



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIGUEÑAL, BIELAS Y TAPAS DE RODAMIENTOS EN FUNDICIÓN NODULAR DE UNA BOMBA TRIPLEX ÉMBOLO”

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

BYRON ANDRÉS GUANUCHI SUQUI

byron.guanuchi@epn.edu.ec

SANTIAGO DANIEL MOPOSITA TITUAÑA

santiago.moposita@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. FAUSTO HERNÁN OVIEDO FIERRO, M.Sc.
fausto.oviedo@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: ING. ÓSCAR EFRAÍN SOTOMAYOR GÁLVEZ, M.Sc.
oscar.sotomayor@epn.edu.ec

Quito, mayo 2017

DECLARACIÓN

Nosotros, Byron Andrés Guanuchi Suqui y Santiago Daniel Moposita Tituaña, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Byron Andrés Guanuchi Suqui

Santiago Daniel Moposita Tituaña

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Byron Andrés Guanuchi Suqui y Santiago Daniel Moposita Tituaña bajo nuestra supervisión.

Ing. Fausto Oviedo M.Sc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Oscar Sotomayor M.Sc.
CO-DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios, por darme la salud para llevar acabo mis estudios y cumplir con mis metas anheladas.

Agradezco a mis padres Luis y Marcia que con sus consejos han sabido guiarme por el buen camino, gracias mami por ser una buena madre conmigo que siempre me has escuchado y has sabido darme las fuerzas necesarias para salir adelante, gracias papi por enseñarme todos los valores que han servido mucho para alcanzar mis metas, gracias a los dos porque siempre me han apoyado en la toma de mis decisiones, su apoyo incondicional ha sido el pilar fundamental para llegar a alcanzar este sueño como es el de ser Ingeniero Mecánico,

Agradezco a mis hermanos Diego y Gaby que aun cuando no compartía mucho tiempo junto a ustedes me han sabido dar sus ánimos para seguir adelante.

Agradezco al Ing. Fausto Oviedo por brindarme la ayuda en el desarrollo de este proyecto.

Agradezco a la empresa FUNDIRECICLAR S.A por la prestación de sus instalaciones que fueron de mucha ayuda en el desarrollo del proyecto.

SANTIAGO

Agradezco a Dios y a mis Padres por haberme apoyado en todo el transcurso de mi carrera dándome los ánimos y fuerzas para poder culminar mis estudios en la mejor universidad del país.

Un agradecimiento especial a la empresa FUNDIRECICLAR S.A por la prestación de sus instalaciones para poder llevar a cabo el presente proyecto. Además, agradecer a la Facultad de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional por facilitar el uso de los laboratorios de Máquinas herramientas, Esfuerzos y vibraciones (LAEV), Metalografía, y Metalurgia extractiva.

También agradezco al Ing. Fausto Oviedo M.Sc por el apoyo brindado durante la elaboración del proyecto.

Por último, agradecer a mis amigos que estuvieron durante toda mi vida estudiantil donde compartimos momentos amenos y tristes.

BYRON

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto a mis padres Luis y Marcia, que el duro sacrificio que realizaron lo ven plasmado en este proyecto.

Para mis hermanos Diego y Gaby que espero que ustedes con este trabajo puedan encontrar la motivación necesario, para plantearse metas mucho más altas y alcanzarlas.

SANTIAGO

El presente proyecto va dedicado principalmente a mis Padres Porfirio y Mercedes quienes me inculcaron los valores suficientes para ser una persona de bien, siendo mi sustento y la razón para seguirme preparando en la vida profesional

También dedico este proyecto a mis hermanos Carlos y Fabián quienes fueron un ejemplo a seguir durante mis estudios, a mis sobrinas Emily Antonella y Dayana Alexandra para quienes quiero ser un ejemplo a seguir, y por último a toda mi familia quienes siempre me brindaron su apoyo.

BYRON

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	1
Objetivos específicos.....	2
Alcance.....	2
1. ESTUDIO DE LAS BOMBAS DE TRIPLE EMBOLO.....	3
1.1. Condiciones generales.....	3
1.1.1. Definición.....	3
1.1.2. Clasificación de las bombas.....	3
1.1.3. Selección de la bomba.....	6
1.1.4. Productos corrosivos y materiales para las bombas.....	7
1.1.5. Tipos de corrosión en las bombas.....	8
1.1. Aplicaciones y características.....	9
1.1.1. Características de la bomba.....	9
1.1.2. Características del flujo.....	9
1.1.3. Aplicaciones.....	10
1.2. Especificaciones de la bomba seleccionada.....	11
2. ESTUDIO DE LA FUNDICIÓN NODULAR.....	14
2.1. Características.....	15
2.1.1. Composición química de la fundición nodular.....	15
2.1.2. Proceso de obtención de la fundición nodular.....	17
2.2. Propiedades mecánicas.....	22
2.3. Justificación del uso de la fundición nodular.....	22
2.4. Cálculo de carga para la obtención de la fundición nodular clase 80-55-06.....	23
2.4.1. Carburización.....	27
2.4.2. Adición del silicio metálico.....	29
2.4.3. Nodulizante Ferrosilicio magnesio.....	32
2.4.4. Inoculante IM22.....	35
3. DISEÑO DE ELEMENTOS.....	38
3.1. Cigüeñal.....	38
3.1.1. Características.....	38
3.1.2. Función.....	39
3.1.3. Diseño de dimensiones críticas.....	39
3.1.4. Cálculo del par motor del motor eléctrico.....	41
3.1.5. Determinación de la fuerza crítica.....	42

3.1.6.	Análisis a torsión	44
3.1.7.	Análisis a fatiga	47
3.2.	Biela	55
3.2.1.	Características	55
3.2.2.	Función.....	55
3.2.3.	Diseño de dimensiones críticas.....	55
3.2.4.	Diseño estático.....	56
3.2.5.	Factor de seguridad estático	60
3.2.6.	Diseño a fatiga	60
3.2.7.	Factor de seguridad a fatiga.....	61
4.	ESTUDIO DE LOS ELEMENTOS NECESARIOS PARA EL PROCESO DE FUNDICIÓN.....	63
4.1.	Selección del horno y mezcla de moldeo a utilizar	63
4.1.1.	Horno de arco eléctrico	63
4.1.2.	Hornos de inducción.....	64
4.2.	Estudio de la arena	64
4.3.	Cálculo y construcción de modelos, noyos y cajas de moldeo	66
4.3.1.	Ejecución del Modelo	66
4.4.	Métodos de cálculo de los sistemas de bebederos para moldaduras de fundición nodular 70	
4.4.1.	Cálculo de los sistemas de alimentación para el cigüeñal	70
4.4.2.	Cálculo de sistema de alimentación para la biela	91
4.4.3.	Calculo del sistema de alimentación de las tapas de los rodamientos	104
4.4.4.	Dimensionamiento de cajas de moldeo	110
4.5.	Materiales y herramientas de fundición.....	115
4.5.1.	Arena para moldear.....	116
4.5.2.	Placa modelo.....	116
4.5.3.	Caja de moldeo	118
4.5.4.	Caja de noyos	118
4.5.5.	Máquina vibradora.....	118
4.5.6.	Punzadores	118
4.5.7.	Alisadores.....	119
4.5.8.	Cucharas	119
4.5.9.	Balanza	119
5.	COLADO, NODULIZADO Y OBTENCIÓN DE LA PIEZA.....	120
5.1.	Obtención del cigüeñal, biela, y tapas.....	120

5.1.1.	Moldeo de los modelos	120
5.1.2.	Preparación de la colada.....	123
5.1.3.	Colado	124
5.1.4.	Piezas en bruto	125
5.1.5.	Acabados finales	127
5.2.	Comprobación de la obtención de la fundición nodular	130
5.2.1.	Fabricación y ensayos de probetas según la norma ASTM A-536	131
5.2.2.	Ensayos de tracción	135
5.2.3.	Ensayos metalográficos	141
5.2.4.	Análisis químico	152
5.3.	Elaboración del procedimiento tecnológico de construcción de las diferentes piezas	153
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	156
6.1.	Conclusiones.....	156
6.2.	Recomendaciones.....	158
	BIBLIOGRAFIA.....	159
	ANEXOS.....	161

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1.1. Tipos de bombas	10
Tabla 1.2. Componentes de la bomba Triplex.....	12
Tabla 1.3. Componentes de la biela.....	13
Tabla 2.1. Composición química nodular.....	15
Tabla 2.2. Propiedades mecánicas de la fundición gris.....	22
Tabla 2.3. Propiedades mecánicas de la fundición nodular.....	23
Tabla 2.4. Composición química del cold rolled.....	24
Tabla 2.5. Composición química de los retornos.....	24
Tabla 2.6. Composiciones químicas de ambas materias primas.....	24
Tabla 2.7. Cantidades de materia prima.....	24
Tabla 2.8. Elementos químicos más relevantes para el ejemplo de cálculo.....	25
Tabla 2.9. Pesos de cada elemento en cada materia prima.....	26
Tabla 2.10. Pesos en kg de los elementos químicos en la aleación inicial.....	26
Tabla 2.11. Porcentajes en peso de la aleación inicial.....	27
Tabla 2.12. Porcentaje en peso de carbono.....	29
Tabla 2.13. Porcentajes de Silicio y Carbono.....	31
Tabla 2.14. Porcentajes calculados del hierro base.....	31
Tabla 2.15. Análisis químico de la aleación del hierro base.....	32
Tabla 2.16. Composición de FeSiMg.....	32
Tabla 2.17. Porcentajes en peso después de la nodulización.....	35
Tabla 2.18. Composición química del IM22.....	35
Tabla 2.19. Porcentajes en peso de la fundición nodular final.....	37
Tabla 3.1. Partes del cigüeñal.....	38
Tabla 3.2. Grados de fundiciones nodulares.....	46
Tabla 3.3. Propiedades mecánicas de fundiciones nodulares según las Norma ASTM A-536.....	46
Tabla 3.4. Valores aproximados para esfuerzo alternos de aceros y hierros fundidos.....	52
Tabla 3.5. Partes de la biela.....	55
Tabla 4.1. Clasificación del tamaño de grano.....	65
Tabla 4.2. Propiedades de la arena en dependiendo del metal a fundir.....	66
Tabla 4.3. Factores de contracción.....	67
Tabla 4.4. Constantes para la ecuación de Caine.....	71
Tabla 4.5. Elementos del sistema de alimentación.....	73
Tabla 4.6. Valores de x para diferentes valores de espesor de pared de la moldura.....	74

Tabla 4.7. Canales de alimentación de forma trapezoidal.....	76
Tabla 4.8. Elementos del sistema de alimentación.	78
Tabla 4.9. Elementos del sistema de alimentación.	79
Tabla 4.10. Elementos del sistema de alimentación del cigüeñal.	80
Tabla 4.11. Dimensiones del embudo de colada.....	81
Tabla 4.12. Elementos del sistema de alimentación.	82
Tabla 4.13. Elementos del sistema de alimentación.	84
Tabla 4.14. Valores de δ y s para molduras medianas y grandes hasta 1000 Kg.....	85
Tabla 4.15. Elementos del sistema de alimentación del cigüeñal.	90
Tabla 4.16. Componente del sistema de alimentación.....	92
Tabla 4.17. Elementos del sistema de alimentación.	94
Tabla 4.18. Elementos del sistema de alimentación de la biela.	95
Tabla 4.19. Elementos del sistema de alimentación.	97
Tabla 4.20. Elementos del sistema de alimentación de la biela	98
Tabla 4.21. Elementos del sistema de alimentación.	103
Tabla 4.22. Elementos del sistema de alimentación	106
Tabla 4.23. Elementos del sistema de alimentación.	110
Tabla 4.24. Distancia permisibles entre piezas y elementos del molde.	111
Tabla 5.1. Propiedades mecánicas de las probetas obtenidas.	140
Tabla 5.2. Propiedades mecánicas de las 3 mejores probetas.	141
Tabla 5.3. Metalografía de la muestra 1	147
Tabla 5.4. Metalografía de la muestra 2	148
Tabla 5.5. Metalografía de la muestra 3	149
Tabla 5.6. Metalografía de la muestra 4	149
Tabla 5.7. Metalografía de la muestra 5	150
Tabla 5.8. Porcentajes de metales en la aleación obtenida.	153

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1.1. Clasificación de bombas.....	4
Figura 1.2. Clasificación de las bombas reciprocantes	4
Figura 1.3. Bomba de triple embolo.....	5
Figura 1.4. Bomba triplex.....	5
Figura 1.5. Ensamble completo de la bomba triplex.....	11
Figura 1.6. Despiece de la bomba triplex	12
Figura 1.7. Despiece de la biela	13
Figura 2.1. Chatarra de aceros estructurales y transformables eléctricos	18
Figura 2.2. Retornos de fundición nodular.....	18
Figura 2.3. Porción de la colada	20
Figura 2.4. Adición de nodulizante	20
Figura 2.5. Reacción generada	20
Figura 2.6. Adición de inoculante	21
Figura 2.7. Inoculante esparcido	21
Figura 2.8. Colada lista.....	21
Figura 2.9. Magnesio de recuperación	33
Figura 2.10. Contenidos de magnesio residual después de un tratamiento con FeSiMg para piezas de 10 a 100mm de espesor.	34
Figura 3.1. Partes de un cigüeñal.....	38
Figura 3.2. Esquema de cigüeñal bielas-pistones y tapas	39
Figura 3.3. Cargas en el cigüeñal.....	40
Figura 3.4. Esquema de vistas - Cargas en el cigüeñal	40
Figura 3.5. Torque generado	41
Figura 3.6. Ubicación de cargas	43
Figura 3.7. Esquema de cargas en los muñones	43
Figura 3.8. Diámetro de la sección crítica a torsión.....	45
Figura 3.9. Esquema cigüeñal fuerza máxima	47
Figura 3.10. Diagrama de cuerpo libre del cigüeñal	47
Figura 3.11. Diagrama Vector cortante – Momento flector.....	48
Figura 3.12. Momento máximo flector en los cambios de sección	49
Figura 3.13. Esquema del muñón (Sección crítica del cigüeñal).....	51
Figura 3.14. Eje redondo con ranura de fondo plano en torsión	52
Figura 3.15. Diagrama de Smith para hierros fundidos nodulares según DIN 1693 T1	53
Figura 3.16. Diagrama S-N.....	54

Figura 3.17. Esquema de biela.....	55
Figura 3.18. DCL	56
Figura 3.19. Simulación en inventor (Máxima tensión en la biela)	57
Figura 3.20. Sección crítica en la biela.....	57
Figura 3.21. Plano de sección	58
Figura 3.22. Sección de biela	58
Figura 3.23. Sección critica	59
Figura 3.24. Sección crítica acotada	59
Figura 4.1. Esquema 3D cigüeñal	70
Figura 4.2. Área y Volumen del cigüeñal.....	70
Figura 4.3. Dimensionamiento de mazarotas	72
Figura 4.4. Cigüeñal con mazarotaje.....	73
Figura 4.5. Dimensionamiento de la altura estática.....	74
Figura 4.6. Valores de P y C del cigüeñal en mm	75
Figura 4.7. Esquema del canal alimentador	77
Figura 4.8. Canales de alimentación	77
Figura 4.9. Canal escoriador	78
Figura 4.10. Ubicación del escoriador	78
Figura 4.11. Canal vertical.....	80
Figura 4.12. Esquema del canal vertical 3D	80
Figura 4.13. Para determinar la velocidad de la masa de colado.....	81
Figura 4.14. Esquema del embudo.....	82
Figura 4.15. Esquema del embudo 3D.....	82
Figura 4.16. Dimensiones de la base de colado.....	83
Figura 4.17. Esquema base de colado 3D	83
Figura 4.18. Llenado de la colada en el cigüeñal	86
Figura 4.19. Temperatura del cigüeñal.....	86
Figura 4.20. Tiempo de solidificación	87
Figura 4.21. Porosidades internas.....	88
Figura 4.22. Corte transversal del cigüeñal	88
Figura 4.23. Porosidades internas.....	89
Figura 4.24. Corte transversal del cigüeñal	89
Figura 4.25. Esquema del cigüeñal	90
Figura 4.26. Corte transversal de la biela.....	91
Figura 4.27. Esquema de la mazarota.....	91
Figura 4.28. Esquema 3D mazarota biela	92

Figura 4.29. Valores de P y C en mm para el cálculo de la altura estática	92
Figura 4.30. Esquema del Alimentador	94
Figura 4.31. Esquema 3D del canal de alimentación	94
Figura 4.32. Esquema colector de escoria 2D.....	95
Figura 4.33. Esquema 3D de la ubicación del escoriador	95
Figura 4.34. Canal vertical.....	96
Figura 4.35. Esquema 3D de la ubicación del sistema de alimentación de la biela	97
Figura 4.36. Esquema 3D de la ubicación del sistema de alimentación de la biela	98
Figura 4.37. Llenado de la biela.	99
Figura 4.38. Tiempo de solidificación de la biela.....	100
Figura 4.39. Porosidades Internas.....	100
Figura 4.40. Llenado de la colada en la biela.	101
Figura 4.41. Tiempo de solidificación	101
Figura 4.42. Porosidades Internas.....	102
Figura 4.43. Corte transversal	102
Figura 4.44. Biela con sistemas de alimentación	103
Figura 4.45. Esquema de círculos inscritos.....	104
Figura 4.46. Embudo de colada.....	105
Figura 4.47. Esquema 3D del sistema de alimentación de la tapa.....	105
Figura 4.48. Llenado de la biela con el primer sistema de alimentación	107
Figura 4.49. Tiempo de solidificación	107
Figura 4.50. Porosidades Internas.....	108
Figura 4.51. Llenado de la colada con un segundo sistema de alimentación	108
Figura 4.52. Tiempo de solidificación	109
Figura 4.53. Porosidades internas.....	109
Figura 4.54. Tapa con sistema de alimentación	110
Figura 4.55. Esquema de Distancia permisibles entre piezas y elementos del molde	111
Figura 4.56. Tapa con el plano divisor.....	112
Figura 4.57. Vista superior caja de moldeo	112
Figura 4.58. Vista frontal caja superior e inferior acoplada	112
Figura 4.59. Plano divisor de la biela.....	113
Figura 4.60. Vista superior caja de moldeo	113
Figura 4.61. Vista frontal caja - superior e inferior.....	114
Figura 4.62. Plano divisor del cigüeñal.....	114
Figura 4.63. Vista superior de la caja de moldeo	115
Figura 4.64. Vista frontal caja superior e inferior	115

Figura 4.65. Arena de moldeo	116
Figura 4.66. Placa modelo cigüeñal macho y hembra.....	117
Figura 4.67. Placa modelo biela macho y hembra	117
Figura 4.68. Placa modelo tapas macho y hembra	117
Figura 4.69. Cajas de noyós Cigüeñal, cigüeñal y bielas	118
Figura 4.70. Maquina compactadora	118
Figura 4.71. Alisador de arena	119
Figura 5.1. Mezclado de la arena de moldeo (Arena silica, resina furánica 1%, y catalizador0.5%) en máquina mezcladora.....	120
Figura 5.2. Llenado de arena en la caja de moldeo del cigüeñal	121
Figura 5.3. Compactación de la arena en maquina compactadora	121
Figura 5.4. Moldes con arena macho y hembra	121
Figura 5.5. Desmoldeo de las cajas	122
Figura 5.6. Moldes de arena listos.....	122
Figura 5.7. Armado de los moldes.....	123
Figura 5.8. Molde de arena armado y con pesas	123
Figura 5.9. Adición de nodulizante FeSiMg	124
Figura 5.10. Adición de inoculante IM22	124
Figura 5.11. Colado en el molde de arena del cigüeñal	125
Figura 5.12. Llenado del molde y enfriamiento.....	125
Figura 5.13. Cigüeñal en bruto obtenido	126
Figura 5.14. Bielas en bruto obtenidas	126
Figura 5.15. Tapas de rodamientos en bruto obtenidas	126
Figura 5.16. Corte de los sistemas de alimentación de la biela	127
Figura 5.17. Esmerilado de la biela	127
Figura 5.18. Acabado final de las bielas	128
Figura 5.19. Torneado de las tapas.....	128
Figura 5.20. Tapa de rodamiento torneada	129
Figura 5.21. Corte de los sistemas de alimentación del cigüeñal.....	129
Figura 5.22. Esmerilado de la superficie del cigüeñal	130
Figura 5.23. Acabado final del cigüeñal.....	130
Figura 5.24. Bloque de fundición nodular según la ASTM A-536	131
Figura 5.25. Dimensiones de bloques para probetas	131
Figura 5.26. Bloque solidificado.....	132
Figura 5.27. Bloque obtenido.....	132
Figura 5.28. Corte de los bloques.....	133

Figura 5.29. Cilindrado del bloque.....	133
Figura 5.30. Dimensiones de la probeta.....	134
Figura 5.31. Probeta final obtenida.....	134
Figura 5.32. Probetas finales obtenidas	135
Figura 5.33. Maquina I de ensayos a tracción	135
Figura 5.34. Mordazas.....	136
Figura 5.35. Enroscado de la probeta	136
Figura 5.36. Probeta correctamente colocada.....	136
Figura 5.37. Secciones de rotura de las probetas	137
Figura 5.38. Curva esfuerzo vs deformación de la probeta 1	138
Figura 5.39. Curva esfuerzo vs deformación de la probeta 2.....	138
Figura 5.40. Curva esfuerzo vs deformación de la probeta 3.....	139
Figura 5.41. Curva esfuerzo vs deformación de la probeta 4.....	139
Figura 5.42. Curva esfuerzo vs deformación de la probeta 5.....	140
Figura 5.43. Área de fractura de las probetas	141
Figura 5.44. Muestras para metalografía.....	142
Figura 5.45. Muestras en resina	142
Figura 5.46. Desmoldeo de las probetas.....	143
Figura 5.47. Maquina automática de lijado y pulido	143
Figura 5.48. Muestras en la matriz	144
Figura 5.49. Lijado de las muestras.....	144
Figura 5.50. Pulido de las muestras	145
Figura 5.51. Muestras pulidas	145
Figura 5.52. Atacado de las muestras	146
Figura 5.53. Muestras atacadas	146
Figura 5.54. Microscopio metalográfico.....	147
Figura 5.55. Microestructuras ASTM A-247	150
Figura 5.56. Dimensiones de nódulos	151
Figura 5.57. Muestras para análisis químico	152
Figura 5.58. Espectrómetro de chispa.....	152

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1. Peso de carbono en el cold rolled.....	25
Ecuación 2.2. Peso de carbono en los retornos.....	26
Ecuación 2.3. Porcentaje en peso del carbono en la aleación inicial.....	27
Ecuación 2.4. Carga de carburizante.....	28
Ecuación 2.5. Porcentaje de silicio metálico.....	29
Ecuación 2.6. Porcentaje de silicio metálico requerido.....	30
Ecuación 2.7. Carga de nodulizante.....	33
Ecuación 2.8. Carbono equivalente.....	36
Ecuación 3.1. Potencia del motor eléctrico.....	41
Ecuación 3.2. Presión máxima de trabajo.....	42
Ecuación 3.3. Ecuación de densidad.....	43
Ecuación 3.4. Esfuerzo cortante máximo.....	44
Ecuación 3.5 Factor de seguridad.....	45
Ecuación 3.6 Criterio de la energía de distorsión para torsor puro.....	46
Ecuación 3.7. Esfuerzo máximo a flexión en ejes.....	49
Ecuación 3.8. Calculo de la resistencia a fatiga.....	50
Ecuación 3.9. Esfuerzo normal sobre la sección critica.....	60
Ecuación 3.10. Factor de seguridad estático.....	60
Ecuación 3.11. Resistencia a la fatiga de la biela.....	60
Ecuación 3.12. Límite de fatiga del material (Hierros fundidos).....	61
Ecuación 3.13. Factor de seguridad a fatiga – Gerber.....	61
Ecuación 4.1. Coordenada X en función del diámetro de la mazarota.....	70
Ecuación 4.2. Coordenada Y de la mazarota.....	71
Ecuación 4.3. Calculo del diámetro de la mazarota.....	71
Ecuación 4.4. Diámetro del canal separador.....	72
Ecuación 4.5. Superficie del alimentador.....	73
Ecuación 4.6. Altura estática de la fundición.....	74
Ecuación 4.7. Superficie del canal escoriador.....	75
Ecuación 4.8. Superficie del canal vertical.....	76
Ecuación 4.9. Conicidad del canal vertical de alimentación.....	79
Ecuación 4.10. Diámetro de la base de colado.....	83
Ecuación 4.11. Tiempo de vertido.....	84

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación, se obtienen mediante fundición las partes de una bomba triplex; como es el cigüeñal, bielas y tapas, para lo cual se realiza un estudio de la fundición nodular que se desea obtener verificando la norma ASTM A-536, para la clase 80-55-06, la cual establece diferentes parámetros de caracterización como la composición química y propiedades mecánicas del material. Para caracterizar el material se realiza ensayos de tracción y análisis químico obteniendo en una de las muestras extraídas una resistencia a la tracción de 92.8ksi, límite de fluencia de 56.5ksi, y una elongación de 9%, mientras que la composición química que se obtiene es %5.4% de carbono, 2.4% de silicio, 0.462% de manganeso, 0.103% de fosforo y 0.02% de azufre, con cual se comprueba la aleación, verificando con los valores de la norma ASTM A-536. La composición química que se obtiene difiere con la norma establecida, esto se debe a la calibración del equipo que se utilizó. Para la microestructura de la aleación se realiza ensayos metalográficos y se caracteriza con la norma ASTM A-247, y el catálogo de la AFS, Ductile Iron microstructures rating chart con lo cual se visualiza el porcentaje de nodularidad, para este caso un 90% de nodularidad de la mejor muestra extraída.

Palabras claves: triplex, nodular, carbono, metalografico, aleacion, porcentaje.

ABSTRACT

In the present titration work, the parts of a triplex pump, such as the crankshaft, connecting rods, and caps are obtained by casting, for which a study of the nodular casting is carried out, which is to be obtained by verifying the ASTM A-536, for class 80-55-06, which establishes different characterization parameters such as the chemical composition and mechanical properties of the material. To characterize the material be make tensile tests and chemical analysis obtaining in one of the extracted samples a tensile strength of 92.8 Ksi, a yield stress of 56.5ksi, and an elongation of 9%, while the chemical composition Which is obtained is 5.4% of carbon, 2.4% of silicon, 0.462% of manganese, 0.103% of phosphorus and 0.02% of sulfur, with which the alloy is checked, checking with the values of ASTM A-536. The chemical composition obtained differs with the established standard norm, this is due to the calibration of the equipment that was used. For the microstructure of the alloy, metallographic tests are carried out and is characterized by ASTM A-247, and the AFS catalog, Ductile Iron microstructures rating chart, which shows the percentage of nodularity, in this case 90% of Nodularity of the best extracted sample.

Keywords: triplex, nodular, carbon, metallographic, alloy, percentage.

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CIGÜEÑAL, BIELAS Y TAPAS DE RODAMIENTOS EN FUNDICIÓN NODULAR DE UNA BOMBA TRIPLEX ÉMBOLO”

INTRODUCCIÓN

Para la elaboración del presente trabajo de titulación se comienza por la justificación de la aleación que se va a utilizar, esto se lo hace a través de la selección y cálculo de cada uno de los elementos necesarios para la fundición como es la carga de materia prima, carga de carburizante, carga de silicio metálico, carga de nodulizante, y carga de inoculante.

Posterior a esto se realiza el diseño, justificando las dimensiones de cada una de las piezas mediante métodos teóricos basados en elementos de máquinas y simulaciones basadas en elementos finitos, en los cuales se omitió la justificación de la tapa debido a que los esfuerzos que existe sobre esta no son considerables ni perjudiciales.

Una vez que se obtiene la justificación se procede con el estudio de los elementos necesarios para el proceso de fundición, en los cuales interviene la selección del horno, dimensionamiento de los modelos, sistemas de alimentación y cajas de moldeo, esto se justifica con una simulación previa para verificar que no existan porosidades en las piezas.

Con todos los parámetros listos se procede a la fabricación mediante fundición, en un horno de inducción con crisol transportable. La materia prima que se usa es Cold Rolled (CR), y retornos, los aditivos que se añade a la colada son nodulizante ferro silicio magnesio (FeSiMg) e Inoculante IM22 este último con porcentajes elevados de silicio y manganeso.

Para caracterizar la aleación obtenida se realizan ensayos de tracción, ensayos metalográficos y análisis químico, los cuales se los realiza en los laboratorios de análisis de esfuerzos y vibraciones (LAEV), Metalografía y Metalurgia extractiva de la Escuela Politécnica Nacional.

Objetivo general

- Obtener un cigüeñal, bielas, y tapas laterales de los porta rodamientos de una bomba triplex en fundición nodular, con lo cual se dará una iniciativa a la producción de las mismas en la industria ecuatoriana.

Objetivos específicos

- Justificar concisamente el diseño de las piezas a realizar optimizando así cada una de las mismas para garantizar su correcto funcionamiento.
- Justificar el uso de la fundición nodular en la obtención de los elementos de la bomba descritos.
- Redactar el procedimiento tecnológico que facilite la construcción de estas partes de la bomba.
- Determinar los tipos de moldes que se va utilizar durante el proceso de fundición, basándonos en parámetros previamente establecidos, tales como tipos de material a colar, peso, etc.
- Producir piezas de fundición nodular como el cigüeñal, tapas de los rodamientos, bielas

Alcance

El presente proyecto se realiza para aportar al cambio de la matriz productiva ecuatoriana, así como utilizar los materiales reciclados de una manera que ayude a la obtención de nuevas máquinas y sus componentes. El presente proyecto se realiza para iniciar la producción de bombas de este tipo en el país. Para la producción de cigüeñal, bielas y tapas, según la bibliografía estudiada, se la va a realizar en fundición nodular, la cual cumple con las especificaciones técnicas de las piezas a producir.

La ventaja del proceso de fundición es que permite la producción de muchos objetos idénticos de forma barata. Una ventaja secundaria es que permite la formación de objetos de diferente forma, que no pueden ser producidos por otro método.

1. ESTUDIO DE LAS BOMBAS DE TRIPLE EMBOLO

En el presente capítulo se realiza una revisión de la bibliografía utilizada en el desarrollo del proyecto de titulación, se muestra un estudio general de la bomba aspecto importante es su clasificación, en base a este estudio se determina cuál de todas las bombas es la que cumple con los requisitos técnicos requeridos; se estudia sus aplicaciones, características, condiciones de trabajo a las cuales van estar expuestas, y las especificaciones de las bombas.

1.1. Condiciones generales

1.1.1. Definición

Una bomba es un equipo en el cual existe un cambio de energía mecánica a hidráulica, la energía mecánica se la obtiene de un motor eléctrico o térmico, la energía del motor es suministrada a un fluido, con lo que el fluido adquiere velocidad y puede ser llevada de un lugar a otro a diferentes alturas. ((Manuel Viejo Zubicaray, 2003))

Las bombas hoy en día son muy utilizadas dentro de la industria; el fluido generalmente se encuentra a una presión estática, este requiera obtener una presión mayor a la estática para obtener mayor velocidad, cumpliendo así los requerimientos del cliente.

1.1.2. Clasificación de las bombas

Tener una clasificación de los diferentes tipos de bombas es importante para el presente estudio, ya que permite tener una idea clara del funcionamiento, aplicaciones y elementos constituyentes de las bombas, en base al análisis de cada una de estas, se determinará cual bomba es la requerida.

Dentro de la clasificación se tiene un sin número de bombas las cuales se pueden detallar en el siguiente cuadro:

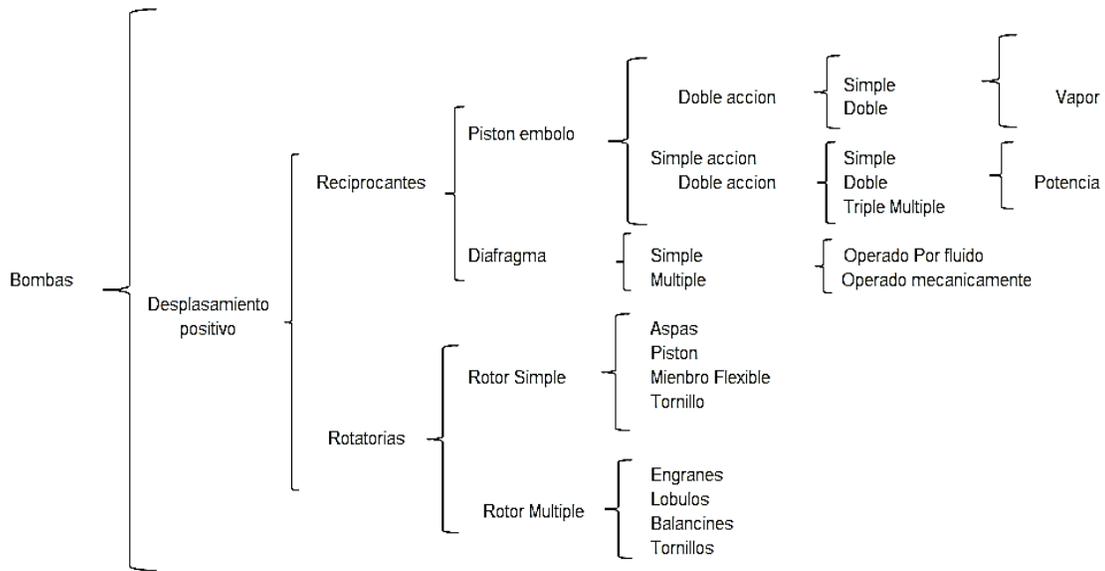


Figura 1.1. Clasificación de bombas
(Manuel Viejo Zubicaray, 2003)

La clasificación anterior, permite apreciar la gran diversidad de bombas que existen, y si a ello agregamos los materiales con los cuales pueden construirse, tamaños, presiones y los diferentes líquidos a manejar; se entiende la importancia de conocer los diferentes tipos de bombas.

Bombas de desplazamiento positivo

Las bombas de desplazamiento positivo pueden ser rotatorias o reciprocantes que estas a su vez se dividen en dos grupos principales:

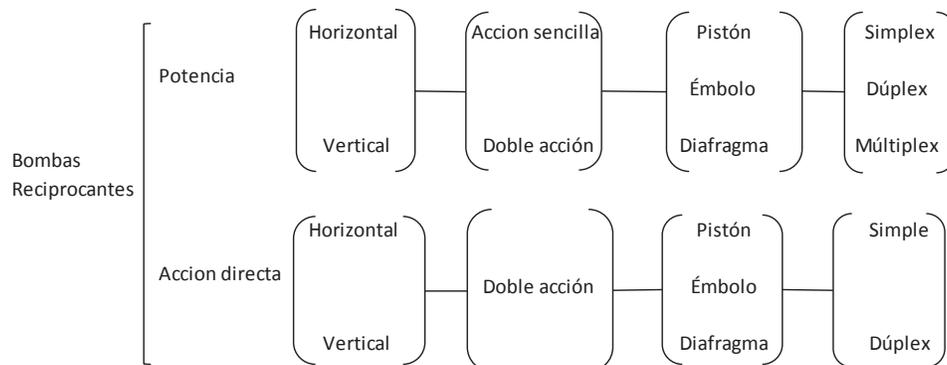


Figura 1.2. Clasificación de las bombas reciprocantes
(McNaughton, 2005)

A continuación, se muestra un esquema de una bomba de triple embolo, la cual da una idea del funcionamiento de la misma.

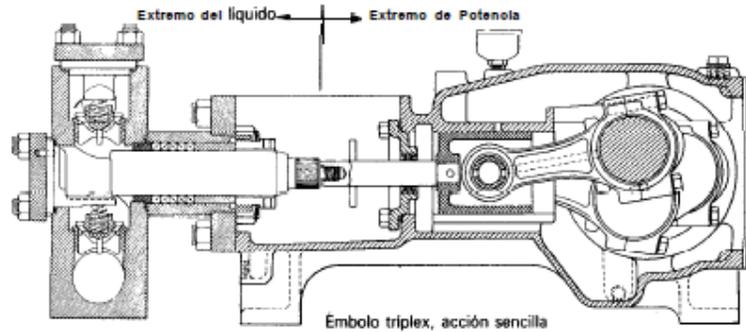


Figura 1.3. Bomba de triple embolo
(McNaughton, 2005)

Una bomba de desplazamiento positivo recibe un volumen fijo de líquido en condiciones casi de succión, lo comprime a la presión de descarga y lo expulsa por la boquilla de descarga. En estas bombas se logra el movimiento alternativo de un pistón, embolo o diafragma. (McNaughton, 2005)

Las bombas de desplazamiento se utilizan de manera específica en aplicaciones que requieren mediano caudal, altas presiones y para bombear como son fluidos pastosos, abrasivos o viscosos fuera de los límites de las bombas centrifugas.

Por otro lado las bombas de potencia, se hace alternar el elemento de bombeo con una manivela o cigüeñal. Esta bomba se mueve con un propulsor con eje rotatorio; como motor eléctrico de combustión interna o turbina. (McNaughton, 2005)

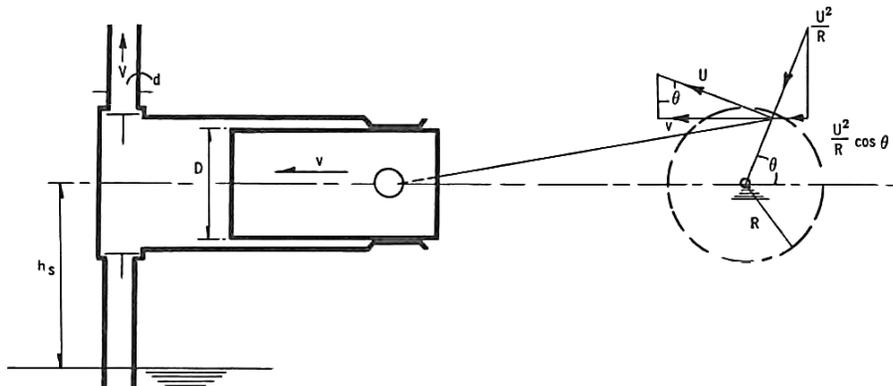


Figura 1.4. Bomba triplex
(Manuel Viejo Zubicaray, 2003)

En la Fig. 1.4 se observa el funcionamiento que tiene una bomba de triple émbolo el pistón ejerce una fuerza en su respectiva cámara de compresión, el fluido recibe la energía del pistón; cada cámara cuenta con una válvula de admisión y una de descarga para controlar el ingreso y salida del fluido. Un múltiple de admisión recibe el fluido a baja presión y una salida compartida descarga el mismo a altas presiones.

1.1.3. Selección de la bomba

Son muy comunes las bombas que tienen la succión en recipientes, tambores o domos y con alturas variables, de acuerdo con esto se buscara las exigencias que la bomba debe tener para cumplir con determinada aplicación. Si la bomba se instala en un sumidero o fosa, los factores esenciales a considerar incluyen el tamaño de la fosa, la ubicación de la bomba dentro de esta y el fluido que está en contacto con la bomba y la fosa.

Dentro de la selección de bombas importa conocer las especificaciones y materiales con los que se construyó la misma, con esto se analiza la compatibilidad con los líquidos que se bombean, los tipos de unidades motrices, sus mecanismos, acoplamientos, engranes, y sellos que también intervienen en la decisión final.

Dentro de la decisión a tomar para la utilización de una bomba intervienen varios factores como son:

- Presión
- Gasto
- Características de los líquidos

(McNaughton, 2005)

Dentro de las tuberías existe perdida por fricción que afecta a la carga total del sistema; esto afecta hasta cierto grado en la caída de presión permisible. El diseñador de la tubería puede proyectarla de un tamaño que produzca gran caída de presión, lo que hará que la bomba adecuada para esto sea una de gran potencia.

La potencia absorbida por una carga más elevada se evalúa con cuidado, debido a que representa siempre un consto más alto en toda la duración de la bomba.

Características de los líquidos

Los líquidos volátiles, calientes, viscosos, las pastas aguadas y las soluciones cristalinas determinan un punto importante dentro de la clasificación y selección de la bomba, estos líquidos pueden dañar el funcionamiento y los elementos de la bomba.

Algunas de las características de los líquidos son:

- Índice de acidez pH
- Condiciones de viscosidad
- Temperatura
- Presión de vaporización del líquido a la temperatura de bombeo
- Densidad
- Condiciones de abrasión
- Condiciones de impureza.

Si bien existe diferentes bombas que son aplicadas en diferentes procesos, la selección que se hizo son las bombas de desplazamiento positivo (triple embolo), estas bombas generalmente son aplicadas para:

- Gastos pequeños
- Presiones altas
- Líquidos limpios

(Manuel Viejo Zubicaray, 2003)

1.1.4. Productos corrosivos y materiales para las bombas

Los materiales para las bombas se pueden dividir en general en metálicos y no metálicos. Los metálicos se dividen en aleaciones ferrosas y no ferrosas, Los no metálicos se pueden dividir en cauchos naturales o sintéticos, plásticos, cerámicas, vidrio, carbono y grafito, los materiales no metálicos tienen aplicaciones específicas en el manejo de sustancias muy corrosivas; los plásticos en particular tienen especial resistencia a la corrosión y se emplea generalmente en los procesos químicos. (McNaughton, 2005)

“Para una aplicación determinada se realiza una minuciosa evaluación, no solo de las características del producto que se maneja, sino que también de los materiales existentes en el mercado para la bomba, con el propósito de hacer la selección de menor costo posible y de mayor vida útil”. (McNaughton, 2005, pág. 17)

1.1.5. Tipos de corrosión en las bombas

La corrosión se produce en las bombas debido a la acción de los líquidos que circulan por estas, habitualmente pueden experimentar ocho tipos de corrosión que se detalla a continuación:

Se tiene la corrosión general que esta se caracteriza por presentar el mismo daño en toda la superficie mojada o expuesta, pero es la menos que preocupa, debido a que es predecible; dentro de una bomba es difícil de predecir ya que existe variación de la velocidad del fluido que circula en estas.

La corrosión por celdas se produce con pequeñas cantidades de fluido que se queda estancado en lugares como roscas, superficies para juntas, agujeros, intersticios y debajo de la cabeza de tornillos y remaches.

La corrosión por picadura es una de las corrosiones más destructora y bastante difícil de predecir, con esta corrosión el elemento va perdiendo peso debido a las picaduras que se produce en el equipo.

Las grietas de corrosión, se producen por la combinación de esfuerzos de tracción y algún producto químico. En las piezas de fundición se presenta raramente este tipo de corrosión por el espesor adicional que se les da a las piezas.

La corrosión intergranular se forma en los bordes de grano y cerca de ellos, generalmente se forma en aceros inoxidable, pero también en otros elementos que diferente aleación. Se puede observar fácilmente este tipo de corrosión en piezas de fundición, porque los granos son más grandes que en un material forjado de composición equivalente.

La corrosión galvánica se produce cuando hay metales desiguales en contacto o conectados eléctricamente en alguna otra forma dentro de un producto corrosivo. (McNaughton, 2005)

La corrosión por erosión se define por un ataque acelerado ocasionado por la combinación de corrosión y desgaste mecánico, esta corrosión es bastante habitual en bombas en donde la erosión reduce la formación de una película pasiva en aleaciones que la requieren para resistir la corrosión. Una de las formas más comunes de esta corrosión es la cavitación.

Finalmente se tiene la corrosión por deslave esta ocasiona la remoción de un elemento de una aleación maciza en un medio corrosivo.

1.1. Aplicaciones y características

1.1.1. Características de la bomba

Una de las características de la bomba triplex; es su alta eficiencia que esta entre 85 a 94 %. La pérdida de 10 % incluye todas las que ocurren en las bandas, engranes, cojinetes, empaquetaduras y válvulas. (McNaughton, 2005)

Otra propiedad de la bomba de triple embolo es que la capacidad que está en función de la velocidad y es más o menos independiente de la presión de descarga. (McNaughton, 2005).

El término positivo significa que la presión desarrollada está limitada solamente por la resistencia estructural de las distintas partes de la bomba y la descarga no es afectada por la carga a presión, sino que está determinada por la velocidad de la bomba y la medida del volumen desplazado.

El ruido de la bomba durante el funcionamiento es relativamente bajo; esto facilita que los operarios estén cerca observando el rendimiento que de la misma.

1.1.2. Características del flujo

Cuando el elemento de bombeo se retrae de la cámara de bombeo, el fluido se expande y reduce la presión. Como la mayor parte de los líquidos no son comprensibles, requiere muy poco movimiento del elemento para disminuir la presión. (McNaughton, 2005)

En una bomba de potencia, la velocidad del elemento (pistón, embolo o diafragma) varía de acuerdo con el seno del ángulo del muñón o codo del cigüeñal. Sería una función senoidal perfecta, si la longitud de la biela fuera infinita. Puesto que la velocidad del líquido en la tubería es proporcional a la velocidad del embolo, se traza la curva como porcentaje del promedio.

La bomba de potencia triplex tiene los codos del cigüeñal desplazados 120° y el traslape de 60° ; esto hace que dos elementos descarguen o succionen liquido en forma simultánea. La variación en eficiencia es solo 25% del promedio, la velocidad máxima es de 107 %, para una capacidad media de 100 gpm, los tubos de succión y descarga tendrían capacidades mínimas de 82 gpm y máximas de 107 gpm. (McNaughton, 2005)

Principalmente la bomba triplex produce seis impulsos por revolución, esto se da por la protuberancia que pasan durante el traslapo de dos elementos de bombeo.

Resumiendo todo, se considera que las variaciones de las velocidades de las bombas de potencia son las siguientes:

Tabla 1.1. Tipos de bombas

No de elementos de bombeo de acción sencilla	Tipo de bomba	Variación en la velocidad %
2	Dúplex	160
3	Triplex	25
5	Quíntuplex	7
7	Séptuplex	4
9	Nónuplex	2

(McNaughton, 2005)

1.1.3. Aplicaciones

Para el servicio de carga de glicoles, se utilizan bombas de potencia con motor y bombas reciprocantes de acción directa. Son utilizadas para eliminar la humedad del gas natural. (McNaughton, 2005, pág. 154)

En las plantas grandes para tratamiento de gas utilizan bombas centrifugas; mientras que en las pequeñas utilizan bombas de potencia propulsadas por un motor eléctrico. (McNaughton, 2005, pág. 154)

Dentro de la industria petrolera se utiliza para absorber los hidrocarburos como butano, propano y etano del gas natural, dentro de la misma industria se utiliza para la inyección de agua salada, es un método utilizado para la recuperación secundaria de petróleo y gas en los campos casi agotados. En los campos pequeños se utilizan bombas de potencia. (McNaughton, 2005)

Sistemas de oleoductos y gaseoductos, utilizan bombas de potencia para inyectar amoníaco o hidrocarburos ligeros. También se envía diversas pastas aguadas y petróleo crudo a las tuberías con bombas de potencia de pistón y embolo. (McNaughton, 2005)

Producción de Fertilizantes. Utilizan bombas de potencia con extremos para líquido hechos de acero inoxidable y prensaestopas especiales para bombear carbonato de

amoníaco a presiones hasta de 3500 psig para la producción de urea. (McNaughton, 2005)

1.2. Especificaciones de la bomba seleccionada

Las especificaciones se detallan de acuerdo a las condiciones del fabricante, las bombas triplex trabajan de manera horizontal o vertical; los cilindros son numerados de izquierda a derecha a partir del uno, lo mismo sucederá para el caso de las bielas, émbolos.

La bomba seleccionada es la bomba triplex embolo que corresponde a una bomba reciprocante, se selecciona este tipo de bomba debido primeramente a la función que esta va a realizar, en este caso la extracción de agua, otra razón es el tipo de fabricación que se realizara para su obtención, para este caso fundición, se podría escoger un tipo de bomba con impeler y alabes, pero su fabricación sería más complicada debido a su geometría, y por lo tanto sería más costoso, y como ultima razón es la poca fabricación de este tipo de bombas mediante fundición por lo que este tipo de bomba podría ser un emprendimiento para un futuro, y poder producirla en masa.

Esta bomba trabaja de manera vertical y la aplicación que tiene es succionar agua para el sector petrolero, a continuación se muestra las especificaciones de la bomba elegida.

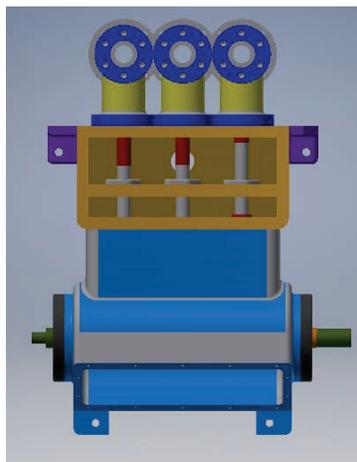


Figura 1.5. Ensamble completo de la bomba triplex
(Fuente: Propia)

En la siguiente grafica se muestra el despiece de la bomba triplex con lo que se muestra con más detalle las distintas piezas que componen la misma.

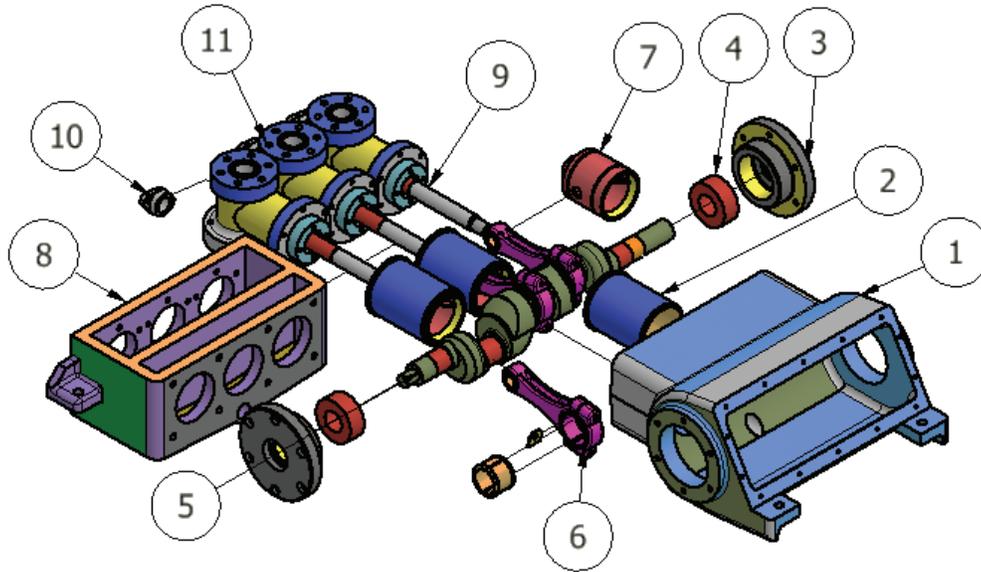


Figura 1.6. Despiece de la bomba triplex
(Fuente: Propia)

Tabla 1.2. Componentes de la bomba Triplex.

Numero	Cantidad	Nombre	Material
1	1	Carcaza	
2	3	Camisas	
3	2	Tapas laterales	Fundición Nodular
4	2	Rod cónico 3055	
5	1	Cigüeñal	Fundición Nodular
6	3	Biela	Fundición Nodular
7	3	Pistón	
8	1	Separador	
9	3	Inyector	
10	3	Prensa estopa aceite	
11	3	Cabezal	

(Fuente: Propia)

Una de las piezas que necesita mayor desglose es la biela y esto se muestra a continuación:

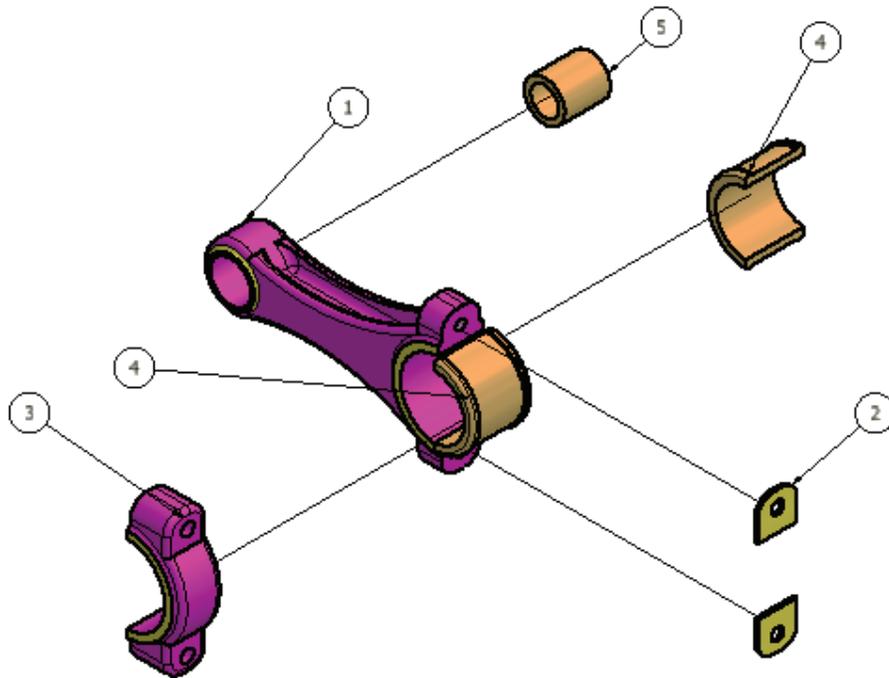


Figura 1.7. Despiece de la biela
(Fuente: Propia)

Tabla 1.3. Componentes de la biela.

Numero	Cantidad	Nombre	Material
1	1	Biela	Fundición Nodular
2	2	Shim Biela	
3	1	Biela2	Fundición Nodular
4	2	Chaqueta	
5	1	Buje	

(Fuente: Propia)

2. ESTUDIO DE LA FUNDICIÓN NODULAR

En este capítulo se describe resumidamente la elaboración de la fundición nodular o fundición de grafito esferoidal. La principal característica de esta fundición, son los nódulos de forma esferoidal que se dan al momento de la fundición. La fundición nodular es un tipo de fundición desarrollada para mejorar las propiedades mecánicas de la fundición gris, tales como la ductilidad, la resistencia al impacto, y reducir problemas de fragilidad en las piezas obtenidas. "Cuando el Grafito se agrupa en forma de nódulos o esferoides, no rompe la continuidad de la matriz, lo que hace es aumentar sensiblemente las características mecánicas en comparación con las que presentaría una fundición corriente".(Luis y Berciano, 2005, pág 28)

En la fundición nodular se presenta una matriz perlítica. Si se realiza un tratamiento térmico adecuado se puede obtener una matriz totalmente ferrítica. En general la fundición nodular presenta mejores propiedades mecánicas con respecto a la fundición gris, y características semejantes a la fundición maleable perlítica con la diferencia de que en las fundiciones nodulares no se requiere un ciclo térmico de transformación la cual es indispensable en las fundiciones maleables. (FACULTAD CATÓLICA DE QUÍMICA E INGENIERIA Fray Rogelio Bacon Trabajo Práctico Fundición Nodular.)

El grafito que se da en la fundición nodular se genera a partir del metal líquido o colada, y por la cristalización directa, otra opción es que el grafito se genere por la descomposición de la cementita o de la austenita saturada en carbono.

Para que se genere la forma específica del grafito; es decir una forma esferoidal, esta adquiere su forma dependiendo de la presencia o ausencia de varios elementos superficialmente activos como es el azufre, o la presencia de impurezas en la estructura metalográfica particular.

"Algunos intermetálicos de silicio como SiMg y Si2Ce, de estructura metalográfica cercana al grafito, pueden originar esferoides mediante un recocido de la fundición una vez solidificada. Los nodulizantes, cuyos elementos (Alcalinos, alcalinotérreos, tierras raras) son muy reactivos frente al oxígeno y azufre, cumplen las dos condiciones expuestas anteriormente y determinan la obtención de grafito esferoidal. De todos ellos, el más usual es el magnesio, bien puro o bien aleado".(Luis y Berciano, 2005, pag 28)

2.1. Características

La fundición nodular posee como material base el carbono en su mayor porcentaje con respecto a los demás elementos químicos que interviene en esta fundición.

Para la obtención de este tipo de fundición se debe tener en cuenta varios factores tales como:

- Equipos de hornos.
- Herramientas para el colado.
- Composición química de la aleación base.
- Aditivos (Nodulizante e inoculante).

2.1.1. Composición química de la fundición nodular

La composición química depende de las condiciones que disponga el usuario, y del tipo de fundición nodular que quiera obtener, pero en general la fundición nodular se rige a la norma ASTM A-536 con los porcentajes en peso tabulados en la siguiente tabla.

Tabla 2.1. Composición química nodular.

Composición química (Porcentaje en peso)						
C(Total)	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu
3,6-3,8	0,15 - 1	1,8 - 2.8	0,03 - 0,07	0,05 - 0,2	0,01 - 0,1	0,15 - 1
P	S	Ce	Mg			
0,03 máx.	0,02 máx.	0,005 - 0,02	0,03 - 0,06			

(ASTM A-536, 2010)

A continuación, se describe brevemente los compuestos químicos que intervienen en una fundición nodular:

Carbono.- El porcentaje de carbono para fundiciones nodulares puede variar desde 3,6 hasta máximo 4%, siendo el carbono el elemento primordial para la formación de los esferoides de grafito, si existe mayor cantidad de carbono mayor es la probabilidad de formación de esferoides, aunque obviamente no debe sobrepasar los límites que se establece ya que esto permite la flotación del carbono. La flotación del grafito se debe

a que la densidad del grafito es menor que la densidad del hierro, lo que hace posible la flotación de nódulos y segregación de los mismos en la parte superior de la pieza.

Silicio.- El contenido final de silicio después de la adición de nodulizante (Aleación de magnesio) e inoculante (Aleación de silicio) está en un 2 a 2.73 %, estos valores mejoran la colabilidad y fluidez. El ferrosilicio se puede añadir en un 0.3% a 1.2% de silicio por lo que la composición química de la aleación final debe estar en un 1.2 a 2.0% de silicio.

Manganeso.- En el caso de fundición nodular se encuentra libre para ejercer su función de aleante y estabilizar la perlita. Para garantizar la formación de ferrita, tanto por enfriamiento lento o por tratamiento térmico si es el caso es favorable mantener los niveles de manganeso muy bajos. En el caso de fundiciones totalmente perlíticas el contenido de manganeso no deberá exceder el 0.3%. En ambos casos como ferrítica - perlítica el manganeso no deberá exceder el 1%, ya que el exceso de este elemento reduce la ductilidad y tenacidad de la fundición nodular.

Azufre.- El azufre es un elemento perjudicial para la reacción nodulizante, ya que cualquier adición de aleantes que contengan este elemento sustraerá magnesio; lo cual reducirá la eficiencia del tratamiento nodulizador, en consecuencia, es recomendable mantener los niveles de azufre lo más bajos posibles (0.02% máx.).

Fósforo.- Este elemento no es muy relevante al momento del proceso de nodulización, pero no es aconsejable su exceso, ya que el exceso de fósforo deteriora las propiedades mecánicas de la fundición, los valores recomendables para una máxima ductilidad y resistencia al impacto son menores al 0.05%.

Níquel.- Se lo añade para obtener una matriz ferrítica o una matriz perlítica. Este elemento aumenta la carga a rotura y el límite elástico.

Cobre.- Su exceso puede producir efectos desfavorables en la formación de los nódulos de grafito.

Cromo.- Es un potente estabilizador de carburos por lo que es perjudicial, no debe exceder el 0.05%, a excepción de piezas mecánicas, cilindros, etc.

2.1.2. Proceso de obtención de la fundición nodular

Composición de las cargas del horno

La materia prima previo a la obtención de la aleación base se selecciona en función del tipo de horno en el que se vaya a trabajar, y de la composición química que se desea alcanzar.

El arrabio es el componente primordial de las cargas de cubilote y de hornos rotativos, en estos dos últimos la fusión provoca una reducción de carbono, por lo que es necesario la utilización de arrabio como materia prima para compensar esas pérdidas de carbono. En los cubilotes es más factible utilizar arrabio en lingotes, ya que en este se genera una recarburización en la colada a expensas del coque.

Para el caso de los hornos eléctricos, no hay recarburización por lo que es necesario la adición de un carburizante, esto ayuda a reemplazar el arrabio por chatarra de acero como materia prima, la cual se selecciona adecuadamente. (Guerra, 2012).

Materia prima

Arrabio.- El arrabio a utilizar debe ser de un porcentaje en fósforo bajo. Este material tiene algunas limitaciones, como por ejemplo su costo, no son muy adecuados para piezas de grandes espesores, además de que no dan buen resultado tratándolos solo con magnesio por lo que se requiere un tratamiento extra de magnesio y cerio lo que implicaría más costos.

Acero.- La chatarra de acero es la más recomendable dependiendo del horno como ya se dijo anteriormente, debido a su disponibilidad y bajo costo en comparación con el arrabio, los tipos de acero que tenemos son:

- Aceros puros
- Aceros de alta aleación

Los tipos de chatarras recomendables son:

- Chatarra de transformables eléctricos

- Chatarra de acero estructural



Figura 2.1. Chatarra de aceros estructurales y transformables eléctricos
(Fuente: Propia)

En ambos tipos se debe controlar y vigilar su composición química, es más recomendable la chatarra de transformables eléctricos, estos poseen niveles de impurezas muy bajos, y un contenido de silicio de hasta el 2.0%.

Retornos.- Los retornos son en su mayoría los sistemas de alimentación que se cortan de fundiciones nodulares hechas, lo más recomendable es que sean de fundición nodular para garantizar su composición química en el resultado final.
(Guerra, 2012)



Figura 2.2. Retornos de fundición nodular
(Fuente: Propia)

Tratamiento de nodulización

La nodulización es la formación de grafito esferoidal o nódulos esferoidales mediante la adición de pequeñas cantidades de magnesio puro o en aleación. La cantidad base de grafito para producirse un hierro nodular perfecto esta entre 0.018 y 0.050, viene combinado en azufre y oxígeno de la aleación inicial (materia prima líquida). (Guerra, 2012)

El magnesio que se aplica elimina cualquier partícula en exceso de azufre y oxígeno que haya quedado en el metal líquido, esto ayuda a que el carbono se aglomere en una sola esfera formando así los nódulos. Los nódulos esferoidales se van produciendo durante el proceso de solidificación.

Inoculación

El rol que cumple la inoculación es la obtención de mejores propiedades. El Ferro silicio de 75 % es el inoculante más empleado a nivel industrial, es recomendable un Ferro silicio con algún porcentaje de Al y Ca, para la eficacia del proceso, también hay elementos como el estroncio que ayudan a la eliminación de carburos.

Para obtener una forma de grafito uniforme se requiere una adición entre 0.3% y 0.5% de silicio, en resumen debe estar en un porcentaje entre 0.6 y 0.7% de FeSi de 75 – 80%.

“La inoculación más efectiva es la que se hace lo más tarde posible, e inmediatamente antes de colar los moldes. Por ello es a veces favorable efectuar parte de la adición inoculante que representa un aumento del 0,2% en el contenido de silicio, inmediatamente antes de colar. Este sistema es particularmente valioso cuando la colada parcialmente inoculada se transporta una larga distancia antes de colar y el metal se transfiere desde los crisoles de transporte hasta los crisoles de colar.” (Guerra, 2012, pág. 70)

Tratamiento clásico de adición directa

En esta sección se procede a explicar esquemáticamente el proceso de obtención de la fundición nodular mediante el “método directo o Pour Over” (Guerra, 2012, pág. 59) el proceso se da de la siguiente manera.

A) Se vierte cierta cantidad de colada desde el horno hacia el crisol transportable

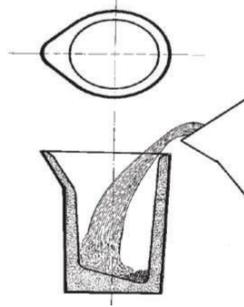


Figura 2.3. Porción de la colada
(Guerra, 2012)

B) Se añade la aleación nodulizante durante el flujo de colada



Figura 2.4. Adición de nodulizante
(Guerra, 2012)

C) Se espera hasta que se establezca la reacción que se genera



Figura 2.5. Reacción generada
(Guerra, 2012)

D) Adición del inoculante durante el colado



Figura 2.6. Adición de inoculante
(Guerra, 2012)

E) Esparcir el inoculante y sacar la escoria



Figura 2.7. Inoculante esparcido
(Guerra, 2012)

F) Crisol listo para el colado



Figura 2.8. Colada lista
(Guerra, 2012)

2.2. Propiedades mecánicas

La fundición nodular posee una alta resistencia mecánica y además alcanza una buena ductilidad y elongación. La dureza es una de sus propiedades más relevantes y esta se debe a la finura de constituyentes de la matriz. También se consigue un buen grado de pulido y resistencia a la corrosión. Resiste altas temperaturas, choques térmicos, presentan un buen coeficiente de rozamiento y resistencia al desgaste, tanto en seco como en lubricado. (Luis y Berciano, 2005)

En general la fundición nodular posee:

- Resistencia mecánica
- Resistencia al calor
- Resistencia a la corrosión
- Resistencia al desgaste
- Facilidad de mecanizado
- Dureza

2.3. Justificación del uso de la fundición nodular

Como se explicó antes la fundición nodular con respecto a otros tipos de fundiciones o aleaciones posee mejores propiedades mecánicas dependiendo de la matriz si es ferrítica, perlítica, o ambas. Para las piezas que se va obtener, estas deben soportar cargas a flexión y tracción. A continuación, se presentan las diferentes clases de fundiciones grises y fundiciones nodulares que existen:

Tabla 2.2. Propiedades mecánicas de la fundición gris.

Clase	Propiedades mecánicas	
	Resistencia (psi)	Dureza Brinell
ASTM A48		
20	24000	130-180
30	34000	170-210
40	44000	210-260
50	54000	240-280
60	64000	260-300

(CASTRO, 2009)

Tabla 2.3. Propiedades mecánicas de la fundición nodular.

ASTM A-536	BRINELL (HB-30)	Resistencia a la tracción (psi)	Límite de fluencia (psi)
60-40-18	160-210	60000	42000
65-45-18	180-230	65000	45000
80-55-06	200-260	80000	55000
100-70-03	220-280	100000	70000
120-70-02	240-300	120000	84000

(ASTM A-536, 2010)

Se observa en la Tabla 2.3 que las propiedades de la fundición nodular son superiores a las de la fundición gris de la Tabla 2.2, por lo que se rige a utilizar la aleación con mejores propiedades de resistencia mecánica, dureza, ductilidad y tomando en cuenta también sus aplicaciones, Tablas 3.2.

2.4. Cálculo de carga para la obtención de la fundición nodular clase 80-55-06

En esta sección se procede a explicar la obtención de las cantidades de aditivos para la obtención de fundición nodular 80-55-06, mediante un cálculo de porcentajes en peso para la adición de nodulizante e inoculante, y otros aditivos, todo con el fin de obtener el grado de fundición especificado.

La chatarra que se va a utilizar es la siguiente:

- Chatarra Cold rolled (CR)
- Retornos de fundiciones realizadas anteriormente

La chatarra Cold Rolled (CR) son residuos de bobinas o elementos estructurales laminados en caliente de espesores delgados. El CR tiene una mayor aptitud al conformado y un mejor aspecto superficial.

Los retornos son los desechos de fundiciones nodulares realizadas anteriormente, tales como sistemas de alimentación o piezas dadas de baja.

Los análisis químicos respectivos y el proceso de fundición se los realizó en la empresa FUNDIRECICLAR S.A, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 2.4. Composición química del cold rolled.

Descripción	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Cu	% Mg
Cold rolled(CR)	0,12	0,14	0,33	0,01	0,000043	0,37	0,02	0,01	< 0,001

(FUNDIRECICLAR S.A., 2017)

Tabla 2.5. Composición química de los retornos.

Descripción	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Cu	% Mg
Retornos	3,81	2,64	0,4	0,01	0,01	0,06	0,03	0,05	< 0,001

(FUNDIRECICLAR S.A., 2017)

Con estos resultados se realiza los cálculos de carga de los respectivos compuestos extras que se debe añadir. Se procede a realizar una sola tabla con ambos tipos de materia prima.

Tabla 2.6. Composiciones químicas de ambas materias primas.

Descripción	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Cu	% Mg
Cold rolled(CR)	0,12	0,14	0,33	0,01	0,000043	0,37	0,02	0,01	< 0,001
Retornos	3,81	2,64	0,4	0,01	0,01	0,06	0,03	0,05	< 0,001

(FUNDIRECICLAR S.A., 2017)

Previamente se verifica las cantidades respectivas de materia prima tanto de cold rolled y retornos que van a ir en el horno, en este caso y por cuestiones de disponibilidad del material en la empresa se procede a cargar 700 kg de cold rolled y 300 kg de retornos.

Con los datos que se obtienen se realiza una tabla en general:

Tabla 2.7. Cantidades de materia prima.

Descripción	Cantidad(kg)	% C	% Si	% Mn	% P	% S
Cold rolled(CR)	700	0,12	0,14	0,33	0,01	0,000043
		% Cr	% Ni	% Cu	% Mg	
		0,37	0,02	0,01	< 0,001	
Retornos	300	% C	% Si	% Mn	% P	% S
		3,81	2,64	0,4	0,01	0,01
		% Cr	% Ni	% Cu	% Mg	
		0,06	0,03	0,05	< 0,001	

(FUNDIRECICLAR S.A., 2017)

Ahora se procede a realizar un ejemplo de cálculo de carga para los elementos más relevantes durante el proceso de fundición como son el carbono, silicio, manganeso, y azufre.

Entonces se tiene los siguientes datos:

Tabla 2.8. Elementos químicos más relevantes para el ejemplo de cálculo.

Descripción	Cantidad(kg)	% C	% Si	% Mn	% S
Cold rolled(CR)	700	0,12	0,14	0,33	0,0043
Retornos	300	3,81	2,64	0,4	0,01

(Fuente Propia)

Se tiene 700 kg y 300 kg de CR y retornos respectivamente, y los porcentajes en peso de cada uno de los elementos. Para obtener los pesos que se tiene en la composición de cada materia prima se multiplica las respectivas cargas de 700 y 300 kg por los porcentajes en peso de cada uno de los elementos químicos y se divide para 100, con esto se obtiene la masa en kg.

Se toma un elemento para realizar un ejemplo de cálculo, en este caso el carbono, para determinar el peso del elemento en la aleación, entonces se aplican las siguientes ecuaciones

$$kgC_{CR} = CR * \%C$$

Ecuación 2.1. Peso de carbono en el cold rolled

Donde:

kgC_{CR} : Kilogramos de carbono en el Cold rolled

CR: Carga de cold rolled 700 kg

%C: Porcentaje de carbono en el Cold rolled

$$kgC_{CR} = \frac{700 * 0.12}{100}$$

$$kgC_{CR} = 0,84 \text{ kg}$$

$$kgC_R = R * \%C$$

Ecuación 2.2. Peso de carbono en los retornos

Donde:

kgC_R : Kilogramos de carbono en los retornos

R: Carga de retornos 300 kg

$\%C$: Porcentaje de carbono los retornos

$$kgC_R = \frac{300 * 3.81}{100}$$

$$kgC_R = 11,43 \text{ kg}$$

Los datos se obtienen de la Tabla 2.8.

Tabla 2.9. Pesos de cada elemento en cada materia prima.

Descripción	Cantidad(kg)	% C	Kg C	% Si	kg Si	% Mn	kg Mn	% S	kg S
Cold rolled(CR)	700	0,12	0,84	0,14	0,98	0,33	2,31	0,0043	0,0301
Retornos	300	3,81	11,43	2,64	7,92	0,4	1,2	0,01	0,03

(Fuente Propia)

Ahora se suma los pesos de la materia prima y de cada uno de los elementos químicos, y se obtiene los kg de carbono en la aleación:

$$kgC_{AL} = kgC_{CR} + kgC_R$$

kgC_{AL} :Peso del carbono en la aleación base en kg.

$$kgC_{AL} = 0.84 \text{ kg} + 11.43 \text{ kg}$$

$$kgC_{AL} = 12,27 \text{ kg}$$

Tabla 2.10. Pesos en kg de los elementos químicos en la aleación inicial.

Descripción	Cantidad(kg)	% C	kg C	% Si	kg Si	% Mn	kg Mn	% S	kg S
Cold rolled(CR)	700	0,12	0,84	0,14	0,98	0,33	2,31	0,0043	0,0301
Retornos	300	3,81	11,43	2,64	7,92	0,4	1,2	0,01	0,03
CT	1000		12,27		8,9		3,51		0,0601

(Fuente: Propia)

Para calcular los porcentajes en peso realizamos el siguiente cálculo.

$$\%C = \frac{kgC_{AL}}{CT} * 100$$

Ecuación 2.3. Porcentaje en peso del carbono en la aleación inicial

CT: Carga total.

Utilizando la Ecuación 2.3 se procede a realizar el cálculo para cada uno de los elementos químicos y se obtiene lo siguiente:

$$\%C = \frac{12.27}{1000} * 100$$

$$\%C = 1,227$$

Se obtiene %C el porcentaje de carbono en la aleación inicial.

Tabla 2.11. Porcentajes en peso de la aleación inicial.

Descripción	Cantidad(Kg)	% C	Kg C	% Si	kg Si	% Mn	kg Mn	% S	kg S
Cold rolled(CR)	700	0,12	0,84	0,14	0,98	0,33	2,31	0,0043	0,0301
Retornos	300	3,81	11,43	2,64	7,92	0,40	1,2	0,01	0,03
CT	1000	1,23	12,27	0,89	8,90	0,35	3,51	0,00601	0,0601

(Fuente: Propia)

La Ecuación 2.3 se la utiliza para todos los casos dependiendo el elemento.

Como se observa los porcentajes de los 4 elementos son relativamente bajos en especial el del carbono por lo cual se tiene que elevar su respectivo porcentaje con la adición de Carburizante (Grafito 05) y Silicio metálico para el caso del silicio, con lo cual se conseguirá el hierro base.

Estos 4 elementos son los que más interfieren durante la nodulización y además son los que más se deben controlar como se lo explica en la sección 2.1.1, con esto se garantiza la uniformidad del nódulo y consigo las propiedades mecánicas del material.

2.4.1. Carburización

Se procede a elevar el porcentaje de carbono en la aleación mediante la adición de grafito 05 al 96 %, hasta conseguir el valor de carbono que se encuentra en la norma ASTM A-536 que esta entre 3,6 y 3,8%C, para lo cual se aplica un método analítico y se utiliza la siguiente formula (FUNDIRECICLAR S.A., 2017).

$$W_G = \frac{kgC_{AL} - \left(\frac{\%C_r * W_{AL}}{100}\right)}{\frac{(\%C_r - \%C_{ALG})}{100}}$$

Ecuación 2.4. Carga de carburizante

Donde:

W_G : Cantidad de grafito que se debe añadir en kg.

kgC_{AL} : Peso del carbono en la aleación inicial en kg.

$\%C_r$: Porcentaje de carbono requerido.

W_{AL} : Peso total de la aleación base inicial en kg.

$\%C_{ALG}$: Porcentaje de carbono en el carburizante.

El porcentaje de carbono requerido en este caso es de 3,8% pero por cuestiones de pérdidas se utiliza 3,9% de carbono, el grafito 05 tiene un porcentaje de 96% de carbono, y para lo que es W_{AL} se observa la Tabla 2.10.

Se reemplaza los respectivos valores.

$$W_G = \frac{12.27 - (0.039 * 1000)}{0.039 - 0.96}$$

$$W_G = 29.02 \text{ kg}$$

Entonces para 1000kg de materia prima la cantidad de grafito 05 que se debe añadir es de 29 kg, aproximando 30kg.

Se aplica la Ecuación 2.1 para el cálculo del nuevo peso del carbono en la nueva aleación.

$$kgC_G = W_G * \%C_G$$

kgC_G : Kilogramos de carbono en el grafito 05

$\%C_G$: Porcentaje de carbono en el grafito 05

$$kgC_G = 30 * 0,96$$

$$kgC_G = 28,8 \text{ kg}$$

A esto se le suma kgC_{AL} el peso del carbono en la aleación inicial y se obtiene los kg de carbono en el hierro base.

$$kgC_{HM} = kgC_G + kgC_{AL}$$

kgC_{HM} : Peso del carbono en la aleación madre en kg.

$$kgC_{HM} = 28,80 + 12,27$$

$$kgC_{HM} = 41,07kg$$

Para la obtención de los nuevos porcentajes de cada uno de los elementos químicos, en este caso el carbono se aplica la Ecuación 2.1 tomando en cuenta que la nueva carga total(CT) 1030kg esto sumado el peso del carburizante, mediante el cual se verifica las pérdidas o ganancias, en este caso ganancia del carbono.

$$\%C = \frac{41,07}{1030} * 100$$

$$\%C = 3,98$$

Tabla 2.12. Porcentaje en peso de carbono.

Descripción	Cantidad(kg)	% C	kg C
Cold rolled(CR)	700	0,12	0,84
Retornos	300	3,81	11,43
Carga total	1000	1,23	12,27
Grafito 05	30	96	28,80
CT	1030	3,98	41,07

Fuente: Propia

En la tabla 2.12 se observa que el porcentaje en peso del carbono se elevó considerablemente sin embargo esta fuera del rango según la norma ASTM A536, este se reducirá con la adición del silicio metálico, nodulizante e inoculante.

2.4.2. Adición del silicio metálico

Se añade silicio metálico al 96 %, y se varia la relación contenida del metal base con la cantidad de silicio que se requiere añadir, obteniendo la siguiente formula (Zambrano, 1980).

$$\%Si_m = \left(1 - \frac{\%Si_{AL}}{\%Si_d}\right) * 100$$

Ecuación 2.5. Porcentaje de silicio metálico

Donde:

$\%Si_m$: Porcentaje de silicio metálico.

$\%Si_d$: Porcentaje de silicio deseado.

$\%Si_{AL}$: Porcentaje de silicio en la aleación base inicial.

Se reemplaza los valores verificando la tabla 2.11, según la norma ASTM A-536 el porcentaje de silicio que se desea obtener para una fundición 80-55-06 es de 3% como máximo.

$$\%Si_m = \left(1 - \frac{0,89}{3}\right) * 100$$

$$\%Si_m = 70,3 \%$$

Como el silicio metálico tiene un 96% de pureza, y la carga de materia prima es de 1030kg se realiza el siguiente cálculo (Zambrano, 1980).

$$\%Si_{Sr} = \frac{\%Si_m}{\%Si_{mAL-Si}}$$

Ecuación 2.6. Porcentaje de silicio metálico requerido

Donde:

$\%Si_{Sr}$: Porcentaje de silicio requerido.

$\%Si_m$: Porcentaje de silicio metálico.

$\%Si_{mAL-Si}$: Porcentaje de silicio en el silicio metálico.

Se reemplaza los valores.

$$\%Si_{Sr} = \frac{0,703}{0,96}$$

$$\%Si_{Sr} = 0,73 \%$$

Por último, se calcula la cantidad de silicio metálico (W_{Si}) que se debe añadir multiplicando el porcentaje de silicio requerido por la carga total hasta el momento 1030kg, obteniendo el siguiente peso.

$$W_{Si} = 7,5 \text{ kg} = 8 \text{ kg}$$

Para el cálculo del nuevo peso del silicio en la aleación se realiza los mismos pasos que se hizo para el carburizante (Grafito 05) y se obtiene lo siguiente:

Tabla 2.13. Porcentajes de Silicio y Carbono.

Descripción	Cantidad(Kg)	% C	Kg C	% Si	kg Si
Cold rolled	700	0,12	0,84	0,14	0,98
Retornos	300	3,81	11,43	2,64	7,92
	1000	1,227	12,27	0,89	8,9
Grafito 05	30	96	28,8	0	0
	1030	3,98	41,07	0,86	8,9
Silicio metálico	8	0	0	96	7,68
CT	1038	3,95	41,07	1,6	16,58

(Fuente: Propia)

En la Tabla 2.13 con la adición del silicio se verifica que el porcentaje de carbono se reduce levemente, y el silicio aumenta considerablemente, por lo que la carga de cada uno de estos elementos influye notablemente en la disminución e incremento de cada uno de ellos, para verificar se realiza una tabla con los 4 elementos descritos al principio del cálculo, esto con el fin de visualizar los porcentajes en peso de cada uno, este último es el hierro base del cual se parte para la obtención de la fundición nodular.

Tabla 2.14. Porcentajes calculados del hierro base.

Descripción	Cantidad(Kg)	% C	kg C	% Si	kg Si	% Mn	kg Mn	% S	kg S
Cold rolled	700	0,12	0,84	0,14	0,98	0,33	2,31	0,004	0,03
Retornos	300	3,81	11,43	2,64	7,92	0,4	1,2	0,014	0,04
Carga total	1000	1,227	12,27	0,89	8,9	0,351	3,51	0,007	0,07
Grafito 05	30	96	28,8	0	0	0	0	0	0
	1030	3,99	41,07	0,86	8,9	0,33	3,51	0,007	0,07
Silicio metálico	8	8	0	96	7,68	0	0	0	0
CT	1038	3,95	41,07	1,6	16,58	0,34	3,51	0,007	0,07

(Fuente: Propia)

Para verificar estos porcentajes se procede a realizar un análisis químico de una muestra de la colada a través de un espectrómetro en caliente.

Tabla 2.15. Análisis químico de la aleación del hierro base.

Descripción	% C	% Si	% Mn	% S	%P
Hierro base(Afino)	3,64	1,77	0,243	0,017	0,015

(FUNDIRECICLAR S.A., 2017), ANEXO 1

Como se puede observar los porcentajes difieren en pequeñas proporciones, esto se debe a diferentes parámetros que se pueden controlar y otros que no se pueden controlar al momento fundir, tales como cantidades de chatarra, cantidades de aditivos, temperatura de colado, velocidad de colado, temperatura de enfriamiento, entonces son muchas las circunstancias por la que los porcentajes no son idénticos, además estos jamás van a coincidir exactamente, ya que como se dijo antes hay parámetros que no se pueden controlar y en algunas ocasiones dependen del medio en el que se trabaja.

Ya se tiene el hierro base del cual se va a partir para obtener la fundición nodular, entonces ahora se necesita las cargas de nodulizante e inoculante para lograr el objetivo.

2.4.3. Nodulizante Ferrosilicio magnesio

Si bien es más factible utilizar magnesio puro como se dijo en la sección 2.1.2, en esta ocasión por disponibilidad de material se procede a utilizar Ferrosilicio magnesio (FeSiMg) L10 con porcentajes de Si al 45%, Mg al 10 %, y el resto hierro, entonces con estos valores se procede a tabular lo siguiente.

Tabla 2.16. Composición de FeSiMg.

Descripción	Cantidad (kg)	% C	Kg C	% Si	kg Si	% Mn	kg Mn	% S	kg S	% Mg	kg Mg
Cold rolled	700	0,12	0,84	0,14	0,98	0,33	2,31	0,004	0,03	0	0
Retornos	300	3,81	11,43	2,64	7,92	0,40	1,20	0,014	0,04	0	0
Carga total	1000	1,23	12,27	0,89	8,90	0,35	3,51	0,007	0,07	0	0
Grafito 05	30	96	28,80	0	0	0	0	0	0	0	0
	1030	3,98	41,07	0,86	8,9	0,34	3,51	0,007	0,07	0	0
Silicio metálico	8	0	0	96	7,68	0	0	0	0	0	0
	1038	3,95	41,07	1,6	16,58	0,34	3,51	0,007	0,07	0	0
FeSiMg L10		0	0	45	0	0	0	0	0	10	0

(Fuente: Propia)

Verificando que no se sobrepase los porcentajes de carbono, silicio, manganeso y magnesio se procede a calcular la carga de nodulizante de la siguiente manera. (Guerra, 2012).

$$W_{FeSiMg} = \frac{(0.75 * S) + Mg_{res}}{Mg_{rec} * MgA} * 10000$$

Ecuación 2.7. Carga de nodulizante

Donde:

WFeSiMg: Es la adición expresada como kg Fe Si Mg / 100 kg metal

S: Es el porcentaje de azufre en la fundición base

Mgres: Es el porcentaje de Mg residual deseado o previsto

Mgrec: Es el rendimiento o recuperación de magnesio, expresado en porcentaje

MgA: es el porcentaje de Mg en la aleación nodulizante

El magnesio de recuperación o rendimiento se lo escoge dependiendo del porcentaje de magnesio que exista en la aleación de Ferro silicio magnesio (FeSiMg).

<u>Mg en la aleación</u>	<u>Rendimiento</u>
Mg puro	0
50	10 - 25
8 - 12	20 - 40

Figura 2.9. Magnesio de recuperación
(Guerra, 2012, pág. 30)

El porcentaje de magnesio en el FeSiMg es de 10% de Mg, el rango en este caso es de 8 a 12% y se escoge el mejor rendimiento que es el de 40%, esto con el fin de obtener una mejor nodulización.

El magnesio residual se lo obtiene mediante una gráfica tomando en cuenta el valor de azufre del hierro madre visto en la tabla 2.14, el valor de azufre es 0,017 aproximando se toma el valor de 0,02. (Guerra, 2012, pág. 39).

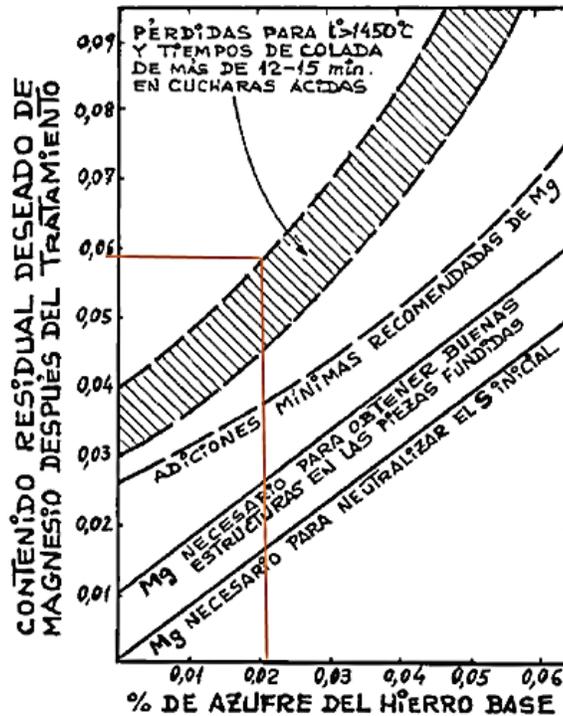


Figura 2.10. Contenidos de magnesio residual después de un tratamiento con FeSiMg para piezas de 10 a 100mm de espesor. (Guerra, 2012)

El magnesio residual aproximado que se obtiene con la gráfica es de 0,06%.

Se reemplazan todos los datos en la Ecuación 2.7

$$W_{FeSiMg} = \frac{(0.75 * 0.017) + 0.06}{40 * 10} * 10000$$

$$W_{FeSiMg} = 1.82 \text{ kg}$$

La cantidad de nodulizante por cada 100 kg de metal o materia prima que se debe añadir es 1,82kg, pero para este caso la cantidad de materia prima que se utiliza es de 1000kg lo que es 10 veces más el peso obtenido, por consiguiente, se procede a multiplicar por 10 veces el peso, y se obtiene.

$$W_{FeSiMg} = 18,2 \text{ kg}$$

Para la obtención de los porcentajes y pesos de los elemento químicos se realiza el mismo procedimiento que realizó en la sección 2.4. y 2.4.1.

Tabla 2.17. Porcentajes en peso después de la nodulización.

Descripción	Cant, (kg)	% C	kg C	% Si	kg Si	% Mn	kg Mn	% S	kg S	% Mg	kg Mg
Cold rolled	700	0,12	0,84	0,14	0,98	0,33	2,31	0,00 4	0,03	0	0
Retornos	300	3,81	11,43	2,64	7,92	0,4	1,2	0,01 4	0,04	0	0
Carga total	1000	1,23	12,27	0,89	8,9	0,35	3,51	0,00 7	0,07	0	0
Grafito 05	30	96	28,8	0	0	0	0	0	0	0	0
	1030	3,99	41,07	0,86	8,9	0,34	3,51	0,00 7	0,07	0	0
Silicio metálico	8	0	0	96	7,68	0	0	0	0	0	0
	1038	3,95	41,07	1,51	16,58	0,34	3,51	0,00 7	0,07	0	0
FeSiMg L10	18	0	0	45	8,1	0	0	0	0	10	2
	1056	3,87	41,07	2,33	24,68	0,33	3,51	0,00 7	0,07	0,2	2

(Fuente: Propia)

Como se observa los resultados en la Tabla 2.17, en algunos casos existen ganancias y en otras existen perdidas en algunos casos se debe a la temperatura de colado y a la volatilidad del elemento, es decir que se pulverizan al momento de nodulizar.

2.4.4. Inoculante IM22

El inoculante IM22 es un aditivo con altos porcentajes de silicio y manganeso, además de estos posee elementos grafitizantes como Zirconio. Calcio, Bario, también posee azufre el cual tiene un fuerte efecto inoculante. Mediante estos elementos la textura del grano es refinada.

A continuación, se procede a especificar mediante una tabla su respectiva composición química

Tabla 2.18. Composición química del IM22.

Descripción	%Si	%Ca	%Ba	%Zr	%Mn	%Al
IM22	60-67	1-1,5	1,8- 3,0	5,0-8,0	5,0-8,0	2% máx.

(ITALMAGNESIO, R. Roberto, 2004), ANEXO 2

Como se observa en la Tabla 2.18 existen varios elementos químicos dentro de la composición química del IM22, pero para este caso los elementos con relevancia serían el Si y el Mn, ya que estos intervienen mayoritariamente en el cálculo de carga por lo que se procede a escoger un inoculante IM22 con 63% en Si y 6% en Mn, estos porcentajes están dentro del rango establecido en la tabla 2.18 del respectivo fabricante.

La cantidad necesaria de inoculante que se debe añadir viene dada por tres parámetros los cuales son:

- Composición del hierro base
- Espesor de la pieza
- Velocidad de enfriamiento.

“Para minimizar la formación de carburos en piezas de espesor pequeño se efectúan adiciones más fuertes de ferrosilicio, de hasta 1,00%. En el caso de piezas gruesas, con más de 50 mm de espesor, hay riesgo de flotación de carbono grafitico, por lo que el carbono equivalente debe ser menor que 4,3, las adiciones de silicio en forma de FeSi pueden mantenerse entre 0,25 y 0,30%” (Guerra, 2012, pág. 101), para este caso son piezas de espesores mayores a 50mm por lo que se procede a calcular el carbono equivalente y comprobar.

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3}$$

Ecuación 2.8. Carbono equivalente

Los datos de Carbono, Silicio y Fosforo se observan en la Tabla 2.15.

$$CE = 3,64 + \frac{1,77 + 0,015}{3}$$

$$CE = 4,2$$

Como se aprecia el carbono equivalente es menor que 4,3 por lo que se puede añadir un porcentaje de silicio en forma de Ferro silicio entre 0,25 y 0,30%, se escoge 0,30% de silicio. El porcentaje de silicio en la aleación de Ferro silicio es de 63%, por lo tanto la cantidad de inoculante IM22 que se debe añadir es:

$$W_I = \frac{0,3}{63} * 1000 \text{ kg}$$

$$W_I = 4,76 \text{ kg} = 5 \text{ kg}$$

Se debe añadir 5kg de inoculante IM22 por 1000kg de materia prima, en base al carbono equivalente que se obtuvo.

Tabla 2.19. Porcentajes en peso de la fundición nodular final.

Descripción	Cantidad(Kg)	% C	Kg C	% Si	kg Si	% Mn	kg Mn	% S	kg S
Cold rolled	700	0,12	0,84	0,14	0,98	0,33	2,31	0,004	0,03
Retornos	300	3,81	11,43	2,64	7,92	0,4	1,2	0,014	0,04
Carga total	1000	1,227	12,27	0,89	8,9	0,35	3,51	0,007	0,02
Grafito 05	30	96	28,8	0	0	0	0	0	0
	1030	3,99	41,07	0,86	8,9	0,34	3,51	0,007	0,07
Silicio metálico	8	0	0	96	7,68	0	0	0	0
	1038	3,95	41,07	1,6	16,58	0,33	3,51	0,007	0,07
FeSiMg L10	18	0	0	45	8,1	0	0	0	0
	1056	3,87	41,07	2,33	24,68	0,33	3,51	0,006	0,07
IM22	5	0	0	63	3,15	6	0,11	0	0
CT	1062	3,86	41,07	2,62	27,83	0,34	3,62	0,006	0,07

(Fuente: Propia)

Se observa los porcentajes de carbono, silicio, manganeso y azufre se compara con los de la Tabla 2.1 según la norma ASTM A-536.

Se comprueba que todos los elementos están dentro del rango de porcentajes en peso, en el caso del carbono excede en un pequeño porcentaje al valor máximo según lo establecido, pero esto es solo en cálculos escritos, para comprobar que el cálculo está correctamente realizado, en el capítulo 5 se explica la realización de probetas de la respectiva fundición y su análisis químico con cual se llegara a la comprobación si la fundición realizada consta con los porcentajes en peso adecuados para cumplir con lo establecido en la norma ASTM A-536, y además se procederá a realizar ensayos metalográficos para comprobar su microestructura.

3. DISEÑO DE ELEMENTOS.

3.1. Cigüeñal

3.1.1. Características

Es el elemento principal de una bomba encargado de transformar el movimiento alternativo del pistón en un movimiento circular, y sus partes son:

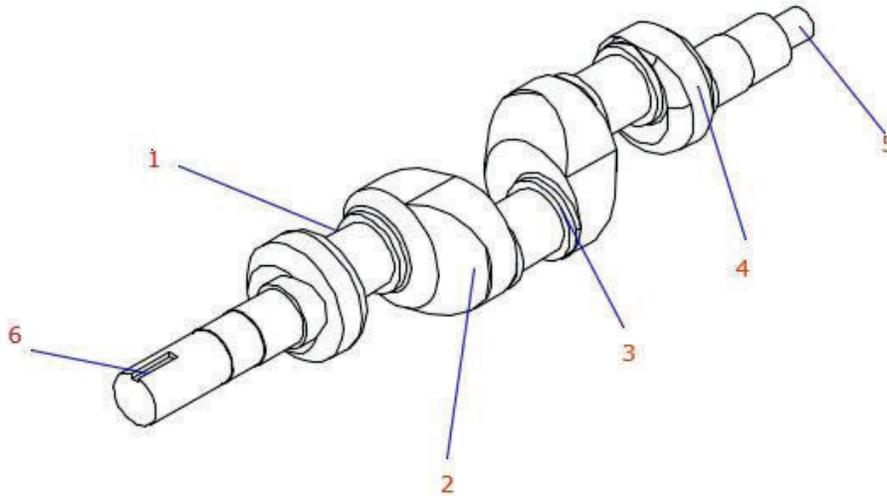


Figura 3.1. Partes de un cigüeñal
(Fuente: Propia)

Tabla 3.1. Partes del cigüeñal.

Nro.	Elemento
1	Muñón
2	Brazo del cigüeñal(Contrapeso)
3	Muñón del bancada
4	Taladros de equilibrio
5	Muñón de apoyo
6	Chavetero

(Fuente: Propia)

El cigüeñal es empleado en una bomba triple émbolo, para el cual cumple la misma gestión que para un motor de combustión interna, con la excepción de que el cigüeñal no va a estar sometido a altas revoluciones y no va a trabajar a altas temperaturas. Igualmente sucede con las cargas que va a soportar, un motor de combustión interna

trabaja con cargas altas debido al torque y la potencia que usualmente los motores de combustión interna utilizan. En la bomba triplex las cargas que va a soportar son bajas con respecto a las cargas que soporta el cigüeñal de un motor de combustión interna, y como la función de la bomba es extraer agua de pozos, la temperatura de trabajo es igualmente baja con respecto a las altas temperaturas de trabajo de un motor de combustión interna.

3.1.2. Función

Este elemento es empleado usualmente en los motores de combustión interna para generar el movimiento circular a partir del movimiento alternativo lineal de los pistones. Esto exige que en los pies de las bielas se conecten émbolos (pistones) que se mueven en el interior de guías (cilindros).

Para el caso de las bombas triplex la gestión que realiza el cigüeñal es similar, solamente que en este caso el cigüeñal adquiere el movimiento rotatorio de un torque externo, este torque externo va a ser generado por un motor eléctrico que va a estar conectado al cigüeñal, impulsando a las bielas y pistones a lo largo de las camisas

3.1.3. Diseño de dimensiones críticas

Se procede a justificar el diámetro de la sección más crítica del cigüeñal de la bomba de triple émbolo.

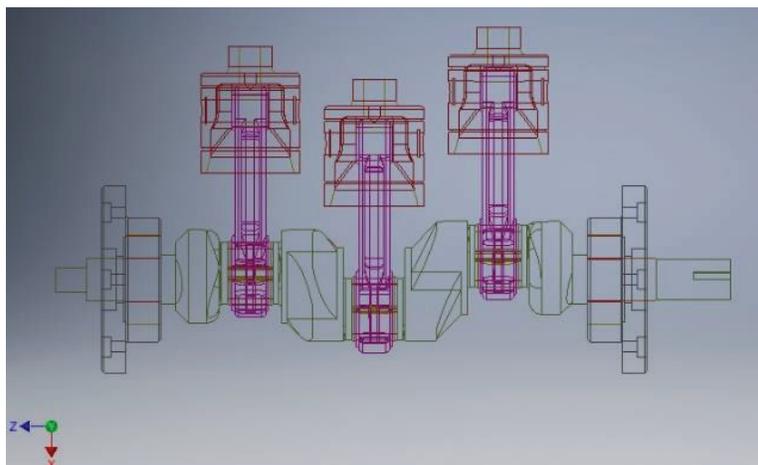


Figura 3.2. Esquema de cigüeñal bielas-pistones y tapas
(Fuente: Propia)

Como se observa la Figura 3.2 el cigüeñal está conectado con las bielas de la bomba triplex, las cuales ejercen una determinada carga sobre los muñones del cigüeñal por lo tanto se realiza el análisis de tensión y justificación de los diámetros de dichas partes

Con estas cargas aplicadas se procede a realizar un esquema del cigüeñal.

En este caso se asume apoyos en los ejes ubicados a los lados del cigüeñal como se muestra en la Figura 3.3, debido a que el cigüeñal va a estar apoyado en la carcasa de la bomba y otros soportes que ayudan al cigüeñal a posicionarse de una manera adecuada para su funcionamiento.

Se procede a realizar el analisis cuando en piston esta en su punto muerto superior, debido a que va a ser en este punto donde se genere la fuerza maxima.

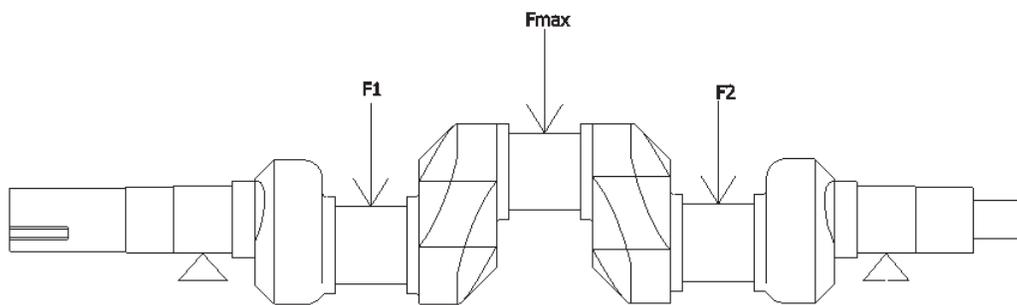


Figura 3.3. Cargas en el cigüeñal
(Fuente: Propia)

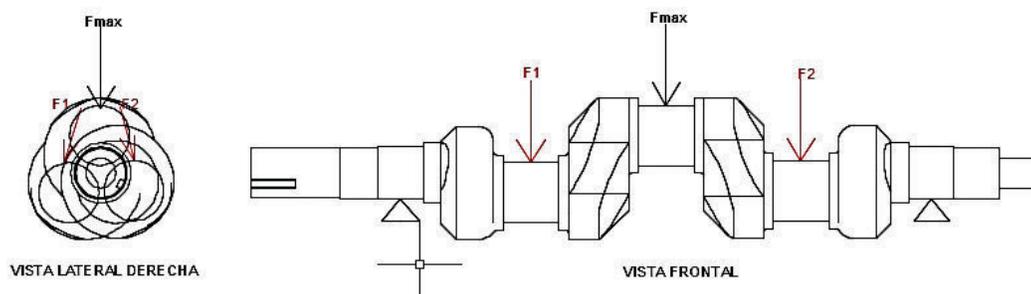


Figura 3.4. Esquema de vistas - Cargas en el cigüeñal
(Fuente Propia)

Como se ve en la figura 3.4 existen dos fuerzas que se ejercen sobre los dos muñones laterales, mientras que para el muñón del centro se genera la fuerza más crítica.

También se toma en cuenta el torque que va a producir el movimiento del cigüeñal. Para que se genere este movimiento se va aplicar un torque externo que es generado por un motor eléctrico.

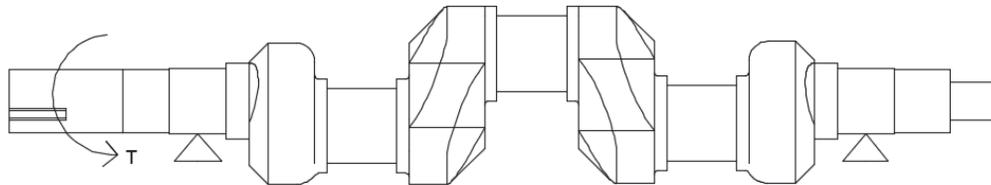


Figura 3.5. Torque generado
(Fuente: Propia)

Torque generado.

Tp: Par motor.

Todos los datos se sustituyen a continuación para realizar el cálculo respectivo y justificar los diámetros de los muñones.

3.1.4. Cálculo del par motor del motor eléctrico.

Datos del motor eléctrico:

$P = 10 \text{ hp} = 7457 \text{ W}$; Potencia del motor

$\omega = 120 \text{ rpm} = 12,57 \text{ [rad/s]}$; Velocidad angular del motor

$T_p = ?$; Par motor

Para hallar el par motor que va a desarrollar el motor eléctrico se utiliza la siguiente ecuación:

$$P = T_p * \omega$$

Ecuación 3.1. Potencia del motor eléctrico

$$T_p = \frac{P}{\omega}$$

$$T_p = \frac{7457 \text{ W}}{12,57 \text{ [rad/s]}}$$

$$T_p = 593,41 \text{ [N, m]}$$

3.1.5. Determinación de la fuerza crítica

Para la determinación de la fuerza máxima se procede a aplicar la formula básica de presión:

$$P_{max} = \frac{F_{max}}{A_p}$$

Ecuación 3.2. Presión máxima de trabajo

P_{max} : Presión máxima de trabajo

$$P_{max} = 300 \text{ psi} = 2,068 * 10^6 \text{ Pa}$$

F_{max} : Fuerza máxima que se ejerce sobre el pistón y se transmite

A_p : Área del pistón

$$A_p = \frac{\phi_p^2 * \pi}{4}$$

ϕ_p : Diámetro del pistón

$$\phi_p = 76 \text{ mm} = 0,076 \text{ m}$$

$$A_p = 4,54 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

De la ecuación 3.2 se despeja la fuerza y se obtiene.

$$F_{max} = 2,068 * 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * 4,54 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$F_{max} = 9388,73 \text{ N}$$

Fmax es la máxima fuerza que se va ejercer en el punto más crítico del cigüeñal, y que se transmite al muñón del medio.

Ahora se procede a calcular las fuerzas que se dan en los dos muñones sobrantes.

Se realizan esquemas para verificar la ubicación de los muñones, como los muñones están desfasados 120° se tiene lo siguiente.

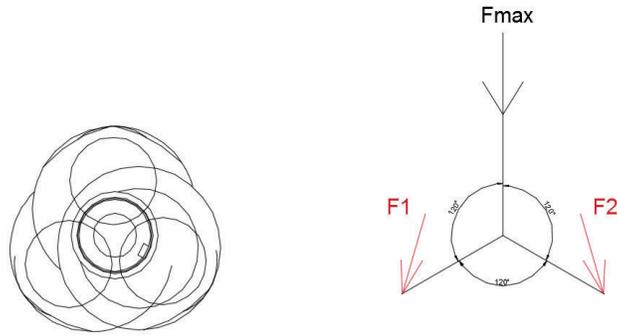


Figura 3.6. Ubicación de cargas
(Fuente: Propia)

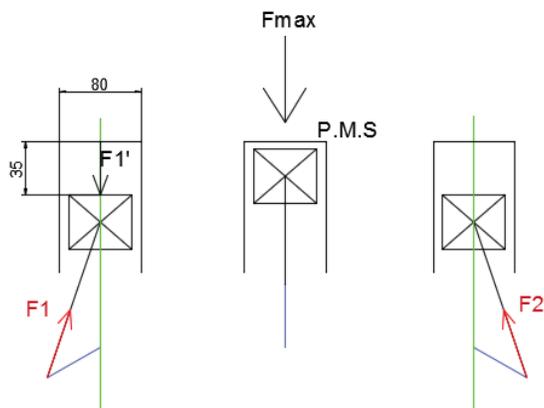


Figura 3.7. Esquema de cargas en los muñones
(Fuente: Propia)

F1' va a ser la fuerza que se genera sobre pistón cuando el pistón del medio se encuentra en el punto muerto superior, para identificar esta fuerza se procede a calcular la masa de agua que esta sobre el pistón en ese momento mediante la siguiente ecuación

$$\rho_{H2O} = \frac{m_{H2O}}{V}$$

Ecuación 3.3. Ecuación de densidad

ρ_{H2O} : Densidad del agua

m_{H2O} : Masa de agua

V : Volumen de la cámara en ese instante

$$V = A_c * h$$

A_c : Area de la base del cilindro

h : Altura

Con los datos de la Figura 3.7 se obtiene un volumen de la cámara del cilindro de $1.76 * 10^{-4} m^3$, y por consiguiente la masa de agua es:

$$m_{H_2O} = \rho_{H_2O} * V$$

$$m_{H_2O} = 1000 \frac{kg}{m^3} * 1,76 * 10^{-4} m^3$$

$$m_{H_2O} = 0,176 kg$$

Con la masa del agua se puede encontrar F_1' al multiplicar por la gravedad.

$$F_1' = m_{H_2O} * g$$

$$F_1' = 1,72 N$$

Como se observa la fuerza que se genera sobre los pistones (F_1') es muy pequeña por consiguiente la fuerza que se transmite a los muñones (F_1) va a ser igualmente pequeña, esto con respecto a la fuerza máxima que se da en el punto muerto superior que es de 9388,73 N, entonces tomando en cuenta esto se procede a despreciar estas cargas y las que generan los pesos de las piezas, enfocándose así en el muñón del medio que va a ser el punto más crítico.

3.1.6. Análisis a torsión

Una vez establecida la carga crítica y su momento torsor se realiza un análisis a torsión para verificar su factor de seguridad.

Se sabe que:

$$T_p = 593,41 [N, m]$$

Para hacer el análisis a torsión primero se procede a aplicar la teoría del esfuerzo cortante máximo que viene dado por la siguiente ecuación.

$$\tau_{max} = \frac{16 * T_p}{\pi * D^3}$$

Ecuación 3.4. Esfuerzo cortante máximo

Donde:

D: diámetro del eje

T_p : Par torsor

Para aplicar este criterio se considera que en algún momento los pistones de la bomba van a atascarse lo cual generara un esfuerzo cortante máximo producido por el par torsor en el cigüeñal.

Para el diámetro del eje se toma el valor de 33 mm, este es el diámetro de la parte del cigüeñal que va estar conectado al motor eléctrico y por consiguiente en caso de fallo de los pistones va a ser la sección donde más va a afectar el par torsor.

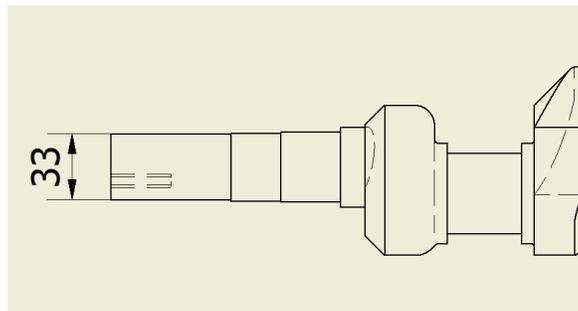


Figura 3.8. Diámetro de la sección crítica a torsión
(Fuente: Propia)

Reemplazando T_p y D en la Ecuación 3.4 se tiene:

$$\tau_{max} = \frac{16 * 593,4 \text{ Nm}}{\pi * (0,033\text{m})^3}$$

$$\tau_{max} = 84,09 * 10^7 \text{ Pa}$$

$$\tau_{max} = 84,09 \text{ Mpa}$$

Para obtener el factor de seguridad se sabe que:

$$n = \frac{\text{Limite de fluencia del material}}{\text{Esfuerzo admisible}}$$

Ecuación 3.5. Factor de seguridad

El esfuerzo admisible vendría dado por el τ_{max} , y el límite de fluencia vendría dado del tipo de material, como se aplica un torsor puro en caso de fallo, el límite de fluencia viene dado por un τ_y el cual es igual a;

$$\tau_y = 0,577 * S_y$$

Ecuación 3.6. Criterio de la energía de distorsión para torsor puro

Entonces el factor de seguridad a torsión es:

$$n = \frac{\tau_y}{\tau_{max}}$$

La aleación que se desea obtener es la fundición nodular 80-55-06, con un límite de fluencia S_y de 55000 psi Tabla 3.4 equivalente a 379,12 MPa, reemplazando esto se obtiene:

Tabla 3.2. Grados de fundiciones nodulares.

	GRADO	DESCRIPCION	USOS GENERALES
ASTM A536	60-40-18	Ferrita; puede ser recocida	Piezas resistentes al impacto, servicio a bajas temperaturas
	65-45-12	Mayoritariamente ferrítica; de colada o recocida	Servicios generales
	80-55-06	Ferrítica - Perlítica; puede ser normalizada	Servicios generales, elementos mecánicos.
	100-70-03	Mayoritariamente Perlítica puede ser normalizada	La mejor combinación de resistencia al desgaste y tenacidad buena respuesta al endurecimiento superficial
	120-90-02	Martensítica, temple al aceite y revenido	La más tenaz y resistente al desgaste

(ASTM A-536, 2010)

Tabla 3.3. Propiedades mecánicas de fundiciones nodulares según las Norma ASTM A-536.

Clase	Resistencia(psi)	Límite de fluencia(psi)	Dureza Brinell	Alargamiento
60-40-18	60000	40000	149-187	18
65-45-12	65000	45000	170-207	12
80-55-06	80000	55000	187-255	6
100-70-03	100000	70000	217-267	3
120-70-02	120000	70000	240-300	2

(ASTM A-536, 2010)

$$\tau_y = 218,75 \text{ MPa}$$

Y el factor de seguridad es:

$$n = 2,6$$

Con lo cual es suficiente para que no falle por torsión en caso atascamiento

3.1.7. Análisis a fatiga

Como se dijo al final de la sección 3.1.5, la única fuerza que se va a considerar en el punto más crítico del cigüeñal es la fuerza que se genera por la presión máxima de trabajo en este caso F_{max} .

Como las dos fuerzas son despreciables se realiza un diagrama considerando solo la fuerza máxima.

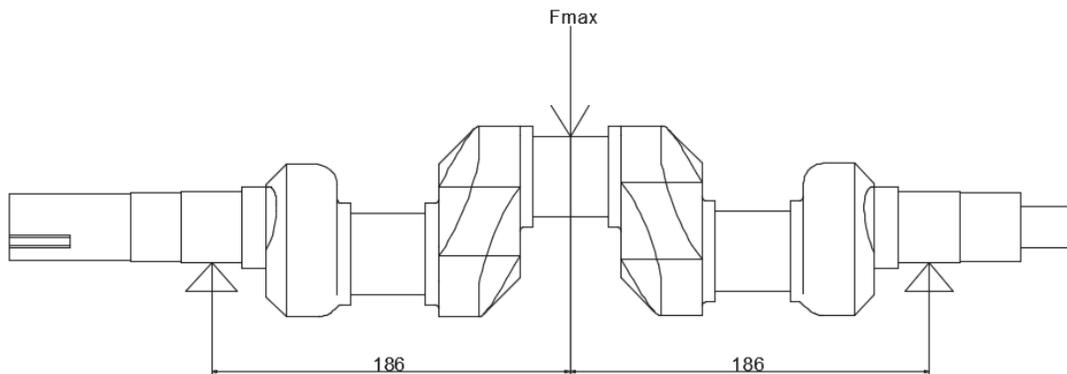


Figura 3.9. Esquema cigüeñal fuerza máxima
(Fuente: Propia)

Existen apoyos en los extremos los cuales van a tener reacciones, por lo cual se procede a realizar un diagrama de cuerpo libre.

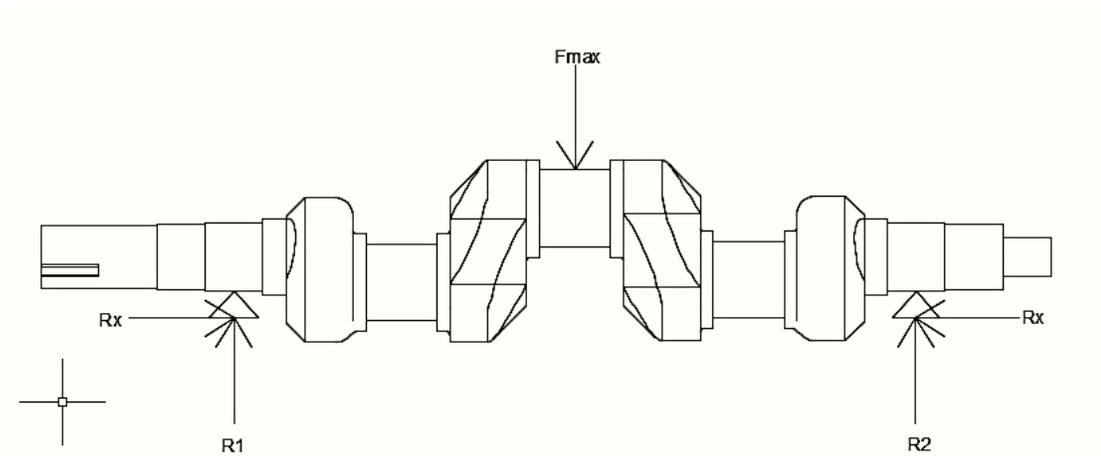


Figura 3.10. Diagrama de cuerpo libre del cigüeñal
(Fuente: Propia)

Las reacciones en x se anulan y como las reacciones son simétricas van a ser iguales por lo tanto:

$$R_1 = R_2 = \frac{F_{max}}{2}$$

$$F_{max} = 9388,73 \text{ N}$$

$$R_1 = R_2 = 4694,365 \text{ N}$$

Con esto ya podemos realizar el diagrama del vector cortante y del momento flector.

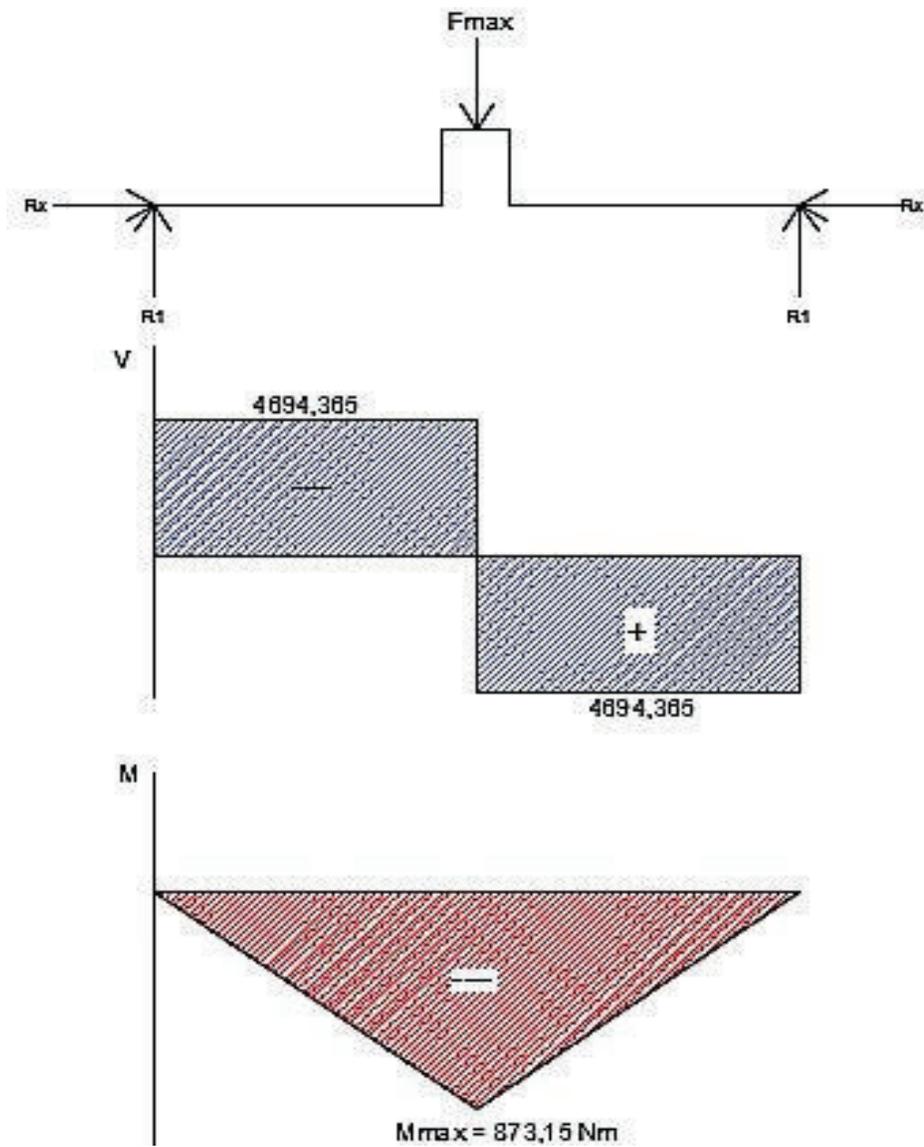


Figura 3.11. Diagrama Vector cortante – Momento flector
(Fuente: Propia)

El momento flector máximo se produce en el punto de aplicación de la carga, sin embargo los lugares más críticos a fatiga son los entalles donde se producen los cambios de sección, por lo tanto se procede a estimar los momentos flectores máximos en estos puntos, restando el área del vector cortante hasta el entalle con el momento flector máximo.

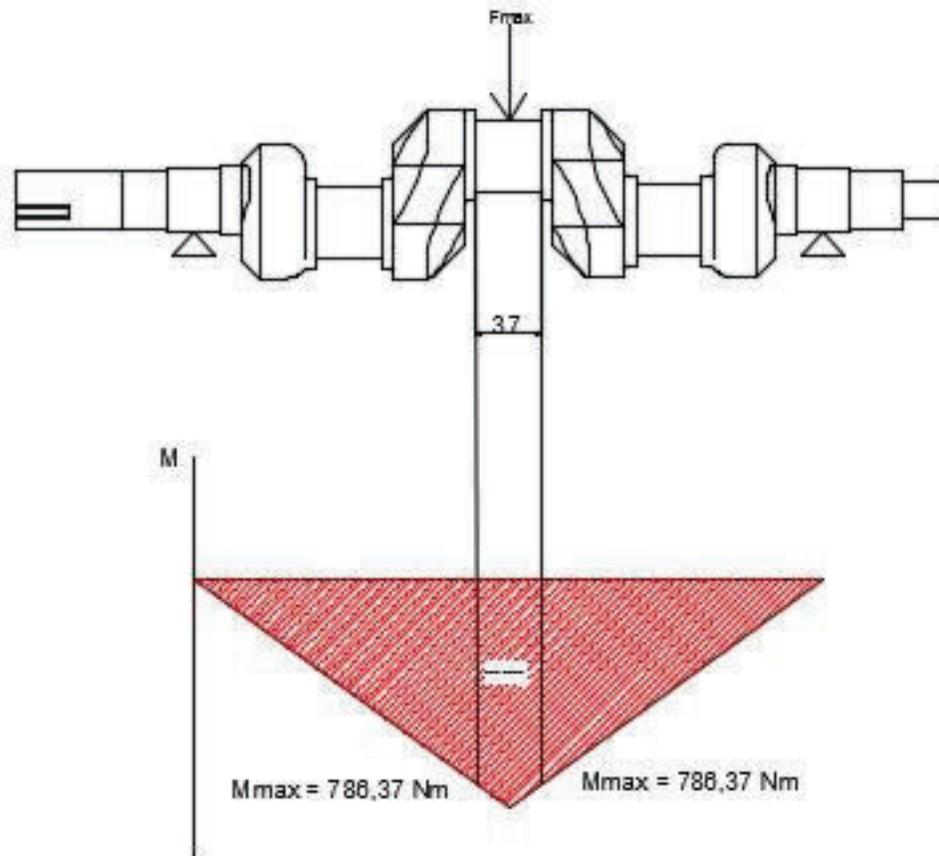


Figura 3.12. Momento máximo flector en los cambios de sección
(Fuente: Propia)

Una vez determinado el momento flector máximo en los cambios de sección, se procede a calcular el esfuerzo máximo a flexión que viene dado por la siguiente ecuación,

$$\sigma_{max} = \frac{32 * M_{max}}{\pi * \varnothing^3}$$

Ecuación 3.7. Esfuerzo máximo a flexión en ejes

Donde:

\varnothing : Diámetro del muñón

$$\varnothing = 40 \text{ mm} = 0,04 \text{ m}$$

M_{max} : Momento flector máximo

$$\sigma_{max} = \frac{32 * 786,37 \text{ Nm}}{\pi * (0,04\text{m})^3}$$

$$\sigma_{max} = 1,25 * 10^8 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{max} = 125,15 \text{ MPa}$$

Para la resistencia a fatiga se toma valores de tablas, y se utiliza la siguiente ecuación.

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S'_e$$

Ecuación 3.8. Calculo de la resistencia a fatiga

Donde:

k_a : Factor de superficie

k_b : Factor de tamaño

k_c : Factor de temperatura

k_d : Factor de temperatura

k_e : Factor de confiabilidad

k_f : Factor de varios efectos

S'_e : Limite de fatiga en una viga rotatoria

S_e : Resistencia a la fatiga de un elemento mecánico

- Factor de superficie (Nisbett, 2008, pág. 280)

$$k_a = a * S_{ut}^b$$

$$S_{ut} = 80000 \text{ psi} = 551,581 \text{ MPa}$$

Maquinado: $a = 4,51$; $b = -0,265$

$$k_a = 4,51 * 551,581^{-0,265}$$

$$k_a = 0,85$$

- Factor de tamaño (Nisbett, 2008, pág. 281)

$$k_b = 1,51 * \phi^{-0,157} ; 51 \leq \phi \leq 254$$

$$k_b = 1,51 * 40^{-0,157}$$

$$k_b = 0,85$$

- Factor de temperatura (Nisbett, 2008, pág. 282)

$$k_c = 1 : \textit{Flexion}$$

- Factor de temperatura

$$k_d = 1$$

- Factor de confiabilidad

$$k_e = 1 : \textit{Confiabilidad 50\%}$$

- Factor efectos varios

$$k_f = 1 + q * (k_t - 1)$$

q = 0,2 para hierros fundidos (Nisbett, 2008, pág. 288)

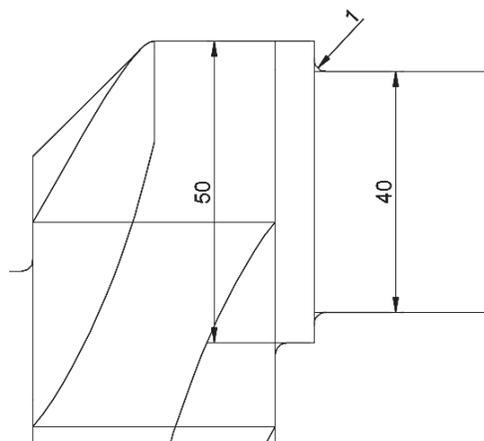


Figura 3.13. Esquema del muñón (Sección crítica del cigüeñal)
(Fuente: Propia)

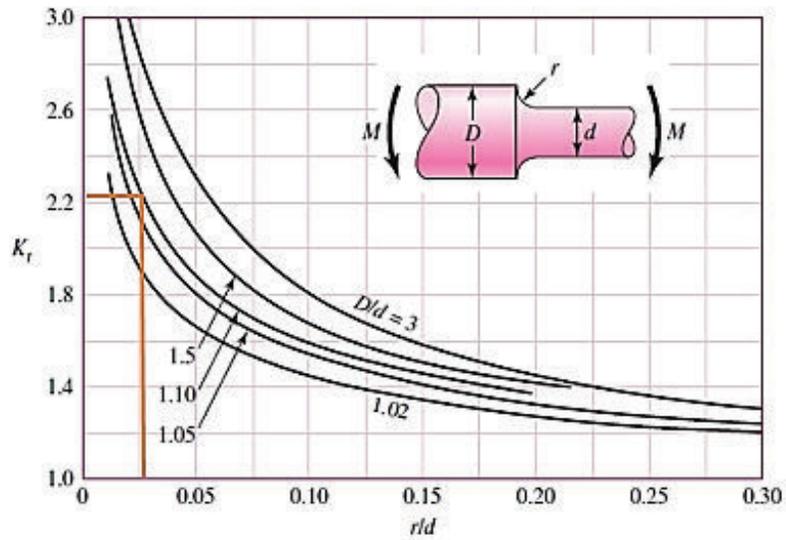


Figura 3.14. Eje redondo con filete en el hombro a flexión (Nisbett, 2008)

Se obtiene un factor de corrección aproximado de:

$$k_t = 2,23$$

$$k_f = 1 + 0,2 * (2,23 - 1)$$

$$k_f = 1,25$$

Para límite de fatiga S'_e se basa en una tabla la cual especifica el factor que se utiliza para hierros fundidos.

Tabla 3.4. Valores aproximados para esfuerzo alternos de aceros y hierros fundidos.

Material	σ_{Alt}		
Aceros	$\sigma_{Alt} = 0,5 \sigma_B$	si	$\sigma_B \leq 1400 \text{ N/mm}^2$
	$\sigma_{Alt} = 700 \text{ N/mm}^2$	si	$\sigma_B > 1400 \text{ N/mm}^2$
hierros y aceros fundidos	$\sigma_{Alt} = 0,45 \sigma_B$	si	$\sigma_B \leq 600 \text{ N/mm}^2$
	$\sigma_{Alt} = 275 \text{ N/mm}^2$	si	$\sigma_B > 600 \text{ N/mm}^2$

(Hernandez, 2010)

$$S'_e = \sigma_{alt}$$

$$S_{ut} = \sigma_B$$

La aleación a obtener es hierro nodular 80-55-06 con un esfuerzo último a la tracción S_{ut} de 80000 psi Tabla 3.3 equivalente a 551,581 MPa.

Entonces se aplica el factor para hierros fundidos.

$$S'_e = 0,45 * S_{ut}$$

$$S'_e = 0,45 * 551,581 \text{ MPa}$$

$$S'_e = 248,21 \text{ MPa}$$

Reemplazando en la ecuación 3.8 se obtiene una resistencia a la fatiga de:

$$S_e = 0,85 * 0,85 * 1 * 1 * 1 * 1,25 * 248,21 \text{ MPa}$$

$$S_e = 224,16 \text{ MPa}$$

Ahora para el límite de fluencia S'_e también se lo puede obtener mediante el diagrama de Smith para fundiciones nodulares bajo la norma DIN 1693 T1.

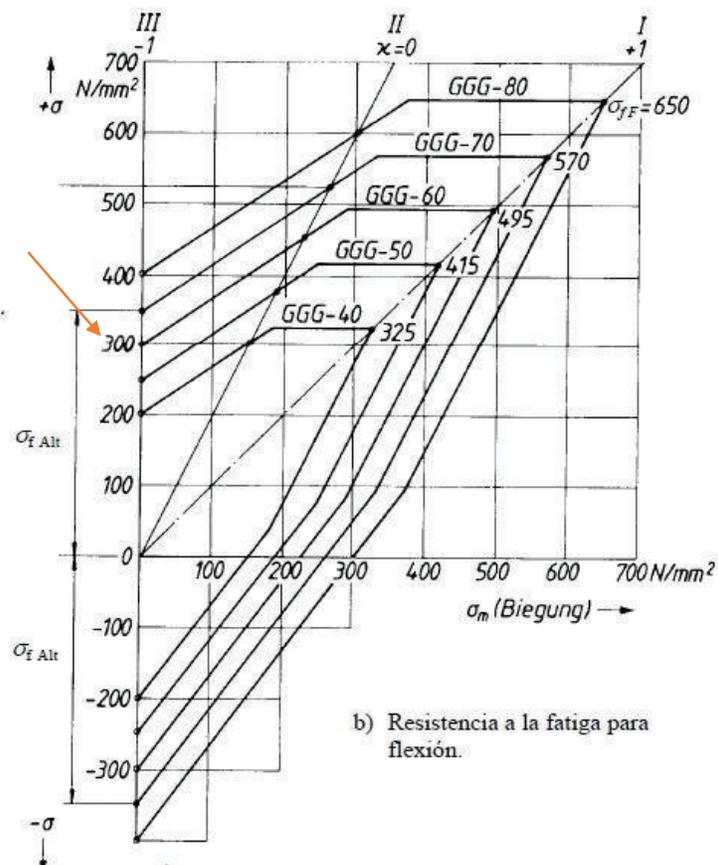


Figura 3.15. Diagrama de Smith para hierros fundidos nodulares según DIN 1693 T1 (Matek, 1994)

Puesto que el cigüeñal va a estar girando el esfuerzo máximo a flexión va a ser un esfuerzo alternante puro, por lo que $\sigma_m = 0$ (Hernandez, 2010, pág. 53), para este caso el equivalente de la fundición en norma ASTM 80-55-06 en norma DIN es la GGG-60 ANEXO 3, entonces para $\sigma_m = 0$, el esfuerzo alternante es $300 \frac{N}{mm^2}$ o 300 MPa, este esfuerzo alternante vendría a ser el S'_e como ya se explicó antes.

Directamente se reemplaza en la Ecuación 3.8

$$S_{e1} = 0,85 * 0,85 * 1 * 1 * 1 * 1,25 * 300 \text{ MPa}$$

$$S_{e1} = 271 \text{ MPa}$$

Como se observa existe una diferencia considerable entre S_e y S_{e1} , por lo que se procede a escoger el de mayor valor S_{e1} para el caso del diseño, debido a que es un valor basado en datos experimentales.

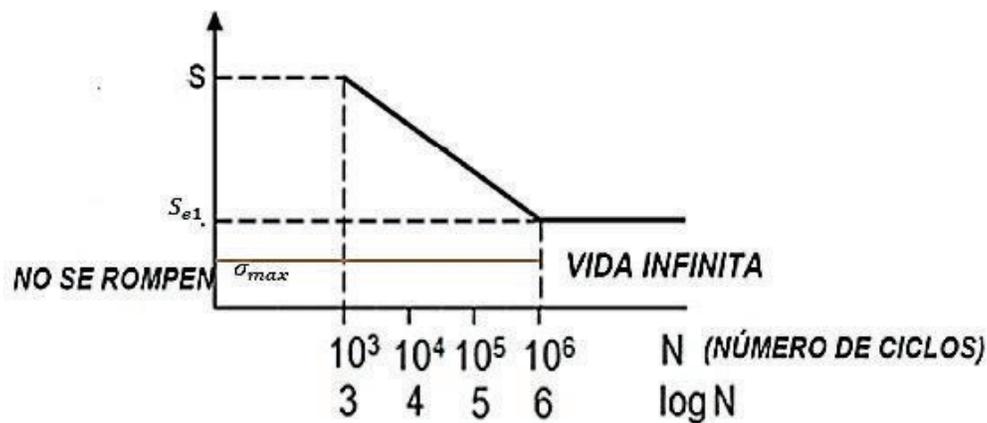


Figura 3.16. Diagrama S-N
(Fuente: Propia)

Como se sabe:

$$\sigma_{max} = 125,15 \text{ MPa} ; S_{e1} = 271 \text{ MPa}$$

Entonces como el esfuerzo máximo a flexión es menor que el límite de fluencia, el cigüeñal no va a fallar por fatiga, como se lo muestra en la figura 3.16.

3.2. Biela

3.2.1. Características

Las características de este elemento mecánico se describen a continuación:

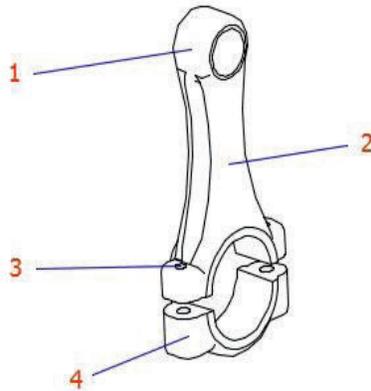


Figura 3.17. Esquema de biela
Fuente: (Propia)

Tabla 3.5. Partes de la biela

Nro	Elemento
1	Pie de biela
2	Cuerpo de biela
3	Perforaciones para pernos
4	Cabeza de biela

(Fuente: Propia)

3.2.2. Función

La biela es el elemento mecánico que transmite el movimiento desde el cigüeñal hacia el pistón en forma rectilínea, es decir transforma el movimiento rotatorio del cigüeñal en un movimiento lineal alternativo del pistón.

3.2.3. Diseño de dimensiones críticas

Para el diseño de las dimensiones se realiza un análisis estático y un análisis a fatiga, a los cuales va a estar expuesta la biela tanto en reposo como en movimiento.

Para garantizar el buen desempeño de la biela durante su funcionamiento se calcula los factores de seguridad en cada uno de los casos dichos previamente, estáticos, y en fatiga.

Como se sabe el material que se va a utilizar va a ser fundición nodular, este es un material dúctil, por lo que su esfuerzo de fluencia a tensión será igual al de compresión.

Como primer paso se calcula la fuerza máxima que caerá sobre el pistón, esto lo podemos determinar con la presión máxima de trabajo que es 300psi, dato proporcionado por el operador y además la presión debida a la altura de bombeo.

3.2.4. Diseño estático

Diagrama de cuerpo libre

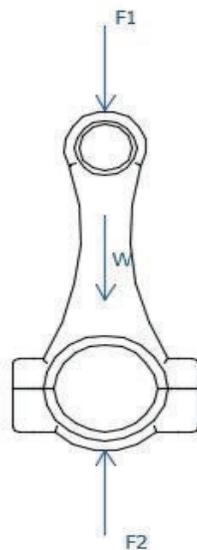


Figura 3.18. DCL
(Fuente: Propia)

F1 va a ser la máxima fuerza que se va a ejercer sobre el pistón por la presión,

$$F_1 = F_2 = 9388,73 \text{ N}$$

Se desprecia el peso de la biela.

Con estos valores se procede a realizar un análisis en tensión mediante la simulación en Inventor, este análisis nos servirá para verificar la sección crítica que tendrá el

elemento y según esto determinar el factor de seguridad para dicha sección, con esto se garantizara su estabilidad y funcionamiento.

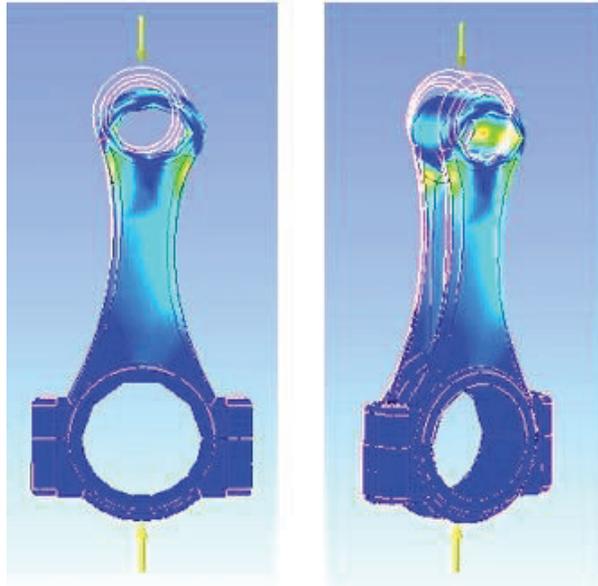


Figura 3.19. Simulación en inventor (Máxima tensión en la biela)
(Fuente: Propia)

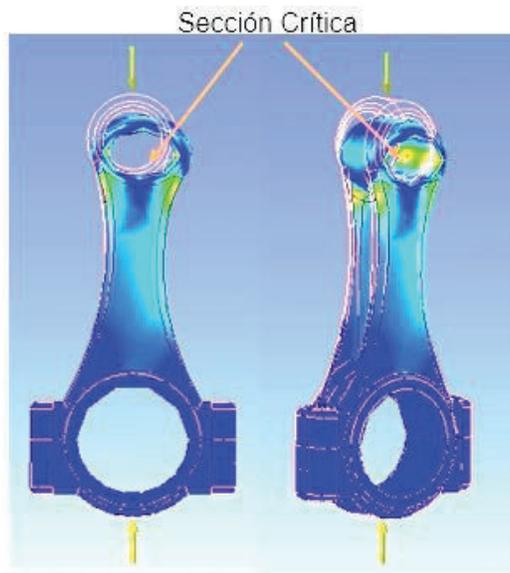


Figura 3.20. Sección crítica en la biela
(Fuente: Propia)

Como se observa la sección más crítica se encuentra entre la cabeza de la biela y el cuerpo.

Ahora bien para obtener el área de esta sección se estima su ubicación tomando en cuenta la diferencia de colores en la simulación de la figura 3.23, y se verifica de la siguiente manera.

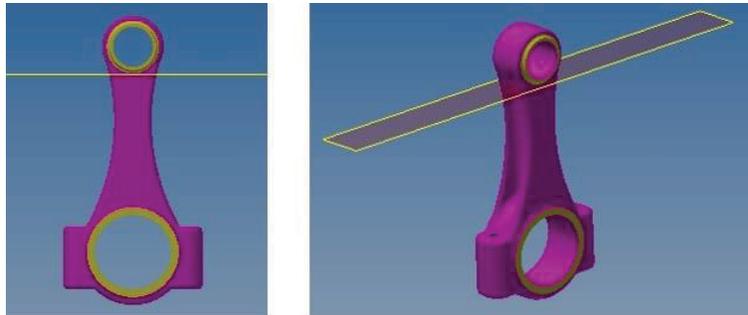


Figura 3.21. Plano de sección
(Fuente: Propia)

Con este plano se secciona al elemento, y se verifica el área de la sección en la figura 3.26.

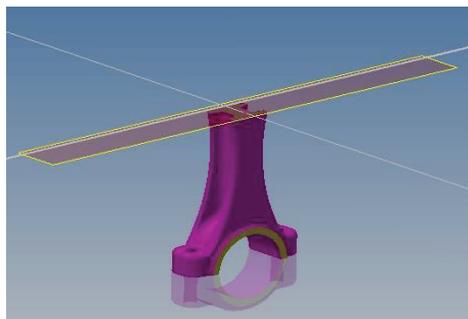


Figura 3.22. Sección de biela
(Fuente: Propia)

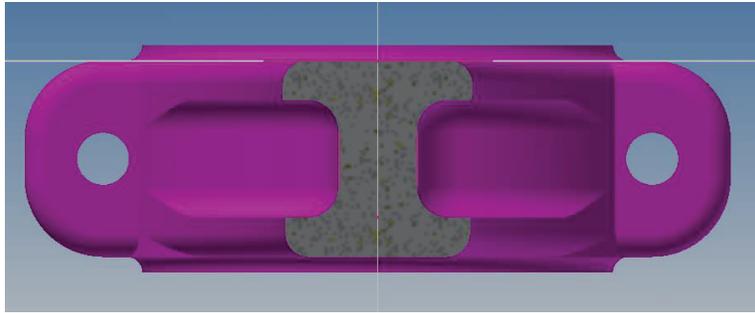


Figura 3.23. Sección crítica
(Fuente: Propia)

Con la sección crítica que se visualiza en la figura 3.23 se procede a calcular el área de la misma.

Por el cálculo se analiza la menor sección, ya que va a ser en esta donde afecte en su mayoría la fuerza máxima, si con esta sección es suficientemente segura con el resto de área que posee la biela su seguridad aumentara.

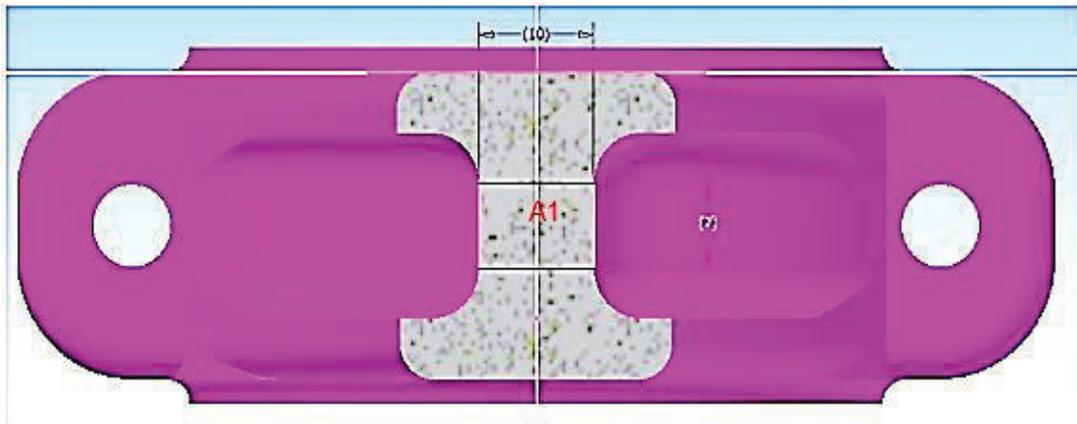


Figura 3.24. Sección crítica acotada
(Fuente: Propia)

$$A_1 = (10 * 7) \text{ mm}^2$$

$$A_1 = 70 \text{ mm}^2$$

$$A_1 = 7 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

La aleación va a ser la misma que para el cigüeñal, la 80-55-06.

Límite de fluencia de la 80-55-06 se lo visualiza en la Tabla 3.3.

$$S_y = 55000 \text{ Psi} = 379 \text{ MPa}$$

Ahora el esfuerzo normal que se da sobre la sección crítica es:

$$\sigma_a = \frac{F_1}{A_s}$$

Ecuación 3.9. Esfuerzo normal sobre la sección crítica

$$\sigma_a = \frac{9388,73 \text{ N}}{7 * 10^{-5} \text{ m}^2}$$

$$\sigma_a = 1,341 * 10^8 \text{ Pa} = 134,12 \text{ MPa}$$

3.2.5. Factor de seguridad estático

Con estos valores podemos hallar el factor de seguridad para el análisis estático.

$$F_s = \frac{S_y}{\sigma_a}$$

Ecuación 3.10. Factor de seguridad estático

$$F_s = 2,83$$

El factor de seguridad es conservador por lo que es lo suficientemente seguro el diseño a compresión.

3.2.6. Diseño a fatiga

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot S'_e$$

Ecuación 3.11. Resistencia a la fatiga de la biela

Ka: factor de superficie:

$$k_a = 0,85$$

Se toma el mismo valor del cigüeñal para la biela.

Kb: Factor de tamaño:

$$k_b = 1$$

Debido a que el elemento posee cargas axiales se toma el valor de 1 (Nisbett, 2008, pág. 280).

Kc: Factor de temperatura:

$$k_c = 0,85$$

Para cargas axiales el valor de kc es 0.85 (Nisbett, 2008, pág. 282).

Kd: Factor de temperatura (Nisbett, 2008, pág. 283).

$$k_d = 1$$

Ke: Factor de confiabilidad:

$$k_e = 1$$

Confiabilidad de 50%.

S'n: Resistencia mínima a tensión de la fundición nodular:

$$S'_e = 0,45 * S_{ut}$$

Ecuación 3.12. Límite de fatiga del material (Hierros fundidos)

$$S_{ut} = 80000 \text{ psi} = 551,581 \text{ MPa}$$

$$S'_e = 248,21 \text{ MPa}$$

Se reemplaza todos los valores en la ecuación 3.11.

$$S_e = 0,85 * 1 * 0,85 * 1 * 1 * 248,21 \text{ MPa}$$

$$S_e = 179,33 \text{ MPa}$$

3.2.7. Factor de seguridad a fatiga

nf: Factor de seguridad a fatiga:

$$n_f = \frac{1}{2} * \left(\frac{S_{ut}}{\sigma_m}\right)^2 * \frac{\sigma_a}{S_e} * \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 * \sigma_m * S_e}{S_{ut} * \sigma_a}\right)^2}\right]$$

Ecuación 3.13. Factor de seguridad a fatiga – Gerber

$$\sigma_a = \frac{F_1}{A_s} = \sigma_m = 134,12 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = 134,12 \text{ MPa}$$

$$n_f = \frac{1}{2} * \left(\frac{551,58}{134,12}\right)^2 * \frac{134,12}{179,33} * \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 * 179,33}{551,58}\right)^2}\right]$$

$$n_f = 1,26$$

Como se puede apreciar el factor de seguridad es un poco bajo , pero esto se debe a la sección que se tomó para analizar , si se toma la sección analizada más la sección que contiene los radios de chafán el factor de seguridad va a aumentar por lo que no habría problema con este valor. Aun así es seguro y no va a fallar por fatiga.

4. ESTUDIO DE LOS ELEMENTOS NECESARIOS PARA EL PROCESO DE FUNDICIÓN.

4.1. Selección del horno y mezcla de moldeo a utilizar

La producción de la fundición gris se obtiene principalmente en hornos de inducción y cubilotes. Sin embargo se opta por utilizar el horno de inducción debido a la existencia y disponibilidad del mismo en la industria. Se hace una breve revisión de los hornos eléctricos.

4.1.1. Horno de arco eléctrico

Los hornos eléctricos son muy utilizados para la obtención del hierro colado, que es destinado para moldaduras importantes, de pared fina y configuraciones complejas; este tipo de horno se utiliza cuando se realiza procesos de inoculación.

Ventajas del horno eléctrico

- Bajo quemado de los elementos.
- Se obtiene una composición más exacta, con menor cantidad de impurezas nocivas.
- Un alto calentamiento.
- Mejores condiciones sanitarias higiénicas de fusión.
- Mayor facilidad de mecanizado y automatización.
- Regulación del proceso de fundición.

Descripción del horno de eléctrico

Estos hornos funcionan con corriente alterna de 125000 A, tensión de servicio es de 105 – 130 v, su capacidad varia de 1000 – 5000 kg, los hornos de inducción trabajan con revestimiento básico y acido. Tienen más aceptación los hornos con revestimiento acido, los mismos que tienen mayor estabilidad, menor coste y menor gasto específico de energía eléctrica.

Los hornos con revestimiento acido se utilizan para fundir hierros colados de aleación con alto contenido de aluminio, magnesio y cromo como también con un pequeño contenido de azufre.

4.1.2. Hornos de inducción

Son utilizados para la fusión del hierro con carga fría, para el calentamiento de la fundición y la mejora de su composición química requerida. El calor que generan dependerá de la resistencia eléctrica de la carga de los materiales. Lo que quiere decir cuánto más pequeñas sean los pedazos que se carguen de chatarra será mayor la frecuencia de la corriente que suministra al inductor, para la rápida fusión de la carga o la intensidad de la corriente. Mientras más grande es la frecuencia de la corriente en el horno es más rápida la fusión con carga fría.

Estos hornos pueden ser de alta y baja frecuencia.

Los de baja frecuencia la masa a fundir hace de arrollamiento secundario en un transformador. El crisol tiene la forma de uno o varios anillos alrededor del núcleo lo que garantiza una transformación completa de la energía tomada de la red. Estos hornos dan un buen rendimiento cuando trabajan en forma continua. (Cuñez David, 2012)

El horno de alta frecuencia está formado por un crisol refractario que contiene el metal, rodeado de un espiral de tubo de cobre, por el que circula una corriente de alta frecuencia el cual crea un campo magnético variable, provocando que la chatarra contenida en el crisol se vaya calentando hasta alcanzar su estado líquido. El tubo de cobre requiere refrigeración por lo tanto se lo refrigera haciendo circular agua por su interior. (Cuñez David, 2012)

4.2. Estudio de la arena

El tipo de arena dentro del proceso de fundición es una parte importante para obtener moldes, machos de calidad y buenas moldaduras, esta arena debe tener propiedades tecnológicas que garanticen una buena plasticidad, penetrabilidad y resistencia.

La arena para el proceso de moldeo generalmente está compuesta por sílice (base refractaria) y aglutinante, dentro de la arena se encuentran impurezas como óxidos y tierra. El tamaño de grano que tendrá la arena es la parte más representativa de la misma, y de esto depende la distinción del tipo de arena.

4.2.1. Propiedades de la arena

Las propiedades que se considera son:

- Plasticidad
- Resistencia
- Penetrabilidad

La plasticidad es la capacidad que tiene la arena para deformarse, bajo la acción de alguna fuerza exterior que se le aplica, esto ayuda que la arena copie perfectamente la forma del modelo.

La resistencia es importante debido a que al transportarla de un lugar a otro o al momento de vaciado de la colada esta no debe destruirse, esta resistencia dependerá de la granulosis de la arena, la humedad, la densidad dependiendo del contenido de arcilla o de aglutinantes que se use en el proceso.

Durante el proceso de colado y el enfriamiento de la moldadura, las paredes del molde alcanzan altas temperaturas, por lo tanto estas arenas deben tener un alto poder refractario, es una de las principales características que debe tener, los gases y vapores que se forman tienden a salir por lo que la arena tiene que garantizar suficiente penetrabilidad, esto depende de la calidad y cantidad de los componentes arcillosos, cuando la arena es más gruesa mayor es la penetrabilidad.

La penetrabilidad depende del tamaño de grano de la arena, la humedad, la existencia de polvo, carbón y el grado de compactación. Sin embargo cuando no existe penetrabilidad suficiente en el momento de colado los gases tienden a salirse por el sistema de alimentación provocando que se produzca porosidad en la pieza. (Titov, 1981).

Tamaño de grano

Este es uno de los parámetros más importantes ya que las características de la mezcla de moldeo y de la pieza moldeada están influenciada por el tamaño de grano, para lo cual se detalla los distintos tamaños de grano:

Tabla 4.1. Clasificación del tamaño de grano.

Arena	Índice AFS (i)	Tamaños de granos mm
Muy gruesa	18	1 a 2
Gruesa	18 a 35	0,5 a 1
Media	35 a 60	0,25 a 0,5
Fina	60 a 150	0,10 a 0,25
Muy Fina	150	0,05 a 0,10

(Cuñez David, 2012)

De los estudios que se ha realizado, se muestran resultados del tamaño de arena a utilizar dependiendo de la aleación a utilizarse, esto se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4.2. Propiedades de la arena en dependiendo del metal a fundir.

Material	Arcilla (%)	Índice AFS	Tamaño de grano (mm)	Arena
Aluminio	12 a 18	160 a 125	0,005 a 0,10	Muy fina
Bronce	12 a 14	140 a 150	0,10 a 0,25	Fina
Hierro gris medio	4 a 10	55 a 75	0,25 a 0,5	Media
Hierro gris resistente	8 a 13	50 a 61	0,25 a 0,5	Media
Hierro maleable	8 a 13	70 a 85	0,10 a 0,25	Fina
Acero ligero	4 a 10	45 a 55	0,25 a 0,5	Media
Acero resistente	4 a 10	38 a 62	0,25 a 0,5	Media

(Cuñez David, 2012)

Se utilizó los siguientes materiales para obtener la correcta mezcla de moldeo.

Materia	Arcilla (%)	Índice AFS	Tamaño de grano (mm)	Arena
Hierro gris medio	4 a 10	55 a 75	0,25 a 0,5	Media

Arena sílice

- Resina furánica (aglomerante) en 1 % dependiendo del peso de las cajas de moldeo.
- Catalizador. 0,5 % dependiendo del peso de las cajas de moldeo.

4.3. Cálculo y construcción de modelos, noyos y cajas de moldeo

4.3.1. Ejecución del Modelo

El modelo es un factor de mucha importancia dentro del proceso de fabricación que transmite sus caracteres al producto final por lo que debe tener propiedades determinadas. (Capello, 1980)

Propiedades de los modelos

- Contracción
- Funcionalidad o congruencia

La contracción del metal se produce cuando empieza a enfriarse lo cual reduce las dimensiones de las piezas coladas según sea el grado de contracción de la aleación. Para evitarse largos cálculos, se emplea reglas especialmente graduadas, que se las representan en la siguiente tabla. (Capello, 1980)

Tabla 4.3. Factores de contracción.

Aleación	Dimensiones del modelo(mm)	Piezas con machos (mm)	Contracción (mm/m)
	piezas macizas		
Fundición gris	Hasta 600	Hasta 600	10
	De 630 a 1200	De 630 a 920	8,5
	Más de 1200	Más de 920	7
Fundición gris de alta resistencia	Hasta 600	Hasta 600	13
	De 630 a 1200	De 630 a 920	10,5
	Más de 1200	Más de 920	8,5
Fundición blanca en arena			15 a 16
Fundición blanca en coquilla			18
Fundición maleable			
Espesor alrededor de:			
3 mm			13
10 mm			10
20 mm			7

(Capello, 1980)

Los modelos deben construirse de tal manera que la pieza que se obtiene se acople al mecanizado y al uso para la que es construida. Durante el proceso de colado la pieza se verá afectada por algunos parámetros que se debe tener en cuenta, los cuales se detallan a continuación:

- La velocidad de entrada del metal al molde no es constante
- A mayor velocidad del metal mayor erosión del molde
- A mayor velocidad de entrada del metal menor posibilidad de que el metal solidifique sin haberse llenado el molde por completo

Planos de fabricación de los modelos

Se los visualiza en el ANEXO 4.

Enfriamiento del metal en el molde

El ingreso del metal se hace lo más rápido posible, garantizando que gran parte del proceso de solidificación se realice con el metal inanimado dentro del molde.

El enfriamiento, y por tanto, la solidificación del metal siempre será de abajo hacia arriba dependiendo del lugar del alimentador de colada, empezando en las paredes del molde por encontrarse a menor temperatura. Al aumentar el proceso de transferencia de calor, la solidificación también se acelera.

Las funciones del sistema de alimentación son las siguientes:

- Conducir el metal líquido a la cavidad del molde en forma suave y regulada
- Separar la escoria del metal y evitar la presencia de gases en la pieza
- Garantizar una buena solidificación. (Goyos, 1985)

Las mazarotas y los respiraderos de alimentación

La sección del respiradero en la base, se adopta habitualmente de $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{4}$ de la sección de la pared de la moldadura. Más arriba de la base la sección del respiradero se hace más grande.

Las mazarotas se las ubica de tal modo que la masa fundida en ellas se solidifique al final. Para este propósito el espesor de la mazarota tiene que ser mayor que el espesor del lugar de moldadura, sobre la que se dispone.

Al diseñar mazarotas se guían por las reglas siguientes:

- La mazarota debe solidificarse al final que el molde lleno de colada.
- Las dimensiones de la mazarota deben ser suficientes para compensar la contracción de las moldaduras.
- "La altura de la mazarota debe ser tal, que toda la oquedad de contracción se disponga en ella sobre la garganta, en el lugar de unión con la moldadura. La garganta debe ser lo más corta posible y al igual que la mazarota, debe solidificarse al final". (Titov, 1981)

Procedimiento para suministrar la masa fundida al molde y estructura de los bebederos

Cuando se fabrica piezas de fundición nodular, la mejor manera de realizar el colado es enviar a la parte más delgada de la pieza, para tener una velocidad de solidificación adecuada de las distintas partes de la pieza. Las partes delgadas reciben la colada más caliente, manteniendo siempre las paredes calientes y la parte más gruesa de la moldadura que se llena con metal fundido un tanto menos caliente; igualando así la velocidad de solidificación, lo que contribuye a la obtención de una moldadura de mejor calidad, la reducción de las tensiones internas y deformaciones en las mismas. (Titov, 1981)

La estructura que tendrán los bebederos pueden ser de distintas formas pero para el estudio se eligió, el sistema de suministro por el plano de separación; es el más adecuado, el más sencillo y tendrá las siguientes partes: (Titov, 1981)

- Embudo de colado
- Canal vertical
- Escoriador
- Alimentador
- Respiraderos
- Mazarotas
- Moldadura

4.4. Métodos de cálculo de los sistemas de bebederos para moldaduras de fundición nodular

4.4.1. Cálculo de los sistemas de alimentación para el cigüeñal

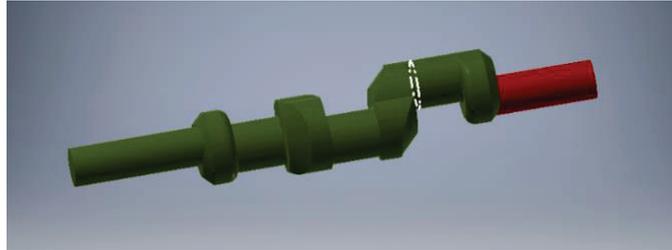


Figura 4.1. Esquema 3D cigüeñal
(Fuente: Propia)

Cálculo de la mazarota

Para el cálculo de las mazarotas se utiliza en el método de Caine. (Rao, 2013)

General Properties	
Mass	9.790 kg (Relative)
Area	114923.826 mm ²
Volume	1369293.197 mm ³
Center of Gravity	
X	-178.962 mm (Relative)
Y	10.180 mm (Relative)
Z	-0.119 mm (Relative)

Figura 4.2. Área y Volumen del cigüeñal
(Fuente: Propia)

Con ayuda del programa inventor se obtiene las propiedades iniciales del cigüeñal, que facilitan el cálculo de la mazarota

Para el cálculo del diámetro de la mazarota se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$X = \frac{SA_{fundicion}/V_{fundicion}}{SA_{mazarota}/V_{mazarota}}$$

Ecuación 4.1. Coordenada X en función del diámetro de la mazarota

Dónde:

$V_{fundicion}$: Volumen de la fundición: 1369293,197 [mm³]

$SA_{fundicion}$: Área superficial de la fundición: 114923,826 [mm²]

$V_{mazarota}$: Volumen de la mazarota: $\pi D^3/4$

$SA_{mazarota}$: Área superficial de la mazarota: $\pi D^2 + \pi D^2/4 = 1.25\pi D^2$

$$X = \frac{114923,826/1369293,197}{1,25\pi D^2/\pi D^3/4}$$

$$X = 0,0262 * D$$

$$Y = \frac{\text{Volumen de la mazarota}}{\text{Volumen de la fundición}}$$

Ecuación 4.2. Coordenada Y de la mazarota

$$Y = \frac{\pi D^3/4}{1369293,197}$$

$$Y = 5,73 * 10^{-7} D^3$$

$$X = \frac{A}{Y - B} + C$$

Ecuación 4.3. Calculo del diámetro de la mazarota

Tabla 4.4. Constantes para la ecuación de Caine.

Material	A	B	C
Acero	0,1	0,03	1
Aluminio	0,1	0,06	1,08
Hierro Fundido, latón	0,04	0,017	1
Fundición de hierro gris	0,33	0,03	1
Bronce al aluminio	0,24	0,017	1
Bronce de silicio	0,24	0,017	1

(Rao, 2013)

$$0.0262 * D = \frac{0,33}{6,13 * 10^{-7} D^3 - 0,030} + 1$$

$$D_{mazarota} = 82,07 \text{ mm}$$

Una vez que se calcula el diámetro de la mazarota se procede con el cálculo de la longitud de separación que tendrá esta con el cigüeñal, para lo cual utilizamos como guía la Figura 4.3.

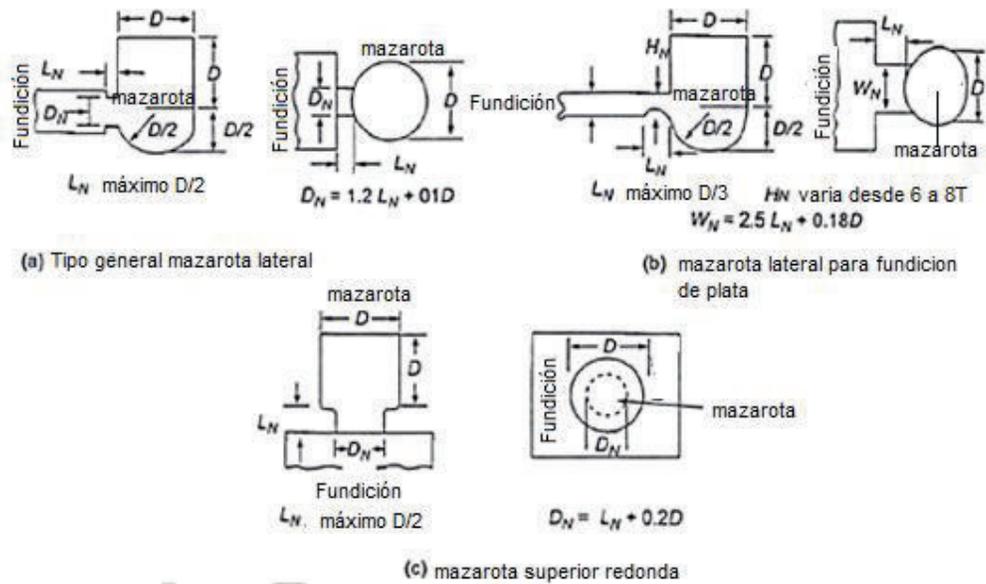


Figura 4.3. Dimensionamiento de mazarotas (Rao, 2013)

$$L_N = 15 [mm]$$

$$D_N = 1,2L_N + 0,1D$$

Ecuación 4.4. Diámetro del canal separador

Donde:

D_N : Diámetro del canal separador

D : Diámetro de la mazarota

L_N : Longitud de separación con la pieza

$$D_N = 1,2(15) + 0,1(82,07)$$

$$D_N = 26,20 [mm]$$

La recomendación en el cigüeñal es tener dos mazarotas en los contrapesos de mayor masa. Se consideró que la masa del sistema de alimentación debe ser menor que la

del cigüeñal, por lo que se opta usar una mazarota en un contrapeso y una mazarota en el otro que al mismo tiempo funcionara como respiradero, esta mazarota (respiradero) es la mitad del diámetro de la mazarota calculada anteriormente, con lo que se representa un esquema de la ubicación de las mismas en el cigüeñal.

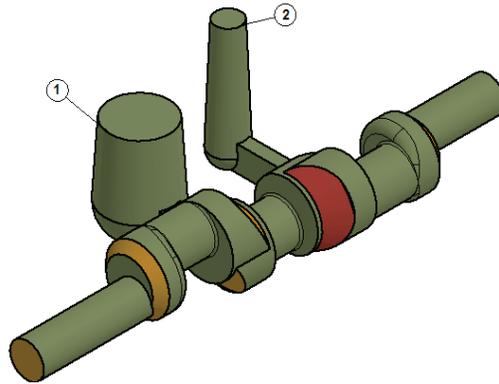


Figura 4.4. Cigüeñal con mazarotaje
(Fuente: Propia)

Tabla 4.5. Elementos del sistema de alimentación.

Número	Elemento
1	Mazarota
2	Mazarota(Respiradero)

(Fuente: Propia)

Cálculo del canal de alimentación

La superficie del alimentador se halla con la siguiente ecuación:

$$F_{\text{alim}} = \frac{x\sqrt{G}}{\sqrt{H_{\text{cal}}}}$$

Ecuación 4.5. Superficie del alimentador

Dónde:

G: Masa de la moldadura

Hcal: Altura estática

Los valores de x dependerán del espesor de la pared de la moldadura y se obtiene de la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Valores de x para diferentes valores de espesor de pared de la moldura.

Espesor, mm	2,5 – 3,5	3,5 – 8	8 – 15
x	5,8	4,9	4,3

(Titov, 1981)

Primeramente, se realiza el cálculo de la altura estática, para lo cual se escoge la opción C) mostrada en la Figura 4.11.

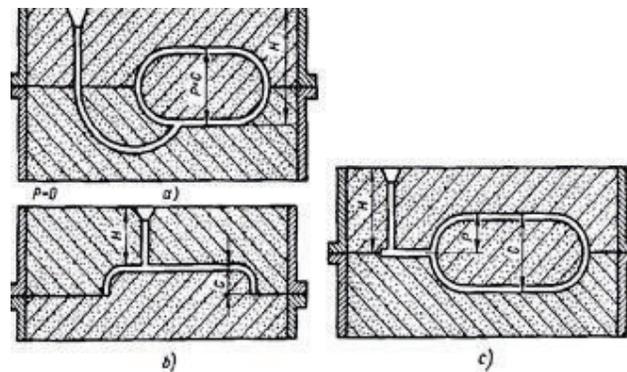


Figura 4.5. Dimensionamiento de la altura estática (Titov, 1981)

La altura estática se calcula con la siguiente ecuación:

$$H_{cal} = H - P^2/2C$$

Ecuación 4.6. Altura estática de la fundición

Dónde:

H: Altura del canal vertical desde el lugar de suministro de la masa fundida al molde [cm]

C: Altura de la moldura [cm].

P: Altura de la moldura del lugar de suministro de la masa fundida al molde [cm].

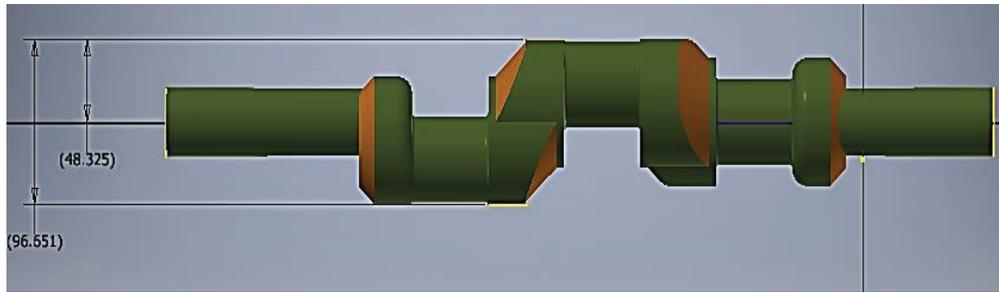


Figura 4.6. Valores de P y C del cigüeñal en mm
(Fuente Propia)

El valor de H dependerá del diseñador del sistema de alimentación, se considera para este caso el siguiente valor:

$$H = 130 \text{ cm}$$

$$H_{cal} = 130 - 48,325^2/2(96,65)$$

$$H_{cal} = 118 \text{ mm}$$

Calculo del área del alimentador, Ecuación 4.5.

$$F_{alim} = \frac{x\sqrt{G}}{\sqrt{H_{cal}}}$$

$$F_{alim} = \frac{4,3\sqrt{15,77}}{\sqrt{11,8}}$$

$$F_{alim} = 4,95 \text{ cm}^2$$

$$F_{alim} = 5 \text{ cm}^2$$

Una vez que se tiene el cálculo de la superficie del alimentador se calcula las demás superficies, tanto del escoriador como del canal vertical, para esto se tiene las siguientes proporciones:

De paredes medianas y pequeñas (Titov, 1981, pág. 158)

$$F_{alim} : F_{esc} : F_{c,v} = 1:1,1:1,15;$$

$$F_{esc} = 1,1 * F_{alim}$$

Ecuación 4.7. Superficie del canal escoriador

$$F_{esc} = 1,1 * 5$$

$$F_{esc} = 5,5 [cm^2]$$

$$F_{c,v} = 1,5 * F_{alim}$$

Ecuación 4.8. Superficie del canal vertical

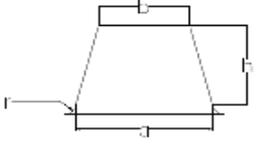
$$F_{c,v} = 1,5 * 5$$

$$F_{c,v} = 7,5 \approx 8 [cm^2]$$

Una vez calculado cada una de las superficies del sistema de alimentación se relaciona estas con canales de forma trapezoidal. Aunque para nuestro estudio se realizó canales cuadrangulares y rectangulares por la facilidad de construcción de la placa modelo.

En la siguiente tabla se muestra la relación de las superficies con los canales trapezoidales.

Tabla 4.7. Canales de alimentación de forma trapezoidal.

Área de la sección [cm ²]				
	Cuando h=0,5a			
	a	b	h	r
1,0	15,0	12,0	7,5	5
1,5	18,0	15,5	9,0	5
2,0	22,0	18,0	11,0	5
2,5	24,0	20,0	12,0	5
3,0	26,0	22,0	13,0	5
3,5	28,0	23,0	14,0	5
4,0	30,0	24,0	15,0	5
4,5	31,0	28,0	15,5	5
5,0	33,0	28,0	16,5	5
5,5	35,0	29,0	17,5	5
6,0	36,0	31,0	18,0	5
6,5	37,0	32,0	18,5	5
7,0	38,0	33,0	19,0	5

(Cuñez David, 2012)

Dimensionamiento del canal alimentador

$$F_{alim} = 5 \text{ [cm}^2\text{]}$$

Para el colector de escoria la altura será superior al ancho, para facilitar el ascenso de la escoria, por tener menor densidad éste tiende a subir. Para el caso de los alimentadores se recomienda una altura igual al ancho, para garantizar la mínima pérdida de calor en los conductos. (Goyos, 1985)

$$F_{alim} = a^2$$

$$500 = a^2$$

$$a = 22 \text{ [mm]}$$

Para el caso del cigüeñal la alimentación se realiza por los contrapesos laterales del cigüeñal como se observa en la figura 4-7, requiere que se alimente por dos lados debido a la geometría que posee el cigüeñal.

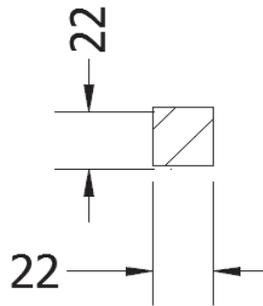


Figura 4.7. Esquema del canal alimentador
(Fuente: Propia)

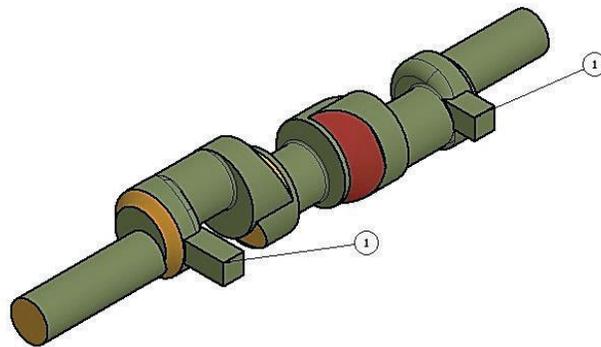


Figura 4.8. Canales de alimentación
(Fuente: Propia)

Tabla 4.8. Elementos del sistema de alimentación.

Numero	Elemento
1	Canal de alimentación

(Fuente: Propia)

Dimensionamiento del colector de escoria

$$F_{esc} = 5,5 [cm^2]$$

$$F_{esc} = a * h$$

$$550 = 22,36 * h$$

$$h = 24,6 [mm]$$

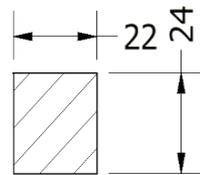


Figura 4.9. Canal escoriador
(Fuente: Propia)

El escoriador va ubicado transversalmente a los canales verticales además entre el canal vertical y el escoriador se ponen mazarotas que garantizan el llenado total de la moldadura en la siguiente figura se observa la ubicación de estos.

El diámetro de las mazarotas es igual a la mitad del diámetro de la mazarota calculada inicialmente.

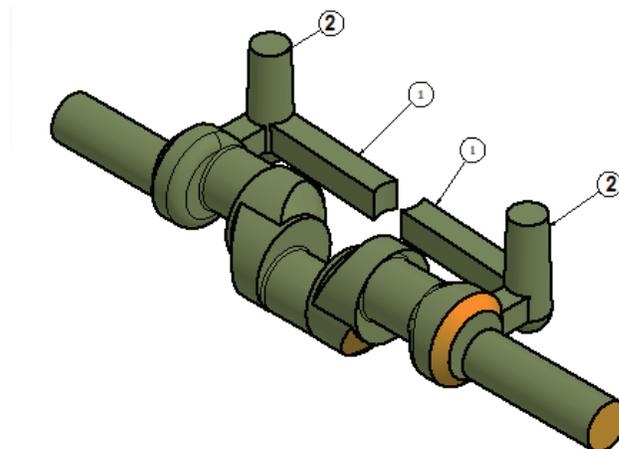


Figura 4.10. Ubicación del escoriador
(Fuente: Propia)

Tabla 4.9. Elementos del sistema de alimentación.

Numero	Elemento
1	Escoriador
2	Mazarotas

(Fuente: Propia)

Dimensionamiento del canal vertical

$$F_{c,v} = \pi r^2$$

$$8 = \pi r^2$$

$$r = 1,59 \approx 1,6[cm]$$

$$D_{c,v} = 32 [mm]$$

La conicidad del canal vertical está entre 2 – 4%, se considera un 3%.

$$c = \frac{D_{c,v} - d_{c,v}}{h}$$

Ecuación 4.9. Conicidad del canal vertical de alimentación

Donde:

$D_{c,v}$: Diámetro mayor del cono

$d_{c,v}$: Diámetro menor del cono

h: Altura del cono

c: Conicidad

$$0,04 = \frac{32 - d_{c,v}}{50}$$

$$d_{c,v} = 30 [mm]$$

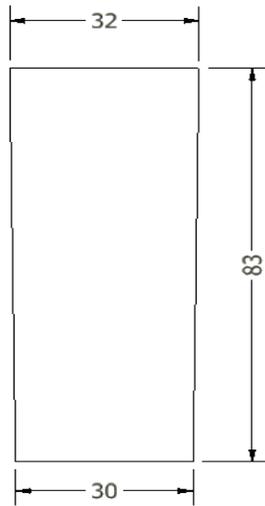


Figura 4.11. Canal vertical
(Fuente: Propia)

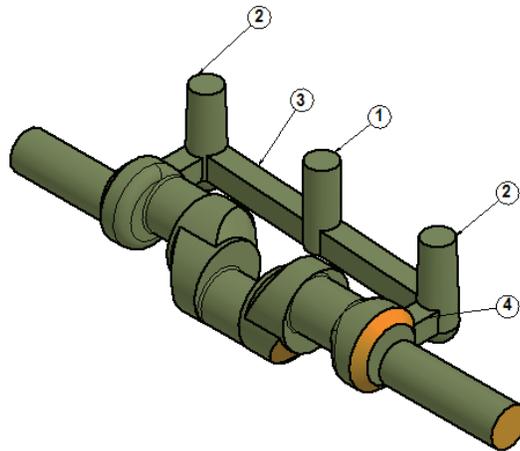


Figura 4.12. Esquema del canal vertical 3D
(Fuente: Propia)

Tabla 4.10. Elementos del sistema de alimentación del cigüeñal.

Numero	Elemento
1	Canal vertical
2	Mazarota
3	Escoriador
4	Canal de alimentación

(Fuente: Propia)

Dimensionamiento del embudo de colada

Primeramente, se calcula la velocidad de colado. La velocidad G_c corresponde a una velocidad de llenado lento, ya que se trata de una pieza de superficies gruesas de fundición gris. (Titov, 1981)

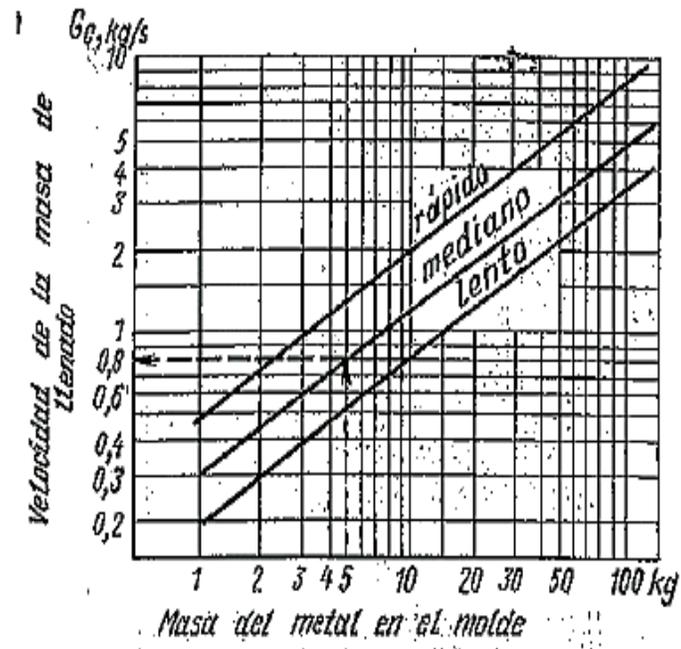


Figura 4.13. Para determinar la velocidad de la masa de colado (Titov, 1981)

De la Figura 4.13 se toma el valor de G_c que corresponde a:

$$G_c = 0,98 \text{ [Kg/s]}$$

Con el valor de G_c , de la tabla 4.4 se observa que corresponde el embudo número 1, por lo tanto $D = h_r = 50 \text{ [mm]}$.

Tabla 4.11. Dimensiones del embudo de colada.

No del embudo	$G_c, \text{ Kg/s}$	$D = h_r, \text{ mm}$
1	Hasta 1,5	50
2	1,5 - 2,5	60
3	2,5 - 3,5	75
4	3,5 - 5,0	95

(Titov, 1981)

La ubicación del embudo de colado es sobre el canal vertical.

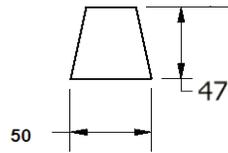


Figura 4.14. Esquema del embudo
(Fuente: Propia)

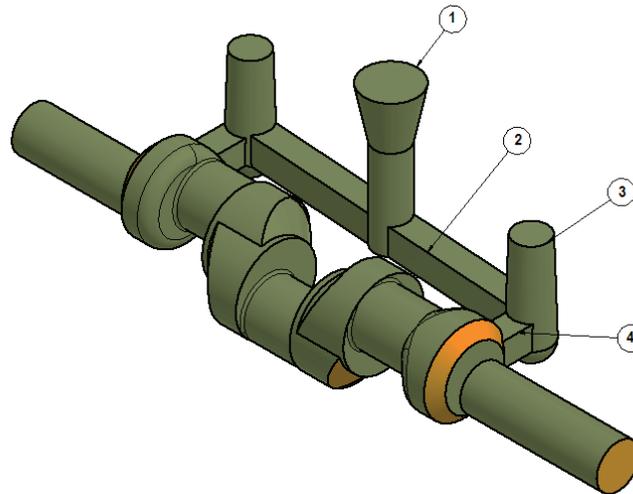


Figura 4.15. Esquema del embudo 3D
(Fuente Propia)

Tabla 4.12. Elementos del sistema de alimentación.

Numero	Elemento
1	Embudo de colada
2	Escoriador
3	Mazarota
4	Canal de alimentación

(Fuente: Propia)

Base de colado

Este es un depósito para el metal ubicado en la parte inferior del canal vertical, reduce el impulso del metal y la erosión del molde, el metal fundido cambia de dirección y fluye dentro de los corredores de una manera más uniforme

Proporciones razonables la base de colado se presenta en la Figura 4.18. Una pauta general será que el diámetro de la base de colado debe ser 2,5 veces la anchura del corredor en un sistema de dos corredores, y el doble de su anchura en un sistema de un corredor. (Rao, 2013)

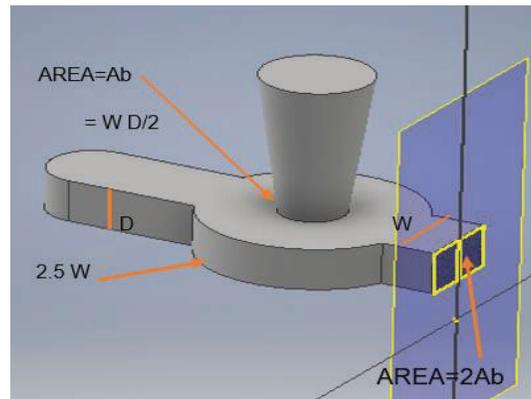


Figura 4.16. Dimensiones de la base de colado (Rao, 2013)

Por la recomendación se procede a calcular el diámetro que tiene la base de colado.

$$D = 2,5 * W$$

Ecuación 4.10. Diámetro de la base de colado

$$D = 2,5 * (22,36)$$

$$D = 56 \text{ mm}$$

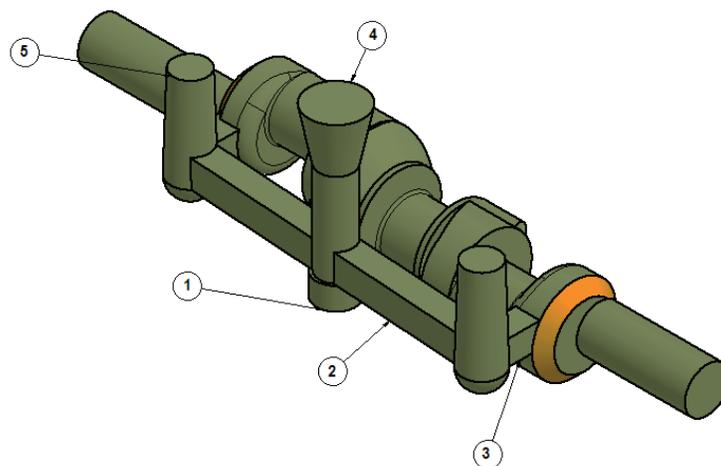


Figura 4.17. Esquema base de colado 3D (Fuente: Propia)

Tabla 4.13. Elementos del sistema de alimentación.

Numero	Elemento
1	Base de colado
2	Escoriador
3	Canal de alimentación
4	Embudo de colada
5	Mazarota

(Fuente: Propia)

Dimensiones de los respiraderos

La sección del respiradero en la base se adopta habitualmente de 1/2 a 1/4 de la sección de la pared de la moldadura.

$$\varnothing_{respiradero} = 20 \text{ mm}$$

En este caso se ubica dos respiraderos a los costados del cigüeñal que tienen un diámetro de 20 mm. Con la ubicación de los respiraderos en el cigüeñal se termina el diseño del sistema de alimentación.

En la Figura 4.24 se muestra el cigüeñal completo con su sistema de alimentación

Tiempo de vertido

El tiempo que la colada tarda en llenar un molde se denomina tiempo de vertido y tiene un papel fundamental en la fundición, conviene que el molde se llene en el menor tiempo posible.

Un tiempo de vertido muy lento requiere mayor temperatura de vertido, un tiempo de vertido muy rápido requiere de flujo turbulento dentro del molde, lo mencionado hace que la pieza fundida tenga defectos.

El tiempo de vertido depende de algunos factores, como son: material, complejidad, espesor y tamaño de la pieza a obtener. No existe una relación para obtener teóricamente el tiempo de vertido con todas las variables mencionadas, pero existe un método estándar para calcular el tiempo de vertido.

$$t = s\sqrt[3]{G\delta} [s]$$

Ecuación 4.11. Tiempo de vertido

Dónde:

s : Coeficiente de espesor

G : Masa de la moldura con el sistema de alimentación [Kg].

δ : Espesor de la moldura [mm].

$s = 1,5$

$G = 21$ [Kg].

δ : Se lo obtiene a partir de la Tabla 4.6

Tabla 4.14. Valores de δ y s para molduras medianas y grandes hasta 1000 Kg.

δ, mm	hasta	10	20	40	80 y más
s	-	1	1,35	1,5	1,7

(Titov, 1981)

$$t = 1,7^3 \sqrt{21 * 96,65} [s]$$

$$t = 19,35 [s]$$

Simulación del cigüeñal con su sistema de alimentación

A continuación, se procede con la simulación de dos cigüeñales para comprobar las ubicaciones de las mazarotas y respiraderos.

En ambos casos la ubicación de mazarotas y respiraderos no se varió; lo que se cambio fue la separación que tendrán estas al cigüeñal.

En la Figura 4.18 se observa que el llenado de la colada se realiza completamente con la temperatura máxima y mínima.



Figura 4.18. Llenado de la colada en el cigüeñal
(Fuente: Propia)

En la figura 4.19 se observa que la solidificación se produce uniformemente, la temperatura más alta 782.7 °C y la más baja es 306 °C, con estos valores la simulación ha terminado, permitiendo analizar los demás parámetros.



Figura 4.19. Temperatura del cigüeñal
(Fuente: Propia)

En la figura 4.20 se muestra el tiempo de solidificación, es un parámetro muy importante que muestra las partes que se van solidificando primero; la ubicación de las mazarotas y respiraderos depende de la uniformidad de solidificación de las partes. La temperatura más baja se obtiene a los 328.7 segundos y la temperatura más alta se tiene 1205.7 en lo que se refiere a la moldadura.



Figura 4.20. Tiempo de solidificación
(Fuente: Propia)

La siguiente figura muestra las porosidades que se obtuvo luego que la pieza se ha enfriado, estas se producen debido a que el enfriamiento de la mazarota y respiradero fue más rápido.

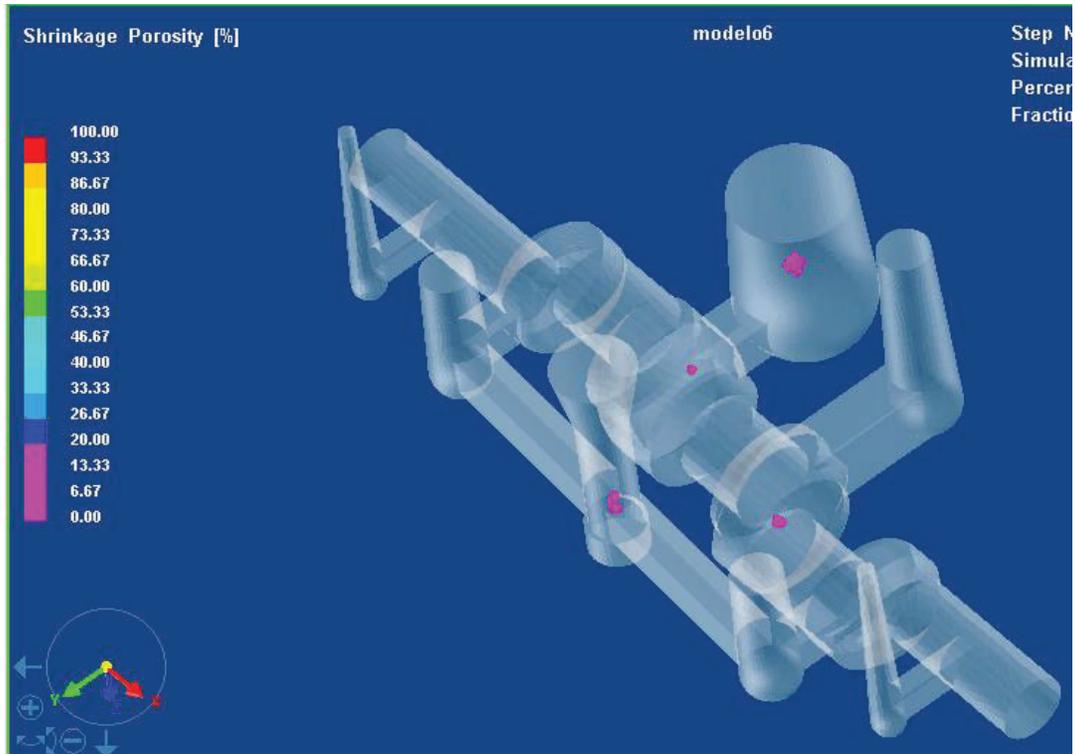


Figura 4.21. Porosidades internas
(Fuente: propia)

Para hacer una análisis más exhaustivo se realiza un corte transversal para ver el enfriamiento de la colada internamente, en el canal de la mazarota claramente se ve que se ha solidificado por completo y no continua alimentando de colada al cigüeñal produciendo así las porosidades.



Figura 4.22. Corte transversal del cigüeñal
(Fuente: propia)

Para reducir las porosidades al 0% el único cambio que se realizó en el sistema de alimentación es la disminución de la longitud y ancho del canal de la mazarota y del respiradero, como se observa en la figura 4.23 que las porosidades han desaparecido.

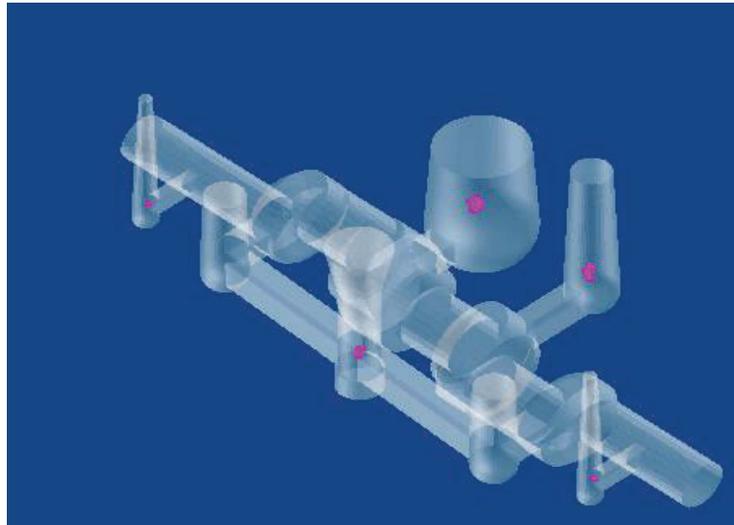


Figura 4.23. Porosidades internas
(Fuente: Propia)

En la figura 4-24 se realiza un corte transversal de la figura 4-23 para comprobar que mientras que el cigüeñal se sigue enfriando la mazarota sigue alimentando, lo que garantiza un porcentaje de porosidad del 0%.

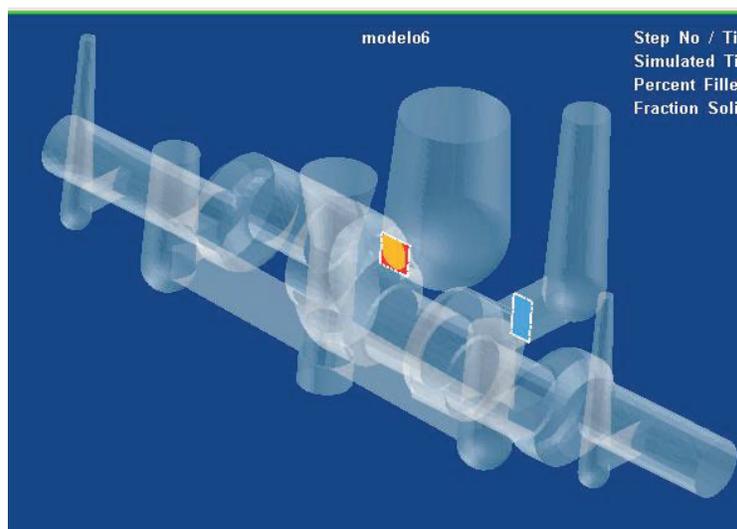


Figura 4.24. Corte transversal del cigüeñal
(Fuente: Propia)

Nótese que los canales de alimentación de forma cuadrangular y de forma rectangular fueron los óptimos para obtener una buena moldadura

Terminado la simulación se elige el sistema de alimentación adecuado, y se lo representa a continuación:

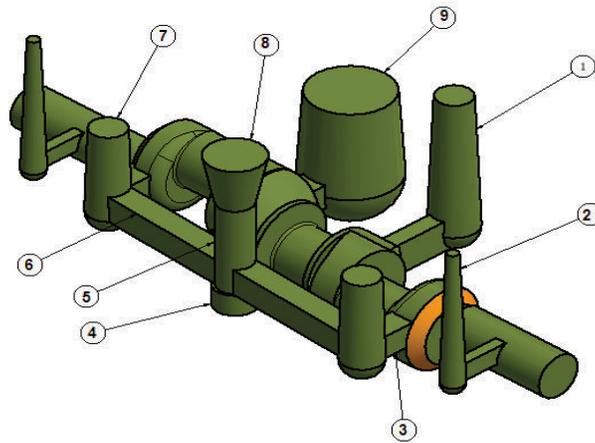


Figura 4.25. Esquema del cigüeñal
(Fuente: Propia)

Tabla 4.15. Elementos del sistema de alimentación del cigüeñal.

Número	Elemento
1	Respiradero (mazarota)
2	Respiradero
3	Alimentador
4	Base de colado
5	Canal Vertical
6	Escoriador
7	Mazarota
8	Embudo de colada
9	Mazarota

(Fuente: Propia)

Nota: El cálculo del sistema de alimentación solo se mostrara para el sistema óptimo que se obtiene después de la simulación garantizando piezas que cumplan con los requerimientos del diseño.

4.4.2. Cálculo de sistema de alimentación para la biela

Cálculo de la mazarota

Para el cálculo de las mazarotas de las bielas se realiza mediante el método del círculo inscrito, se opta por este método por facilidad de cálculo, es un método bastante apropiado para las bielas debido a que la forma geométrica que tienen estas no es tan complicada como la del cigüeñal.



Figura 4.26. Corte transversal de la biela
(Fuente: Propia)

De la figura observamos que el diámetro máximo que se puede inscribir es de:

$$\phi = 32 \text{ mm}$$

Para este caso se aumenta un 25% para obtener el diámetro de la mazarota y para la altura un 40%.

$$\phi_{mazarota} = 32 + 8 = 40 \text{ mm}$$

$$h_{mazarota} = 32 + 12,8 = 44,8 \approx 40 \text{ mm}$$

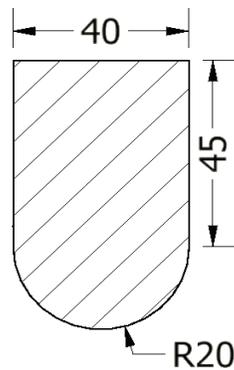


Figura 4.27. Esquema de la mazarota
(Fuente: Propia)

A continuación, se muestra un esquema en 3D de la biela con la ubicación de las mazarotas anteriormente calculadas.

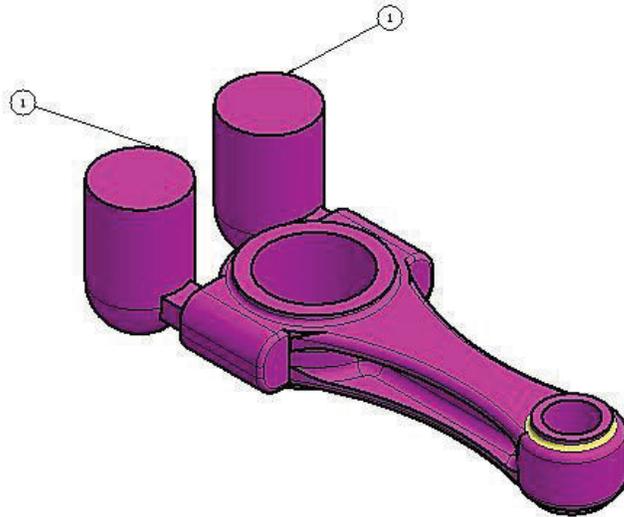


Figura 4.28. Esquema 3D mazarota biela
(Fuente: Propia)

Tabla 4.16. Componente del sistema de alimentación.

Numero	Componente
1	Mazarota

(Fuente: Propia)

Cálculo del canal de alimentación

De igual forma que se realizó para el cigüeñal se calcula todos los sistemas de alimentación para la biela, empezando con la altura estática:

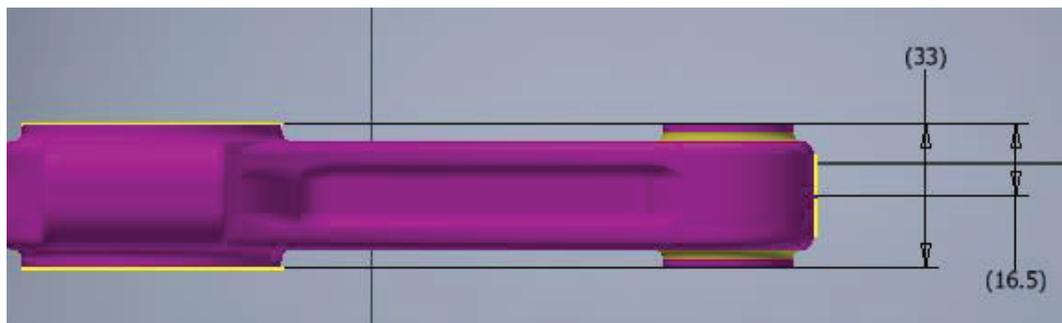


Figura 4.29. Valores de P y C en mm para el cálculo de la altura estática
(Fuente: Propia)

El valor de H depende del diseñador del sistema de alimentación en este caso se toma como:

$$H = 95 \text{ mm}$$

$$H_{cal} = H - P^2/2C$$

$$H_{cal} = 95 - 16,5^2/2(33)$$

$$H_{cal} = 90 \text{ mm}$$

Basándonos en la Tabla 4.6 obtenemos los valores para x

$$F_{alim} = \frac{x\sqrt{G}}{\sqrt{H_{cal}}}$$

$$F_{alim} = \frac{4,3\sqrt{1,80}}{\sqrt{9}}$$

$$F_{alim} = 1,92 \text{ cm}^2$$

Para la biela se tiene las siguientes relaciones:

$$F_{alim} : F_{esc} : F_{c,v} = 1:1,1:1,15$$

$$F_{esc} = 1,1 * F_{alim}$$

$$F_{esc} = 1,1 * 1,92$$

$$F_{esc} = 2 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$F_{c,v} = 1,5 * F_{alim}$$

$$F_{c,v} = 1,5 * 1,92$$

$$F_{c,v} = 3 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$F_{alim} = a^2$$

$$1,92 = a^2$$

$$a = 14 \text{ [mm]}$$

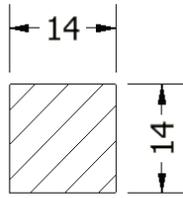


Figura 4.30. Esquema del Alimentador
(Fuente: Propia)

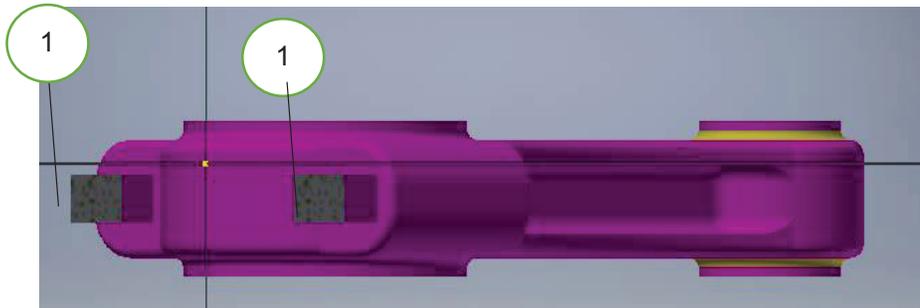


Figura 4.31. Esquema 3D del canal de alimentación
(Fuente: Propia)

Tabla 4.17. Elementos del sistema de alimentación.

Numero	Componente
1	Canal de alimentación

(Fuente: Propia)

Dimensionamiento del colector de escoria

Para el cálculo de las dimensiones del colector de escoria se considera que tendrá forma rectangular con lo que se tiene lo siguiente:

$$F_{esc} = 2 [cm^2]$$

$$F_{esc} = a * h$$

$$200 = 14 * h$$

$$h = 15 [mm]$$

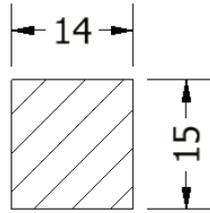


Figura 4.32. Esquema colector de escoria 2D
(Fuente: Propia)

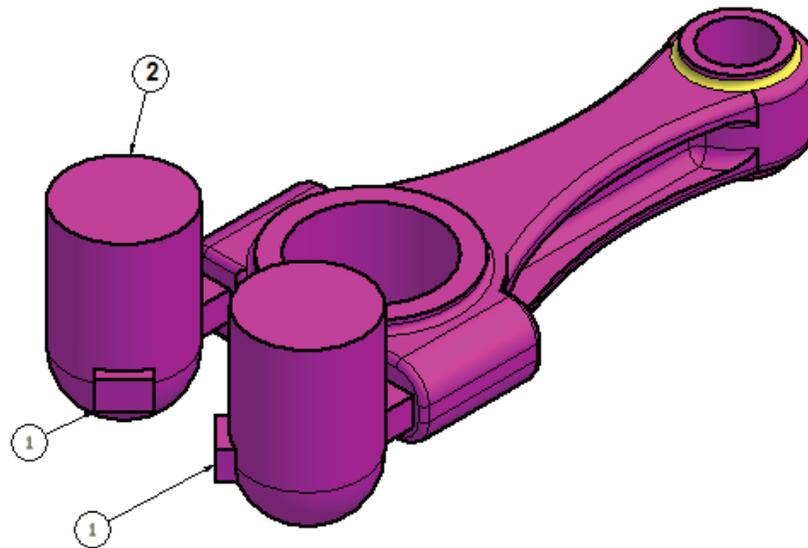


Figura 4.33. Esquema 3D de la ubicación del escoriador
(Fuente: Propia)

Tabla 4.18. Elementos del sistema de alimentación de la biela.

Numero	Componente
1	Escoriador
2	Mazarota

(Fuente: Propia)

Dimensionamiento del canal vertical

Para el cálculo de las dimensiones del canal vertical se toma como un tronco de cono teniendo así los siguientes cálculos.

$$F_{c,v} = \pi r^2$$

$$3 = \pi r^2$$

$$r = 0,97 \approx 1 \text{ [cm]}$$

$$D_{c,v} = 20 \text{ [mm]}$$

La conicidad del canal vertical está entre 2 – 4%, vamos a considerar un 4%.

$$c = \frac{D_{c,v} - d_{c,v}}{h}$$

$$0,04 = \frac{20 - d_{c,v}}{50}$$

$$d_{c,v} = 18 \text{ [mm]}$$

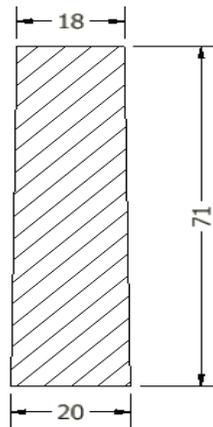


Figura 4.34. Canal vertical
(Fuente: Propia)

De la Figura 4.12 se obtiene la velocidad de la masa de colado que corresponde a:

$$G_c = 0,42 \text{ [Kg/s]}$$

Esto corresponde al embudo número 1, por lo tanto $D = h_r = 50 \text{ [mm]}$.

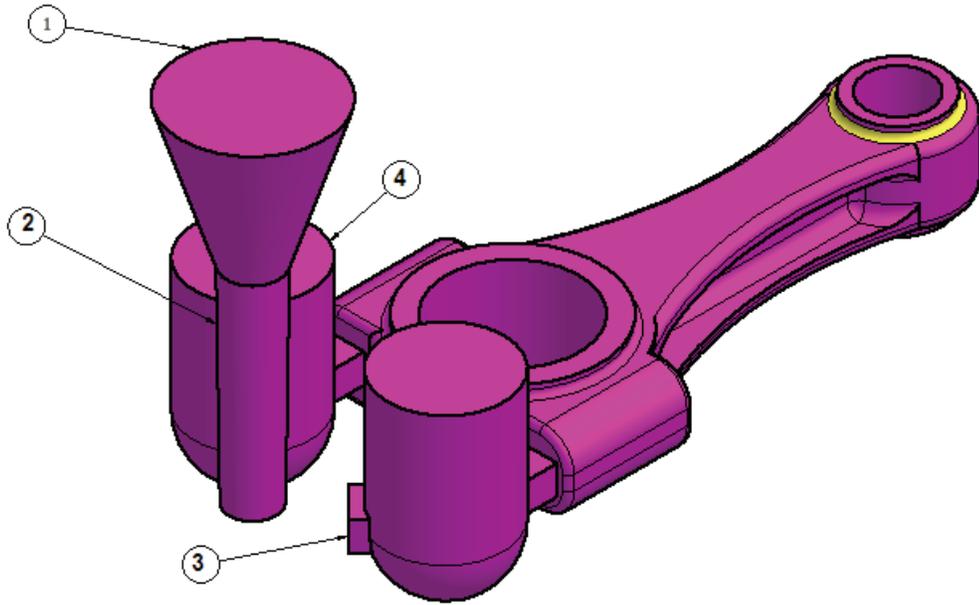


Figura 4.35. Esquema 3D de la ubicación del sistema de alimentación de la biela
(Fuente: Propia)

Tabla 4.19. Elementos del sistema de alimentación.

Numero	Elemento
1	Embudo de colado
2	Canal vertical
3	Escoriador
4	Mazarota

(Fuente: Propia)

Finalmente se procede a calcular el diámetro que tendrá la base de colada basándose en la ecuación 4.11.

$$D = 2 W$$

$$D = 2 (14)$$

$$D = 28 \text{ mm}$$

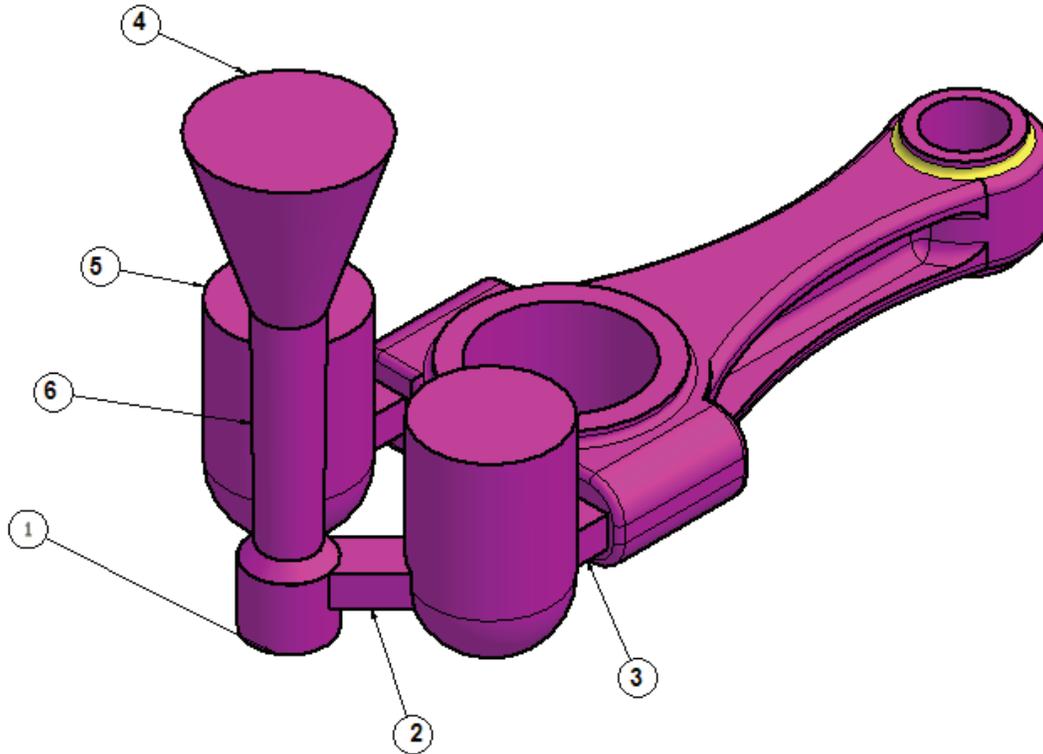


Figura 4.36. Esquema 3D de la ubicación del sistema de alimentación de la biela
(Fuente: Propia)

Tabla 4.20. Elementos del sistema de alimentación de la biela

Numero	Elemento
1	Base de colado
2	Escoriador
3	Canal vertical
4	Embudo de colada
5	Mazarota
6	Canal Vertical

(Fuente: Propia)

Tiempo de vertido

Se calcula con la siguiente formula.

$$t = s^3 \sqrt{G\delta} [s]$$

Dónde:

s: Coeficiente de espesor

G: Masa de la moldura con el sistema de alimentación [Kg].

δ : Espesor de la moldura [mm].

$$s = 1.5$$

$$G = 2.7 \text{ [Kg]}.$$

δ : Se lo obtiene a partir de la tabla 4.6

$$t = s^3 \sqrt[3]{G\delta} \text{ [s]}$$
$$t = 1.5^3 \sqrt[3]{2.7 * 33} \text{ [s]}$$
$$t = 6.69 \text{ [s]}$$

Simulación de la biela con su sistema de alimentación

Para la biela se presenta dos simulaciones con distintas formas de ubicación de los sistemas de alimentación.

La primera simulación se realiza con el sistema de alimentación que se muestra en la figura 4.36, los cálculos para esto no se los pone debido a que éste sistema no es el correcto como se ve a continuación.

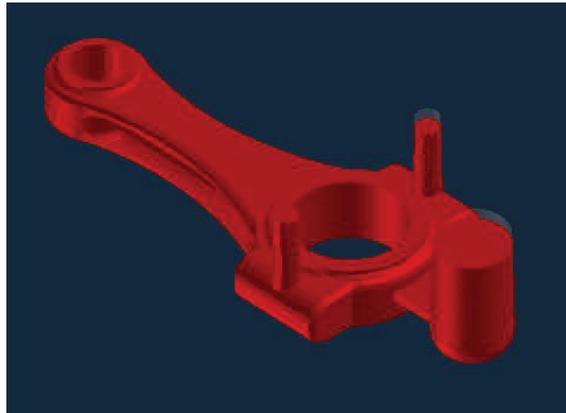


Figura 4.37. Llenado de la biela.
(Fuente: Propia)

Al observar la figura 4.38 se determina que los respiraderos no son lo suficientemente grandes para contribuir con la alimentación de la colada, mientras se solidifica la biela. De acuerdo a los colores y temperaturas los respiraderos son los primeros en solidificarse.

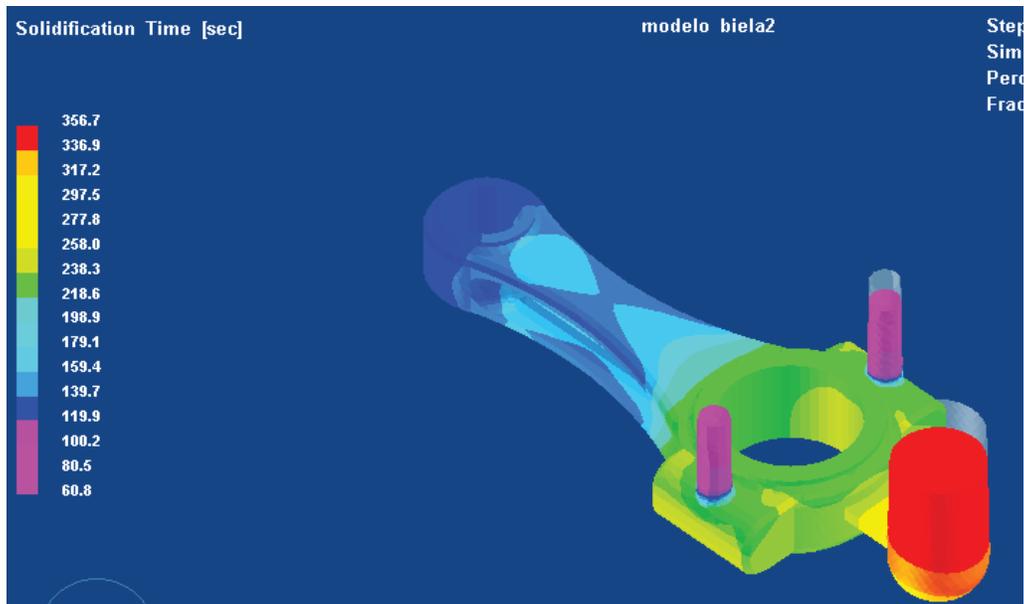


Figura 4.38. Tiempo de solidificación de la biela
(Fuente: Propia)

Como los respiraderos son muy pequeños se produjo porosidades internas por lo tanto el sistema de alimentación no es válido,

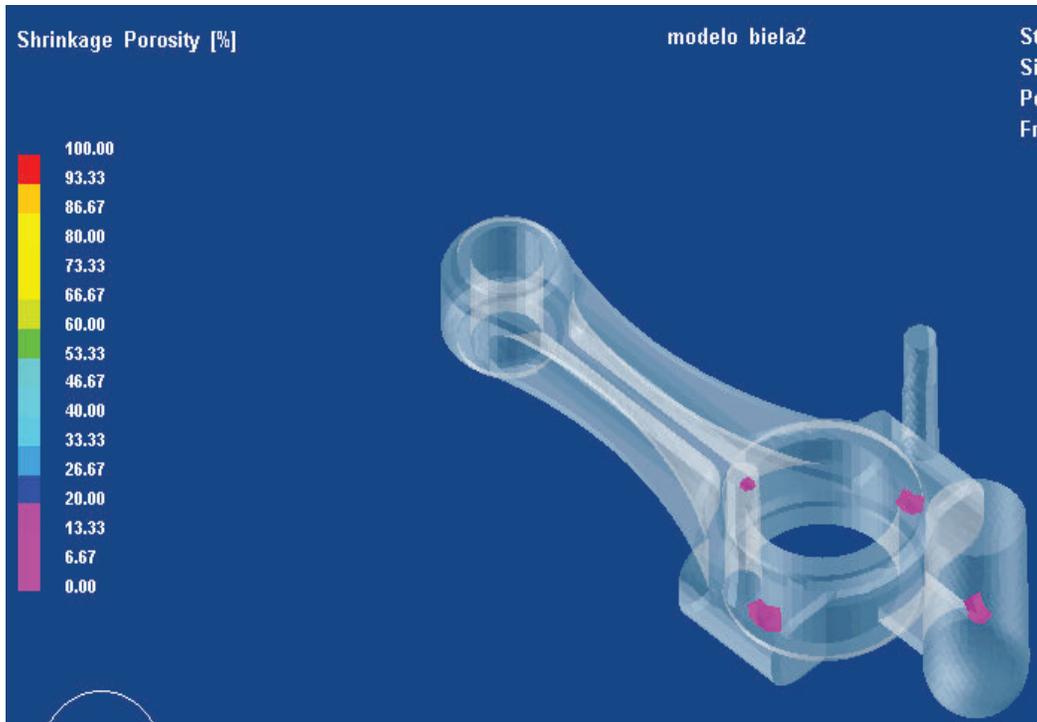


Figura 4.39. Porosidades Internas
(Fuente: Propia)

Se realiza la simulación con un nuevo sistema de alimentación en el cual se aumentó dos mazarotas que ayudaran a la eliminación de las porosidades. Los cálculos para este sistema se los detalla en la sección 4.4.2.



Figura 4.40. Llenado de la colada en la biela.
(Fuente: Propia)

La gráfica del tiempo de solidificación nos muestra que la temperatura de solidificación es más uniforme lo que va a garantizar la eliminación de porosidades al 0%.

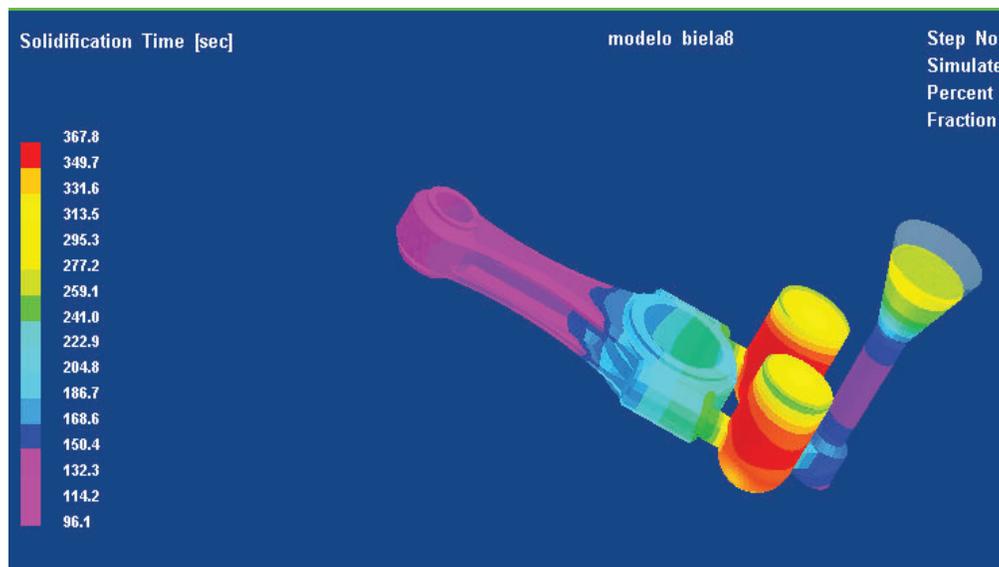


Figura 4.41. Tiempo de solidificación
Fuente: (Propia)

Efectivamente en la Figura 4.42 se ve la eliminación total de las porosidades internas, dentro de la biela, las porosidades que se observa son en las mazarotas que no afectara en nada a la pieza.

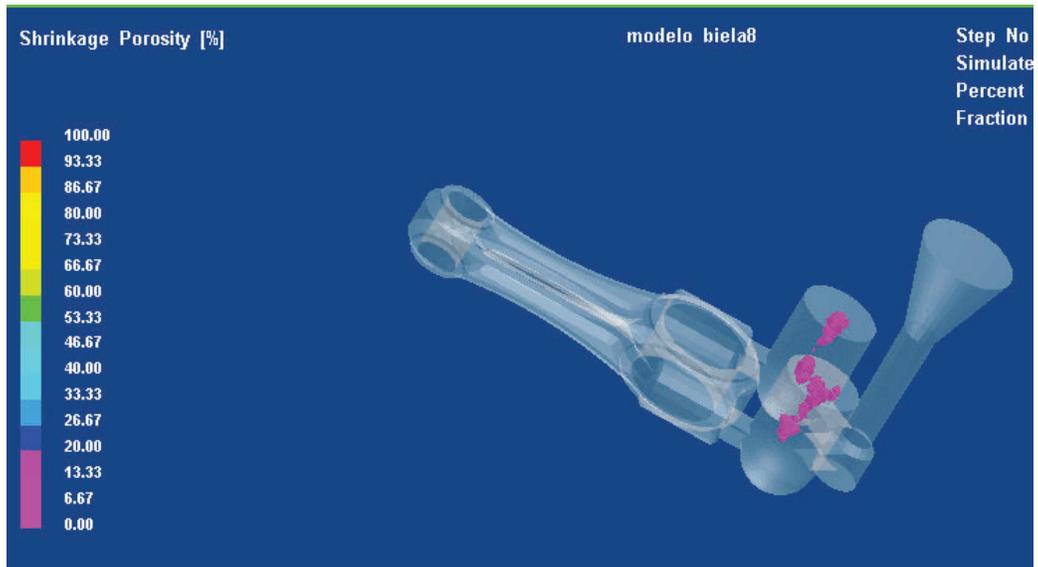


Figura 4.42. Porosidades Internas
(Fuente: Propia)

Realizando un corte transversal se observa que mientras se solidifica la pieza las mazarotas continúan alimentadas a la misma, dando una pieza libre de defectos.

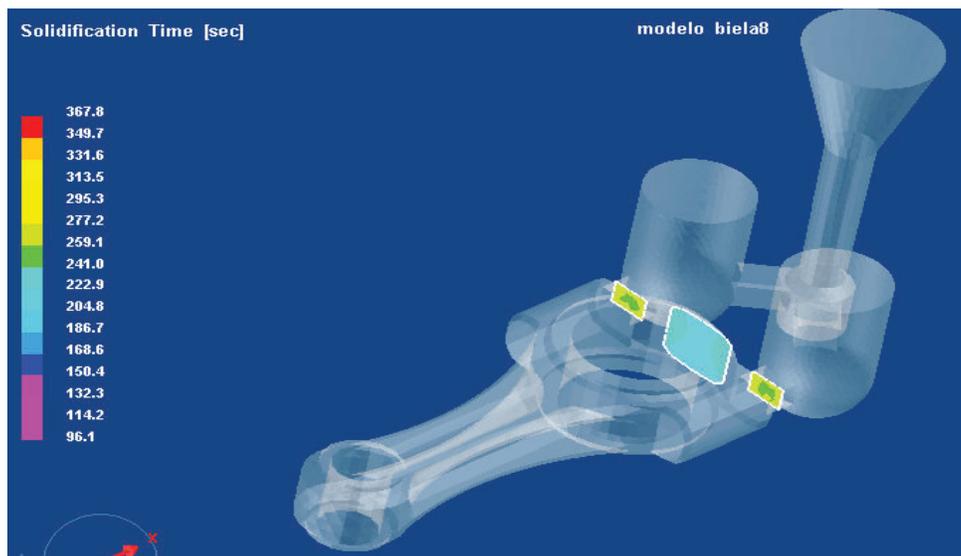


Figura 4.43. Corte transversal
(Fuente: Propia)

Realizado la simulación se representa a continuación el sistema de alimentación óptimo para la biela.

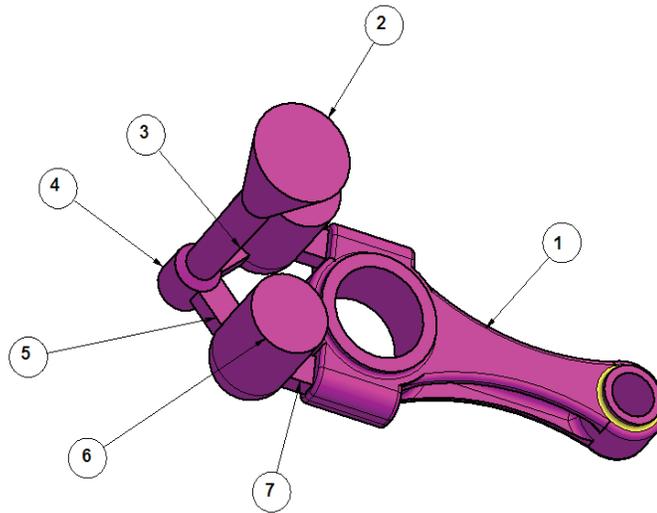


Figura 4.44. Biela con sistemas de alimentación
(Fuente: Propia)

Tabla 4.21. Elementos del sistema de alimentación.

Numero	Elemento
1	Biela
2	Embudo
3	Canal vertical
4	Base de colada
5	Escoriador
6	Mazarota
7	Alimentador

(Fuente: Propia)

Nota: El cálculo del sistema de alimentación solo se mostrara para el sistema óptimo que se obtiene después de la simulación garantizando piezas que cumplen con los requerimientos del cliente.

4.4.3. Cálculo del sistema de alimentación de las tapas de los rodamientos

Para el caso de la tapa, la alimentación que se realiza es directamente a la pieza por consiguiendo los valores de P y C son cero, considerando solo el valor de H que dependerá del diseñador del sistema.

Se realiza el cálculo de la altura estática:

$$H_{cal} = H - P^2/2C$$

$$H_{cal} = 100 \text{ mm}$$

Dimensionamiento del alimentador. (Mazarota)

Para la tapa el cálculo de las mazarotas que también funciona como alimentador se realiza mediante el método de los círculos inscritos como se observa en la figura 4.45, para el diámetro se le aumenta un 25 % mientras que para la altura un 35%.

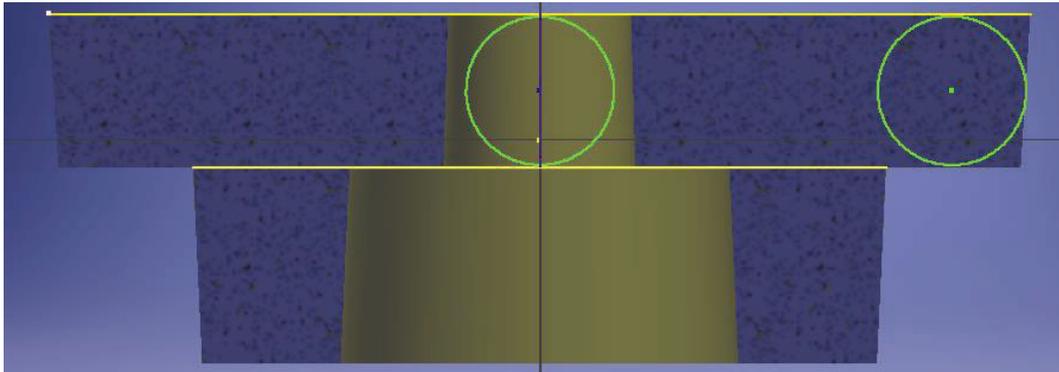


Figura 4.45. Esquema de círculos inscritos
(Fuente: Propia)

$$\phi_{inscrito} = 25 \text{ mm}$$

$$\phi_{alimentador} = 31,25 \text{ mm}$$

$$h_{alimentador} = 33,75 \text{ mm}$$

El diámetro calculado del alimentador es demasiado pequeño en comparación a la masa de la tapa, por lo tanto se aumenta este diámetro aproximadamente al doble. Mientras que la altura se le aumenta un 70 %, por lo tanto, las nuevas dimensiones serán las siguientes:

$$\phi_{alimentador} = 60 \text{ mm}$$

$$h_{alimentador} = 50 \text{ mm}$$

La alimentación de la colada es directamente a la tapa; el cálculo de escoriadores, alimentadores y base colado se omite para este caso.

Dimensionamiento del embudo de colada

Como:

$$G_c = 0,4 \text{ [Kg/s]}$$

Corresponde el embudo número 1, por lo tanto $D = h_r = 50 \text{ [mm]}$.

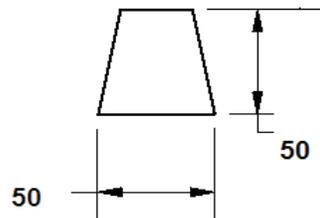


Figura 4.46. Embudo de colada
(Fuente: Propia)

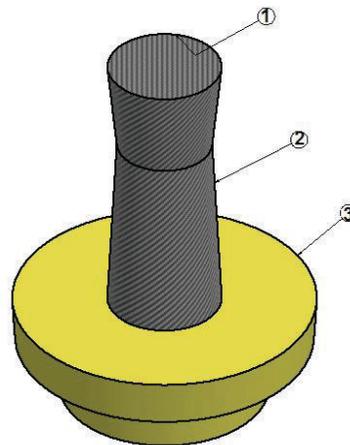


Figura 4.47. Esquema 3D del sistema de alimentación de la tapa
(Fuente: Propia)

Tabla 4.22. Elementos del sistema de alimentación

Numero	Elemento
1	Embudo de colado
2	Canal vertical (Mazarota)
3	Tapa

Fuente: Propia

Tiempo de vertido

$$t = s^3 \sqrt[3]{G\delta} [s]$$

Dónde:

s : Coeficiente de espesor

G : Masa de la moldura con el sistema de alimentación [Kg].

δ : Espesor de la moldura [mm].

$$s = 1.7$$

$$G = 7.5 [Kg].$$

δ : Se lo obtiene a partir de la tabla 4.6

$$t = s^3 \sqrt[3]{G\delta} [s]$$

$$t = 1,7^3 \sqrt[3]{7,5 * 57} [s]$$

$$t = 12,18 [s]$$

Simulación de la tapa con su sistema de alimentación

Para la última pieza se realiza varias simulaciones, pero solo se presentarán dos, con las que se analiza cuáles son las principales partes a considerar del sistema de alimentación.

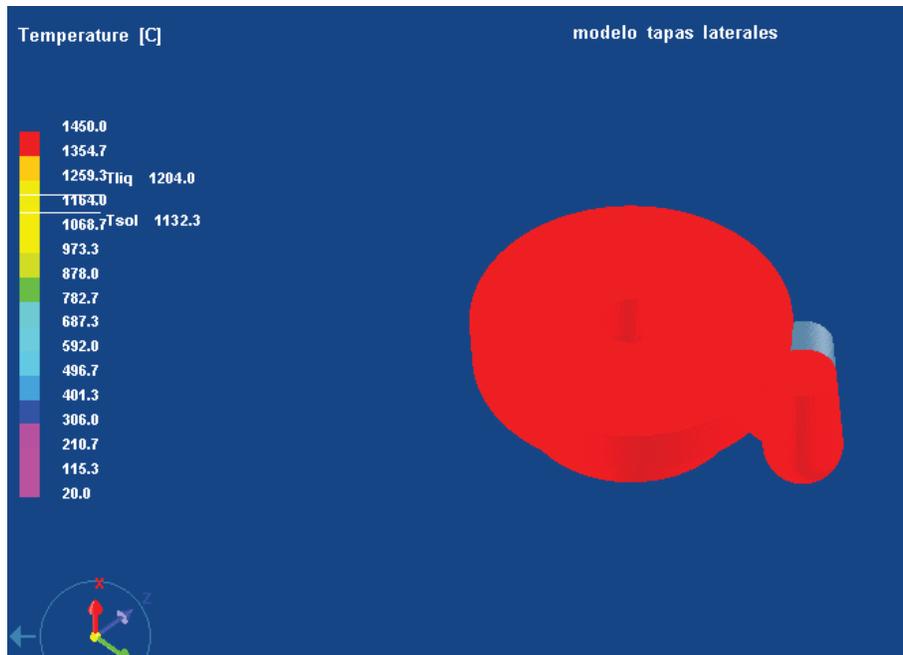


Figura 4.48. Llenado de la biela con el primer sistema de alimentación
(Fuente: Propia)

Claramente se ve que este sistema de alimentación falla debido a que la solidificación de la Figura 4.49 muestra que el alimentador que también es mazarota se enfría mucho más antes que la pieza, por lo que se produce porosidades en ese punto, que se puede visualizar en la Figura.4.50.

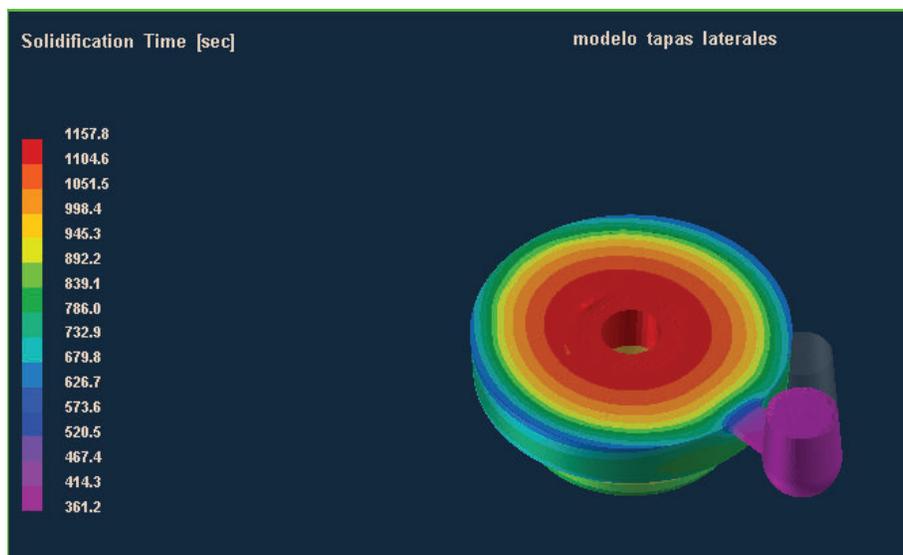


Figura 4.49. Tiempo de solidificación
(Fuente: Propia)

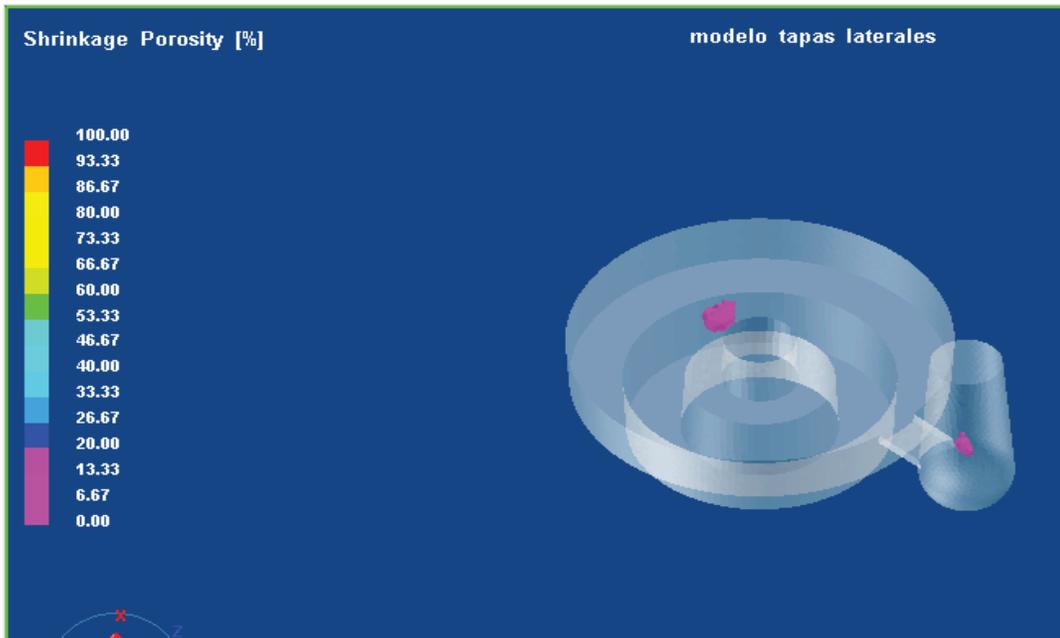


Figura 4.50. Porosidades Internas
(Fuente: Propia)

Con el nuevo sistema de alimentación tendremos los siguientes resultados que se presentan a continuación.



Figura 4.51. Llenado de la colada con un segundo sistema de alimentación
(Fuente: Propia)

Analizando la Figura 4.52 la solidificación es la correcto; el alimentador (mazarota), se enfría después de la pieza, garantizando la alimentación de la colada durante la solidificación; en la Figura 4.53 se tiene una porosidad que se produce en donde se va hacer el agujero por lo tanto no dañara la geometría de la tapa.

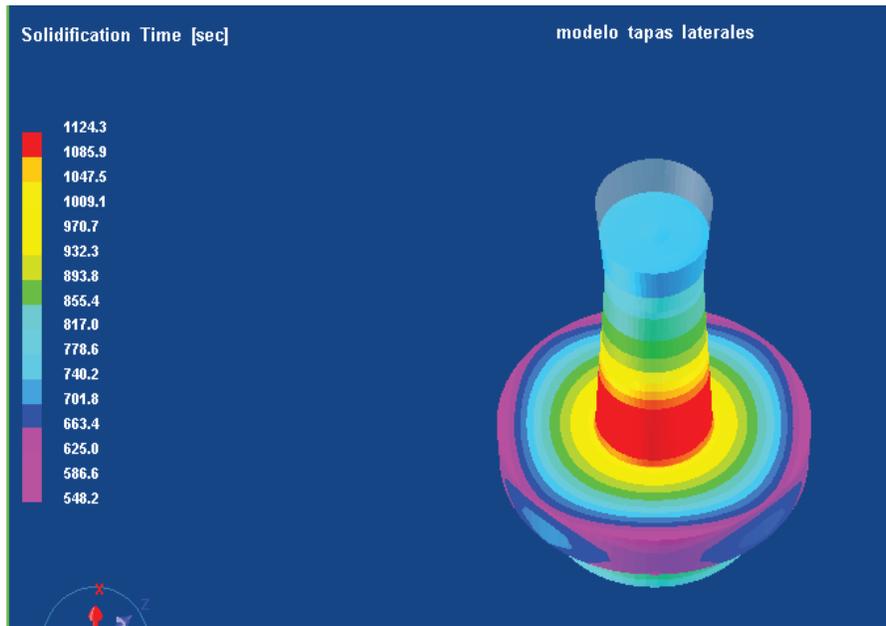


Figura 4.52. Tiempo de solidificación
(Fuente: Propia)



Figura 4.53. Porosidades internas
(Fuente: Propia)

Con la simulación realizada se escoge el sistema de alimentación correcto que se presenta a continuación:

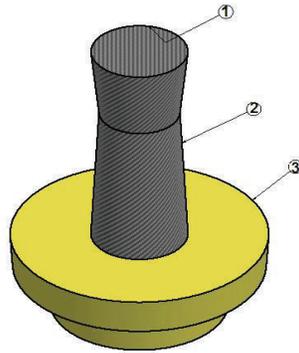


Figura 4.54. Tapa con sistema de alimentación
(Fuente: Propia)

Tabla 4.23. Elementos del sistema de alimentación.

Numero	Elemento
1	Embudo de colado
2	Canal vertical (Mazarota)
3	Tapa

(Fuente: Propia)

Nota: El cálculo del sistema de alimentación solo se mostrara para el sistema óptimo que se obtiene después de la simulación garantizando piezas que cumplen con los requerimientos del cliente.

4.4.4. Dimensionamiento de cajas de moldeo

Las dimensiones de las cajas se determinan por el tamaño del modelo, por la cantidad de piezas dentro de la caja de moldeo, por su posición, por las dimensiones de las mazarotas, sistemas de alimentación, y por las dimensiones de las portadas de los machos.

Debe tenerse en cuenta que la capa de mezcla entre la cavidad del molde y las paredes de la caja de moldeo tiene que asegurarse la resistencia debida del molde

para evitar su destrucción y deformación por la acción de las presiones estáticas y dinámica del metal vertido. (Goyos, 1985)

Tabla 4.24. Distancia permisibles entre piezas y elementos del molde.

Distancia pieza-pieza y pieza molde					
Tipo de pieza	Dimensiones mm				
	A	B	B	s	d
Pequeñas	10 a 30	35 a 60	50 a 75	0,3 de la	0,5 de la
Medianas	50 a 75	74 a 100	100 a 125	altura de	altura de
Grandes	125 a 175	150 a 200	175 a 200	plantilla	plantilla

Fuente: (Goyos, 1985)

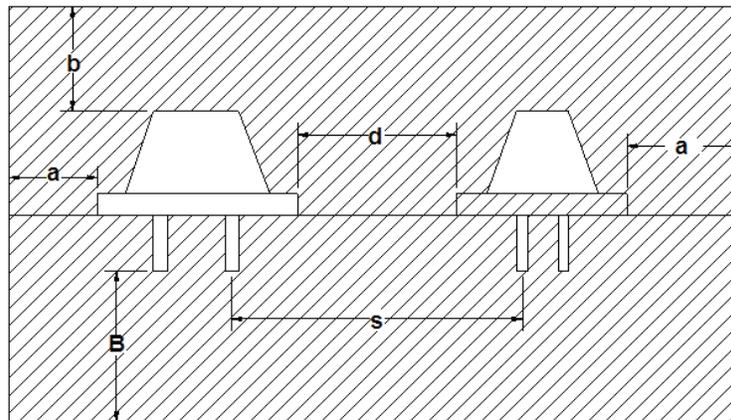


Figura 4.55. Esquema de Distancia permisibles entre piezas y elementos del molde
Fuente: (Goyos, 1985)

Dimensionamiento de las cajas de las tapas

Para el dimensionamiento de las cajas se realiza un plano divisor a la tapa como se muestra en la Figura 4.56 mostrando la división de la caja superior e inferior. Tomando en cuenta las dimensiones de los modelos, sus sistemas de alimentación, tipo de pieza mediana y siguiendo la Tabla 4.24 se establece que las dimensiones son las siguientes.

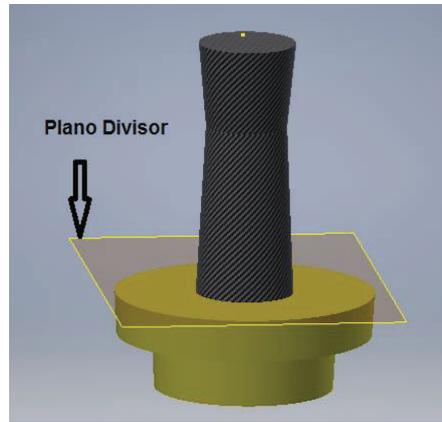


Figura 4.56. Tapa con el plano divisor
(Fuente: Propia)

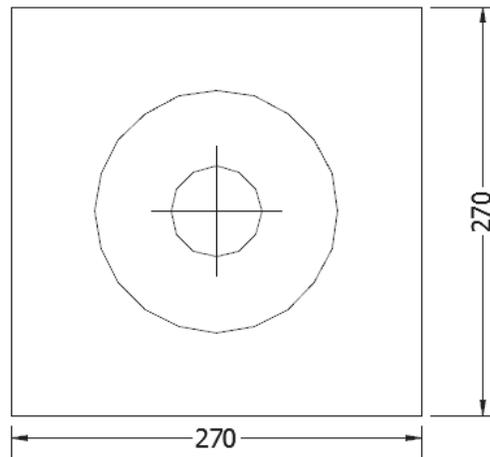


Figura 4.57. Vista superior caja de moldeo
(Fuente: Propia)

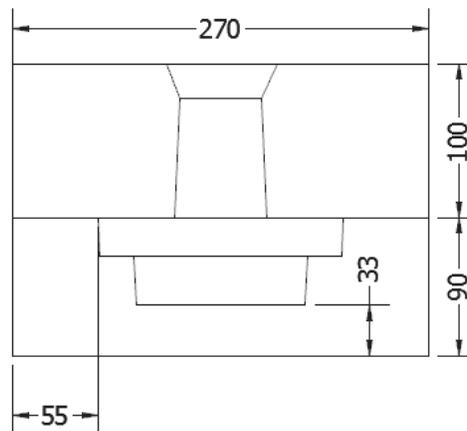


Figura 4.58. Vista frontal caja superior e inferior acoplada
(Fuente: Propia)

En el caso de la dimensión B se tiene un valor menor a lo establecido en la Tabla 4-24, esto se lo hace ya que la arena utilizada en el moldeo es bastante resistente garantizando que no se destruirá al momento del colado.

Dimensionamiento de las cajas de la biela

El plano divisor que se muestra en la Figura 4.59 nos indica la división de la caja en superior e inferior. De igual manera se le toma como una pieza mediana y se procede con las dimensiones de las cajas como se muestra a continuación.

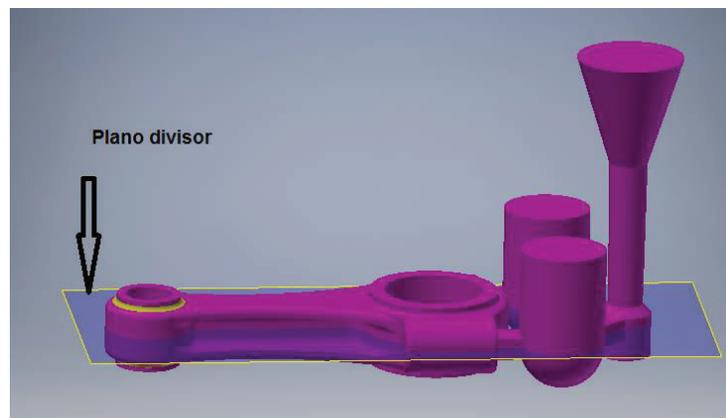


Figura 4.59. Plano divisor de la biela
(Fuente: Propia)

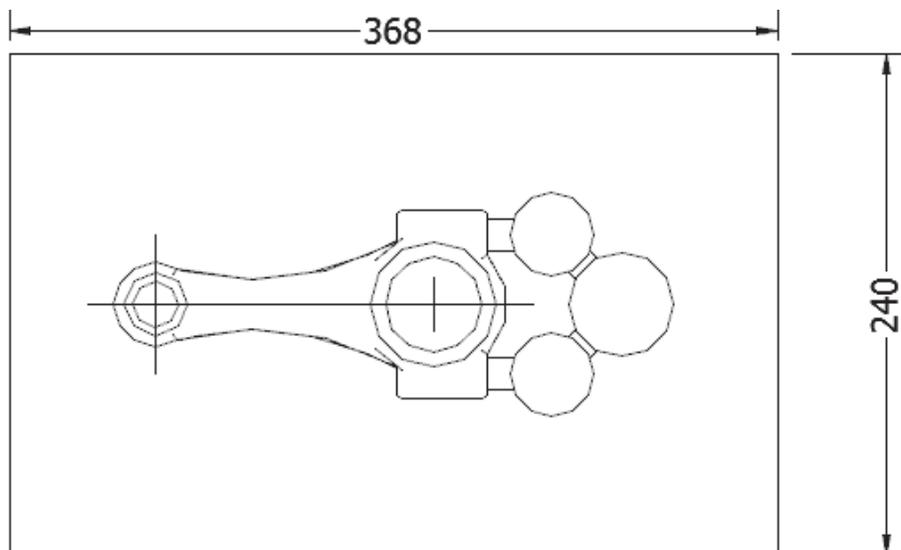


Figura 4.60. Vista superior caja de moldeo
(Fuente: Propia)

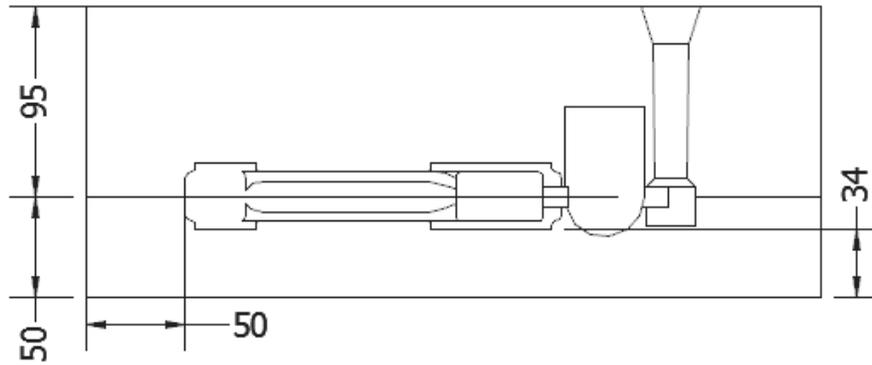


Figura 4.61. Vista frontal caja - superior e inferior
(Fuente: Propia)

La dimensión B para el caso de la biela también se disminuyó, gracias a la resistencia de la arena que es bastante alta, garantizando que no se destruye en la dimensión establecida.

Dimensionamiento de las cajas del cigüeñal

Se establece el plano divisor del cigüeñal que muestra la división de la caja superior e inferior, las distancias que tiene el molde de la caja de moldeo se toman de la Tabla 4.24.

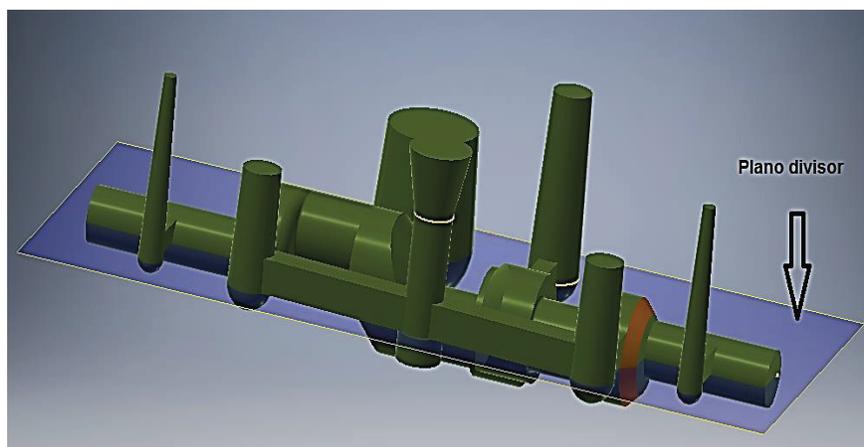


Figura 4.62. Plano divisor del cigüeñal
(Fuente: Propia)

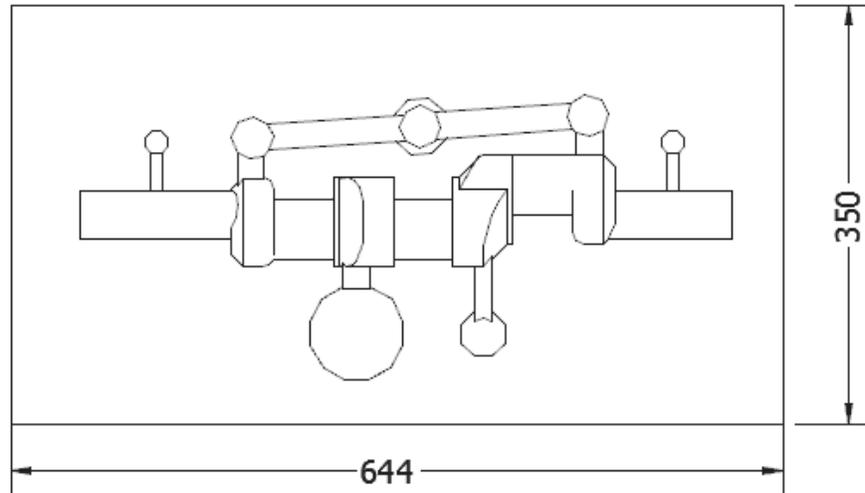


Figura 4.63. Vista superior de la caja de moldeo
(Fuente: Propia)

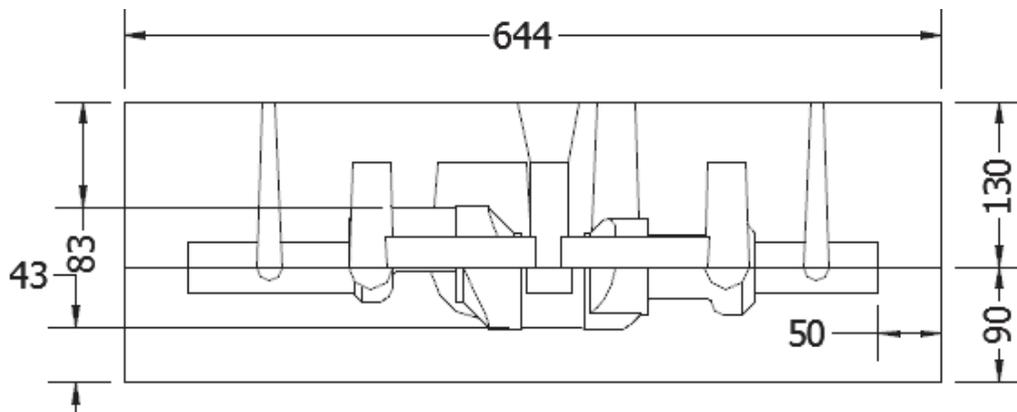


Figura 4.64. Vista frontal caja superior e inferior
(Fuente: Propia)

La resistencia de la arena utilizada es bastante alta permitiendo reducir la dimensión de B, además se garantiza que al momento de colado no sufrirá ningún daño la moldadura.

4.5. Materiales y herramientas de fundición

Los materiales que se utiliza en el proceso de obtención de las piezas se detallan a continuación:

- Arena para moldear
- Nodulizante
- Inoculante

- Carburizante

Las herramientas que se utiliza en el proceso de obtención de las piezas como cigüeñal, bielas y tapas se detallan a continuación:

- Placas modelo
- Caja de moldeo
- Caja de machos
- Maquina vibradora
- Punzadores.
- Alisadores
- Cucharas
- Balanza

4.5.1. Arena para moldear

La arena que se utiliza es arena sílice con resina furánica y catalizador, en la siguiente figura se observa el suministro de arena.



Figura 4.65. Arena de moldeo
(Fuente: Propia)

4.5.2. Placa modelo

Las placas se fabrican en madera, lo que ayuda a la facilidad de moldeo y desmoldeo, son muy utilizadas en la producción en serie, las mismas que cuentan con su sistema de alimentación incorporado, previamente diseñados y calculados.



Figura 4.66. Placa modelo cigüeñal macho y hembra
(Fuente: Propia)



Figura 4.67. Placa modelo biela macho y hembra
(Fuente: Propia)



Figura 4.68. Placa modelo tapas macho y hembra
(Fuente: Propia)

4.5.3. Caja de moldeo

Es una parte importante dentro del proceso de fundición, las cajas se hizo de madera, estas cajas van unidas a las placas modelo como se observa en las figuras del punto anterior.

4.5.4. Caja de noyos

Debido a la complejidad de las piezas a obtenerse, se utilizó caja de machos; obteniendo así todos los detalles de las mismas, normalmente los se utilizan machos cuando se tienen perforaciones en las piezas.



Figura 4.69. Cajas de noyos Cigüeñal, cigüeñal y bielas
(Fuente: Propia)

4.5.5. Máquina vibradora

Esta máquina se utiliza para compactar la arena que se encuentra esparcida dentro de las cajas.



Figura 4.70. Máquina compactadora
(Fuente: Propia)

4.5.6. Punzadores

Se utiliza al momento de realizar la salida de gases que se generan durante el colado.

4.5.7. Alisadores

Se utiliza para quitar la arena cuando se tiene por encima de la caja de moldeo, en este caso se utilizó una regleta como se observa en la figura:



Figura 4.71. Alisador de arena
(Fuente: Propia)

4.5.8. Cucharas

Se utiliza para destapar o agrandar los agujeros tanto de los alimentadores y respiraderos.

4.5.9. Balanza

Se utilizó para pesar la cantidad de carburante, inoculante y nodulizante necesaria para obtener hierro nodular.

5. COLADO, NODULIZADO Y OBTENCIÓN DE LA PIEZA

5.1. Obtención del cigüeñal, biela, y tapas

Una vez realizados los pasos previos como es el diseño, justificación del diseño, dimensionamiento de los sistemas de alimentación, cajas de moldeo, la simulación respectiva, y el cálculo de carga, se realiza la fabricación de las piezas mediante fundición.

Para el procedimiento de obtención de las piezas se escoge una pieza específica, y se detalla mediante imágenes, cada uno de los pasos que se siguió, para este caso el cigüeñal, esto con el fin de ser concisos y no extenderse demasiado, además para todas las piezas se realizó los mismos pasos.

5.1.1. Moldeo de los modelos

Como primer paso se procede a moldear los modelos previamente fabricados, para lo cual se utilizó arena sílica resina furánica 1% y catalizador 0.5%.



Figura 5.1. Mezclado de la arena de moldeo (Arena sílica, resina furánica 1%, y catalizador 0.5%) en máquina mezcladora
(Fuente: Propia)



Figura 5.2. Llenado de arena en la caja de moldeo del cigüeñal
(Fuente: Propia)



Figura 5.3. Compactación de la arena en maquina compactadora
(Fuente: Propia)



Figura 5.4. Moldes con arena macho y hembra
(Fuente: Propia)

Una vez realizado todos estos pasos el tiempo estimado de espera es de 10 a 15 min hasta que la arena se endurezca lo suficiente para poder realizar el respectivo desmoldeo.



Figura 5.5. Desmoldeo de las cajas
(Fuente: Propia)



Figura 5.6. Moldes de arena listos
(Fuente: Propia)

Ahora que ya se tiene los moldes de arena listos se procede a armarlos para dejarlos listos para el colado.



Figura 5.7. Armado de los moldes
(Fuente: Propia)



Figura 5.8. Molde de arena armado y con pesas
(Fuente: Propia)

Una vez que se tiene los moldes armados y listos se procede a preparar el metal líquido para el colado en los moldes.

5.1.2. Preparación de la colada

En esta sección se procede a detallar mediante imágenes la preparación del metal líquido previo a su colado en los moldes, la fundición que se debe obtener es nodular por lo que se requiere la adición de componentes extras para la obtención de la misma.

Los aditivos que se utiliza son ferro silicio magnesio como nodulizante, e inoculante IM22.



Figura 5.9. Adición de nodulizante FeSiMg
(Fuente: Propia)



Figura 5.10. Adición de inoculante IM22
(Fuente: Propia)

Ya realizado la preparación de la colada se procede a colar.

5.1.3. Colado

Con la colada lista se procede a colar sobre los moldes, verificando su correcto flujo y llenado.



Figura 5.11. Colado en el molde de arena del cigüeñal
(Fuente: Propia)



Figura 5.12. Llenado del molde y enfriamiento
(Fuente: Propia)

Ya colado y llenado el molde se procede a esperar un tiempo aproximado de 4 horas para poder desmoldear y verificar la pieza.

5.1.4. Piezas en bruto

Con los moldes colados y enfriados se procede a verificar las piezas obtenidas.



Figura 5.13. Cigüeñal en bruto obtenido
(Fuente: Propia)



Figura 5.14. Bielas en bruto obtenidas
(Fuente: Propia)



Figura 5.15. Tapas de rodamientos en bruto obtenidas
(Fuente: Propia)

5.1.5. Acabados finales

Con las piezas obtenidas se procede a darles un acabado superficial medio, mediante diferentes procesos que igualmente se detallaran mediante imágenes.

Acabados en la biela

Para la biela primeramente se procede a cortar los sistemas de alimentación.



Figura 5.16. Corte de los sistemas de alimentación de la biela
(Fuente: Propia)

Después de cortar los sistemas de alimentación se procede a esmerilar las rebabas que se encuentran alojadas en la superficie de cada biela.



Figura 5.17. Esmerilado de la biela
(Fuente: Propia)

Ya realizado ambos pasos se obtienen las siguientes piezas.



Figura 5.18. Acabado final de las bielas
(Fuente: Propia)

Acabados en las tapas de rodamientos

Para las tapas igualmente primero se procede a cortar el sistema de alimentación, posterior a esto se procede a torneado la superficie de la tapa.



Figura 5.19. Torneado de las tapas
(Fuente: Propia)

Ya realizado el torneado de las mismas se obtiene lo siguiente.



Figura 5.20. Tapa de rodamiento torneada
(Fuente: Propia)

Acabados en el cigüeñal

Para el cigüeñal se procede a cortar los sistemas de alimentación.



Figura 5.21. Corte de los sistemas de alimentación del cigüeñal
(Fuente: Propia)

Y como paso final se procede a molar las rebabas en la superficie.



Figura 5.22. Esmerilado de la superficie del cigüeñal
(Fuente: Propia)



Figura 5.23. Acabado final del cigüeñal
(Fuente: Propia)

5.2. Comprobación de la obtención de la fundición nodular

En este capítulo se procede a realizar la comprobación de los resultados empíricos que se obtuvo en el capítulo 3 sección 3.4 con los resultados que se obtuvo mediante los diferentes ensayos y análisis realizados.

Como primer paso para lo comprobación de la fundición nodular 80-55-06 se procede a realizar ensayos de tracción, este ensayo es indispensable para la comprobación de las propiedades mecánicas del material y con estas poder caracterizarlo.

Previamente al ensayo se procede a realizar probetas según la norma establecida para el tipo de material que se analiza, para este caso la norma que se utiliza es la ASTM A 536 la cual es específicamente para hierro nodular con la cual nos guiaremos y verificaremos las dimensiones establecidas para las respectivas probetas.

Se realiza la revisión respectiva de la norma y se verifica que como primer paso para la fabricación de las probetas se debe fundir un bloque con la misma colada que se

utilizó para las piezas, previo a esto se verifica las dimensiones según lo establece la norma.

5.2.1. Fabricación y ensayos de probetas según la norma ASTM A-536

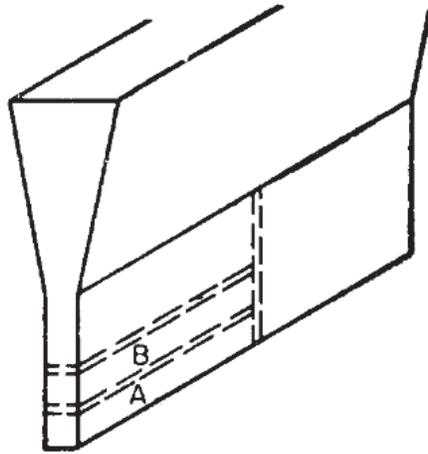


Figura 5.24. Bloque de fundición nodular según la ASTM A-536 (ASTM A-536, 2010)

Para las dimensiones del bloque se fabrica según lo establecido en la norma, para este caso se escogió un bloque para fundiciones de espesores que van desde 13 a 38 mm.

Dimensiones	Para fundiciones de espesores menores a 1/2 in (13mm)		Para fundiciones de espesores entre 1/2 in (13mm) a 1 1/2 in (38mm)		Para fundiciones de espesores de 1 1/2 in (38mm) y superiores	
	in	mm	in	mm	in	mm
A	1/2	13	1	25	3	75
B	1 5/8	40	2 1/8	54	5	125
C	2	50	3	75	4	100
D	4	100	6	150	8	200
E	7	175	7	175	7	175

Figura 5.25. Dimensiones de bloques para probetas
Fuente: (ASTM A-536, 2010)

Se procede a escoger este bloque tomando en cuenta las secciones más críticas de cada pieza, tales como el cuello de la biela y los muñones del cigüeñal, en la tapa no hay secciones perjudiciales ya que esta no va a sufrir cargas considerables que puedan afectar su vida útil y su funcionamiento.

Entonces con todos los pasos previos realizados se procede a fundir el bloque con la misma colada que se utiliza para las piezas

Los bloques se elaboran previamente en la empresa FUDIRECICLAR S.A con la misma colada que se utiliza para las piezas.



Figura 5.26. Bloque solidificado
(Fuente: Propia)



Figura 5.27. Bloque obtenido

(Fuente: Propia)

Con la obtención del bloque se procede a la manufactura del mismo para obtener las probetas, para garantizar los resultados se procedió a fundir 3 bloques para obtener la probetas necesarias para el estudio.

Según la norma establecida se procede a cortar el bloque con una sierra mecánica en pequeños bloques para después maquirarlos con el torno.



Figura 5.28. Corte de los bloques
(Fuente: Propia)

Ya con las partes extraídas del bloque se procede al maquinado con lo cual se le da un cilindrado previo al maquinado de las probetas.



Figura 5.29. Cilindrado del bloque
(Fuente: Propia)

Una vez cilindrados los bloques extraídos se procede a darle forma a la probeta según las dimensiones que establece la norma ASTM A-536.

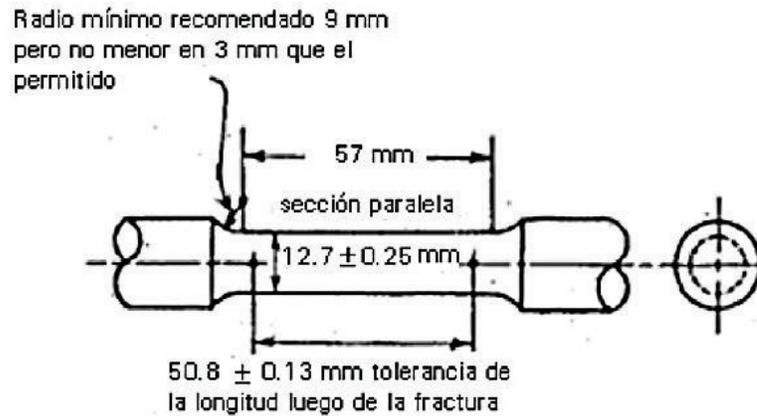


Figura 5.30. Dimensiones de la probeta
(ASTM A-536, 2010)

Según la norma establecida se debe realizar un roscado de 3/8" en el extremo de la probeta, esto con el fin de embonar la probeta a la máquina de ensayos de tracción.



Figura 5.31. Probeta final obtenida
(Fuente: Propia)

Como se realizó 3 bloques, se extrajo 5 probetas de los mismos, qué ayuda en el análisis final de la caracterización de la fundición.



Figura 5.32. Probetas finales obtenidas
(Fuente: Propia)

Con las probetas listas se procede a realizar los ensayos de tracción, metalográficos y químico de cada una.

5.2.2. Ensayos de tracción

Para los ensayos de tracción se dispone de una maquina universal de ensayos.



Figura 5.33. Maquina I de ensayos a tracción
(Fuente: Propia)

Se procede a embonar las mordazas en la máquina.



Figura 5.34. Mordazas
(Fuente: Propia)

Después se procede a enroscar la probeta en las mordazas.



Figura 5.35. Enroscado de la probeta
(Fuente: Propia)



Figura 5.36. Probeta correctamente colocada
(Fuente: Propia)

Con la probeta correctamente colocada se procede a realizar el ensayo de tracción, se ensayan las 5 probetas realizadas.

Probeta	Imagen	Probeta	Imagen
1		2	
3		4	
5			

Figura 5.37. Secciones de rotura de las probetas
(Fuente: Propia)

Análisis de resultados de ensayos de tracción

Una vez fracturadas las probetas se obtienen los siguientes graficas de esfuerzo vs deformación.

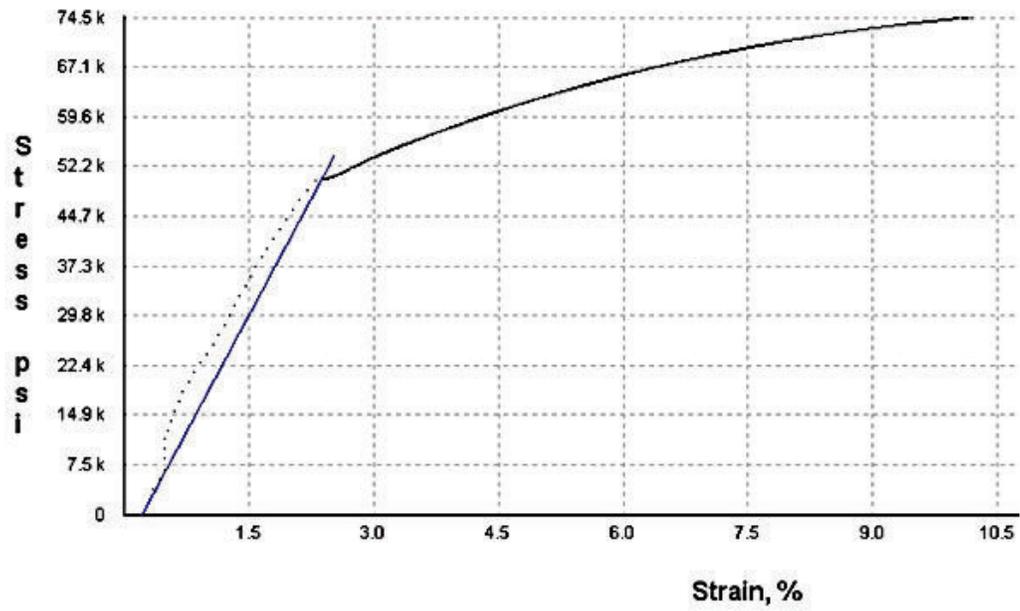


Figura 5.38. Curva esfuerzo vs deformación de la probeta 1
(Fuente: Propia)

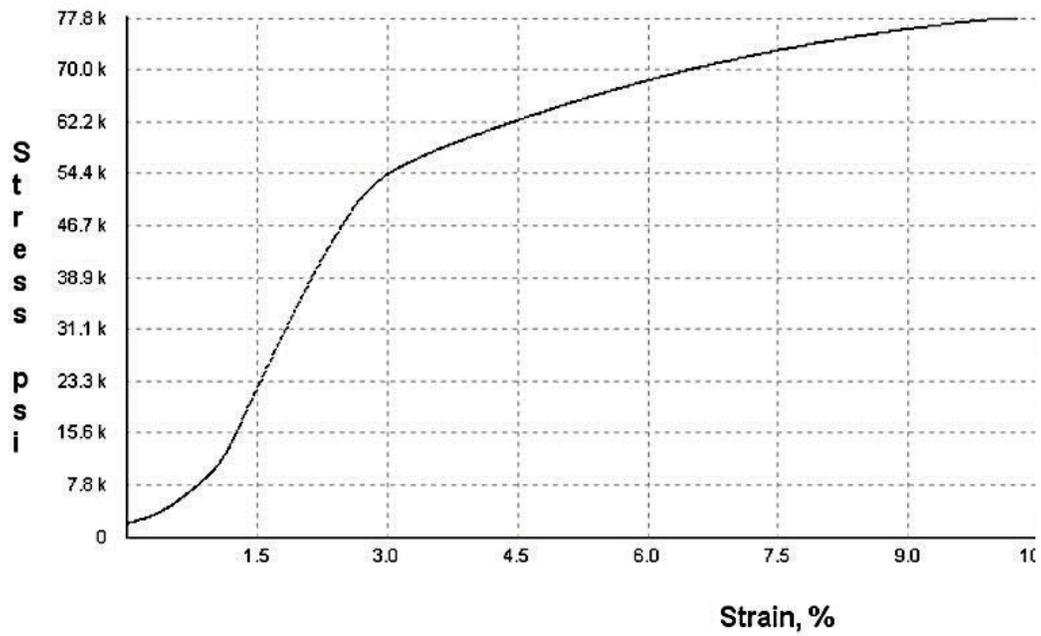


Figura 5.39. Curva esfuerzo vs deformación de la probeta 2
(Fuente: Propia)

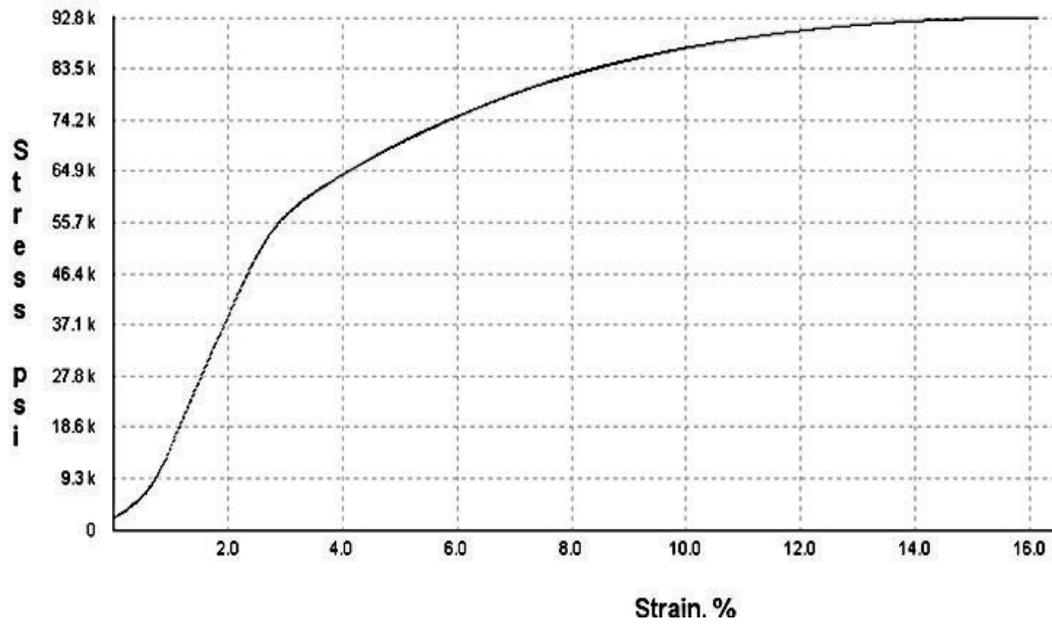


Figura 5.40. Curva esfuerzo vs deformación de la probeta 3
(Fuente: Propia)

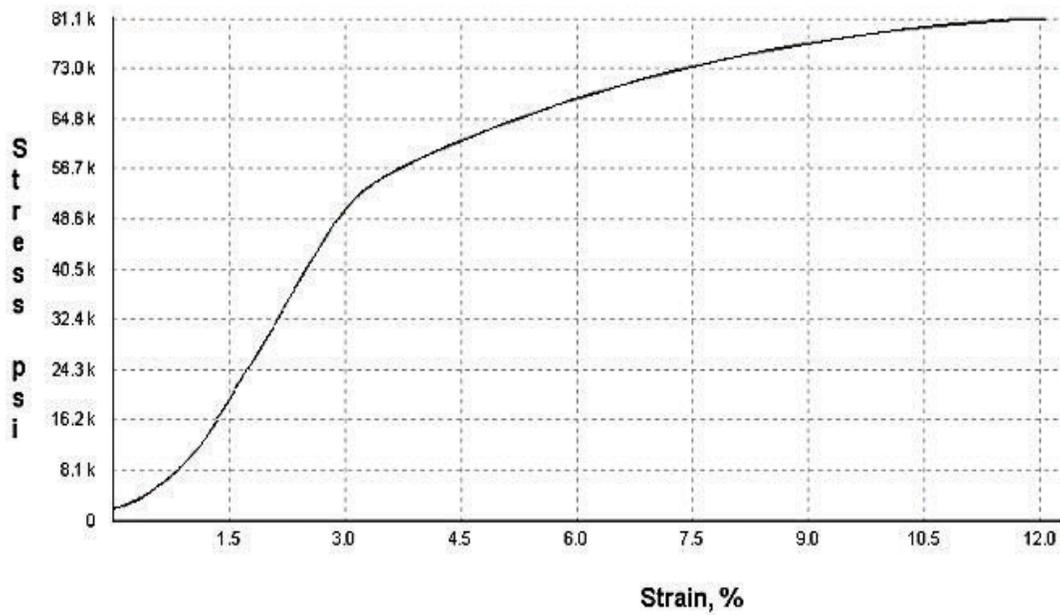


Figura 5.41. Curva esfuerzo vs deformación de la probeta 4
(Fuente: Propia)

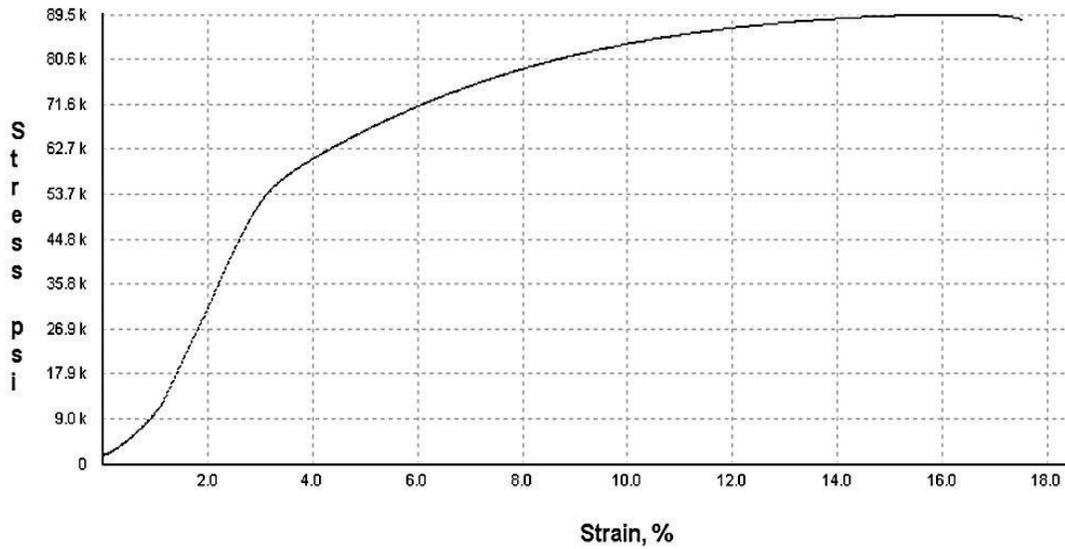


Figura 5.42. Curva esfuerzo vs deformación de la probeta 5
(Fuente: Propia)

Las gráficas obtenidas expresan las siguientes propiedades mecánicas.

Tabla 5.1. Propiedades mecánicas de las probetas obtenidas.

Muestra	Diámetro Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% Elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa	
T-1	12,64	14500	64499	50,2	346	74,5	514	5,6
T-2	12,73	15350	68280	53,2	367	77,8	536	4,4
T-3	12,71	18250	81180	56,5	389	92,8	640	9,1
T-4	12,71	15950	70949	54,5	376	81,1	559	5,6
T-5	12,55	17170	76376	55,7	384	89,5	617	10,9

(Fuente: Propia)

Nota: Todos los ensayos se realizaron en el laboratorio de análisis y esfuerzos de la Escuela Politécnica Nacional, el informe completo se lo presenta en el ANEXO 5.

Con las 5 probetas ensayadas se procede a escoger las 3 probetas que obtuvieron los mejores resultados con respecto a la norma ASTM A-536, y se los tabula.

Tabla 5.2. Propiedades mecánicas de las 3 mejores probetas.

Probeta	Diámetro Promedio	Carga máxima registrada		Límite de fluencia		Resistencia a la tracción		% Elongación en 50 mm
	mm	lbf	N	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa	
T-3	12,71	18250	81180	56,5	389	92,8	640	9,1
T-4	12,71	15950	70949	54,5	376	81,1	559	5,6
T-5	12,55	17170	76376	55,7	384	89,5	617	10,9

(Fuente: Propia)

Con los resultados obtenidos se realiza una comparación con las propiedades mecánicas estándares según la norma ASTM A-536 detallado en el Capítulo 3, Tabla 3.3. La clase de fundición que se utiliza para realizar los cálculos de diseño es la 80-55-06 con resistencia a la tracción de 80ksi, límite fluencia 55ksi y elongación del 6%.

Se escogen las probetas 3,4 y 5 por obtener las mejores propiedades mecánicas de las 5 probetas analizadas. Los valores de tracción, fluencia, dureza, y elongación que se obtienen en las tres probetas indicadas ayudan para la caracterización del material que se desea obtener según la norma ASTM A-536.

Para verificar en un 100% la aleación se procede a verificar los nódulos incrustados en la matriz del material mediante un ensayo metalográfico.

5.2.3. Ensayos metalográficos

De las probetas fracturadas se extrae muestras para los ensayos metalográficos, las muestras se las extrae de las zonas de fractura, es decir de las secciones en donde el material fallo.



Figura 5.43. Área de fractura de las probetas
(Fuente: Propia)

Se puede apreciar ciertas franjas oscuras en algunas de las probetas, esto puede influir en sus propiedades mecánicas, a simple vista se podría decir que en las probeta de la figura 5.43 existe una acumulación excesiva de carbono concentradores de esfuerzos, lo que afecta el porcentaje de nodularidad y sus propiedades mecánicas.

Haciendo este breve análisis se procede a cortar las áreas de fractura de cada probeta para extraer las muestras respectivas.



Figura 5.44. Muestras para metalografía
(Fuente: Propia)

Lijado

Extraídas las muestras se realiza el lijado, en la máquina de lijado y pulido automática de laboratorio de metalografía de la Escuela Politécnica Nacional.

Previo al lijado se debe sumergir las probetas en pequeñas matrices llenas de resina para obtener la forma adecuada para la matriz de la máquina.



Figura 5.45. Muestras en resina
(Fuente: Propia)

Una vez que la resina se haya endurecido se procede a desmoldar las probetas de las matrices.



Figura 5.46. Desmoldeo de las probetas
(Fuente: Propia)

Una vez desmoldadas las probetas se coloca en la matriz de la máquina de lijado y pulido automática marca metkon capacidad 60 N y 3000rpm.



Figura 5.47. Máquina automática de lijado y pulido
(Fuente: Propia)

Con todas las muestras listas se coloca las 5 probetas en la matriz de la máquina, como se muestra a continuación.



Figura 5.48. Muestras en la matriz
(Fuente: Propia)

Con todo listo se procede a realizar el lijado de las muestras, primero colocando en el plato una lija de número 600 y después una lija de número 1200.



Figura 5.49. Lijado de las muestras
(Fuente: Propia)

Continuamente se debe aplicar un lubricante para evitar el desgaste rápido de la lija, para lo cual se usa Water-based, Diamond lubricant.

Pulido

Con todas las muestras lijadas se procede a realizar el pulido correspondiente, en la misma máquina.

Primero se coloca un paño en el plato de la máquina, y se realiza el mismo procedimiento que para el lijado.

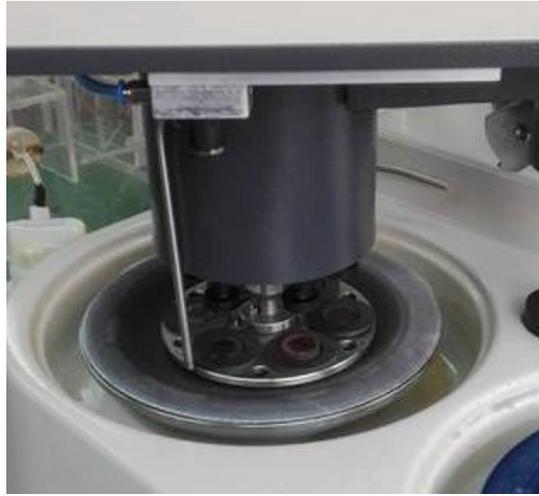


Figura 5.50. Pulido de las muestras
(Fuente: Propia)

Con la muestra lijada y pulida se obtiene las siguientes superficies.

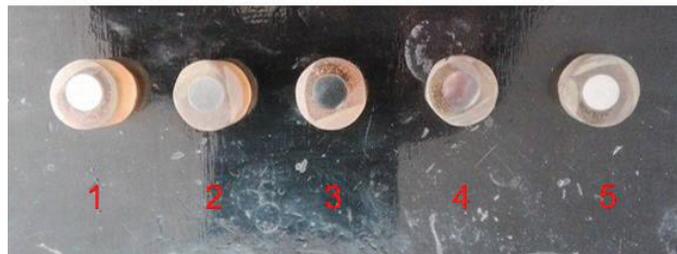


Figura 5.51. Muestras pulidas
(Fuente: Propia)

Las superficies se encuentran lijadas y pulidas lo suficiente para ser analizadas en el microscopio.

Atacado de las muestras

Con las muestras lijadas y pulidas se realiza un ataque con nital al 10% para poder apreciar la matriz de las muestras.



Figura 5.52. Atacado de las muestras
(Fuente: Propia)



Figura 5.53. Muestras atacadas
(Fuente: Propia)

La coloración azulada que adquieren las probetas es un efecto que genera el nital comprobando que están correctamente atacadas.

Análisis metalográfico

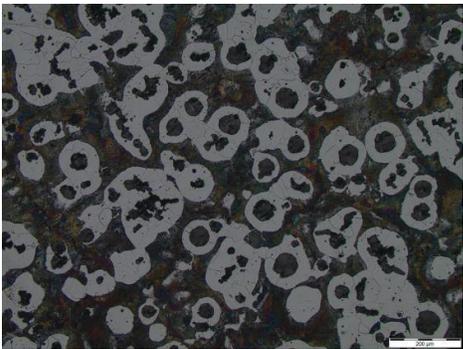
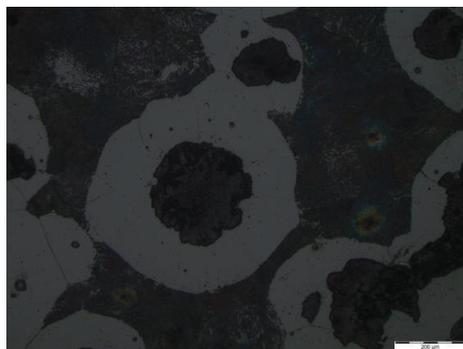
Con todas las muestras lijadas, pulidas y atacadas, se procede a visualizar la microestructura de cada una de las muestras en el microscopio metalográfico marca OLIMPUS GX41.



Figura 5.54. Microscopio metalográfico
(Fuente: Propia)

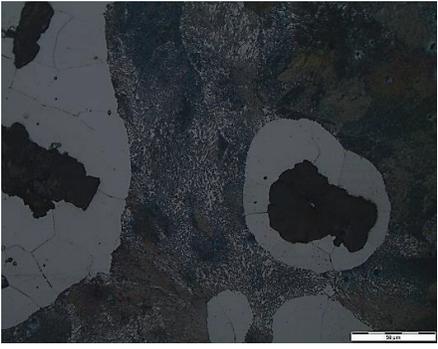
Visualizando en el microscopio se obtienen las siguientes metalografías.

Tabla 5.3. Metalografía de la muestra 1.

Muestra	Microestructura 100X	Microestructura 500X
1	 <p data-bbox="423 1444 886 1625">Se observa que la nodularidad no es tan Uniforme teniendo un porcentaje de nodularidad del 80%, y una matriz Ferrítica-Perlitica</p>	 <p data-bbox="930 1444 1393 1577">Para este caso se tienen un aumento en la imagen para poder comprobar la nodularidad.</p>

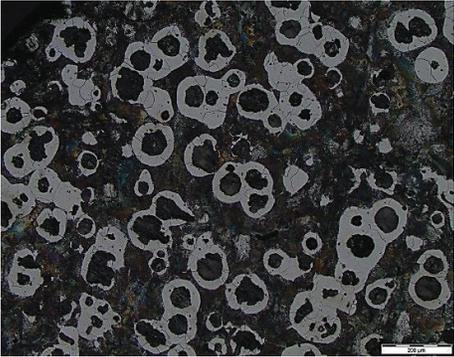
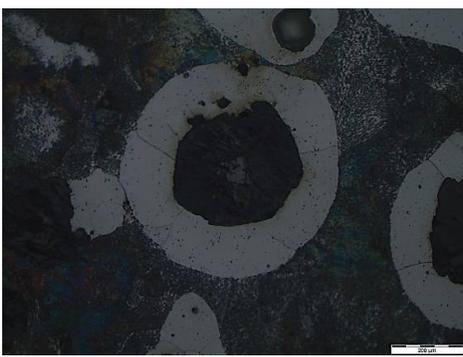
(Fuente: Propia)

Tabla 5.4. Metalografía de la muestra 2.

Muestra	Microestructura 100X	Microestructura 500X
2	 <p data-bbox="488 1052 943 1262">En esta microestructura se observa que la nodularidad no es tan uniforme, se presenta una matriz ferrítica-perlítica, se tiene partes vermiculares.</p>	 <p data-bbox="971 1052 1425 1157">En la microestructura aumentada se ve que el nódulo no es tan esferoidal.</p>

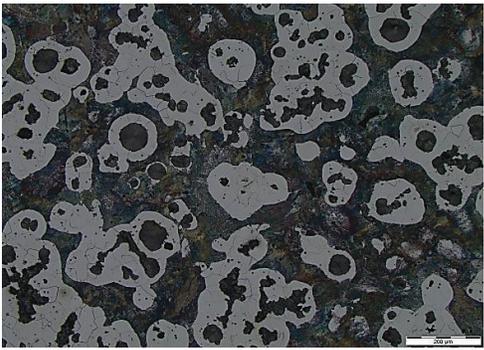
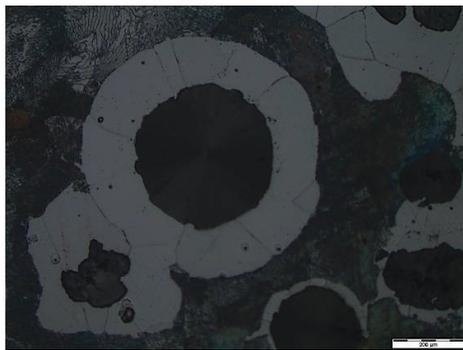
(Fuente: Propia)

Tabla 5.5. Metalografía de la muestra 3.

Muestra	Microestructura 100X	Microestructura 500X
3	 <p data-bbox="479 661 933 882">En esta microestructura se observa que la nodularidad está bastante uniforme, aunque existe partes vermiculares presenta una matriz ferrítica - perlítica.</p>	 <p data-bbox="974 661 1437 882">La uniformidad del nódulo es bastante esferoidal.</p>

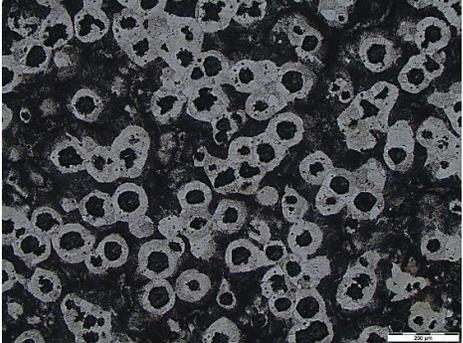
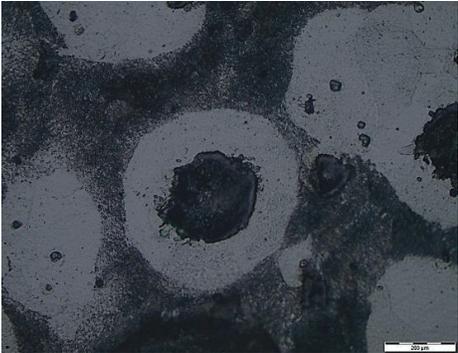
(Fuente: Propia)

Tabla 5.6. Metalografía de la muestra 4.

Muestra	Microestructura 100X	Microestructura 500X
4	 <p data-bbox="422 1665 906 1801">En esta metalografía se observa una matriz ferrítica- perlítica, con nódulos esferoidales y también vermiculares.</p>	 <p data-bbox="941 1665 1404 1801">Se observa que el nódulo es bastante esferoidal.</p>

(Fuente: propia)

Tabla 5.7. Metalografía de la muestra 5.

Muestra	Microestructura 100X	Microestructura 500X
5	 <p data-bbox="418 699 914 877">Se puede observar que la nodularidad es bastante uniforme y un porcentaje de nódulos del 100% presenta una matriz ferrítica- perlítica.</p>	 <p data-bbox="935 722 1401 800">Al aumentar la imagen se ve que el nódulo es bastante esferoidal.</p>

(Fuente: propia)

Analizando las 5 muestras se comprueba que el proceso de nodulización fue el adecuado, aunque en algunas de las muestras el porcentaje de nodulización no está al 100% de modularidad según la norma ASTM A-247.

Para poder elegir las 3 mejores muestras se compara con las microestructuras estandarizadas de la norma ASTM A-247 como se muestra a continuación.

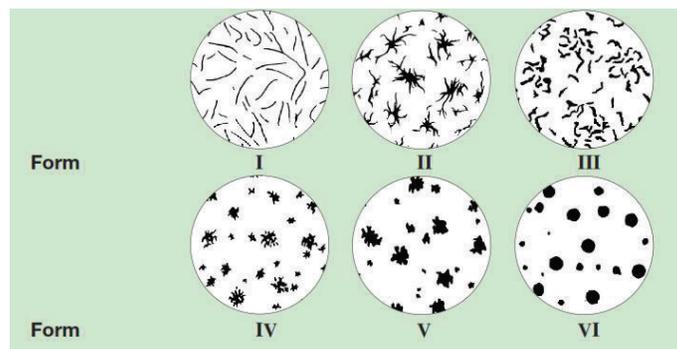


Figura 5.55. Microestructuras ASTM A-247 (ASTM A-247, 2010), (Elken foundry, 2013)

Para analizar las microestructuras se escoge la forma VI, que corresponde a fundición nodular y se asemeja más a las microestructuras que se obtuvo.

Con la forma VI se tiene las siguientes dimensiones de nódulos a 100X de magnificación.

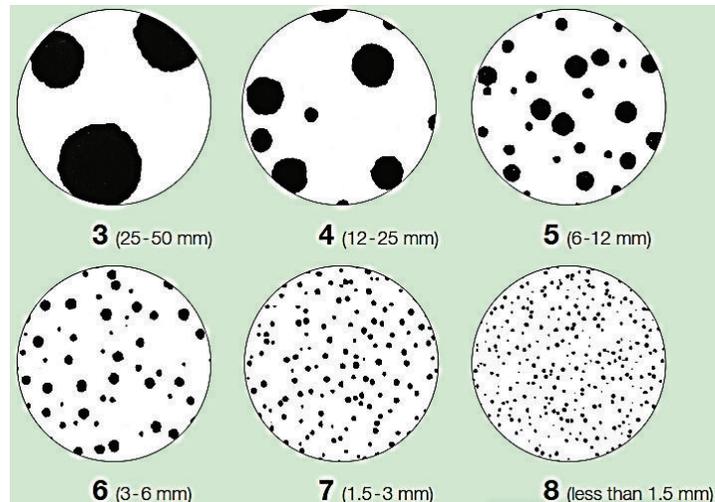


Figura 5.56. Dimensiones de nódulos
(Elken foundry, 2013)

La comparación de las microestructuras obtenidas en el ensayo metalográfico con la norma ASTM A-247, y la (AFS Dúctil Iron Quality control) se detalla a continuación.

Para todas las muestras se hace un breve análisis de uniformidad de nódulo, tamaño de nódulo y porcentaje de nodularidad. De acuerdo a la norma ASTM A-247 el tamaño que se considera para la comparación es el mismo para todas las muestras, que corresponde a un tamaño de 6 a 12 mm por nódulo.

Visualizando la matriz en todas las muestras se aprecia que es una matriz ferrítica perlítica.

Para la muestra 1 el porcentaje de nodularidad que se obtiene es de un 80%, y la uniformidad de los nódulos es bastante aceptable.

Para la muestra 2 el porcentaje de nodularidad disminuye a un 70%, e igualmente la uniformidad disminuye tendiendo a ser una fundición vermicular.

Para la muestra 3 el porcentaje de nodularidad se encuentra en un 90%, con lo cual también la uniformidad del nódulo mejora pudiendo apreciar una mejor distribución de los nódulos por toda la matriz.

En la muestra 4 la nodularidad se reduce a un 70% junto con la geometría del nódulo, visualizando partes vermiculares en la matriz.

Por último, en la muestra 5 se tiende a tener un 100% de nodularidad, la uniformidad y distribución del nódulo es la mejor de todas las muestras.

La comparación grafica de las muestras se muestra en el ANEXO 6.

5.2.4. Análisis químico

Para el análisis químico se extrae 5 muestras de las probetas que se realizó anteriormente.



Figura 5.57. Muestras para análisis químico
(Fuente: Propia)

La cuantificación de los metales presentes en la muestra se lo realiza empleando el espectrómetro de chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN.



Figura 5.58. Espectrómetro de chispa
(Fuente: Propia)

Los resultados obtenidos son los siguientes.

Tabla 5.8. Porcentajes de metales en la aleación obtenida.

Metales	Probeta 1 (%)	Probeta 2 (%)	Probeta 3 (%)	Probeta 4 (%)	Probeta 5 (%)
Carbono C	4,401	5,40	5,40	5,40	4,416
Silicio Si	2,319	2,518	2,408	2,266	2,816
Manganeso Mn	0,508	0,401	0,462	0,339	0,490
Fósforo P	0,473	0,048	0,103	0,044	0,057
Azufre S	0,018	0,020	0,024	0,050	0,037
Cromo Cr	0,085	0,065	0,122	0,050	0,153
Níquel Ni	0,024	0,018	0,023	0,028	0,029
Cobre Cu	0,229	0,268	0,158	0,212	0,211
Aluminio Al	0,011	0,027	0,018	0,038	0,014
Cerio Ce	0,039	0,014	0,012	0,020	0,030
Magnesio Mg	0,058	0,037	0,068	0,046	0,085
Pomo Pb	0,014	0,016	0,026	0,036	0,026
Antimonio Sb	0,030	0,011	0,006	0,018	0,020
Hierro Fe	91,66	91,08	97,27	91,35	91,58

(Fuente: Propia)

Visualizando los porcentajes de carbono silicio magnesio y azufre y comparando con la norma ASTM A-536 estos valores están fuera del rango que establece la norma, para la fundición nodular 80-55-06.

EL error de porcentajes en el análisis químico se debe más a un error de calibración del equipo de análisis, ya que esto no concuerda con las metalografías que se obtuvo las cuales nos dan nódulos con un alto porcentaje de modularidad los cual significa que los porcentajes de carbono deben estar dentro de los rangos establecidos según las norma ASTM A-536.

Nota: El análisis químico final de la fundición, se lo realizo en el laboratorio de Metalurgia extractiva de la Escuela Politécnica Nacional el informe completa se lo presenta en el ANEXO 7.

5.3. Elaboración del procedimiento tecnológico de construcción de las diferentes piezas

Las hojas de procesos se las presenta en el ANEXO 8

Análisis de resultados

En base al diseño realizado se tiene que el cigüeñal no va a fallar por torsión ni por fatiga, además el factor de seguridad de la biela a fatiga es conservador, garantizando el funcionamiento correcto de estos elementos dentro de la bomba triplex.

Para poder obtener los elementos libres de defectos que se producen durante el colado se diseñó el sistema de alimentación para cada uno de los elementos, para poder comprobar que estos resultados sean los correctos se realizó la simulación del cigüeñal la biela y la tapa en un programa basado en elementos finitos, con lo que se observó que el sistema de alimentación está bien diseñado debido a que las piezas obtenidas no presentan ningún defecto en ellas.

Se realizó 5 probetas para realizar los ensayos de tracción, metalográfico y químico para poder caracterizar el material de fundición nodular:

Para la primera probeta los resultados no están dentro de las normas establecidas, la resistencia de tracción fue de 74.5 Ksi, la microestructura de esta se observa claramente que corresponde a la fundición nodular con un porcentaje de nodularidad de un 80%, y en el análisis químico los porcentajes de metales en la probeta no están según la norma establecida, esto se debe que para fundiciones no es el mejor método de realizar este análisis por medio del espectrómetro de chispa.

En el caso de la probeta número dos, los resultados se acercan mas a los parámetros que debe cumplir la fundición nodular, teniendo una resistencia a la tracción de 77,8 Ksi, la nodularidad que se observar en la microestructura es de un 70%, los porcentajes de metales en la probeta, para el caso del carbono se tiene un porcentaje bastante alto, esto es debido a que el ensayo no es el correcto para fundiciones nodulares.

La probeta número tres presenta mejores resultados que las anteriores con una resistencia a la tracción de 92,8 Ksi, un porcentaje de nodularidad del 90%, los porcentajes de metales en la probeta están dentro del rango excepto el carbono, debido a que el ensayo no es el adecuado cuando se trabaja con fundiciones.

Para la probeta número cuatro se tiene los resultados bastante aceptables con una resistencia a la tracción de 92,8 Ksi, con una nodularidad de 70%, los porcentajes de elementos en la aleación están dentro del rango que debe tener la fundición nodular excepto el carbono que su porcentaje es de 5,40%.

Por último se tiene la probeta número cinco la cual presente mejores características que las anteriores, con una resistencia a la tracción 89,5 Ksi, el porcentaje de nodularidad es del 100%, para el caso del porcentaje de los elementos en la aleación se tiene mejores resultados que los anteriores, el único porcentaje que no está dentro del rango es el del carbono que tienen 4,416%.

Analizado cada una de las probetas, la aleación que se utilizó para obtener los elementos de la bomba, es la aleación de la probeta número cinco, porque es la más óptima y los valores obtenidos en los ensayos son los que más se aproximan de acuerdo a las normas establecidas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1. Conclusiones

- Luego de los cálculos de diseño realizados se comprueba que las dimensiones y forma geométrica del cigüeñal, biela y tapas de los rodamientos, cumplen con los estándares de fabricación, garantizando su óptimo funcionamiento con un factor de seguridad mayor al establecido.
- La resistencia mecánica del cigüeñal y de la biela durante su funcionamiento se garantizan con los resultados que se obtienen en los ensayos de tracción tomando en cuenta los 3 mejores resultados de los 5, con 81 a 93 kpsi de resistencia máxima a la tracción, y 54 a 57 kpsi de límite de fluencia, mientras que los datos que se utilizan para la justificación de dimensiones y factores seguridad son de 80kpsi de resistencia máxima a la tracción, y 50kpsi de límite de fluencia, por lo que el material va a soportar más de lo establecido en el diseño.
- El ensayo de tracción para las 2 primeras probetas no cumple con las especificaciones de la fundición nodular 80-55-06, esto se debe a que la velocidad de carga no era la adecuada además existen zonas de fractura con porcentajes elevados de carbono, además en las metalografías se visualiza que la uniformidad de los nódulos y su distribución a través de la matriz no es la más adecuada.
- Los sistemas de alimentación calculados, ubicados adecuadamente y simulados en un software, garantizan la obtención de piezas sin ningún tipo de defecto, lo que cumple con las especificaciones del diseño, los datos de simulación fueron aplicados en la ejecución del modelo.
- La simulación realizada de las diferentes piezas a fabricar; ayuda a optimizar materia prima que se utiliza en el proceso de fundición, además garantiza la obtención de piezas bien definidas geométricamente y sin ningún tipo de defecto en la primera fundición. Para la ubicación correcta de cada elemento de los sistemas de alimentación se procede a verificar en la simulación el paso de la colada y la velocidad de enfriamiento de la pieza y de los sistemas de alimentación como se lo aprecia en la simulación del cigüeñal, y de todas las piezas,
- El uso de un respiradero- mazarota ayuda al enfriamiento de la pieza antes que la mazarota con lo cual elimina cualquier tipo de acumulación de gases en el interior de la pieza, eliminando así cualquier porosidad interna.

- Los porcentajes de carbono que se obtienen en el análisis químico son muy elevados con respecto a la norma ASTM A-536, esto no refleja en si la composición correcta de la fundición obtenida ya que no concuerdan con las metalografías que se obtienen, entonces la razón de estos porcentajes elevados es a la mala calibración o ubicación de la muestra durante el chispazo del espectrómetro, ya que existen zonas en donde los nódulos se aglomeran en grandes cantidades, otra razón es el análisis que se realizó no es el correcto cuando se trabaja con fundiciones, las muestras deben ser analizadas en caliente, en el instante que se obtiene la colada, con este método se obtiene un análisis mucho más exacto.
- De acuerdo a los ensayos realizados de las 5 probetas se considera que la funcionalidad de las piezas son las correctas, cumpliendo así las necesidades del cliente.
- En la rotura de las probetas se visualizó que existió un concentrador de esfuerzos, en donde el efecto de nodulización no se produjo totalmente en el hierro base, Figura 5.43.
- Las probetas 3,4 y 5 obtienen los mejores resultados en tracción, y esto se los corrobora con los ensayos metalográficos, los nódulos poseen una mejor uniformidad y su distribución es muy aceptable comparando con la norma ASTM A-247.
- La matriz que se obtiene es Ferrítica perlítica, esto debido al manganeso que estabiliza la perlita y a su bajo porcentaje el cual garantiza la formación de perlita, para lo cual no debe exceder el 1 %, y lo que se obtiene en el análisis químico es un porcentaje de Mn de 0,34 a 0,5 %, por lo que esta afirmación es correcta.
- Las propiedades mecánicas, metalográficas y químicas de las tres últimas probetas se seleccionan como las más óptimas de las 5, para la obtención de una aleación nodular 80.55-06 que se utiliza para fabricar por fundición elementos mecánicos en este caso cigüeñal, bielas, y tapas, garantizando su funcionamiento con los cálculos realizados y resultados obtenidos.

6.2. Recomendaciones

- Cuando se realice la colocación del canal alimentador en el modelo, siempre se lo debe hacer de forma que garantice una buena solidificación, para lo cual se recomienda colocar del plano divisor hacia arriba.
- Para obtener mejores resultados en el ensayo de tracción se debe primeramente regular la velocidad de carga de acuerdo a la norma establecida para cada aleación.
- Para el desmoldeo de las diferentes piezas tener en cuenta el tiempo estipulado en la hoja de procesos, para no dañar el molde.
- En el momento que se realice el ensamble de los moldes macho y hembra observar si cuenta con los noyós dispuestos para cada una de las piezas.
- Para garantizar mejores resultados en el análisis químico se importante realizar este ensayo con el proceso adecuado para lo que son fundiciones; esto se la hace con un espectrómetro en caliente.
- Una vez que se tiene la colada del hierro base siempre se tendrá que primero realizar el proceso de inoculación para posteriormente realizar el proceso de nodulización, garantizando así que la aleación que se obtendrá sea la correcta.

BIBLIOGRAFIA.

- AFS Dúctil Iron Quality control, C. (n.d.). Ductile Iron microestructures rating chart. *Ductile Iron microestructures rating chart*, 1.
- ASTM A-247, A. S. (2010). Standard Test Method for evaluating the microestructure of graphite in iron castings. *Standard Test Method for evaluating the microestructure of graphite in iron castings*, 1-5.
- ASTM A-536, A. S. (2010). Standard Specification for ductile iron castings. *Standard Specification for ductile iron castings*, 1-2.
- Capello, E. (1980). *Modelos*.
- CASTRO, I. G. (2009). *FUNIDCIONES*. MEXICO.
- Cuñez David, G. S. (2012). *Selección y fabricación en fundición gris de dos tipos de quemadores industriales a gas*. Quito: EPN.
- Elken foundry, p. (2013). Graphite Structures in Cast Irons. *Graphite Structures in Cast Irons*, 1.
- FUNDIRECICLAR S.A. (2017). *Análisis químico*. Quito.
- Goyos, L. (1985). Tecnología de la fundición. In L. Goyos, *Tecnología de la fundición*. Habana: ISPJAE.
- Guerra, J. L. (2012). FABRICACION DE FUNDICION NODULAR. *FABRICACION DE FUNDICION NODULAR*, 1-111.
- Hernandez, J. R. (2010). *Fatiga*. Lima.
- Manuel Viejo Zubicaray, J. F. (2003). *Diseño teorías, Diseño y aplicaciones*. Mexico: Limusa S.A.
- Matek, R. y. (1994). *maschinenelemente*. Berlin: Anflage.
- McNaughton, K. (2005). *Bombas Selección*. Mexico: McGraw - Hil.
- METAL SERVICES METALES CATALUNYA, S. (n.d.). FUNDICIÓN NODULAR Y PERLÍTICA. *metal service*, 2.
- Nisbett, R. G. (2008). DISEÑO EN INGENIERIA MECANICA DE SHIGLEY. In R. G. Nisbett, *Apendice A(Gráficas de factores de concentracion de esfuerzos kf)*. Mexico: McGraw Hill.

Rao, P. (2013). *Manufacturing Tecnology Vol1 Foundry*. India: McGrawhill.

Titov, N. (1981). *Tenologia del proceso de fundicion*. Moscu: Mir Moscu.

Vivanco, R. A. (2006). *Diseño y construccion de sistema de rueda hidraulica - Bomba*.
Quito.

Zambrano, V. G. (1980). *Obtencion de fundicion nodular ferritica*. Quito.

ANEXOS.

ANEXO 1

Resultados:

No DE INFORME:
MUESTRA ID: A-030-12-17 AFINO
METODO ENSAYO: Fe-20-F
NORMA A COMPROBAR:

FECHA ANALISIS: 21/02/2017
HORA ANALISIS: 13:03:53

NOTAS/OBSERVACIONES/CLIENTE:

	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	Al %	Cu %
Value	3,64	1,77	0,243	0,0150	0,0170	0,149	0,0480	<0,00200	0,00100	0,0670
	Mg %	V %	W %	Mg %	Fe %					
Value	<0,00100	<0,00100	0,0120	<0,00100	93,8					

Medido por:

Revisado por:

Firma:

Firma:

Nombre:

Nombre:

ANEXO 2

TECHNICAL DATA

IM 22



Rua: Salvador Roberto, nº1963 - Centro
Cep: 39260 - 000 - Várzea da Palma - Minas Gerais - MG
Tel: 55 38 3731-1451 - Fax: 55 38 3731-1511
E-mail: trading@trablin.com.br

For Grey and Ductile Iron

Chemical Analysis:

Silicon	60	-	67%
Calcium	1	-	1.5 %
Barium	1.8	-	3.0 %
Zirconium	5	-	8%
Manganese	5	-	8%
Aluminium			2% max

Melting range: 1280 ÷ 1320°C

Sizing Mesh Tyler: 100 x 28M
28 x 6M
6x 4M

ANEXO 3



FUNDICIÓN NODULAR y PERLÍTICA



METALSERVICE METALES CATALUNYA, S.L.
C/ AUSIAS MARC 144 - 08013 BARCELONA -
Tel. 93 246 90 96 Fax 93 246 91 65
www.metal-service.net



Los datos técnicos y explicativos han sido facilitados por Fabricantes, los cuales son considerados únicamente como enunciativos, en ningún caso son responsabilidad de METALSERVICE

Página 1

FUNDICIÓN NODULAR PERLÍTICA Y FUNDICIÓN GRIS PERLÍTICA

Barras cilíndricas, cuadradas y rectangulares – Perlítica – Nodular

BARRAS DE FUNDICIÓN GRIS PERLÍTICA

EQUIVALENCIAS INTERNACIONALES							PROPIEDADES MECANICAS		
UNE 36 - 111	UNI 5007	MEE- HANITE	BS 1452	DIN 1691	ASTM A-48	ISO R-185	DUREZA BRINELL (HB-30)	RESISTENCIA N/mm ²	
								Tracción (Rm)	COMPRES. (Rc)
*FG-25	G-25	GD-250	Grado 17	GG-25	Grado 35	Grado 25	180-220	250	900
FG-30	G-30	GB-300	Grado 20	GG-30	Grado 45	Grado 30	190-230	300	1050
FG-35	G-35	GA-350	Grado 23	GG-35	Grado 50	Grado 35	200-240	350	1150

BARRAS DE FUNDICIÓN NODULAR PERLÍTICA

EQUIVALENCIAS INTERNACIONALES							PROPIEDADES MECANICAS		
UNE 36 - 118	UNI 4544	MEE- HANITE	BS 2789	DIN 1693	ASTM A-536	ISO R-1083	DUREZA BRINELL (HB-30)	RESISTENCIA N/mm ²	
								Tracción (Rm)	COMPRES. (Rc)
FGE 38-17	GS 400-12	SF 400	27-12	GG-40	60-40-18	400-12	160-210	400	800
FGE 50-7	GS 500-7	SFP 500	32-7	GG-50	65-45-18	500-7	180-230	500	900
FGE 60-2	GS 600-3	SPF 600	37-3	GG-60	80-55-06	600-3	200-260	600	1000
FGE 70-2	GS 700-2	SP 700	42-2	GG-70	100-70-03	700-2	220-280	700	1100

- Largos comerciales de 1 y 3 metros Bajo demanda largos de hasta 4 metros.
- Servicio de corte a medida
- Tolerancia sobre el peso teórico -0% +3%
- Para barras huecas, consúltenos

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y TÉCNICAS			
Resistencia a la tracción Kg./mm ²	25-30	Módulo de elasticidad	12.000
Resistencia a la compresión Kg./mm ²	100-130	Limite de elasticidad Kg./mm ²	12
Resistencia al cizallamiento	0.9 Rt	Alargamiento a la rotura	int. a 2%
Resistencia a la flexión Kg./mm ²	30-50	Limite fatiga a torsión Kg./mm ²	12-17
Resistencia probeta entallada	débil	Peso específico Kg./dm ³	7,2
Resistividad eléctrica MΩ/cm ²	60-90	Dureza HB	160-120
		Temperatura temple OC aceite	850-900
		Temperatura revestido: como fundición clásica	

ANEXO 4

PLANOS

ANEXO 5

ENSAYOS DE TRACCIÓN

ANEXO 6

TABLA COMPARATIVA DE METALOGRAFIAS

ANEXO 7

ANALISIS QUIMICO

ANEXO 8

HOJAS DE PROCESOS

