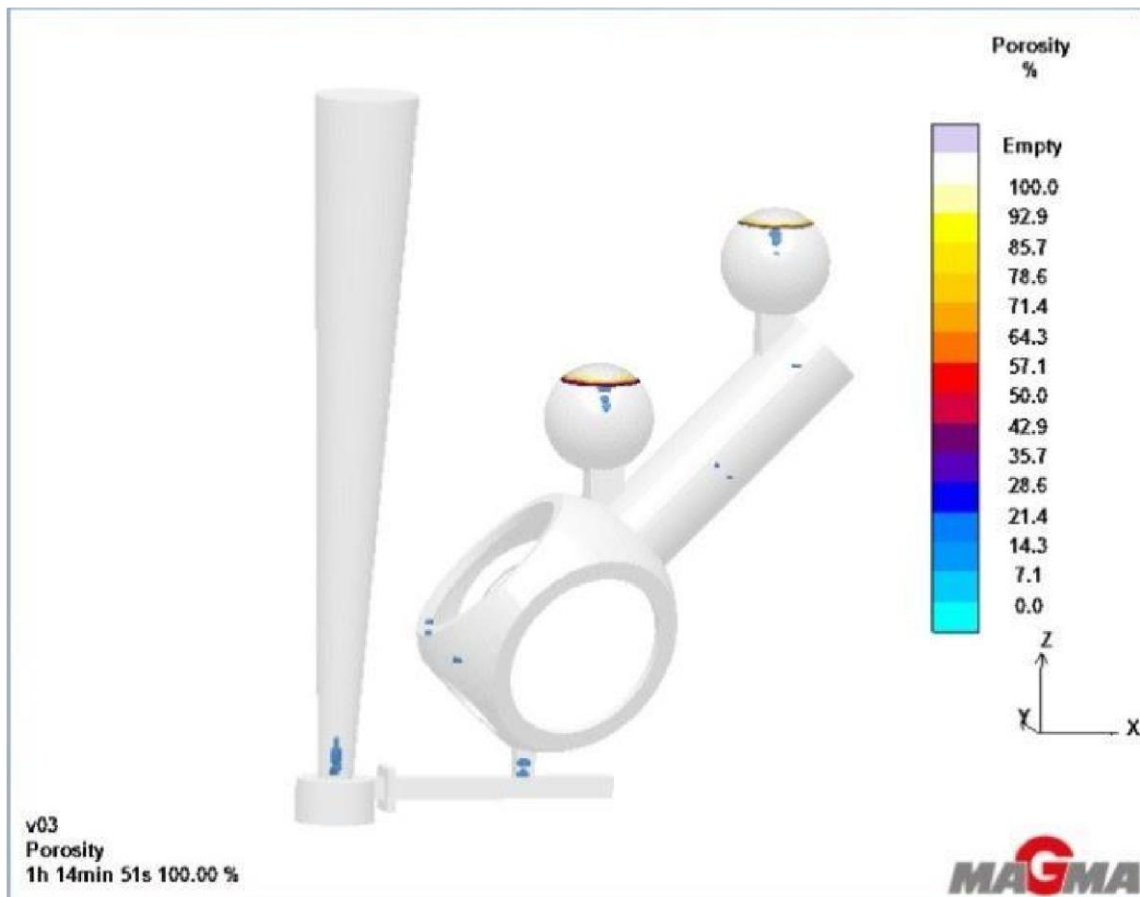


Figura 47. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Aleación de Aluminio AlSi7Mg, Temperatura de colada: 850°C, Mazarota: Si (Volumen: 798cm³), Chills: Si, Temperatura de molde y chills: 20°C.

Se verificó nuevamente el porcentaje de fracción de líquido a un tiempo dado de solidificación para corroborar la direccionalidad de solidificación, de manera de asegurar de que no queden regiones aisladas de metal líquido. A partir de lo observado en la Figura 48 se presume una correcta selección de las temperaturas tanto de colada, de chills y de molde; y de la cantidad y tamaño de las mazarotas y chills empleados.

En base a este segundo lote de simulaciones, se pudo desarrollar un sistema de alimentación y establecer parámetros de colada que permitieron predecir el desarrollo de la pieza "HUB-EJE LENTO" en aleación de aluminio libre de porosidad.

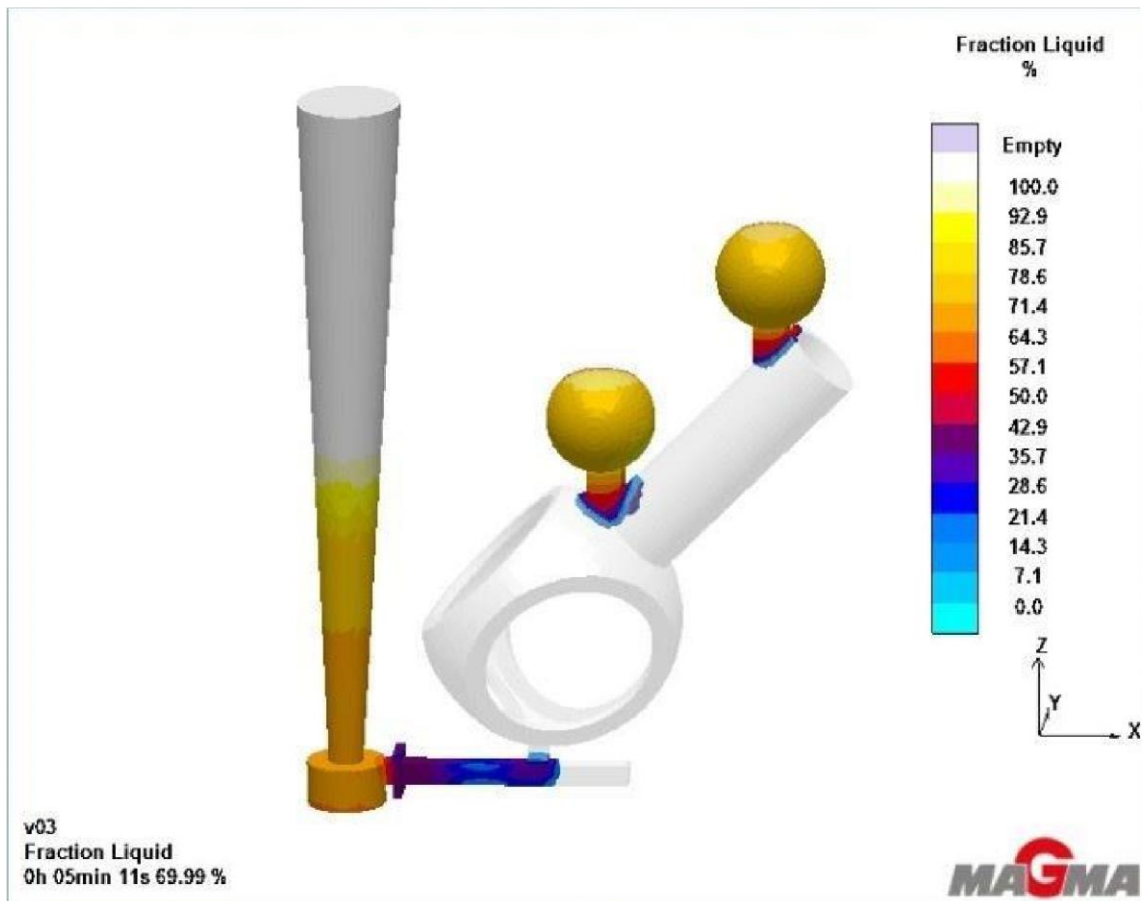


Figura 48. Fracción de líquido para 5 min, 11 seg luego del inicio de la solidificación. Se puede verificar una correcta direccionalidad de solidificación para Aleación de Aluminio AlSi7Mg utilizando el sistema de alimentación mostrado en la Figura 46.

5.1.4.5 QUINTO GRUPO: SIMULACIONES ACERO GX40CrSi13

Para el caso del desarrollo del sistema de alimentación de la pieza HUB-EJE LENTO para ser fabricada en acero, nuevamente se realizó una primera corrida con una configuración sin enfriadores ni mazarotas. La temperatura de colada y del molde fueron de 1600° C y 20° C respectivamente. Nuevamente, esta primera simulación resultó útil para evaluar, en una primera aproximación, la porosidad que presentaba la pieza en estas condiciones de colada.

Como se puede ver en la Figura 49 la porosidad resultó distribuida y generalizada en toda la pieza. Por este motivo, en las siguientes simulaciones se realizaron algunas modificaciones para obtener una pieza de mejor calidad.

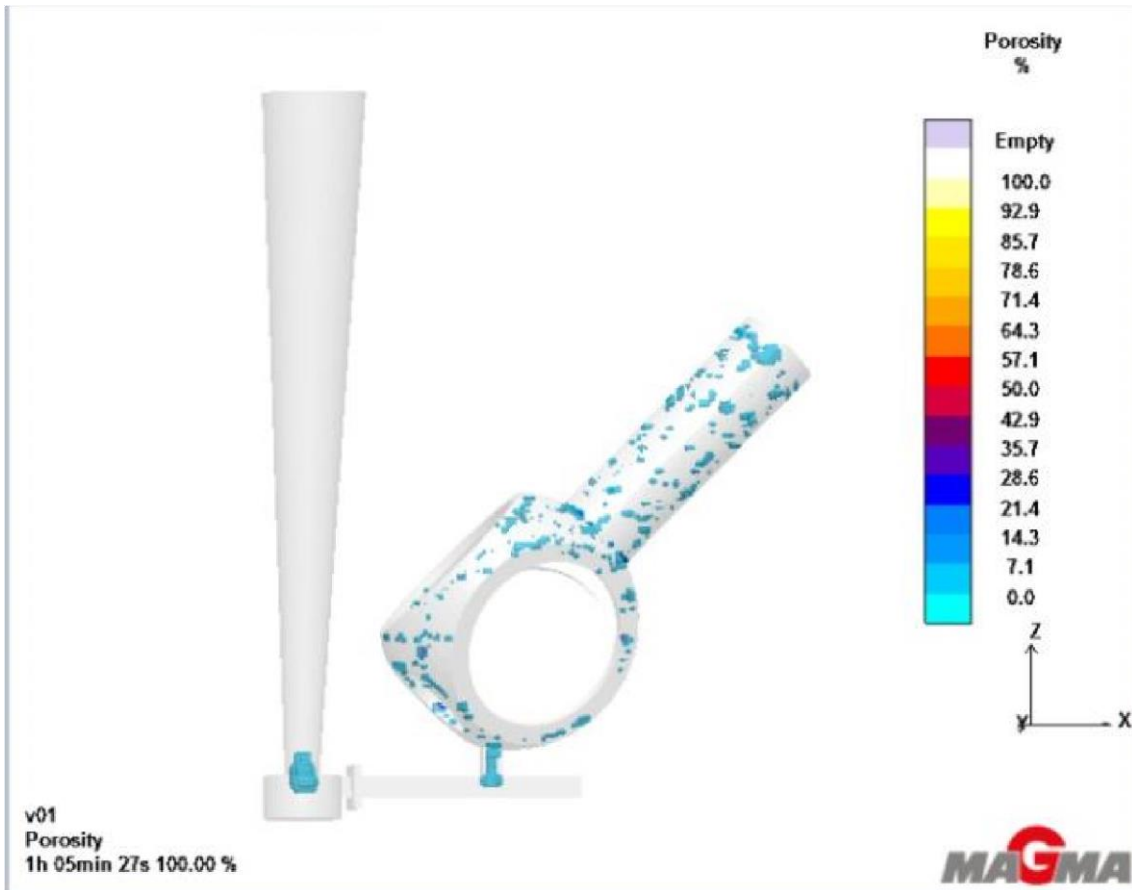


Figura 49. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Acero GX40CrSi13, Temperatura de colada: 1600°C, Mazarota: No, Chills: No, Temperatura de molde: 20°C.

La Figura 50 muestra los resultados de una nueva simulación considerando una mazarota en la región crítica unión HUB-EJE LENTO. Se mantuvieron constantes las condiciones de colada respecto de las mencionadas anteriormente. Esto dio lugar a una ligera reducción en la porosidad con respecto a las condiciones de colada mostradas en la Figura 49.

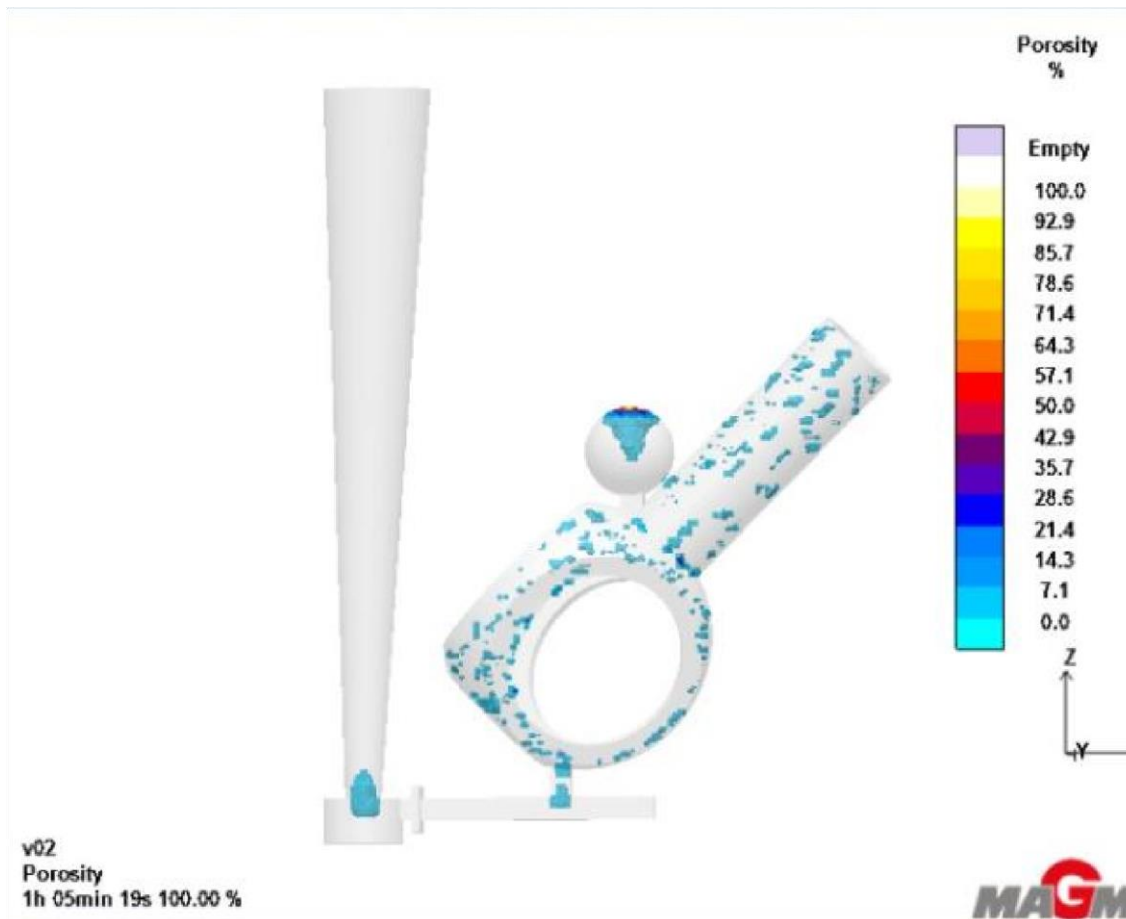


Figura 50. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Acero GX40CrSi13, Temperatura de colada: 1600°C, Mazarota: Sí (Cantidad:1, Volumen: 798cm³), Chills: No, Temperatura de molde: 20°C.

Las Figuras 51 y 52 muestran la porosidad obtenida para simulaciones realizadas utilizando los sistemas de alimentación desarrollados para fundición de hierro (ver Figura 39) y para aleación de aluminio (ver Figura 46) respectivamente. El único cambio que se realizó fue optar por un tamaño de mazarota esférica mayor a cualquier corrida realizada anteriormente (Volumen mazarota: 1064 cm³). Esto se basó en el hecho de que las coladas de acero presentan la mayor contracción durante la solidificación dentro de estos tres materiales seleccionados, por lo que se debe disponer de una mayor cantidad de reservorio líquido para compensar de mejor manera la contracción del material y minimizar la posible aparición de rechupes.

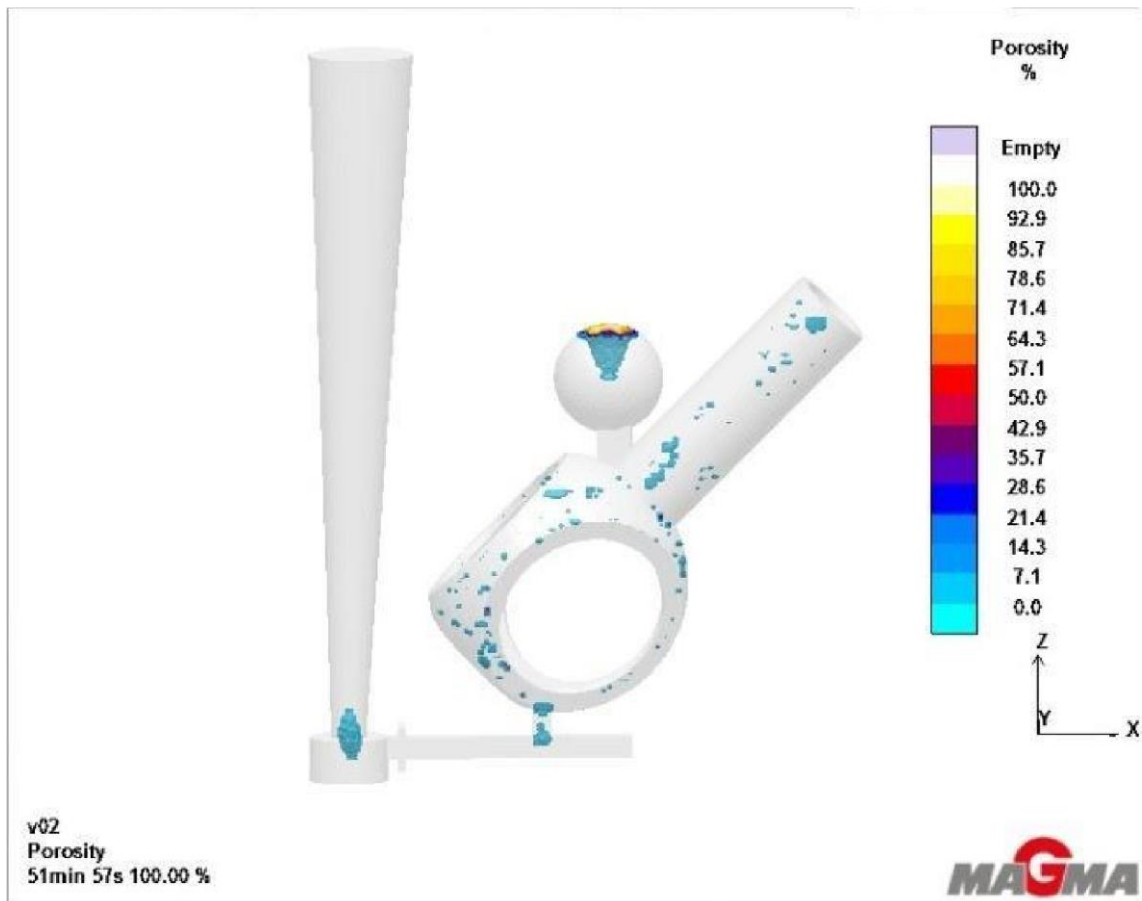


Figura 51. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Acero GX40CrSi13, Disposición de chills y mazarotas utilizadas para Fundición gris, según Figura 40. Temperatura de colada: 1600°C, Mazarota: Sí (Cantidad:1, Volumen: 1064 cm³), Chills: Sí (Cantidad: 4; 3 en los ligamentos y 1 en la unión "HUB- EJE LENTO"), Temperatura de molde y chills: 25°C.

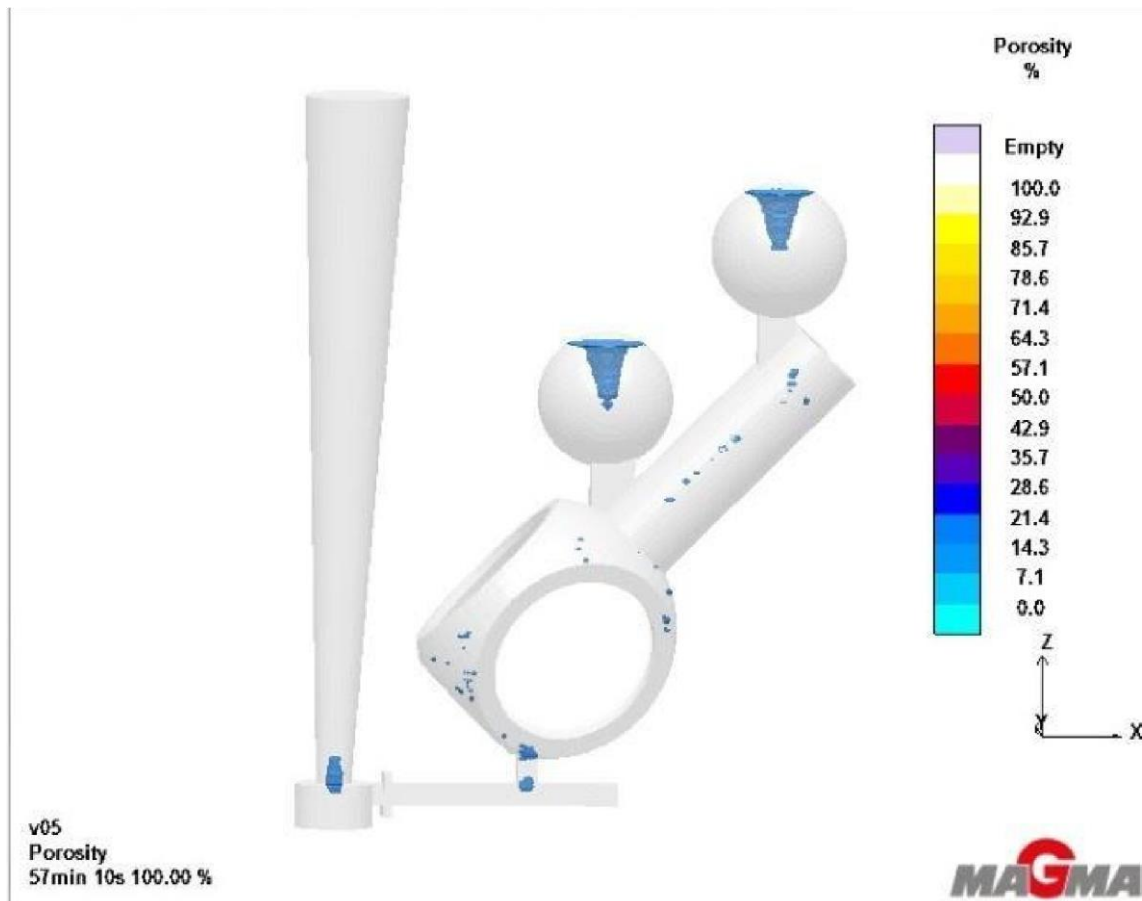


Figura 52. Porosidad en la pieza una vez solidificada. Material: Acero GX40CrSi13, Disposición de chills y mazarotas utilizadas para Aleación de Aluminio, según Figura 46. Temperatura de colada: 1600°C, Mazarota: Sí (Cantidad:2, Volumen: 1064 cm³), Chills: Sí (Cantidad: 5; 3 en los ligamentos y 2 a lo largo del Eje), Temperatura de molde y chills: 25°C.

Los resultados de porosidad mejoraron notablemente con respecto al caso anterior, tal como es mostrado en la Figura 52; los resultados obtenidos indican claramente que la configuración que presenta menor cantidad de porosidad es la que fue desarrollada para la aleación de aluminio, conformada por cinco enfriadores y dos mazarotas con un volumen de 1064 cm³ cada una.

En la Figura 53 se puede observar un instante de la etapa de solidificación asociado a las condiciones de colada utilizadas para realizar la simulación de la Figura 52, la cual refleja que las mazarotas y el sistema de alimentación son, efectivamente, las últimas zonas de retención de metal líquido.

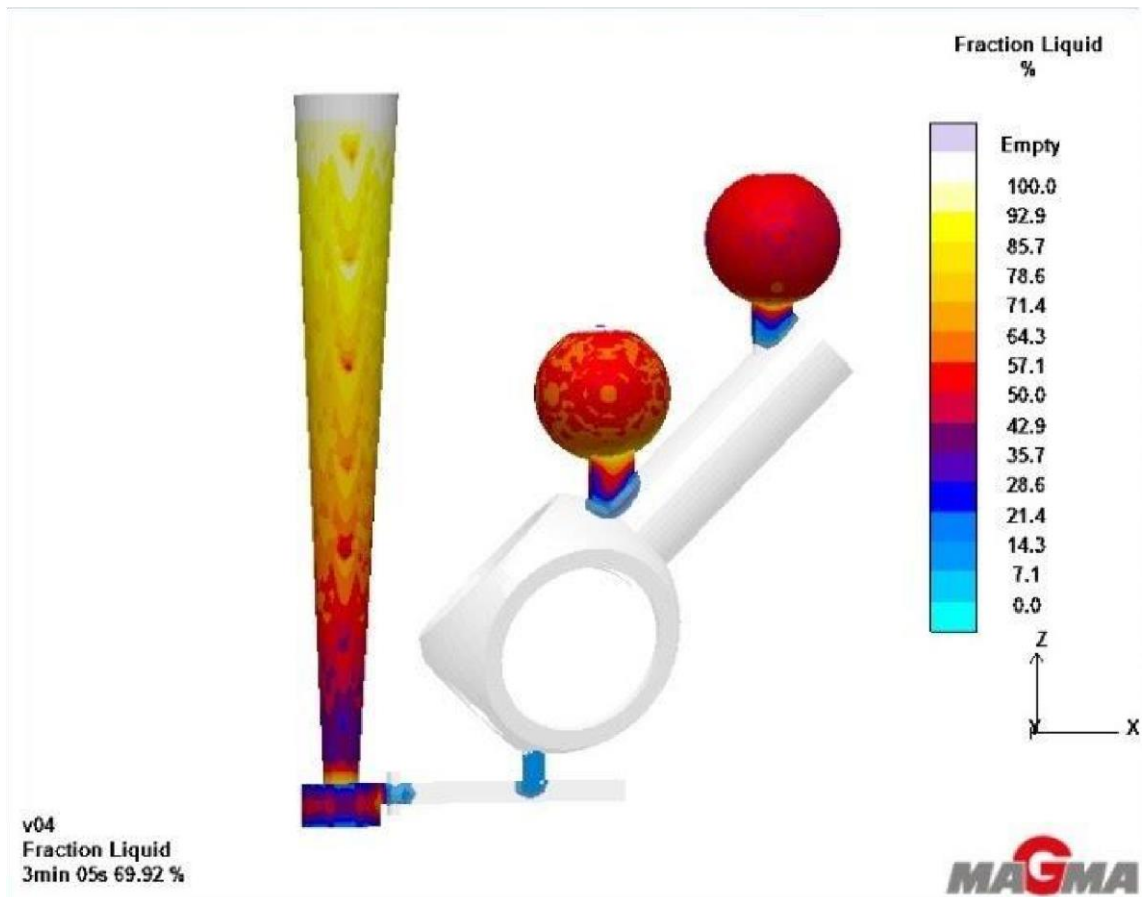


Figura 53. Fracción de líquido para 3 min, 5 seg luego del inicio de la solidificación asociada a la simulación de la Figura 52.

A partir de estos últimos resultados, se realizó una última variante de colada con el objetivo de intentar lograr una pieza colada de acero con una menor cantidad aún de porosidad.

Para este último caso, se modificó la geometría del chill superior que se encuentra a lo largo del eje para intentar mejorar la direccionalidad de la solidificación (ver Figura 54). Este chill tiene una longitud de 20 mm, un espesor de 4 mm y un radio interno de 35 mm. El motivo por el cual se modificó la geometría del enfriador superior utilizado en el sistema de alimentación desarrollado para la aleación de aluminio, fue con el fin de darle mayor direccionalidad a la solidificación hacia las mazarotas, disminuyendo de esta manera la posibilidad de aparición de porosidad en la pieza.

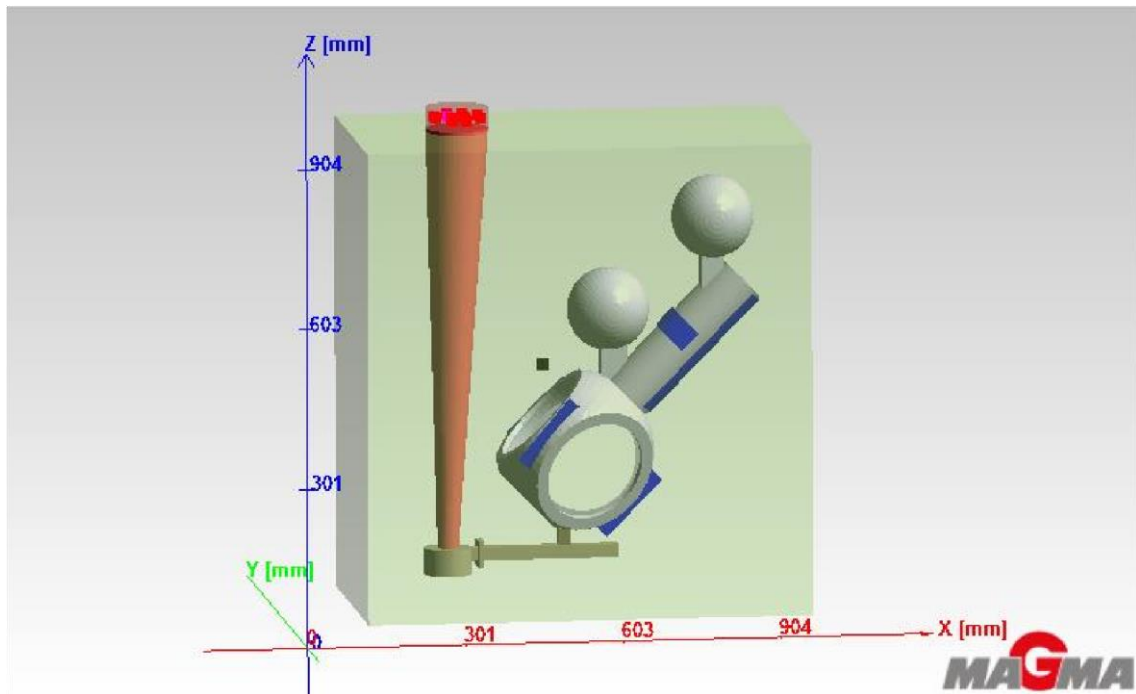


Figura 54. Sistema de alimentación para Acero GX40CrSi13, consistente con el sistema desarrollado para la Aleación de Aluminio AlSi7Mg, con modificación en el chill superior ubicado en el eje lento.

Los resultados obtenidos de porosidad para esta última configuración de sistema de alimentación, utilizando acero como material de fabricación para la pieza "HUB-EJE LENTO" se muestran en la Figura 55. Se puede observar una baja porosidad, similar a la mostrada en la Figura 52, pero con una leve disminución en la zona del eje lento. Esto permitiría concluir que la modificación del chill ubicado en la parte superior del eje permitiría una mejora en la calidad de la pieza.

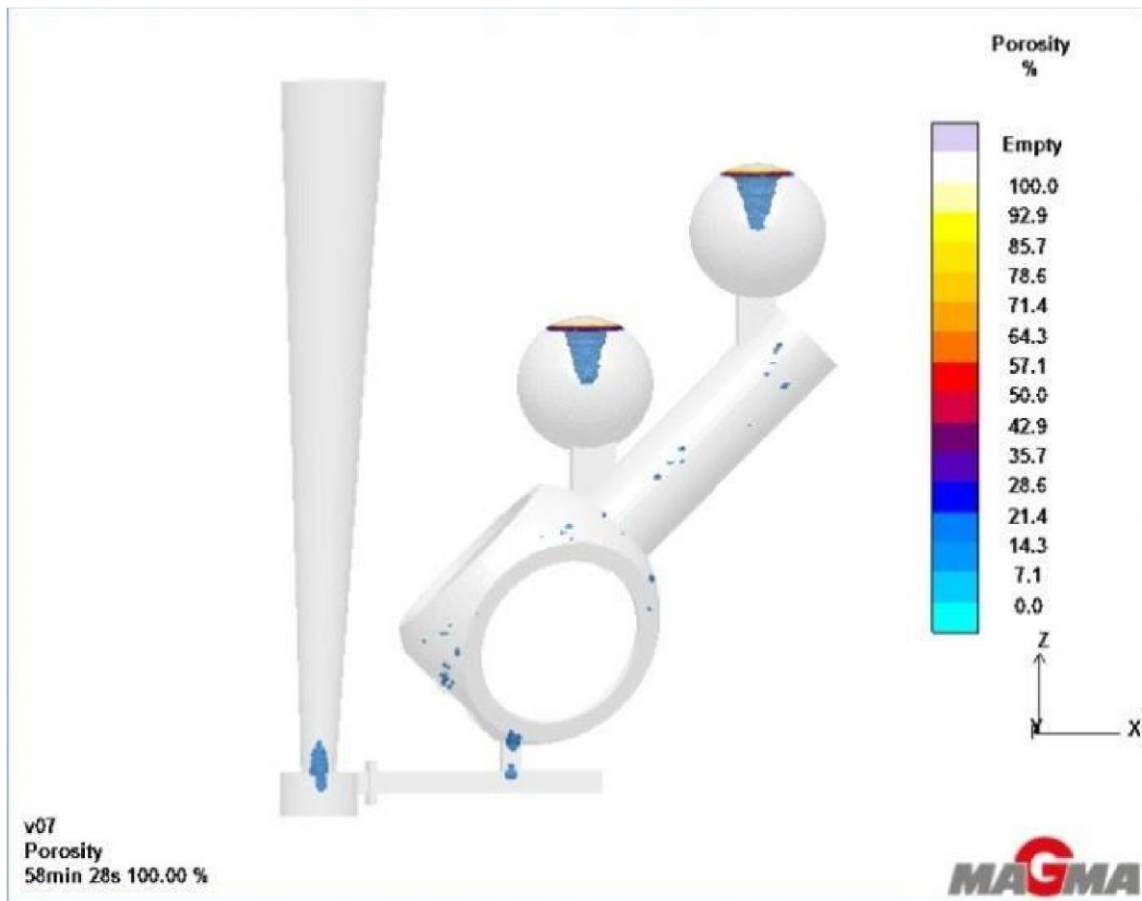


Figura 55. Descripción Ídem Figura. 52 con modificación de chill superior.

Si bien no se logró una pieza totalmente libre de porosidad para el caso del desarrollo de la pieza "HUB-EJE LENTO", utilizando como material acero, se considera que los resultados obtenidos son aceptables, teniendo en cuenta la mayor dificultad de colar piezas en este material utilizando técnicas de moldeo convencionales. Es importante mencionar que una posible solución a este problema sería que en la etapa experimental se considere un sobreespesor en la pieza para luego ser mecanizada hasta sus dimensiones finales, con el objetivo de remover la piel de colada, y en esa acción remover posible porosidad superficial retenida durante la solidificación de la pieza.

5.2 SIMULACIÓN ESTÁTICA DE SOLICITACIONES MECÁNICAS UTILIZANDO EL SOFTWARE SOLIDWORKS DE COMPONENTES: HUB-EJE LENTO-ASPAS

A partir de la pieza "HUB-EJE LENTO" diseñada, se realizó el ensamblaje con las aspás (diseñadas previamente por la alumna Catalina Miranda en el contexto de una Práctica Profesional Supervisada) utilizando el *software Solidworks*. En la Figura 56 se muestran las dimensiones principales del aspa. Se realizó un análisis simplificado de solicitaciones mecánicas del conjunto "ASPAS-HUB-EJE LENTO" con un complemento del mismo *software: Solidworks Simulation*. El objetivo del mismo fue encontrar la región más comprometida mecánicamente dentro del conjunto y evaluar si se encontraba en valores cercanos a la falla según el criterio adoptado.

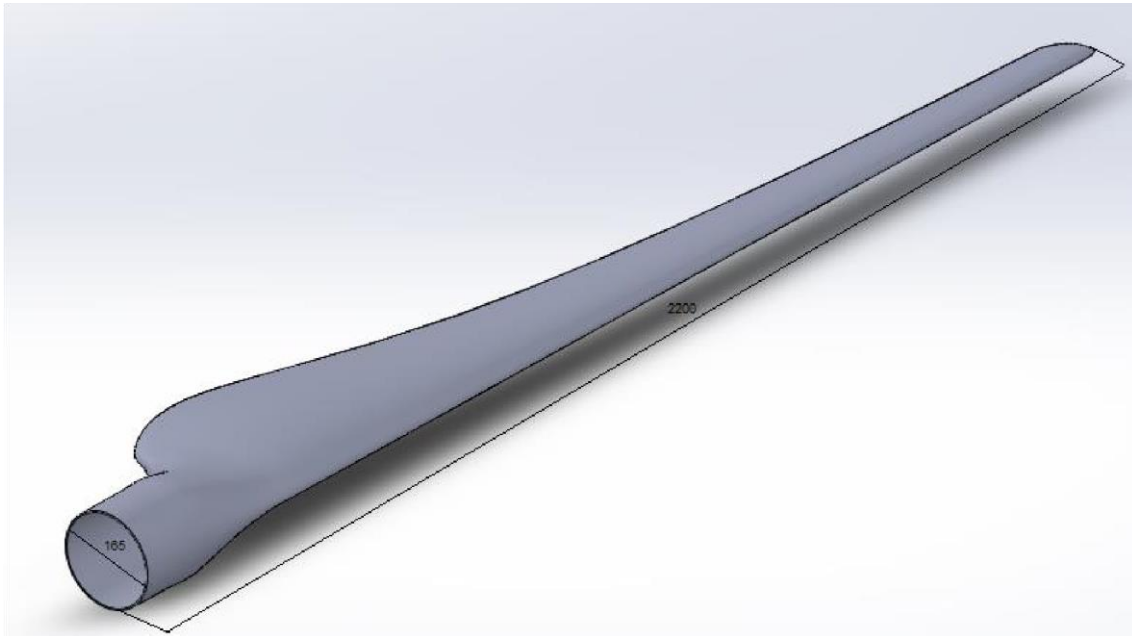


Figura 56. Dimensiones principales del aspa (en mm).

5.2.1 DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DISEÑO

Para determinar la velocidad del viento se utilizaron los datos tomados por el grupo GEEAA (Grupo de Estudio de Energías Alternativas y Ambiente) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata. Este grupo posee una estación meteorológica ubicada sobre el mismo edificio de la facultad (en la ciudad de Mar del Plata, en la intersección de la calle Ing. Ratero y la avenida Juan B. Justo). El equipo utilizado para las mediciones fue el “*Weather Wizard III Station*” de la empresa “*Davis Instruments*”. Las mediciones del viento se realizaron a una altura de 24 metros. Los datos se midieron durante todo el año 2000 en intervalos de 5 minutos [21].

Dado que la velocidad del viento aumenta con la altura, como se observa en la Figura 57, se debió estimar la altura del *hub* en el cual se insertarían las aspas. El valor propuesto de forma arbitraria fue de 10 metros.

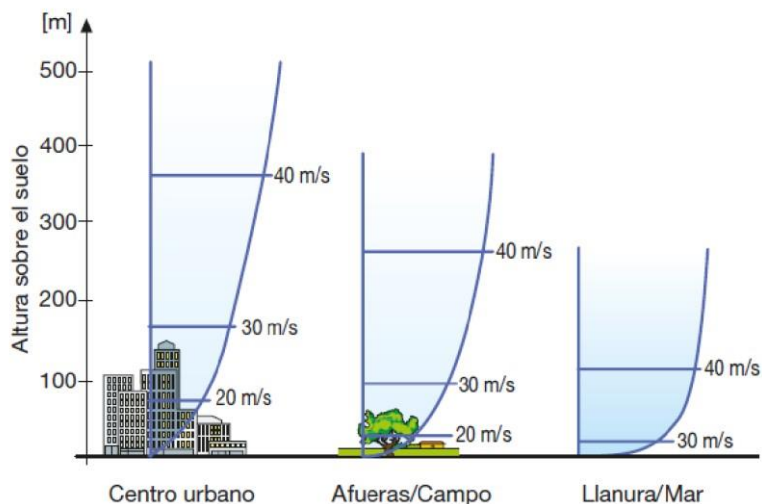


Figura 57. Variación de la velocidad del viento con la altura sobre el suelo, para diferentes topografías de terreno.

Como las mediciones se hicieron a 24 metros de altura, se debieron convertir los datos obtenidos usando la Ley Exponencial de *Hellmann*, que permite obtener la velocidad del viento a una altura diferente a la calculada experimentalmente.

$$v_h = v_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^\varepsilon$$

(Ecuación.6)

Donde ε es el exponente de *Hellmann*, que es función de la topografía del sitio de colocación del molino y es igual a 0.25 para ciudades, h es la altura en metros, v_{10} es la velocidad del viento medido a 10 metros de altura y v_h es la velocidad del viento a la altura h . El principal inconveniente que surgió al usar los datos provistos por el grupo GEEAA es que estos fueron medidos en una ciudad, mientras que la instalación del molino se prevé en zonas rurales, por lo que lo correcto sería utilizar datos obtenidos en zonas rurales con el correspondiente valor del exponente de *Hellmann*.

Una vez convertidos los datos, se graficó la energía probable en función de la velocidad obteniéndose el gráfico de la Figura 58, donde se observa que la velocidad de viento máxima anual es 15.6 m/s, y que la velocidad con mayor probabilidad de ocurrencia es 5.6 m/s. De esta forma, se adoptó como velocidad de diseño 6 m/s. [21]

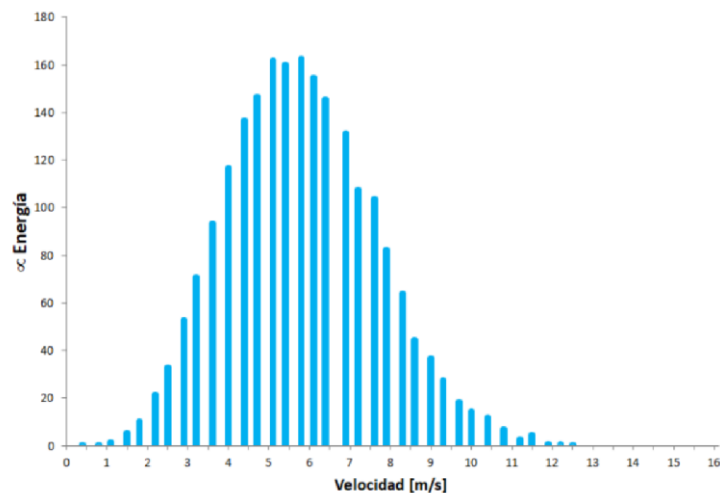


Figura 58. Curva de distribución de energía del viento.

5.2.2 DETERMINACIÓN DE LA FUERZA APLICADA

Por otro lado, fue clave determinar la fuerza de incidencia del viento para poder calcular los esfuerzos a los que van a estar sometidos los componentes del molino. El área de impacto (o área proyectada) del viento se aproximó dibujando el contorno del aspa con rectas y curvas *splines*. Con la herramienta "Medir" disponible en *Solidworks* se obtuvo el valor del área de interés. El área proyectada resultó de 0.4721 m². En la Figura 59 se muestra una imagen del área proyectada de una de las aspas.

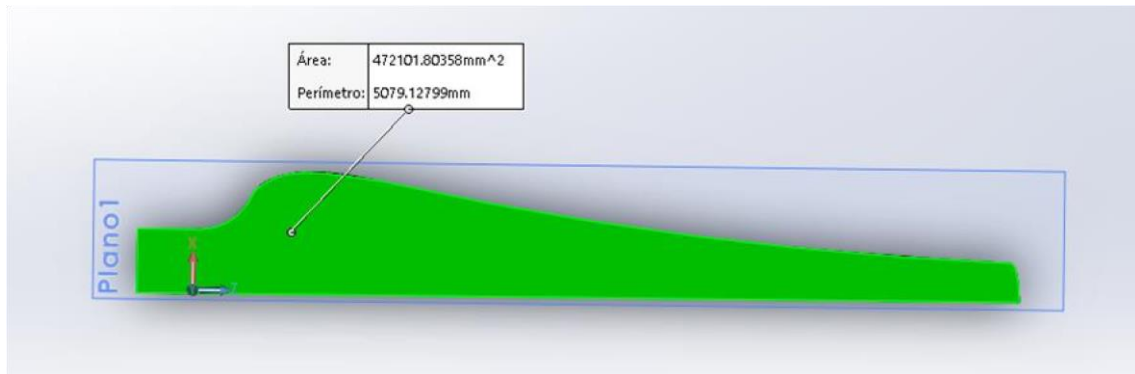


Figura 59. Área proyectada aspa.

Con los valores de velocidad de incidencia del viento y área proyectada se procedió a calcular la fuerza (F) del viento generada, obtenida a partir de la siguiente expresión:

$$F=A\delta V^2 \text{ (Ecuación.7)}$$

Donde A es el área de incidencia del viento sobre cada aspa (m²), δ es la densidad del aire (1.229 Kg/m³) y V es la velocidad de incidencia del viento (m/s). De esta manera, la fuerza calculada para una velocidad de viento de 6 m/s resultó de F= 20.88 N [22].

5.2.3 ENSAMBLAJE DEL CONJUNTO “HUB-EJE LENTO-ASPAS”

La primera tarea experimental en *Solidworks* fue realizar el ensamblaje de las aspas con el *hub*. Se tuvieron que realizar algunas adiciones y reestructuración de las aspas para efectuar el ensamblaje de manera correcta y, de esta manera, evitar dificultades en el mallado al momento de realizar las simulaciones mecánicas de los componentes. Por un lado, a la pieza “HUB-EJE LENTO” se le agregaron tres capas cilíndricas sobre las regiones donde irán colocadas las aspas del molino. Cada una tiene un diámetro de 248 mm y un espesor de 20 mm. La región azulada de la Figura 60 muestra una de las tres capas. Estas geometrías simularían una brida con caño que se utilizaría para poder realizar el ensamble en las piezas reales prototipos.

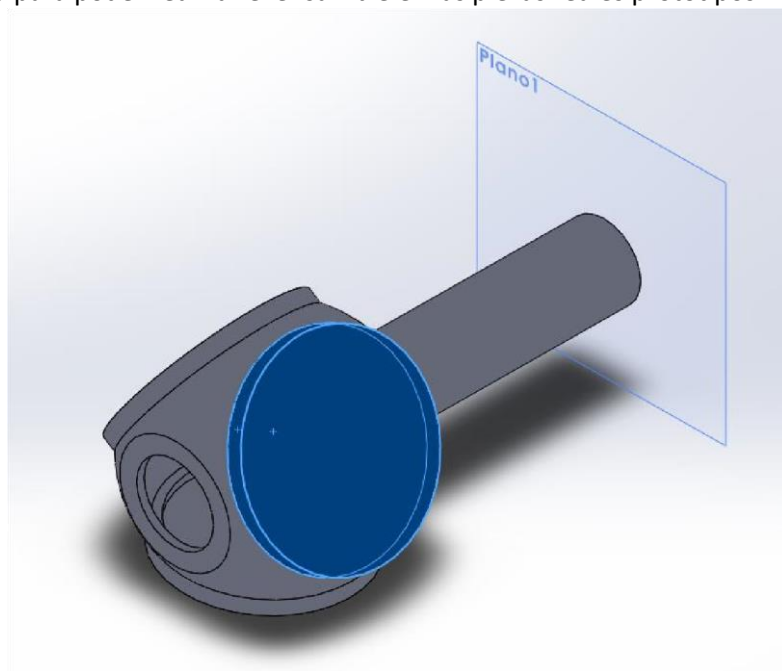


Figura 60. Capas cilíndricas para facilitar el ensamblaje.

La otra modificación necesaria para posibilitar el mallado de la estructura fue sobre las aspas. Las mismas están constituidas por tres zonas características: la base o raíz, la zona de transición, y la región aerodinámica. La raíz es de sección circular constante de modo de facilitar la unión con el *hub*. La región aerodinámica está conformada por perfiles aerodinámicos con el objetivo de captar la mayor cantidad de energía cinética posible del viento incidente sobre las aspas. Por último, la zona de transición tiene la función de ir adaptando gradualmente la raíz con la zona aerodinámica. Estas regiones se pueden observar claramente en la Figura 61.

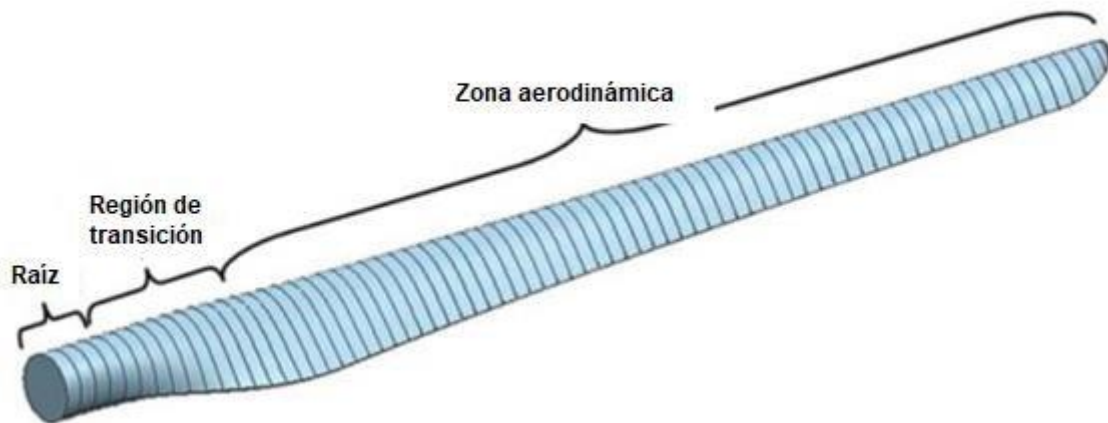


Figura 61. Regiones geométricas características del asa.

De esta manera, el cambio fue realizado sobre la raíz del asa donde gran parte de la sección circular hueca fue transformada en un cilindro macizo de 91.07 mm de longitud, como se ve en la Figura 62:

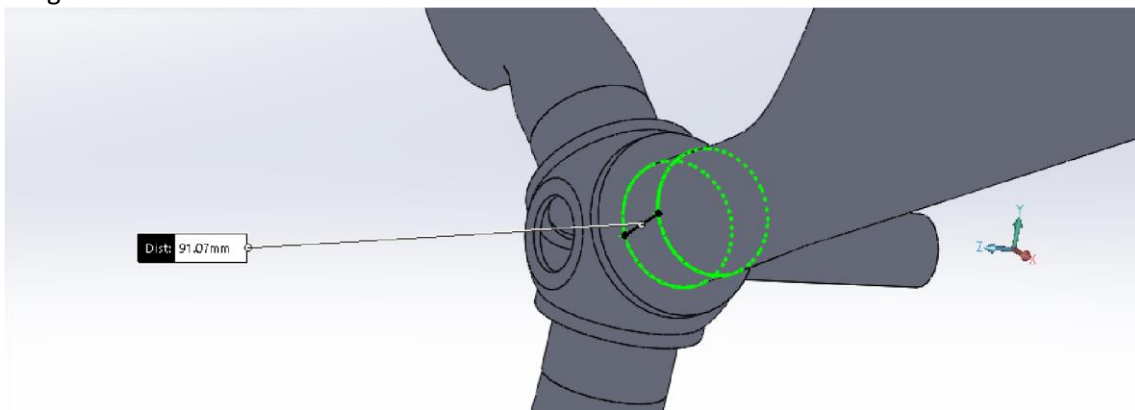


Figura 62. Ubicación cilindro macizo en las aspas.

Una vez realizadas estas modificaciones se procedió al ensamblaje de todo el sistema utilizando herramientas de concentricidad y adherencia perfecta entre los sólidos. Cabe destacar que estos cambios en el ensamblaje fueron simplificaciones del modelo lo cual repercutió en los resultados obtenidos de las simulaciones mecánicas, y como se dijo anteriormente, fueron necesarios para que, al momento de realizar las mismas, no haya errores con el mallado de todo el sistema completo. Además, se orientaron las aspas de una forma en particular para aprovechar el diseño aerodinámico de las mismas. Para ello, se ubicó el plano de rotación de las aspas de manera perpendicular a la dirección de incidencia del viento. El plano de rotación (Plano 13) se puede ver en la Figura 63.

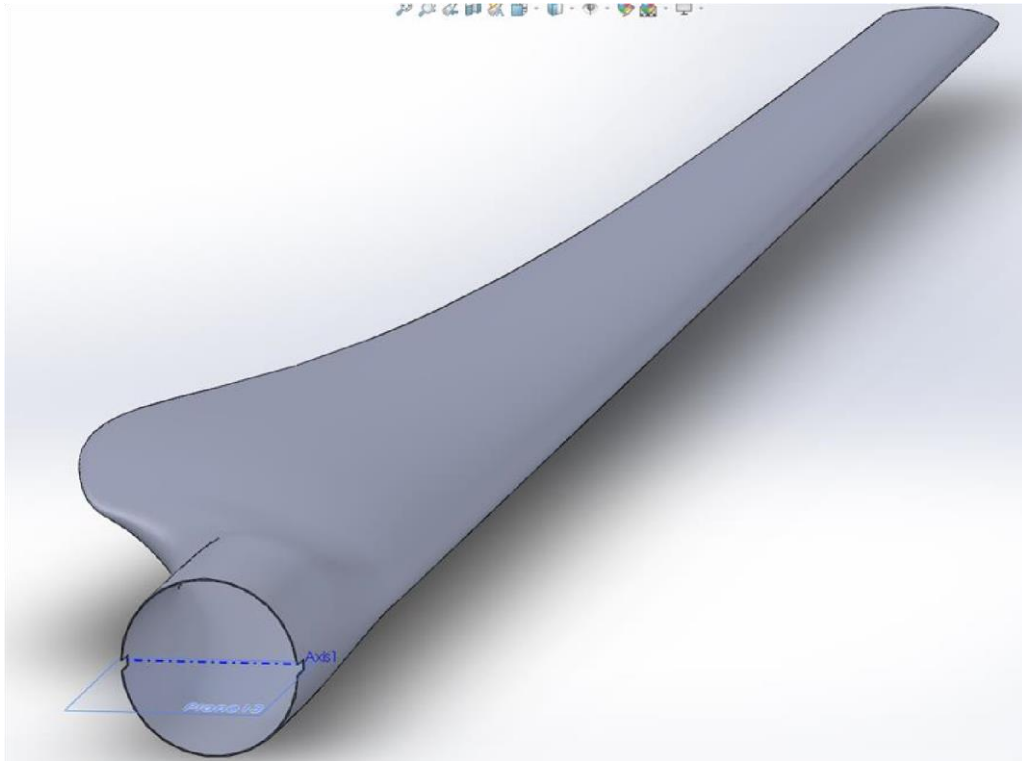


Figura 63. Plano de rotación del aspa.

5.2.4 CRITERIO DE FALLA MECÁNICA

En esta sección, se presenta el criterio de falla utilizado como consecuencia del efecto de la sollicitación aplicada sobre el sistema. Las cargas que produce el viento sobre el molino generan momentos flectores sobre las aspas. Según el criterio de Von Mises es posible calcular una tensión equivalente que represente el estado tensional de cada elemento del mallado. A partir de las simulaciones se obtendrá la distribución de tensiones de Von Mises en todo el sólido. Luego, se comparará el valor máximo de tensión equivalente de Von Mises con la resistencia a la fatiga del material con el cual están fabricadas las piezas analizadas (HUB-EJE LENTO-ASPAS). De esta manera, se determinará cuál es la zona crítica del sistema. Si la máxima tensión equivalente de Von Mises resultara mayor a la resistencia a la fatiga del material, la estructura fallaría. Cabe destacar que el criterio utilizado sirve de modo orientativo y aproximado para poder efectuar el estudio.

5.2.5 ETAPAS ANÁLISIS ESTÁTICO EN *SOLIDWORKS*

5.2.5.1 MALLADO

Para el mallado se realizó un mallado basado en curvatura, el cual es la opción más adecuada para piezas de pequeño espesor. El tamaño máximo de elemento fue de aproximadamente 1.05 cm y el tamaño mínimo de elemento fue de aproximadamente de 0.21 cm (ver Figura 64).

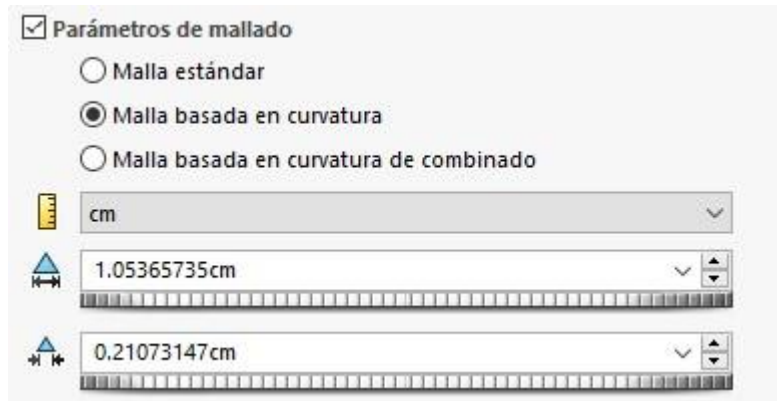


Figura 64. Mallado.

5.2.5.2 DEFINICIÓN DE MATERIALES

Para las aspas se creó un material personalizado con las propiedades acordes al material compuesto Epoxi con fibras de yute (Figura 65) [23].

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	4.4e+10	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.3	N/D
Módulo cortante	64000000	N/m ²
Densidad de masa	1164	kg/m ³
Límite de tracción	105000000	N/m ²

Figura 65. Propiedades Epoxy/ Fibra de Yute.

Para el HUB-EJE LENTO se seleccionó simplemente el material C355-0-T61 de la base de datos del programa (Figura 66). Según la ficha técnica este material es una aleación de aluminio apta para ser colada y posee propiedades mecánicas muy similares a la aleación de aluminio en la cual sería fabricado el HUB-EJE LENTO prototipo [24]. Las simulaciones de propiedades mecánicas solamente se realizaron, en una primera instancia, utilizando a la aleación de aluminio como único material de fabricación del componente HUB-EJE LENTO. El motivo fue que este material es el que presenta las menores propiedades mecánicas de los tres materiales propuestos para la fabricación de la pieza HUB-EJE LENTO. Si este material resistiese satisfactoriamente las solicitaciones propuestas, también lo debería hacer la fundición nodular ADI y el acero con estructura bainítica libre de carburos.

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 66. Propiedades aleación de aluminio C355-0-T61.

5.2.5.3 CONDICIONES DE CONTORNO

Como condición de contorno se colocó un empotramiento en el extremo libre del “HUB-EJE LENTO” para realizar la simulación (ver Figura 67).

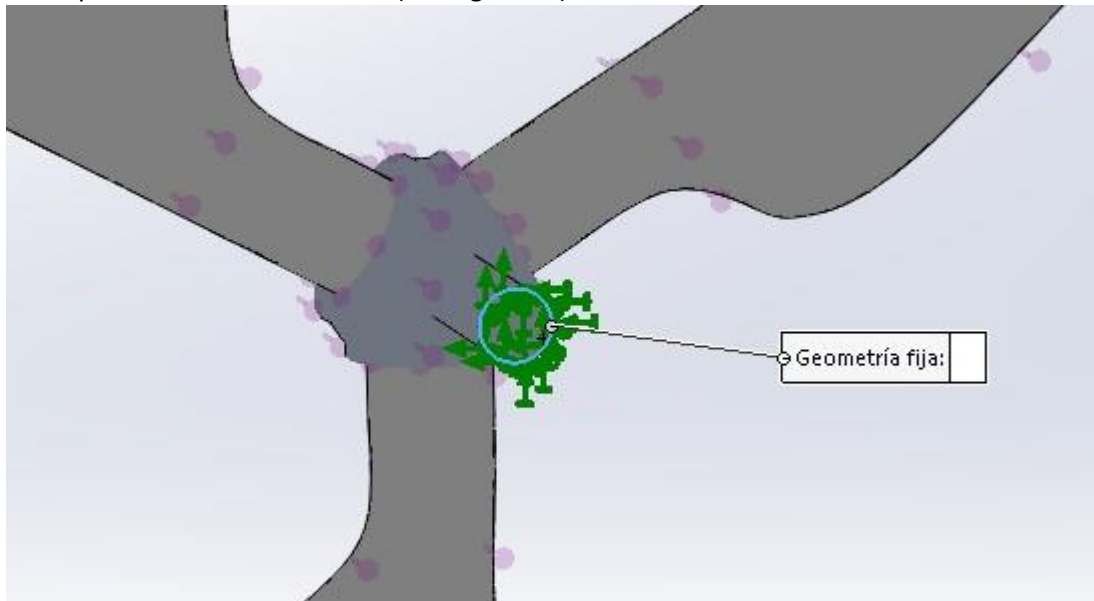


Figura 67. Empotramiento en el eje.

5.2.5.4 APLICACIÓN DE FUERZA DISTRIBUIDA EN EL ENSAMBLE

Luego se colocó una fuerza distribuida sobre la estructura en dirección paralela al eje lento (ver Figura 68), cuya magnitud depende de la velocidad de incidencia del viento que se desea evaluar, como se mostró en la Ecuación 7.

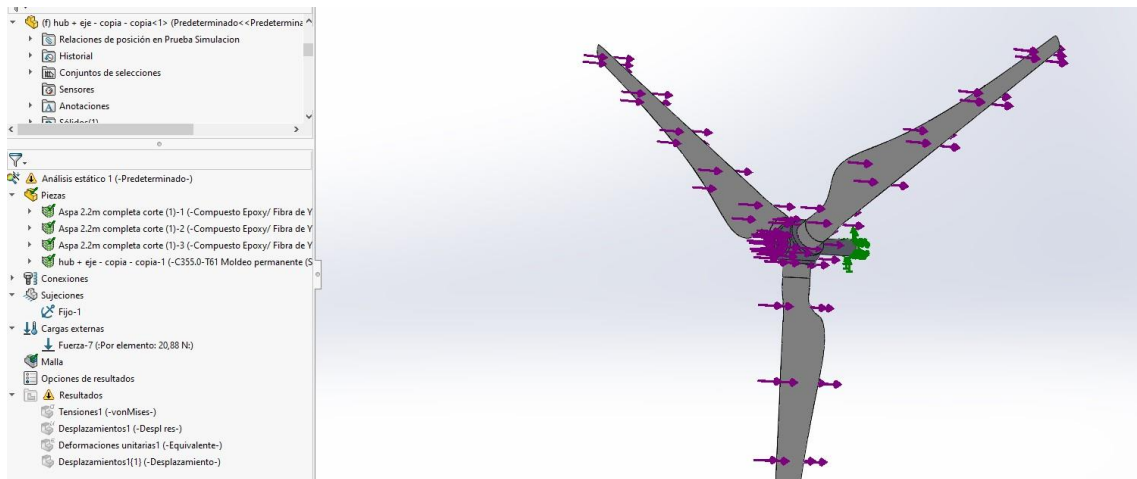


Figura 68. Fuerza distribuida sobre el conjunto de piezas HUB-EJE LENTO-ASPAS.

5.2.5.5 PERFIL DE TENSIONES DE VON MISES

Como se puede observar en las Figuras 69-A y 69-B, la máxima tensión de Von Mises ocurrió en las aspas, específicamente en la zona de transición de las mismas. Su valor fue de 0.87 Mpa para la velocidad de incidencia del viento de 6 m/s (equivalentes a 21.6 Km/h).

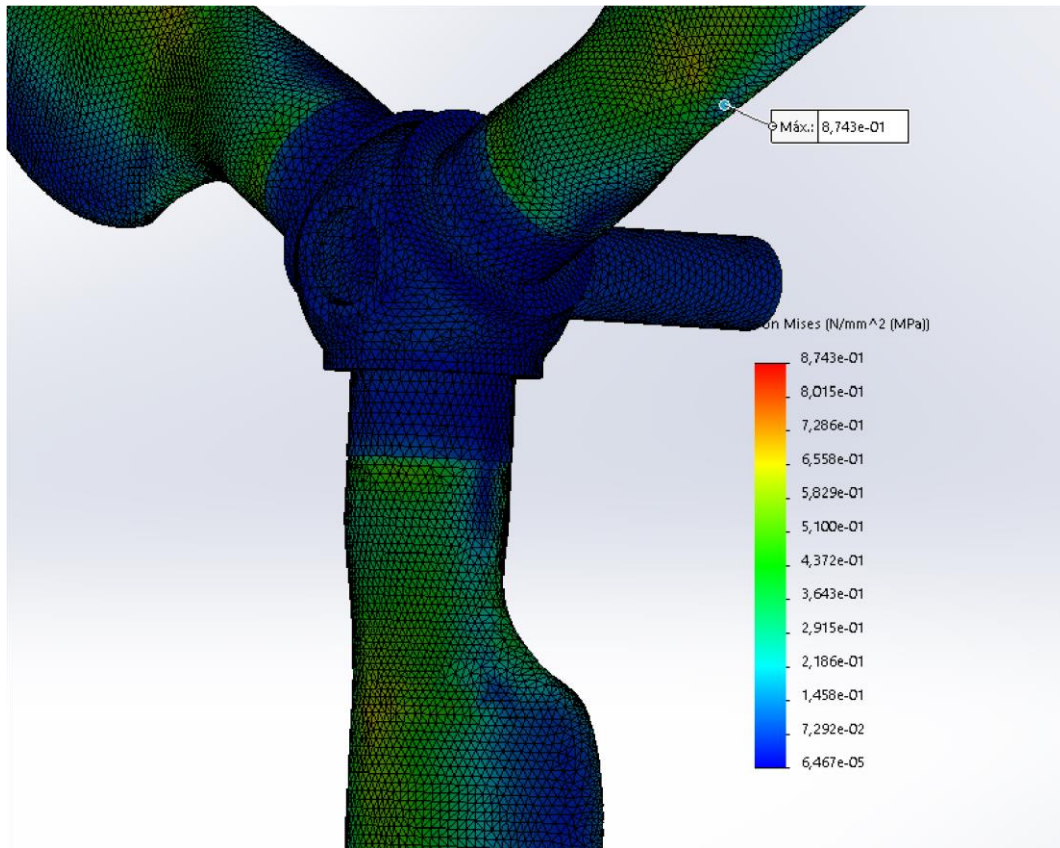


Figura 69-A. Perfil de tensiones de Von Mises.

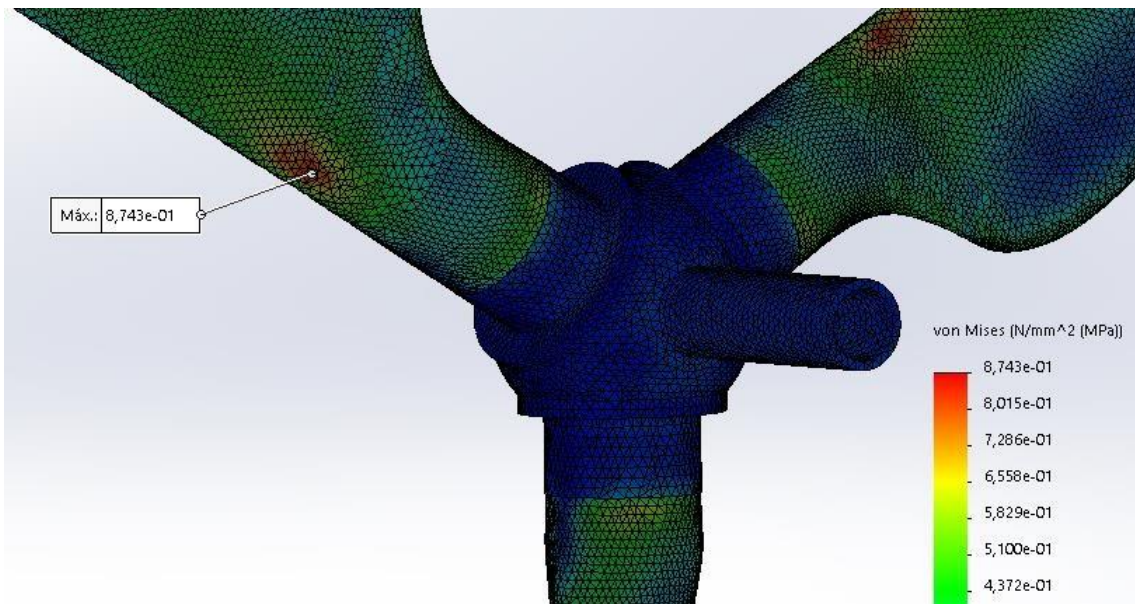


Figura 69-B. Perfil de tensiones de Von Mises.

Por lo tanto, se comparó este valor con el de resistencia a la fatiga para el material compuesto con el que serán fabricadas las aspas. Debido a la dificultad de encontrar valores confiables de resistencia a la fatiga para materiales compuestos, se adoptó un criterio para obtener la resistencia a la fatiga del material compuesto Epoxi/Yute. La Figura 70 establece una relación entre la resistencia a la fatiga y la resistencia estática en función del número de ciclos para distintos materiales compuestos y para el acero [25].

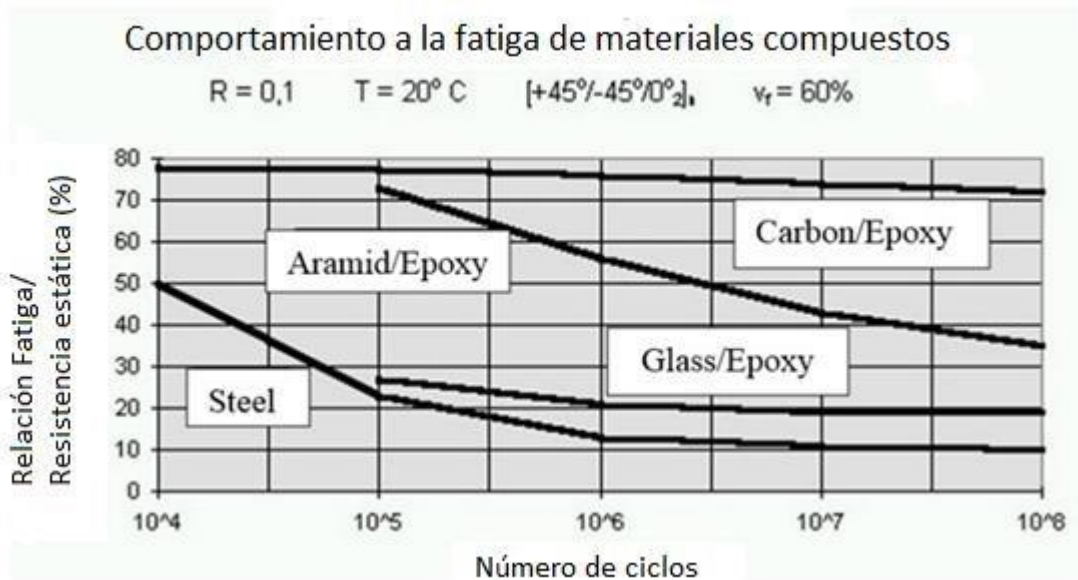


Figura 70. Comparación del comportamiento a la fatiga de materiales compuestos frente al acero.

Con esta información, el compuesto Epoxi/ Fibras de Vidrio presenta una relación entre resistencia a la fatiga y resistencia estática del 20% para 10^6 ciclos (se supone esta cantidad de ciclos para establecer vida infinita a la fatiga del material). Como la resistencia a la tracción de este material presenta un rango entre 330 y 370 Mpa se consideró el valor medio para continuar con los cálculos [26]. Entonces, como la resistencia promedio a la tracción es de 350 Mpa, la resistencia a la fatiga resultaría de 70 Mpa aproximadamente.

Luego, para relacionar este valor de resistencia a la fatiga de Epoxi/ Fibras de Vidrio con Epoxi/ Yute, se supuso que el cociente de las resistencias a la tracción de ambos materiales resultaba igual al cociente de sus resistencias a la fatiga. Entonces, primero se realizó el cociente entre las resistencias a la tracción de ambos materiales, lo que da un valor de 3.33 y este valor se usó para encontrar la resistencia a la fatiga del compuesto Epoxi/Yute, resultando de 21 Mpa aproximadamente. Este valor se encuentra muy por encima de la sollicitación de la pieza (0.87 MPa), por lo que en estas condiciones de carga el sistema no fallaría.

Iterando para mayores valores de fuerza (es decir, aumentando la velocidad de incidencia del viento) se pudo obtener un valor de máxima tensión de Von Mises que iguale la resistencia a la fatiga del material compuesto (21 Mpa). Esto ocurrió para un valor de $F = 502 N$ o, lo que es equivalente, para una velocidad de incidencia del viento de 29.41 m/s (equivalentes a 105.88 Km/h). De esta manera, velocidades de viento iguales o mayores a este valor producirían la falla de la estructura, como se muestra en la Figura 71.

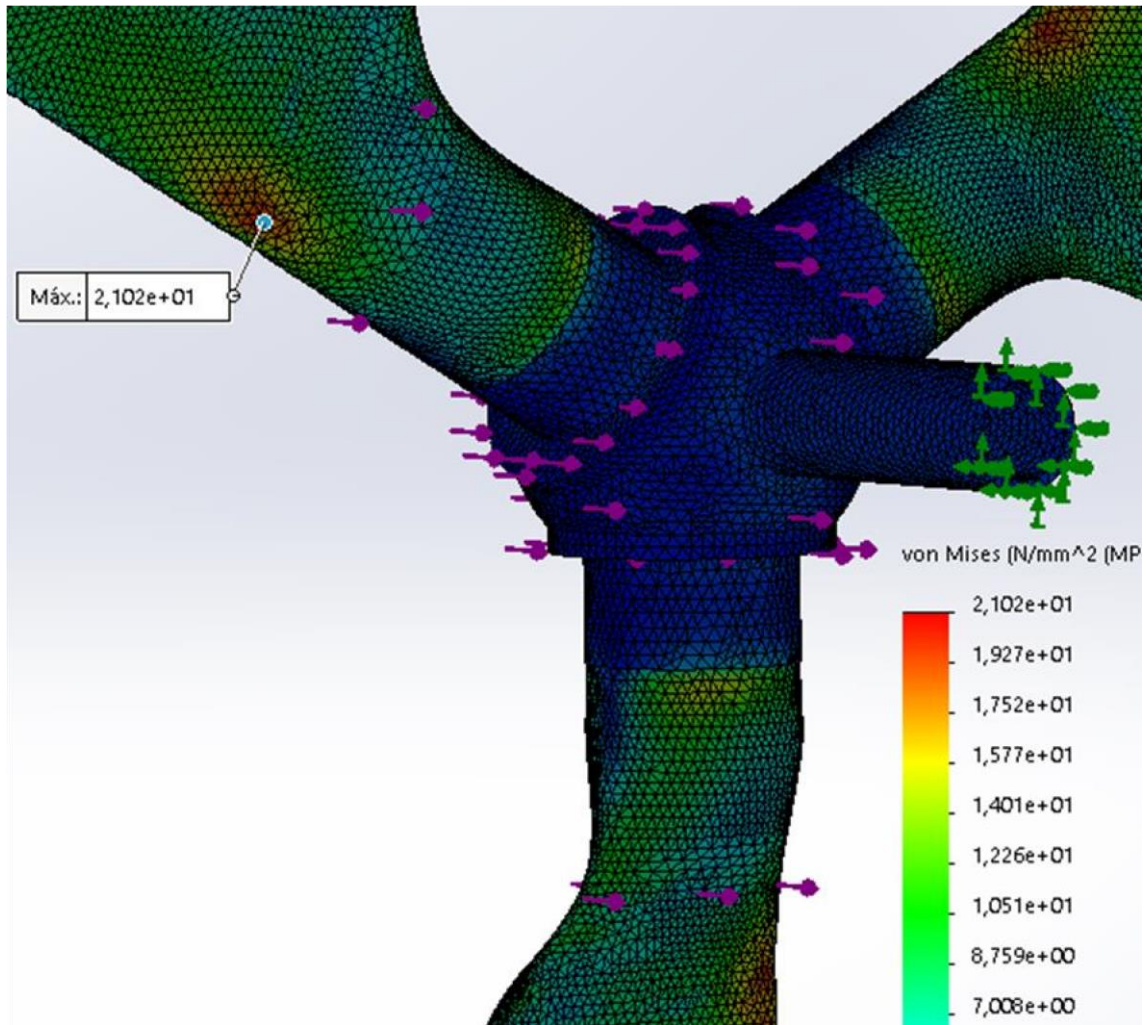


Figura 71. Máxima tensión de Von Mises para V= 29.41 m/s.

A partir del estudio efectuado, se esperaría que el molino pueda estar sometido a velocidades de viento del rango de 21.6 a 105.88 Km/h sin que se produzca la falla con el criterio adoptado. Además, en caso de que ocurriese, la falla del molino ocurriría en las aspas y no en el HUB- EJE LENTO, por lo que este último estaría sobredimensionado y un espesor de 10 mm aseguraría un correcto funcionamiento de la estructura considerando la aleación de aluminio establecida en este trabajo.

Por otra parte, la máxima tensión equivalente de Von Mises en el “HUB-EJE LENTO” fue de aproximadamente 1.8 Mpa para esta situación, como se puede ver en la Figura 72, resultando mucho menor al límite de fatiga del material propuesto para este componente del molino (95 Mpa) [27]. Por esta razón, se puede concluir que el análisis efectuado está sobredimensionado y un espesor uniforme de 10 mm en la pieza “HUB-EJE LENTO” aseguraría que la estructura no falle por el criterio adoptado en las condiciones establecidas.

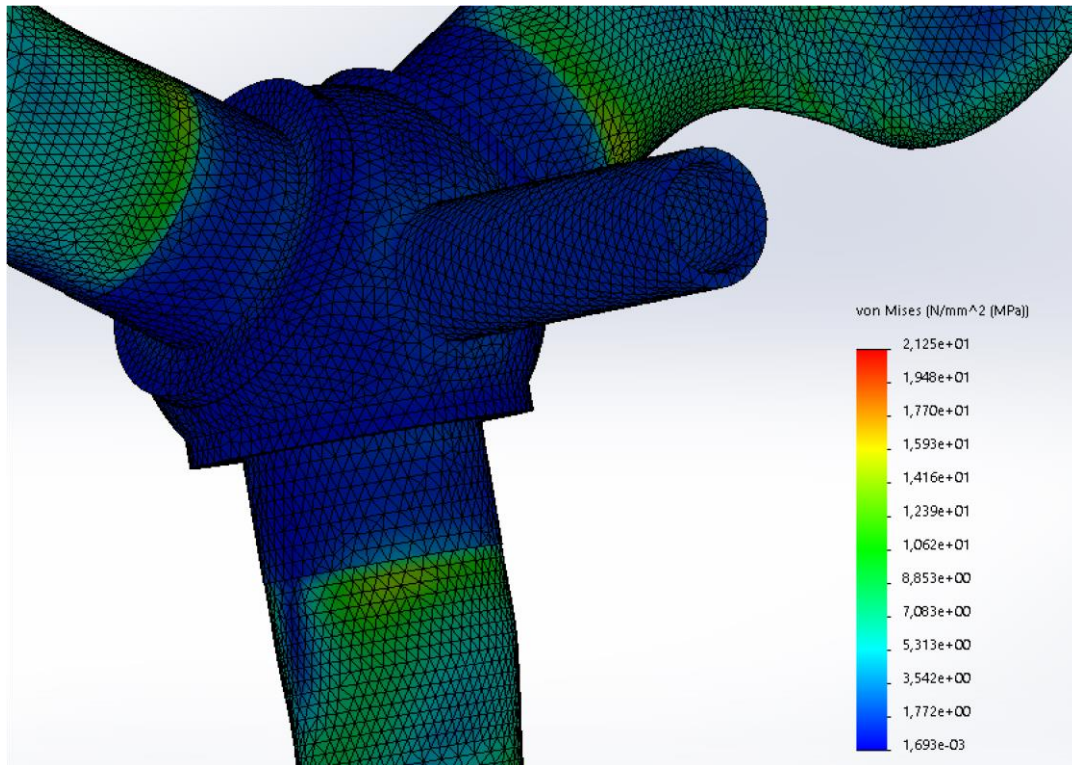


Figura 72. Perfil de tensiones de Von Mises en el “HUB- EJE LENTO”.

5.3 FABRICACIÓN DE UN PROTOTIPO FUNCIONAL DE LA PIEZA MONOLÍTICA “HUB-EJE LENTO” Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL PARCIAL DE LAS SIMULACIONES EN MAGMASOFT

En el presente trabajo final, se trató de realizar la validación experimental de las simulaciones realizadas en MAGMASOFT, fabricando un prototipo funcional de la pieza en estudio. Debido al gran trabajo experimental que esto involucra, y con la finalidad de acortar el alcance del trabajo final, esta tarea solo se realizó de manera parcial para el desarrollo del sistema de alimentación para fabricar la pieza HUB-EJE LENTO en aleación de aluminio. En esta etapa experimental el primer paso fue la impresión en 3D del sistema de alimentación, del modelo y de la caja de noyos. La impresión de estos modelos se puede observar en la Figura 73. Los modelos fueron impresos en el INTEMA, utilizando PLA (marca Grillon) como polímero de impresión.



Figura 73. Modelos impresos en PLA de: A- Sistema de alimentación. B- Modelo. C- Caja de noyo.

Luego, a partir de estos modelos, se procedió a la operación de moldeo del bajero (parte inferior del molde) en el que se utilizó arena de río ligada con resina y catalizador. Además, se agregaron dos mazarotas de madera y los chills de acero. Esta operación se puede observar en la Figura 74.

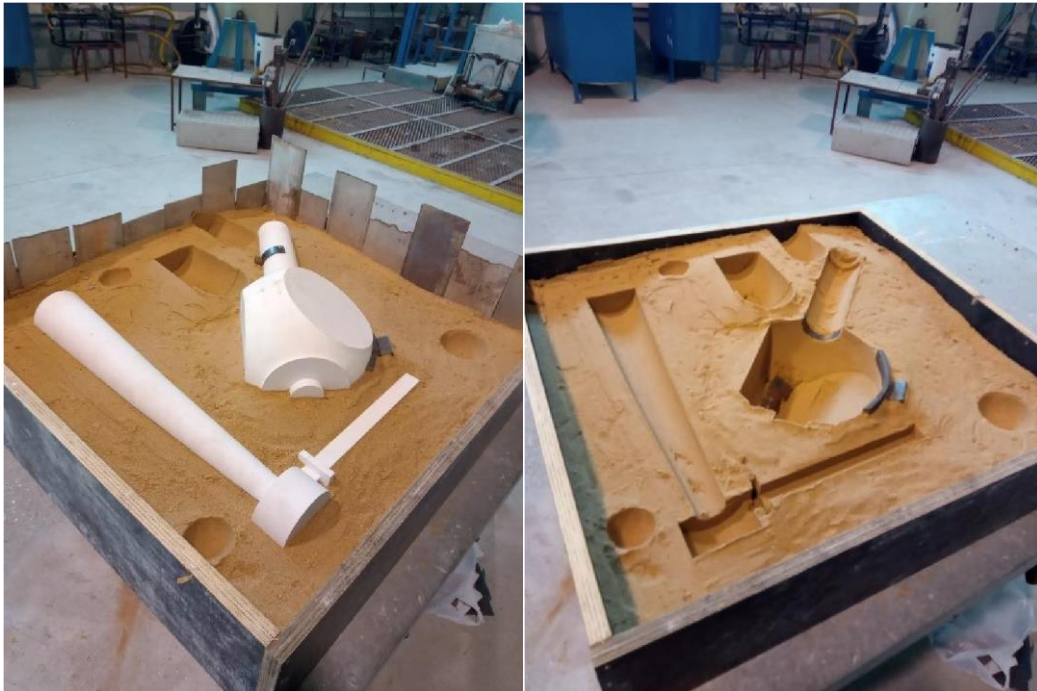


Figura 74. Operación de moldeo del bajero (semi-molde inferior).

Después, utilizando la caja de noyo obtenida por impresión 3D (Figura 73-C), se moldeó el noyo del “HUB-EJE LENTO” (el noyo contemplaría lo que sería el hueco interior de la pieza). Cabe destacar que se colocó una varilla de hierro interna a lo largo del eje con el objetivo de aportar rigidez al noyo y evitar que éste se rompa con facilidad. El noyo del “HUB-EJE LENTO” se muestra en la Figura 75.



Figura 75. Noyo del “HUB-EJE LENTO”.

Posteriormente, se llevó a cabo la fabricación del sobre (parte superior del molde). Para esta operación se colocaron en el bajero los modelos del sistema de alimentación y de la pieza, junto con las mazarotas y *chills*. Para favorecer un correcto desmoldeo del sobre se agregó talco sobre el bajero. Luego, se relleno la caja de moldeo con arena ligada con resina y catalizador. Se utilizaron aproximadamente 210 Kg de arena de río para la fabricación del molde y del noyo. Una vez confeccionados el sobre y el bajero, se retiraron los modelos, mazarotas y *chills*; se colocó el noyo y se procedió a cerrar el molde. Esta secuencia de pasos se puede observar en la Figura 76. Cabe destacar que se colocó un basín de colada, el cual cumple la función de mitigar el impacto del metal líquido que proviene de la cuchara, y así, evitar un flujo turbulento durante su recorrido en el sistema de alimentación.

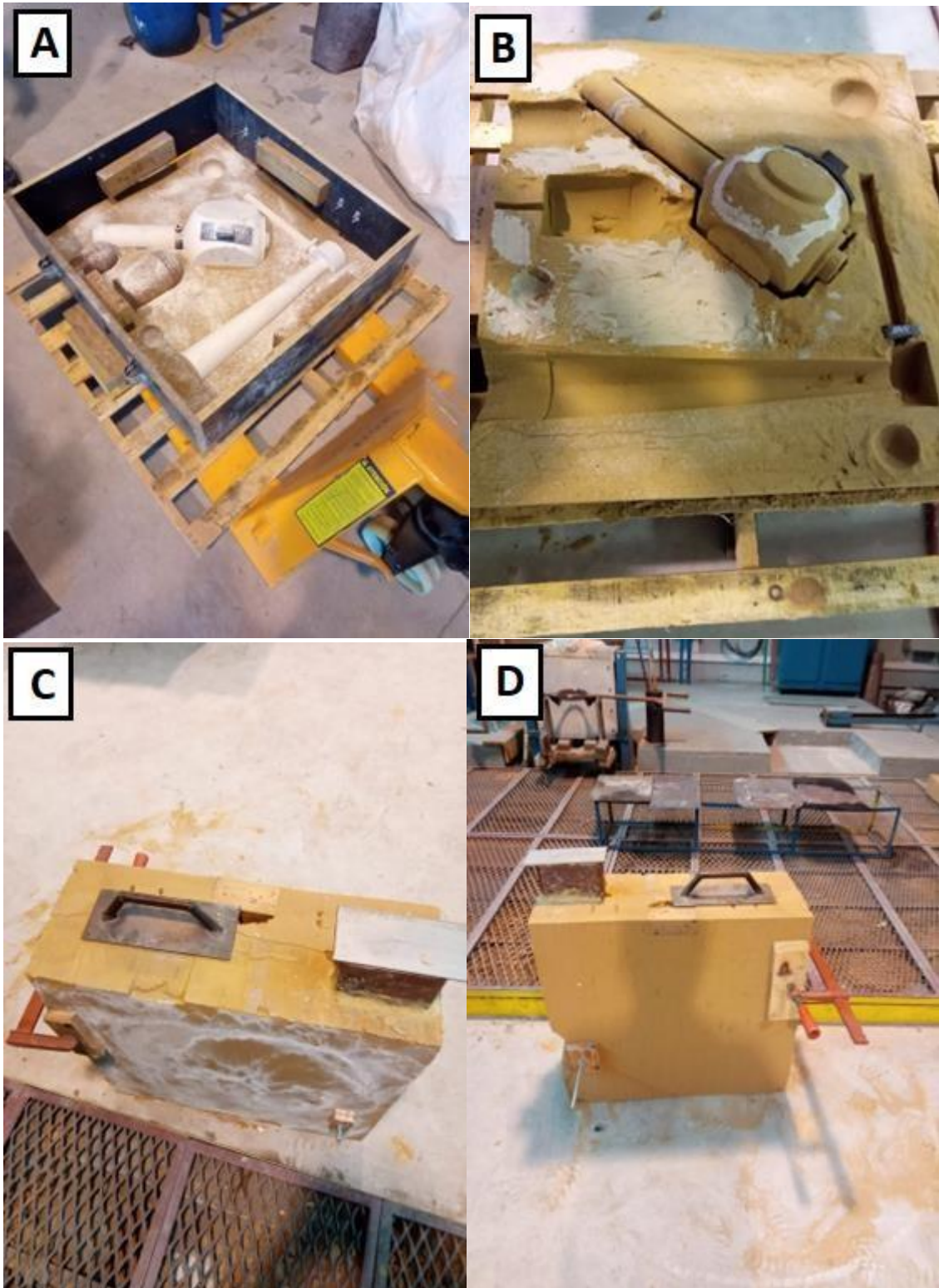


Figura 76.A- Semi-molde inferior (con modelos, mazarotas y chills) preparado para la fabricación del semi- molde superior. B- Colocación del noyo en el semi-molde inferior. C- Vista superior del molde cerrado. D- Vista lateral del molde cerrado.

En última instancia, se llevó a cabo el proceso de fusión y colada de la aleación de aluminio AlSi8, la cual fue fundida en un horno alimentado por gas natural a 850°C. Se utilizaron aproximadamente 15 Kg de material metálico. En la Figura 77-A se muestra el horno utilizado

para el proceso, el cual está ubicado en la Planta Piloto de la División Metalurgia-INTEMA, y en la Figura 77-B se puede observar la pieza prototipo colada, ya desmoldeada, junto al sistema de alimentación y realimentación.

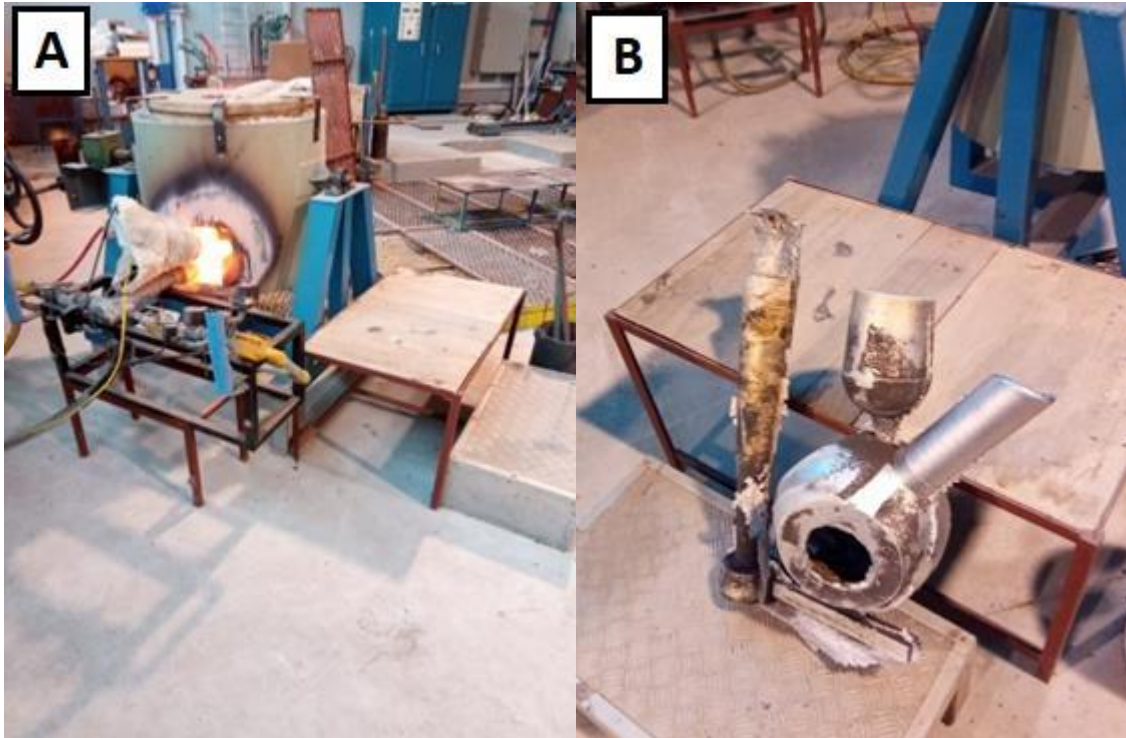


Figura 77.A- Horno de fusión. B- Pieza prototipo" HUB- EJE LENTO" junto al sistema de alimentación y realimentación.

A simple vista, se puede observar que el frente de metal líquido solidificó antes de cubrir la longitud total del eje. Esto podría asociarse al delgado espesor que presenta esta pieza, lo cual favoreció la transferencia de calor del metal hacia el molde. En este sentido, quizás a futuro, debería omitirse el uso de chills (enfriadores), lo cual ayudaría a que el frente de metal líquido mantenga una mayor temperatura durante el llenado, a pesar de estar en contraposición con los resultados óptimos obtenidos en las simulaciones efectuadas en *MAGMASOFT*. Si no, habría que realizar un rediseño del sistema de alimentación, planteando que la alimentación a la pieza se realice por varios puntos con la finalidad que el metal caliente que ingrese a la cavidad de moldeo recorra una menor distancia. Se descarta la alternativa de incrementar la temperatura de colada (la cual sería la más fácil y obvia), ya que la temperatura utilizada en este caso ya fue elevada para la aleación en estudio: fue de aproximadamente 850 °C, cuando debería haber estado en el orden de los 750-780 °C.

Finalmente, se realizaron operaciones de corte para retirar el sistema de alimentación y realimentación, y operaciones de mecanizado con amoladora para lograr un pulido de la superficie de la pieza. En las Figuras 78-A, B y C se puede observar la pieza obtenida luego de llevar a cabo dichas acciones. Cabe destacar que se obtuvo un espesor uniforme en todo el *HUB* (como se muestra en la Figura 78-C), pero no así en el *EJE LENTO* (Figura 78-A). Esto se produjo debido a que el noyo se quebró levemente durante el cierre del molde, lo que generó un desplazamiento parcial dentro de la cavidad de moldeo. En cuanto a la calidad de la pieza, a simple vista, no se observó porosidad ni defectos superficiales.

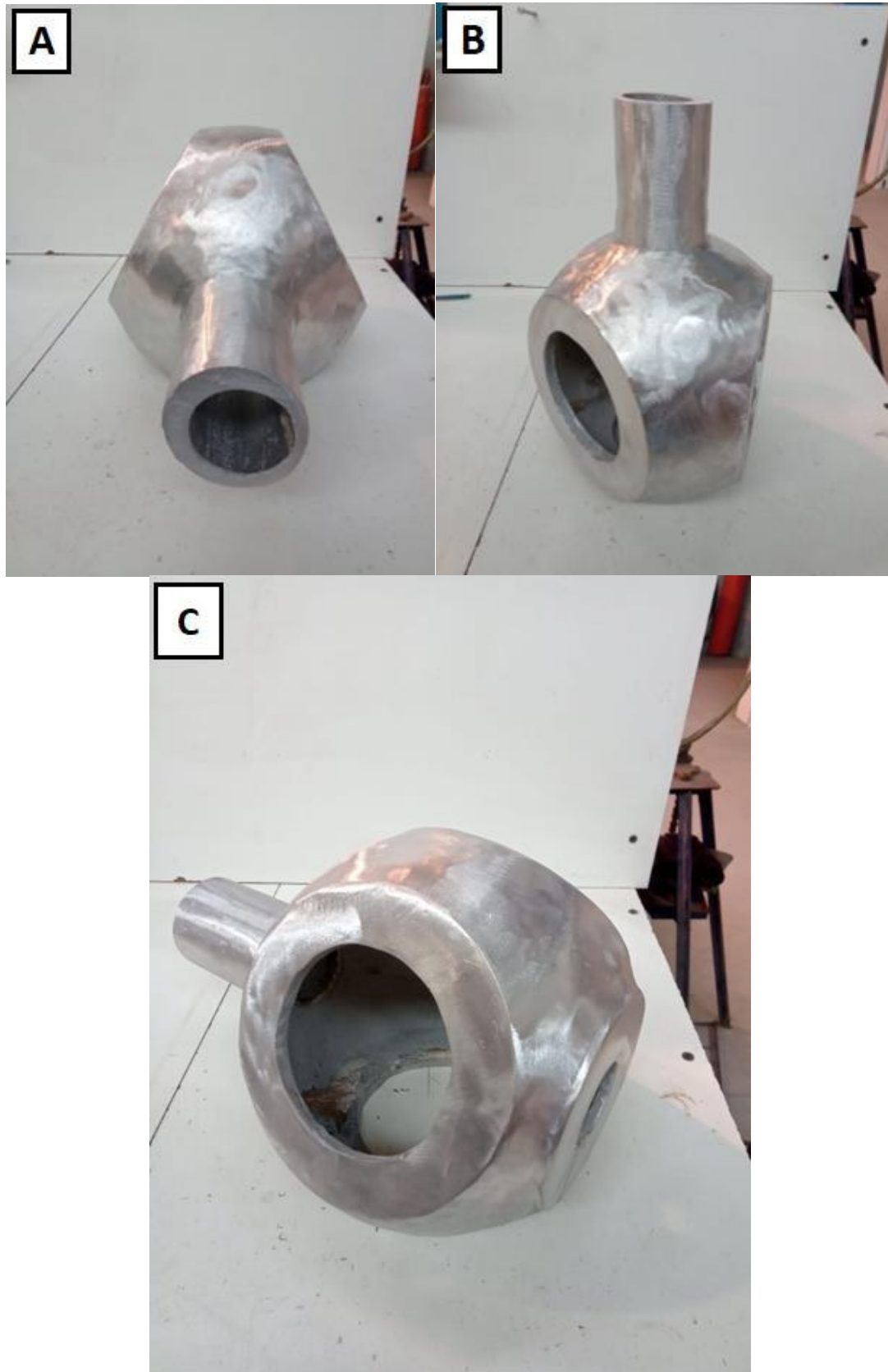


Figura 78. A- Pieza "HUB-EJE LENTO" con espesor no uniforme en el EJE LENTO. B- Pieza "HUBEJE LENTO" orientada con el EJE LENTO en dirección vertical. C- Pieza "HUB-EJE LENTO" con espesor uniforme en el *hub*.

Finalmente, durante una práctica de ensayos no destructivos realizada por la cátedra Laboratorio I, dictada en la carrera de Ingeniería en Materiales de esta facultad, la pieza fue evaluada mediante ultrasonido con la finalidad de determinar si la misma poseía porosidad interna. Los resultados permitieron observar que la pieza se encuentra libre de defectos, lo que permitiría verificar satisfactoriamente las simulaciones realizadas para la aleación de aluminio en estudio.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se llevó a cabo el diseño de un proceso de colada que permite fabricar la pieza monolítica “HUB-EJE LENTO” utilizando la técnica de fusión y colada, sin necesidad de colar ambas partes por separado y tener que realizar operaciones de unión como abulonado, remachado o soldado.

Se estudiaron simulaciones del proceso de fusión y colada de la pieza “HUB- EJE LENTO”, evaluando tres variantes de materiales como potenciales opciones de fabricación: aleación de aluminio, acero y fundición nodular. Para todos los casos, se realizaron diversas modificaciones sucesivas, tanto en variables geométricas de diseño (que incluyen a los sistemas de alimentación, realimentación y enfriadores) como a variables características del proceso como lo son la temperatura de colada del material y la temperatura inicial del molde y de los enfriadores. Estos cambios se hicieron con el fin de obtener piezas con nula o mínima porosidad.

Para el caso de la fundición gris nodular se logró desarrollar un sistema de alimentación y establecer variables de colada que permitieron obtener una pieza con nula porosidad. Por su parte, para la aleación de aluminio se tuvo que aumentar el tamaño y la cantidad de mazarotas con respecto al caso anterior, junto con el agregado de enfriadores de dimensiones específicas, con el fin de direccionar la solidificación hacia las mazarotas y al sistema de alimentación. Con estos cambios, se obtuvo una pieza con muy baja porosidad para la aleación de aluminio utilizada. Por último, para el acero elegido se optaron por mazarotas con mayor tamaño que las utilizadas para los casos anteriores, debido a que las piezas coladas de acero presentan (debido a su mayor contracción durante la solidificación) los rechupes más significativos dentro de estos tres materiales seleccionados, por lo que se debe disponer de una mayor cantidad de reservorio líquido para compensar la contracción del material. Los resultados para este último material no fueron óptimos, ya que no se logró obtener una pieza totalmente libre de porosidad. De todas maneras, se considera que los resultados fueron aceptables, teniendo en cuenta la mayor dificultad de colar piezas en este material utilizando técnicas de moldeo convencionales.

Por otra parte, el trabajo abarcó un breve estudio tensional estático del ensamblaje del “HUB-EJE LENTO” junto con aspas desarrolladas anteriormente en el marco de esta línea de investigación, con el fin de hallar la región más comprometida del sistema. Se pudieron obtener valores coherentes de velocidad máxima de viento. A partir del estudio efectuado, se esperaría que el molino pueda estar sometido a velocidades de viento del rango de 20 a 100 Km/h sin que se produzca la falla con el criterio adoptado. Además, en caso de que ocurriese, la falla del molino ocurriría en las aspas y no en el “HUB-EJE LENTO”, por lo que este último estaría sobredimensionado y un espesor de 10 mm (espesor evaluado en este trabajo) aseguraría un correcto funcionamiento de la pieza considerando los materiales propuestos en este trabajo.

Por último, se fabricó un prototipo funcional de la pieza monolítica “HUB-EJE LENTO” que permitió llevar a cabo una validación experimental parcial de las simulaciones en *MAGMASOFT*. Debido al gran trabajo y tiempo que esta tarea requería, solo se hizo para la aleación de aluminio. De esta manera, se realizó satisfactoriamente el proceso de fusión y colada de la pieza

“HUB-EJE LENTO”. La misma mostró un defecto en el extremo del eje lento por falta de llenado del molde, ya que el frente del metal líquido solidificó antes de cubrir la longitud total del eje.

Esto es atribuido a que la pieza debería ser atacada por dos o más puntos, debido al gran tamaño de la pieza. Para el delgado espesor que posee la pieza (10 mm), con un solo punto de ataque se produce la solidificación prematura, interrumpiéndose el llenado del molde en el extremo del eje lento, zona opuesta al ingreso del metal a la pieza.

TRABAJO A FUTURO

El trabajo a futuro planteado consiste en fabricar prototipos de HUB-EJE LENTO utilizando fundición de hierro y acero, con la finalidad de validar experimentalmente los sistemas de alimentación desarrollados mediante el uso del *software* MAGMASOFT. Con esto se completaría la validación experimental correspondiente al capítulo 4 del presente proyecto final.

Además, se podría realizar una retroalimentación experimental de la presencia, tipo, tamaño y localización de defectos para validar el modelo computacional desarrollado en MAGMA.

En base a estas validaciones, se debería plantear un rediseño de los sistemas de alimentación para resolver, en un principio, el llenado incompleto de la pieza colada en aluminio. Es probable que este defecto vuelva a aparecer cuando se fabriquen prototipos en acero o fundición de hierro. alguna propuesta ya ha sido planteada en el presente trabajo.

Sería adecuado realizar un análisis de costos respecto a los materiales tradicionales usados en la fabricación del hub y del eje, que son directamente utilizados como productos de colada (“*as cast*”) frente a las tres opciones de materiales que se plantean en este trabajo, las cuales presentarían mejores propiedades mecánicas, ayudando a disminuir el espesor de la pieza, y, por lo tanto, a disminuir la cantidad de metal empleado en la fabricación. Y, si bien, esto último llevaría a un menor costo del proceso, se tendría que tener en cuenta el posterior tratamiento térmico necesario para alcanzar las propiedades mecánicas buscadas, lo que aporta un incremento del costo total. Además, se podrían indicar los costos relativos entre los dos tipos de moldeo utilizados (en base a la cantidad de metal y arena que se requiere para cada uno) como criterio adicional en la toma de decisión del tipo de configuración del sistema de colada.

Finalmente, se propone fabricar tres aspas prototipo y las piezas de ensamble (bridas con caño) entre las aspas y el hub para lograr el ensamble ASPAS-HUB-EJE LENTO. Luego, el sistema debería ser puesto en servicio con la finalidad de poder validar el análisis realizado de solicitaciones mecánicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Energía Eólica I, Boletín Iberoamericano, Información Tecnológica, IBEPi, noviembre 2016.
Link de referencia: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/it_ibepi_energia_eolica_2016.pdf
- [2] Fundamentos aerodinámicos de las máquinas eólicas II. Link de referencia:
<http://www.exa.unne.edu.ar/fisica/maestria/modulo2/eolica/eolo22002.pdf>
- [3] Wind Turbine Blade Design Review, P.J. Schubel and R.J. Crossley, 3 de Agosto, 2012.
- [4] P. Silva, “Energía Eólica,” Man. dell’Ingegnere, 2012.
- [5] A. Betz, “Introduction to the Theory of Flow Machines,” Introd. to Theory Flow Mach., 1966.

- [6] L. Thomas and M. Ramachandra, "Advanced materials for wind turbine blade- A Review," Mater.
- [7] J. Zhu, X. Cai, and R. Gu, "Aerodynamic and structural integrated optimization design of horizontal axis wind turbine blades," *Energies*, vol. 9, no. 2, pp. 1–18, 2016.
- [8] Wind Turbine - Materials and Manufacturing Fact Sheet, Prepared for the Office of Industrial Technologies, US Department of Energy by Princeton Energy Resources International, LLC. Dan Ancona and Jim McVeigh, August 29, 2001.
- [9] Chapter Three - Wind Turbine Components and Descriptions: Essential Components to Have a Productive, Reliable, and Safe Wind Machine.
- [10] ASM Metals Handbook Volume 15 "Casting". Second printing: 1992.
- [11] Guía para el cálculo y diseño de sistemas de alimentación. Cátedra: Tecnología de la Fundición, Departamento de Ing. Mecánica-Fi-UNMdP.
- [12] MEDINA SEMINARIO, J. A. (2003). *Universidad Nacional de Ingeniería*, 1(236), 208. Facultad De Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/776%0Ahttp://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/3760>.
- [13] J, Campbell. "Castings". Capítulo 7 "Solidification shrinkage", segunda edición.
- [14] Loizaga, A., Sertucha, J., & Suárez, R. (2008). Defectos metalúrgicos generados por la presencia de gases en el metal líquido. *Anales de La Real Sociedad Española de Química*, www.rseq.org.
- [15] Manfredi, Louis Joseph, "Design and Analysis of a Hub for A 50-Horsepower, Three Bladed Wind Energy Conversion System", August 1978.
- [16] A.P. Guliaev. "Metalografía", Tomo 1, 1977. Editorial MIR, Moscú. Capítulo VIII.
- [17] Diseño del tratamiento térmico de nuevas calidades de fundición ADI, Abel García Anido, Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras, Julio 2015.
- [18] <http://www.ductile.org/didata/Section4/4intro.htm#Mechanical%20Properties>.
- [19] Roedter, H., & Gagné, M. (2003). Ductile Iron for Heavy Section Wind Mill Castings: A European Experience. Keith Millis Symposium on Ductile Iron.
- [20] Santofimia Navarro M. J, 2006, "La transformación bainítica sin formación de carburos en aceros", Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid.
- [21] Design of blades for household small wind turbines. C. Miranda, A.D. Basso, G.M. Francucci, L.N. Ludueña. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. Springer. 2022. <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00464-3>.
- [22] G, Karen. "How to Convert Wind Speed to Force" sciencing.com, <https://sciencing.com/convert-wind-speed-force-5985528.html>. 2 September 2021.
- [23] Mishra, V., & Biswas, S. (2013). Physical and mechanical properties of bi-directional jute fiber epoxy composites. *Procedia Engineering*, 51(NUiCONE 2012), 561–566. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.079>.
- [24] <https://matmatch.com/es/materials/alky2400-pink-sheets-grade-c355-0-t61>.

- [25] Zaludek, M., Rusnakova, S., Kubisova, M., Bilek, O., & Karvanis, K. (2020). Fatigue life of thermoset composite materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/726/1/012016>.
- [26] Singh, M.M., Kumar, H., Kumar, G.H. et al. Determination of Strength Parameters of Glass Fibers Reinforced Composites for Engineering Applications. Silicon 12, 1–11 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12633-019-0078-3>.
- [27]<https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=fafa8026ae394fd4bcc49f56ee8d39b&ckck=1>.