



Universidad
Industrial de
Santander

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ÉMBOLO DE UN MOTOR DE DOS TIEMPOS
DE PEQUEÑA CILINDRADA PARA APLICACIÓN AGRÍCOLA**

STIVEN FERNANDO CABRA BRIJALDO

WILFRAN MANUEL SOCARRAS VILORIA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ÉMBOLO DE UN MOTOR DE DOS TIEMPOS
DE PEQUEÑA CILINDRADA PARA APLICACIÓN AGRÍCOLA**

STIVEN FERNANDO CABRA BRIJALDO

WILFRAN MANUEL SOCARRAS VILORIA

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director:

**PH D. JORGE LUIS CHACÓN VELASCO
Ingeniero Mecánico, Ph.D.**

Co-Director:

**Ms. C. RICARDO ALFONSO JAIMES ROLÓN
Ingeniero Mecánico, Ms.C.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS	18
1.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2. CARACTERIZACIÓN DEL ÉMBOLO DEL MOTOR SHINDAIWA S450EC1	20
2.1 GENERALIDADES	20
2.2 METROLOGÍA DEL ÉMBOLO	22
2.2.1 Dimensionamiento del émbolo	23
2.2.2 Masa del émbolo	25
2.3 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	29
2.3.1 Ensayo de rugosidad superficial	29
2.4 ENSAYOS DESTRUCTIVOS	34
2.4.1 Ensayo de compresión	35
2.4.2 Ensayo de espectrometría de emisión óptica	38
2.4.3 Ensayo metalográfico	44
2.4.4 Ensayos de durezas	53
3. OPCIONES DE MANUFACTURA DEL PROCESOS DE MOLDEO Y DE SELECCIÓN DE ALEACIONES DE ALUMINIO PARA LA FABRICACIÓN DEL ÉMBOLO	64
3.1 OPCIONES DE PROCESO DE MOLDEO	64
3.1.1 Fundición en molde de arena (Sand casting)	66
3.2 OPCIONES DE MATERIALES	73
4. DISEÑO DEL ÉMBOLO PROTOTIPO	74
4.1 CÁLCULOS Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL ÉMBOLO	74
4.1.1 Análisis del ciclo termodinámico	74
4.1.2 Presión de admisión para motores de dos tiempos	75
4.1.3 Temperatura de admisión	75
4.1.4 Presión de compresión	76

4.1.5 Temperatura de compresión.....	77
4.1.6 Temperatura de combustión.....	77
4.1.7 Presión de combustión	78
4.1.8 Fuerza máxima del mecanismo manivela-biela-émbolo	78
4.1.9 Cilindrada unitaria.....	80
4.2 ANALISIS DINAMICO DEL MECANISMO MANIVELA-BIELA-CORREDERA.....	82
4.2.1 Posición, velocidad y desplazamiento del émbolo.....	82
4.2.2 Fuerza de fricción existente entre el émbolo y las paredes del cilindro	89
4.2.3 Condiciones de trabajo para el cálculo del émbolo	92
4.2.4 Análisis por fatiga del émbolo.....	96
4.2.5 Análisis térmico del émbolo	97
4.3 GEOMETRÍA DEL DISEÑO.....	102
5. ESTUDIO Y ANALISIS DE FACTIBILIDAD TECNICO-ECONOMICO DE LA MANUFACTURA DEL EMBOLO PROTOTIPO EN EL AREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA.....	111
6. OPERACION DEL PROCESO DE MANUFACTURA	116
6.1 PROCESO DE FUNDICION EN MOLDE DE ARENA PARA EL EMBOLO PROTOTIPO.....	116
6.2 PROCESO DE MECANIZADO Y TERMINADO DEL ÉMBOLO.....	121
6.3 ENSAYO DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL DEL ÉMBOLO PROTOTIPO.....	127
6.4 HOJAS DE RUTA.....	130
7. CONCLUSIONES	140
8. RECOMENDACIONES.....	143
BIBLIOGRAFIA.....	144
ANEXOS.....	147

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de diseño y construcción del émbolo	21
Figura 2. Dimensionamiento del émbolo.....	23
Figura 3. Émbolo motor Shindaiwa S450EC1	24
Figura 4. Evolución del diseño de un émbolo.	27
Figura 5. Términos y dimensiones importantes del émbolo según MAHLE	28
Figura 6. Medición de la masa del émbolo.	28
Figura 7. Rugosidad superficial recomendada para el émbolo	31
Figura 8. Ensayo de rugosidad superficial en el alojamiento del bulón.....	32
Figura 9. Ensayo de rugosidad superficial de la falda del émbolo	33
Figura 10. Resultados de la rugosidad superficial del alojamiento del bulón	33
Figura 11. Resultados de la rugosidad superficial de la falda	34
Figura 12. Diagrama de cuerpo libre del émbolo.	35
Figura 13. Maquina universal de ensayo	36
Figura 14. Diagrama fuerza contra desplazamiento ensayo de compresión del émbolo.	37
Figura 15. Espectrómetro de emisión óptica.....	38
Figura 16. Corte de la cabeza del émbolo	39
Figura 17. Distribución de temperatura en °C en la cabeza del émbolo de un motor a gasolina	39
Figura 18. Resultados obtenidos por la base de datos de materiales de ingeniería.	42
Figura 19. Proceso de elaboración de la baquelita.	44
Figura 20. Lijadora de banda para metalografía	47

Figura 21. Muestra del émbolo en probeta de diferentes vistas sometidas a ataque Keller.....	47
Figura 22. Descripción de la morfología de la aleación del émbolo en estudio	48
Figura 23. Microestructuras de la aleación 390.0.	49
Figura 24. Microestructuras del émbolo en estudio a 200X y 1000X.....	50
Figura 25. Diagrama de fases de aleación Al-Si hipereutética.....	51
Figura 26. Microestructura de la aleación Al-Si hipereutética	52
Figura 27. Perfiles de fractura de la aleación 390.0.....	53
Figura 28. Ensayo preliminar de la dureza del émbolo mediante durómetro Wilson	55
Figura 29. Visualización del software Innovaview Vector	57
Figura 30. Ensayo de dureza Vickers.	58
Figura 31. Datos proporcionados por el software Innovaview Vector	59
Figura 32. Arena sílice para fundición.....	67
Figura 33. Principales partes de los moldes de arena	70
Figura 34. Secuencia de operación del fundido de arena del émbolo	71
Figura 35. Ciclo termodinámico en motores de dos tiempos.	74
Figura 36. Fuerza máxima mecanismo manivela–biela–émbolo	80
Figura 37. Diagrama geométrico mecanismo Manivela-biela-émbolo	83
Figura 38. Posición [cm] vs ángulo [grados]	87
Figura 39. Velocidad en el PMS [cm/s] vs ángulo [grados].....	88
Figura 40. Aceleración [cm/s ²] vs ángulo [grados]	88
Figura 41. Diagrama del cuerpo libre del émbolo	89
Figura 42. Comportamiento dinámico de la fuerza a diferentes r.p.m.....	91
Figura 43. Fuerzas de fricción sobre el cilindro.....	91
Figura 44. Sección de menor área transversal del émbolo.....	93
Figura 45. Sección transversal del émbolo mostrando los tabiques	95
Figura 46. Comportamiento del émbolo sometido a la presión de los gases	95
Figura 47. Resumen de la distribución de temperatura	98
Figura 48. Comportamiento de dilatación debido a cambios de temperaturas	99

Figura 49. Nomenclatura estándar de las medidas del émbolo	103
Figura 50. Mallado émbolo prototipo.....	108
Figura 51. Distribución de esfuerzos mecánicos	109
Figura 52. Molde en madera terminado y listo para ser montado.....	117
Figura 53. Adecuación preliminar del molde en madera moldear el macho de sacrificio.....	118
Figura 54. Preparación de la arena para el respectivo moldeo.....	119
Figura 55. Horno para fundición de crisol basculante	120
Figura 56. Vertimiento del material en el molde.....	120
Figura 57. Acabado final después de extraer del molde	121
Figura 58: Pieza resultante del proceso de fundición en arena	122
Figura 59. Movimientos de torneado.....	123
Figura 60. Cilindrada preliminar	124
Figura 61. Refrentado de los tetones.....	125
Figura 62. Realización de loa alojamientos de los anillos.....	125
Figura 63. Proceso de mecanizado de los alojamientos de bulón	126
Figura 64. Émbolo prototipo resultante	127
Figura 65. Resultados de la rugosidad superficial del alojamiento del bulón para el émbolo prototipo	128
Figura 66. Resultados de la rugosidad superficial de la falda del émbolo prototipo	129

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Rangos dimensionales del émbolo (según la SAE)	26
Tabla 2. Relación de la masa para émbolos hechos de aleación de aluminio para carro de pasajeros cuando el diámetro de la cabeza es < 100 mm.	29
Tabla 3. Informe del ensayo de espectrometría de emisión óptica	40
Tabla 4. Composición de la aleación 390.0	43
Tabla 5. Composición de la aleación A390.0	43
Tabla 6. Composición de la aleación B390.0	43
Tabla 7. Parámetros de ensayo escala B de dureza Rockwell.	56
Tabla 8. Resultados de ensayo de dureza Rockwell	56
Tabla 9. Parámetros estándar de cálculo de dureza Vickers para microdureza. ...	60
Tabla 10. Parámetros estándar de cálculo de dureza Brinell.....	61
Tabla 11. Propiedades mecánicas típicas de temperatura ambiente de probetas de ensayo de las aleaciones de 390,0.....	62
Tabla 12. Dureza típica de la muestra del émbolo a temperatura ambiente (unidades de ingeniería)	62
Tabla 13. Comparación entre resultados de dureza	63
Tabla 14. Factores que influyen en la selección del proceso de fundición de aleaciones de aluminio.	65
Tabla 15. Datasheet motor Shindaiwa B450.....	79
Tabla 16. Datos geométricos del motor B-450.....	87
Tabla 17. Medidas recomendadas para la geometría del émbolo	103
Tabla 18. . Comparación de esfuerzos entre el émbolo original y el fabricado	107
Tabla 19. Costo de los procesos de manufactura disponibles.....	114
Tabla 20. Costo del trabajo intelectual.....	115
Tabla 21. Costo total de productos y servicios para el émbolo.....	115
Tabla 22. Hoja de ruta del proceso completo de fabricación	130

Tabla 23. Página uno de la hoja de ruta del proceso de fundición	131
Tabla 24. Página dos de la hoja de ruta del proceso de fundición.....	132
Tabla 25. Página uno de la hoja de ruta del proceso de cilindrado	133
Tabla 26. Página dos de la hoja de ruta del proceso de cilindrado.....	134
Tabla 27. Página uno de la hoja de ruta del refrentado de los tetones	135
Tabla 28. Página dos de la hoja de ruta del refrentado de los tetones	136
Tabla 29. Página uno de la hoja de ruta del barrenado del alojamiento del bulón y construcción de chaveteros	137
Tabla 30. Página dos de la hoja de ruta del barrenado del alojamiento del bulón y construcción de chaveteros	138
Tabla 31. Página uno de la hoja de ruta de la elaboración de los segmentos y acabado superficial final	139
Tabla 32. Página dos de la hoja de ruta de la elaboración de los segmentos y acabado superficial final	140

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Aspectos teóricos, funcionales y constitucionales del émbolo	147
Anexo B. Plano del dimensionamiento del émbolo	171
Anexo C. Propiedades químicas de las aleaciones recomendadas para la fabricación del émbolo por fundición.....	172
Anexo D. Diagramas de fases características de la aleación AL-SI	176
Anexo E. Teoría de ensayo de dureza.....	181
Anexo F. Tratamientos térmicos	188
Anexo G. Opciones para la fundición del émbolo distintas al moldeo en arena ..	196
Anexo H. Opciones de aleaciones de aluminio de moldeo para émbolos	210
Anexo I. Propiedades físicas, eléctricas y térmicas de las aleaciones recomendadas para la fabricación del émbolo	212
Anexo J. Opciones de procesos de conformado y de selección de aleaciones de aluminio para la fabricación del émbolo	223
Anexo K. Cálculos de las dimensiones del fundido resultante	236
Anexo L. Dimensiones del molde en madera para el moldeo en arena.....	238
Anexo M. Dimensionamiento y desarrollo del macho del molde.....	240
Anexo N. Cálculos del moldeo en arena.....	245
Anexo O. Operación de fundición del aluminio	253
Anexo P. Cilindrado superficial del émbolo.....	258
Anexo Q. Refrentado de tetones.....	262
Anexo R. Barrenado de alojamientos del bulón y construcción de chaveteros....	263
Anexo S. Construcción de alojamientos de segmentos y acabado superficial	265
Anexo T. Revoluciones por minuto en el proceso de mecanizado.....	273
Anexo U. Fichas técnicas del torno y del taladro usados en el mecanizado.....	276
Anexo V. Protocolo de pruebas	278
Anexo W. Análisis nodal de fallos	283

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL ÉMBOLO DE UN MOTOR DE DOS TIEMPOS DE PEQUEÑA CILINDRADA DE APLICACIÓN AGRICOLA.*

AUTORES: STIVEN FERNANDO CABRA BRIJALDO, WILFRAN MANUEL SOCARRAS VILORIA**

PALABRAS CLAVE: Émbolo, diseño, construcción, motor, dos, tiempos, manufactura, forjado, fundición.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se quiere demostrar que mediante los conocimientos adquiridos en Ingeniería Mecánica sumado a la capacidad que tiene la industria regional, es posible el diseño, desarrollo y manufactura de los componentes que conforman un motor de combustión interna, para este proyecto en específico, se desarrolló el diseño y manufactura del émbolo basado en el análisis del existente en un motor de dos tiempos.

Primero se realiza un estudio de las características dimensionales y de composición de la pieza ya existente, después se hace un análisis mecánico y térmico de la pieza cuando está en operación mediante las ecuaciones matemáticas existentes y el análisis de los resultados de la caracterización. A partir de todo lo anterior se realiza la construcción de la pieza teniendo en cuenta la viabilidad de la industria local para su elaboración y el costo que esto comprende.

Después de analizar costos, se procede a la fabricación del émbolo basándose en los estudios anteriores. Realizado el émbolo, se somete a funcionamiento y se compara su operación respecto a la operación del émbolo original y se analiza la viabilidad mecánica y económica del émbolo construido. Este trabajo busca fomentar la necesaria interacción entre la industria y la académica, con el propósito de emprender iniciativas que contribuyan a la generación de nuevas actividades empresariales y con ello, la generación de nuevos empleos en el mercado regional.

* Proyecto de grado.

** Universidad Industrial de Santander; Facultad de ingeniería Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director: Ingeniero Jorge Luis Chacón Velasco PhD.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PISTON OF SMALL DISPLACEMENT TWO-STROKE ENGINE FOR AGRICOLA APPLICATIONS.*

AUTHOR: STIVEN FERNANDO CABRA BRIJALDO, WILFRAN MANUEL SOCARRAS VILORIA **

KEY WORDS: Piston, design, construction, engine, two, stroke, manufacturing, forging, casting.

DESCRIPTION:

In this paper we want to show that through the knowledge acquired in Mechanical Engineering undergraduate studies together with the ability of the regional industry, it is possible to design, development and manufacture of the components that make up an internal combustion engine, for this project in specific, is developing the design and manufacture of piston based on the analysis of existing in a two-stroke engine.

First, a study of the dimensional characteristics and composition of the existing part is done, after mechanical and thermal analysis of the piece is done when it is in operation through existing mathematical equations and finite element analysis. From the above construction of the piece is performed taking into account the viability of the local industry for processing and this includes the cost.

After analyzing costs, we proceed to manufacture the piston based on previous studies. After manufacture the piston, it is subjected to operation and comparing operation regarding the operation of the original plunger. After mechanical and economic viability of the prototype piston is analyzed. This paper seeks to encourage interaction between industry and academia, with the purpose of undertaking initiatives that contribute to the generation of new businesses and creating new jobs in the regional market.

* Degree Project: Modality business practice.

** Universidad Industrial de Santander; Faculty of Physical-Mechanical engineering, Mechanical engineering School, Engineer Jorge Luis Chacón Velasco PhD., Project Manager.

INTRODUCCIÓN

Con la realización de este proyecto se buscó evidenciar que al nivel regional si es posible el diseño, desarrollo y manufactura de los elementos constitutivos de un motor de combustión interna. En el caso particular de este proyecto, se diseñó y construyó un émbolo con base al existente en el motor de dos tiempos Shindaiwa S450EC1. La consecución del mismo, ofrece una prueba real y tangible de que la industria regional está en capacidad de manufacturar piezas de motor, con niveles de calidad lo suficientemente buenos para que estos elementos cumplan con las exigencias estándar para su operatividad.

Este trabajo es un soporte teórico-práctico que tendrá a su disposición el futuro laboratorio de pruebas y ensayos del Centro de investigación de motores de dos tiempos que se está desarrollando en el Parque Tecnológico de Guatiguara y que pretende hacer una conexión entre la Universidad y la industria para que estas se retroalimenten y se desarrollen simultáneamente.

En lo académico, la escuela de Ingeniería Mecánica ya está estableciendo convenio con la Universidad Hochschule Bremen de Alemania para la parte de investigación y desarrollo. En lo industrial para los procesos de manufactura se lograron acercamientos con empresas metalmecánicas que tienen experiencia en la construcción y diseño de elementos mecánicos como es el caso de la Metalizadora del Oriente, la industria Lavco y otras empresas enfocadas en procesos de fundición, mecanizado y forjado. Se espera que este proyecto sea un aporte inicial en el desarrollo a nivel regional de empresas dedicadas a la fabricación de motores de dos tiempos y sus respectivos repuestos.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Dentro de la misión de la Universidad Industrial de Santander esta la formación profesional de alta calidad de cada uno de sus egresados mediante la adecuación y generación de conocimientos. En miras de lograr tal propósito, este proyecto busca realizar los primeros aportes en el desarrollo de investigación, análisis, diseño, construcción y ensayos de piezas que componen los motores de dos tiempos, cuyos resultados buscan contribuir al desarrollo del futuro laboratorio de pruebas para M. T. A. que hará parte del Parque Tecnológico de Guatiguara.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la caracterización del émbolo que conforma el motor de dos tiempos Shindaiwa modelo S450EC1. Para tal propósito se debe hacer una serie de análisis. Mediante metrología se establecerá el dimensionamiento principal del componente; mediante ensayos de dureza, metalografía y compresión se identificará el tipo de material que lo compone, su proceso de manufactura y los esfuerzos y deformaciones máximos a los cuales pudo ser sometida la pieza en el momento de su fabricación.
- Efectuar un análisis mecánico y térmico del émbolo mediante su estudio a partir del método de los elementos finitos con el fin de obtener datos de esfuerzo y deformación al cual será sometida la pieza cuando esta cumpla su función dentro del motor.

- Diseñar el émbolo del motor de dos tiempos por medio de la información obtenida a través de la caracterización y el análisis mecánico de la pieza. Para tal propósito es necesario establecer el tipo de material que se va a utilizar y la viabilidad en su manufactura, la cual dependerá de la tecnología regional disponible y de los costos en su ejecución.
- Producir de acuerdo al diseño efectuado uno o dos prototipos del émbolo del motor y comprobar que sus características sean semejantes a la pieza original.
- Instalar en el motor de dos tiempos Shindaiwa modelo S450EC1 uno de los prototipos del émbolo una vez analizada la concordancia en su caracterización y someterlo a trabajo cuando el motor está en funcionamiento y realiza el proceso de corte o desmalezado.
- Documentar todo los datos que sean necesarios y útiles para la manufactura del émbolo según los criterios del diseño que se efectuó, para ello se debe tener en cuenta procedimientos, planos, máquinas utilizadas, control de calidad y hojas de ruta.

2. CARACTERIZACIÓN DEL ÉMBOLO DEL MOTOR SHINDAIWA S450EC1

2.1 GENERALIDADES

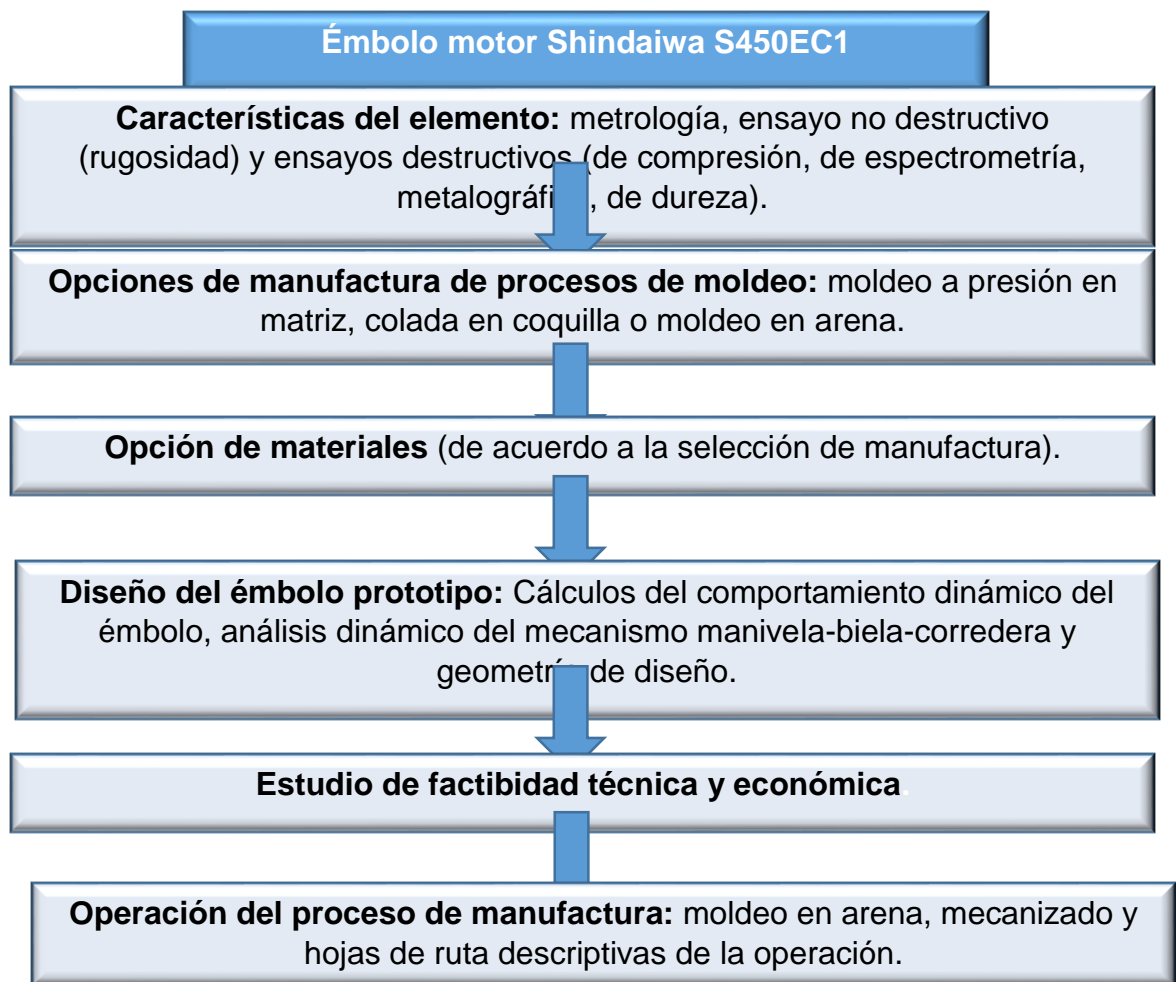
Los motores de dos tiempos de encendido por chispa son básicamente máquinas térmicas que obtienen energía mecánica directamente de la energía química que proporciona el combustible al arder dentro de una cámara de combustión. Al ser un motor de dos tiempos efectúan una carrera útil de trabajo en cada giro, a diferencia de los de cuatro tiempos que la efectúa cada dos giros. El diseño y construcción de los elementos constitutivos de este motor se debe hacer teniendo en cuenta los parámetros de funcionalidad y seguridad que permitan que el proceso de combustión del motor se realice de la manera más eficaz y efectiva posible.

De todos los elementos que constituyen el motor de combustión interna, el émbolo es uno de los que presenta especial importancia en el momento de diseñar y fabricar pues trabaja con cargas y regímenes de velocidad muy variados, además debe soportar la presión y temperatura generada por los gases de combustión. Esta pieza debe ser construida de un material que sea lo más ligero posible pero que a su vez posea gran resistencia a la deformación, al desgaste y a la corrosión.

El desarrollo industrial que se ha generado en las últimas décadas, han consumido grandes recursos materiales e intelectuales en la elaboración de motores cada vez más eficientes y funcionales. Es por esto que las empresas que trabajan en este campo se han diversificado mediante la creación de departamentos de reingeniería de autopartes y repuestos. Incluso tiene departamentos encargados en la realización de prototipos de motores enteros. Las investigaciones que se

llevan en dichos departamentos pueden durar desde meses hasta años, antes de que sus productos lleguen al mercado.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de diseño y construcción del émbolo



Para el émbolo del motor Shindaiwa S450EC1 se ha realizado un análisis geométrico mediante metrología, para conocer con precisión su

dimensionamiento. Se efectuaron a su vez técnicas metalúrgicas consistentes en ensayos destructivos y no destructivos con el fin de conocer la composición química de la pieza, su tipo de fabricación, los procesos de mecanizado y tratamientos térmicos que posiblemente se realizaron en su elaboración. Además se hizo un ensayo de compresión para determinar los límites de esfuerzo y deformación al que puede ser sometida la pieza, un resumen apropiado de este proceso se puede ver en la figura 1.

2.2 METROLOGÍA DEL ÉMBOLO

El émbolo al ser un elemento mecánico constitutivo dentro del mecanismo biela-cigüeñal tendrá una interacción constante y dinámica entre sus componentes, es por esto que su exacto dimensionamiento es fundamental para el correcto funcionamiento del sistema y por ende del motor mismo. Por tanto se debe hacer un especial énfasis en la medición del émbolo en el cual basaremos nuestro primer estudio preliminar.

Por medio de la metrología haremos una medición de la longitud, diámetro, espesor y otros factores que caracterizan la pieza. La caracterización geométrica del émbolo debe establecerse teniendo en cuenta las partes que lo conforman.

Para efectuar la medición geométrica se usó un émbolo nuevo, al considerar que uno usado podría tener un ligero cambio dimensional debido a la presión y temperatura al que fue sometido durante su operación en el motor. Tal trabajo se efectuó en la empresa regional Metalizadora del Oriente Ltda., que posee un laboratorio de medición acreditado, esta empresa tiene una amplia experiencia en el proceso de rectificado de piezas mecánicas, lo cual garantiza un trabajo eficiente y de calidad en el proceso de medición.

cabeza del émbolo para facilitar su análisis. Para la configuración y dimensionamiento del émbolo, se tienen en cuenta un gran número de parámetros entre los cuales se destacan las cargas térmicas y mecánicas a las que se somete la pieza, la forma y posición de la cámara de combustión y el diámetro del bulón.

Figura 3. Émbolo motor Shindaiwa S450EC1



Nos basaremos en las referencias establecidas por el libro de ingeniería de combustión interna de la SAE¹ como se muestra en la tabla 1.

¹ SAE Internacional (Society of Automotive Engineers). Como su nombre lo indica, la SAE es una sociedad de ingenieros automotrices y tienen como enfoque el estudio ingenieril de los componentes mecánicos usados en el campo aeroespacial, automotriz, y en general de todas las industrias comerciales especializadas en la construcción de vehículos.

2.2.2 Masa del émbolo El émbolo y sus partes complementarias (anillos y bulón) constituyen una masa oscilante. Dependiendo del tipo de motor, el émbolo estará sometido a fuerzas y torques de inercia derivados del esfuerzo generado para mover el mecanismo en el proceso de la combustión.²

Estas características hacen que dentro del proceso su proceso de fabricación, se busque que esta masa oscilante sea lo más ligera posible, en especial si esta hace parte de motores de alta velocidad, es por esto que la industria ha hecho esfuerzos en reducir de forma continua su masa mediante el mejoramiento continuo de su diseño, material y proceso de fabricación, como se puede ver en la figura 4.

En la fabricación del émbolo generalmente el área que comprende $KH \cdot D$ (figura 5) corresponde al 80% de su masa y es en esta zona donde la pieza se somete a compresión y por tanto a los mayores niveles de transferencia de calor.

Para hallar la masa del émbolo en estudio se utilizó una balanza calibrada del laboratorio de la Escuela de Metalurgia y Ciencia de los materiales de la Universidad Industrial de Santander, cuyos resultados se ven en la figura 6.

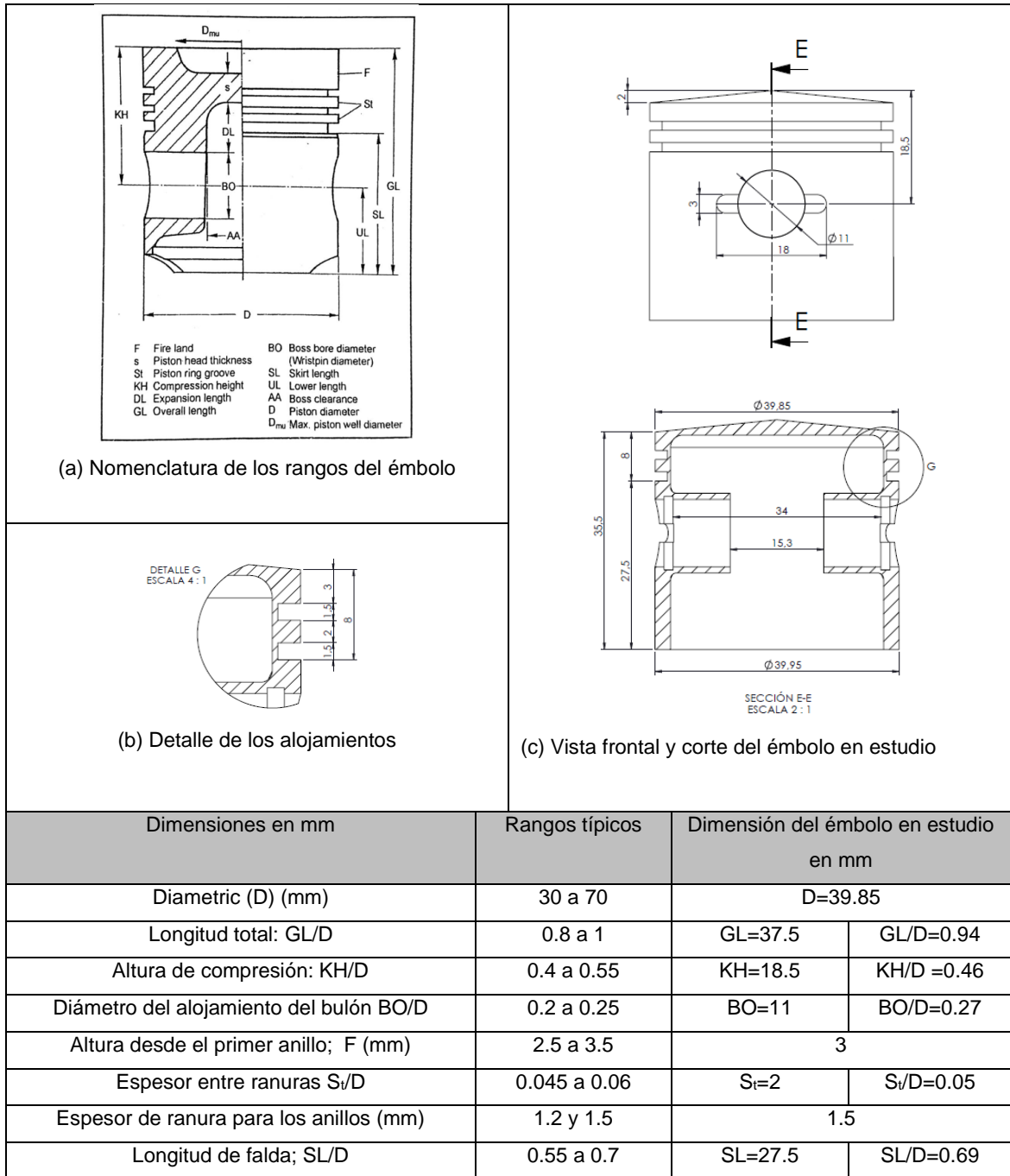
Dentro del desarrollo del estudio ingenieril del diseño y construcción de motores en la industria, se ha establecido una relación entre la masa del émbolo y el diámetro de su cabeza, que permite establecer a qué tipo de motor corresponde la pieza, sin necesidad de acudir a datos adicionales.

La masa del émbolo (sin anillos ni bulón) que aquí llamaremos m_k , la compararemos con el diámetro de la cabeza del émbolo, para hallar una relación

² Fuente: MAHLE, Manual técnico MAHLE: Motores de Combustão Interna. Brasil: MAHLE international. 1990. p.61.

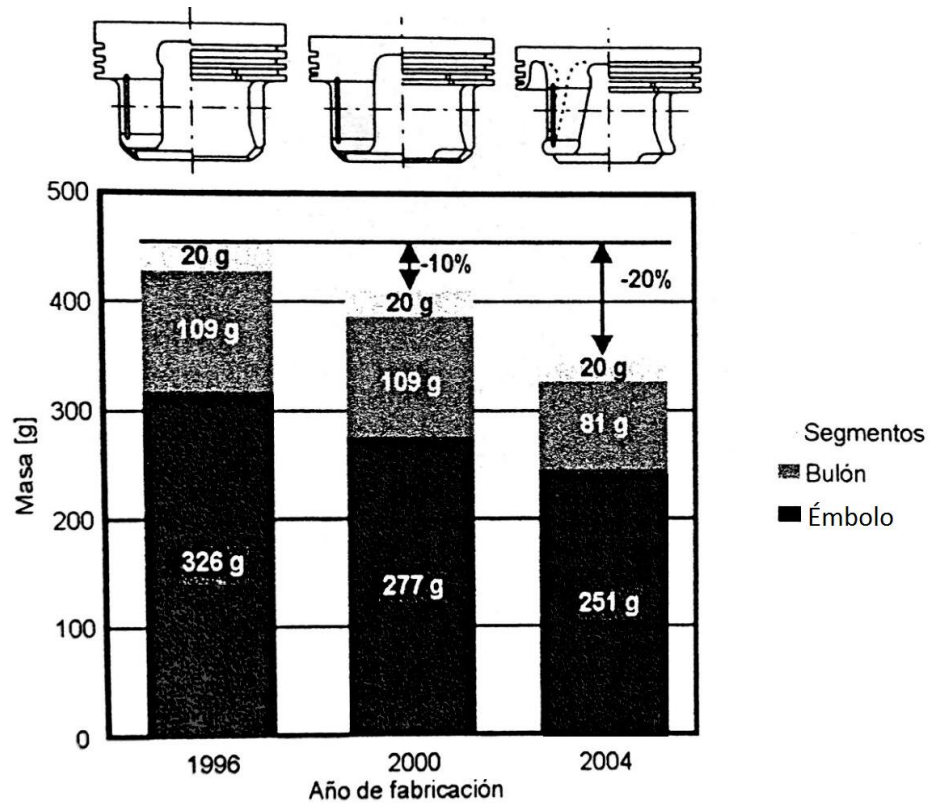
entre estas y cuyos resultados compararemos con datos preestablecidos que se pueden ver en la tabla 2.

Tabla 1. Rangos dimensionales del émbolo (según la SAE)



Fuente: Van Basshuysen, Internal combustion engine handbook. Warrendale: SAE International. 2004. p. 81

Figura 4. Evolución del diseño de un émbolo.

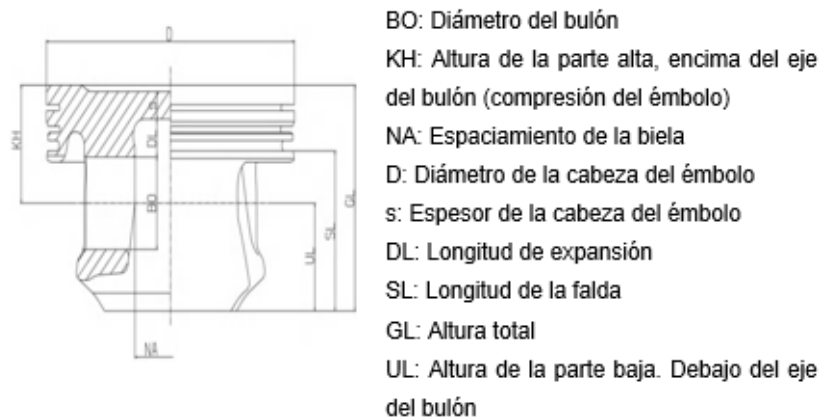


Fuente: PAYRI, F. Motores de combustión interna alternativos. Barcelona: Ed. Reverté. 2012. p. 874.

Asumiendo que el émbolo está fabricado de aleación de aluminio (lo que demostraremos en posteriores pruebas) y teniendo en cuenta los datos de la figura 6, tenemos que $m_k=41,5[g]$ y por metrología sabemos que $D=39,85[mm]=3,98[cm]$ (véase la figura 2), entonces $D^3=63,0448\text{ cm}^3$ por tanto $m_k/D^3=0,6313$ que según la tabla 2 corresponde a un motor a gasolina de dos tiempos lo cual es congruente puesto que el émbolo en estudio es de un motor de dos tiempos de una guadañadora.

La MAHLE GmbH es una empresa alemana con influencia y liderazgo en el desarrollo para la industria automotriz y de motores. Sus principales productos son los sistemas de pistón, componentes de cilindro y sistemas de válvulas, posicionándose entre los tres principales proveedores al nivel mundial.

Figura 5. Términos y dimensiones importantes del émbolo según MAHLE



Fuente: Pistons and engine testing. MAHLE GmbH, Stuttgart 2012. p. 26.

Figura 6. Medición de la masa del émbolo.

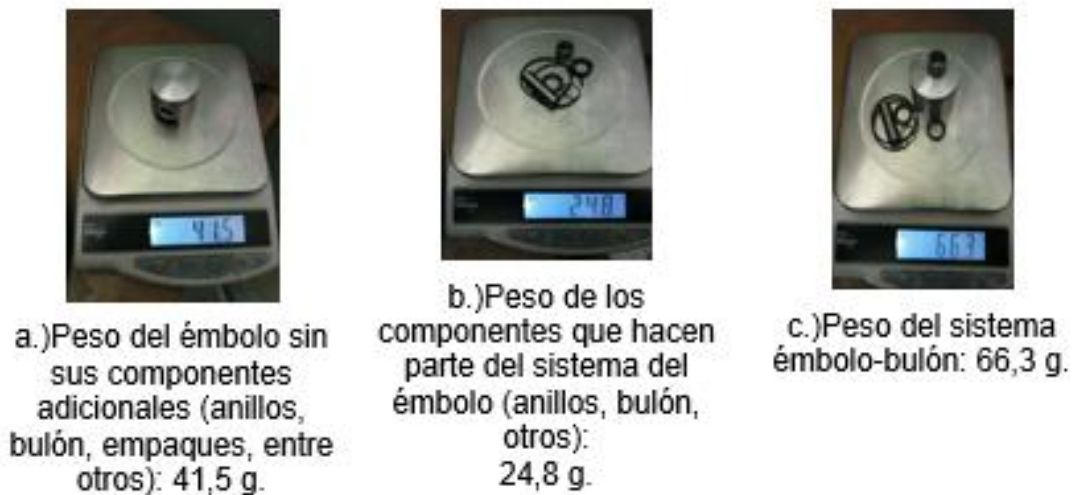


Tabla 2. Relación de la masa para émbolos hechos de aleación de aluminio para carro de pasajeros cuando el diámetro de la cabeza es < 100 mm.

Principio de operación	Relación m_k/D^3
Motor a gasolina de dos tiempos con inyección múltiple	0.5 a 0.7
Motor a gasolina de cuatro tiempos con inyección múltiple	0.4 a 0.5
Motor diesel de cuatro tiempos	0.8 a 1.1

Fuentes: Van Basshuysen, Internal combustion engine handbook. Warrendale: SAE International. 2004. P.82; Pistons and engine testing. Stuttgart. MAHLE GmbH. 2012. p.8

2.3 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los ensayos no destructivos son cualquier tipo de prueba practicada a un material cuyo proceso no altera de forma permanente ninguna de sus propiedades físicas, mecánicas, químicas y dimensionales. En este tipo de ensayos el daño al material es imperceptible o incluso nulo, pero generalmente proveen datos menos exactos que los entregados mediante los ensayos destructivos, razón por la cual solo realizaremos el ensayo de rugosidad a la superficie del émbolo.

2.3.1 Ensayo de rugosidad superficial Todo material presenta cierto tipo imperfecciones superficiales que se generan en su proceso de fabricación, en términos generales estas imperfecciones tiene tres clasificaciones: la rugosidad producida por la huella que genera la herramienta que lo fabrica, las ondulaciones que se causan por desajustes en la máquina-herramienta utilizadas en el proceso del mecanizado y las imperfecciones mixtas que son producto de la rugosidad y las ondulaciones que se presentan conjuntamente. En el émbolo a construir la pared móvil de la cámara de combustión presenta en su dinámica ciertas

tolerancias que permiten su correcta operatividad al interactuar con el bloque y el bulón. Si la rugosidad del émbolo en la falda y en el alojamiento del bulón supera dicha tolerancia la pieza está destinada a la falla, es por esto que el ensayo de rugosidad superficial nos permite conocer su magnitud y así poder compararla con la rugosidad característica del émbolo.

Primero hallamos la rugosidad superficial del alojamiento del bulón en el émbolo. El sistema de deslizamiento que se crea entre el bulón y su alojamiento en el émbolo debe estar en perfecto estado con el fin de garantizar que el funcionamiento del motor sea fiable. Si la rugosidad de la superficie llega a ser demasiado baja, particularmente en el arranque del motor, puede causar excoiación en el agujero que aloja al bulón en el émbolo. Dependiendo del diámetro del agujero del alojamiento del bulón, se requiere una rugosidad superficial Ra^3 entre 0,63 y 1,0 μm^4 .

Aunque se tiende a tener valores de rugosidades ligeramente mayores con el fin de aumentar la retención de aceite dentro del sistema, especialmente cuando las condiciones de operatividad del motor no requieren de su máximo esfuerzo, como es el caso del motor Shindaiwa.

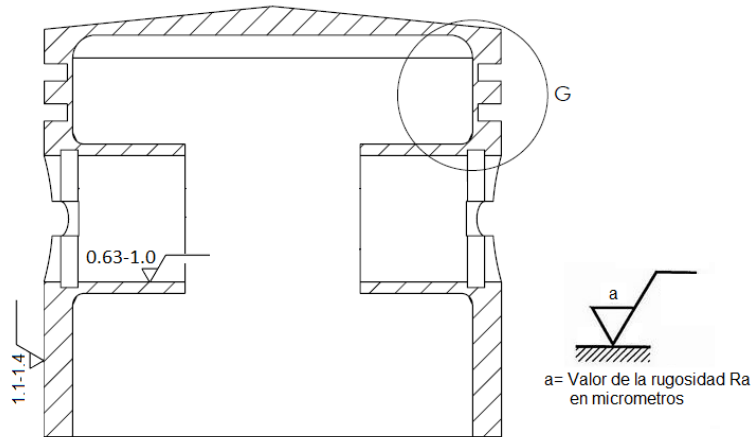
Después hallamos la rugosidad superficial de la falda del émbolo. La superficie que comprende la falda del émbolo influencia de manera notable en el comportamiento de deslizamiento del émbolo. Si la rugosidad de la superficie es demasiado baja, el émbolo no puede funcionar correctamente. Para el área de la falda se recomiendan valores de rugosidad superficial Ra entre 1,1 a 1,4 μm^5

³ Ra (desviación media aritmética del perfil): Es el parámetro de medida de la rugosidad más utilizado.

⁴ Fuente: Pistons and engine testing. MAHLE GmbH, Stuttgart 2012. p. 29.

⁵ Fuente: ASM Handbook volume XVIII: Friction, Lubrication, and Wear Technology. USA: Ed. ASM international. 1992. p.646.

Figura 7. Rugosidad superficial recomendada para el émbolo



2.3.1.3 Ensayo de rugosidad superficial en el émbolo

La medición de la rugosidad superficial del alojamiento de bulón y de la falda se realizó mediante un microscopio de observación tridimensional marca HIROX perteneciente al laboratorio de pruebas del grupo de investigación GIMAT de la escuela de metalurgia y ciencia de los materiales (figuras 8 y 9), aunque se tuvo que cortar el émbolo en secciones que permitan su análisis en el microscopio, el ensayo en sí no es destructivo, las áreas analizadas no sufrieron ningún tipo de alteración en la superficie donde se cuantificó la rugosidad.

El ensayo en el alojamiento del bulón obtuvo un pico máximo de 65.949 μm bajo un mínimo de referencia de 0 μm , estableciendo como promedio de su rugosidad de 32.974 μm (0.032 mm). En cuanto a la falda, el ensayo obtuvo un pico máximo de 66.459 μm bajo un mínimo de referencia de 0 μm , promediando una rugosidad de 33.229 μm (0.032 mm), ambos ensayos muestran que el émbolo fue tratado uniformemente en su superficie en ambas zonas pues sus rugosidades son similares. Los resultados están muy por encima de los recomendados para la

fabricación del émbolo, esto se debe en parte a que las referencias de rugosidad son el resultado de análisis de muestras especialmente elaboradas para este propósito y que suponen que el émbolo será sometido a condiciones máximas y continuas de operatividad como suele ocurrir en el campo industrial y automotriz. El émbolo de la guadañadora opera en condiciones de operatividad relativamente baja e intermitente y generalmente no requiere de un tratamiento superficial especial en su fabricación. Los resultados del proceso se pueden ver en las figuras 10 y 11.

Figura 8. Ensayo de rugosidad superficial en el alojamiento del bulón

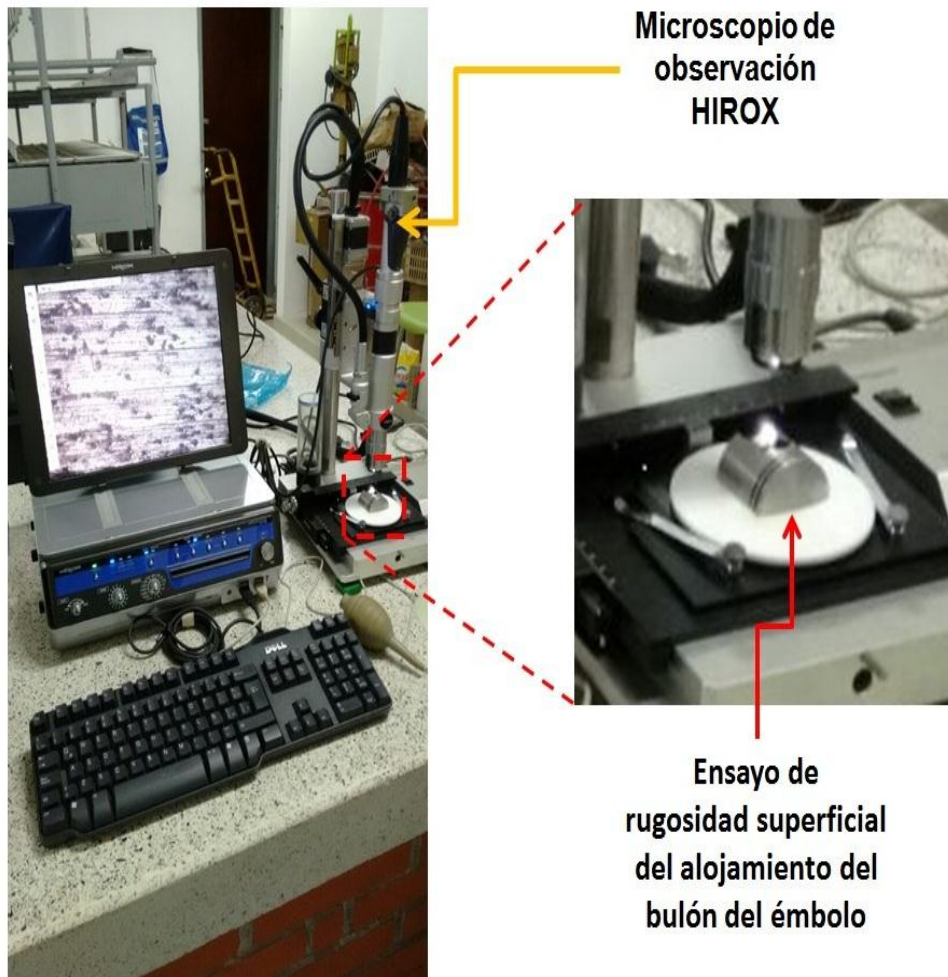


Figura 9. Ensayo de rugosidad superficial de la falda del émbolo

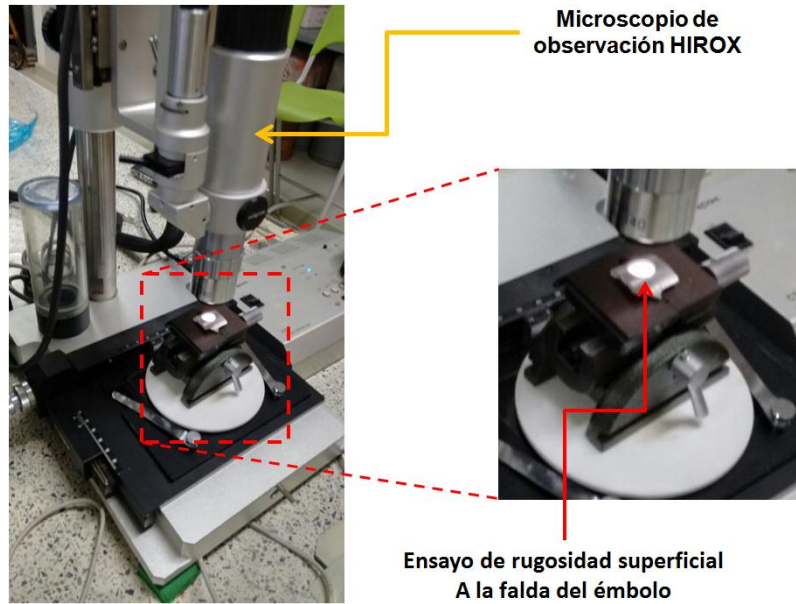
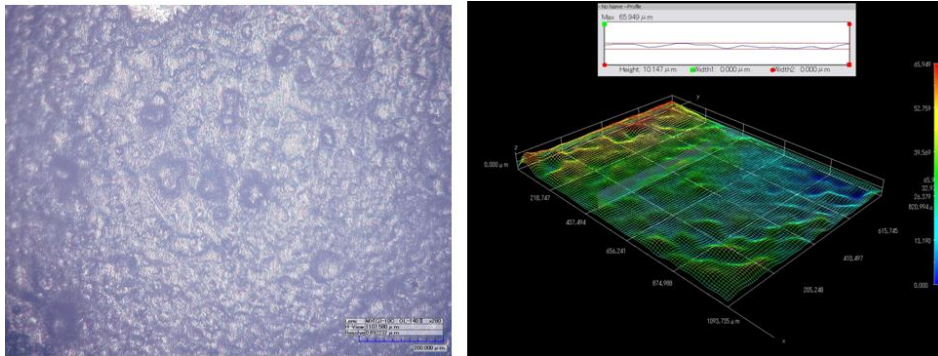
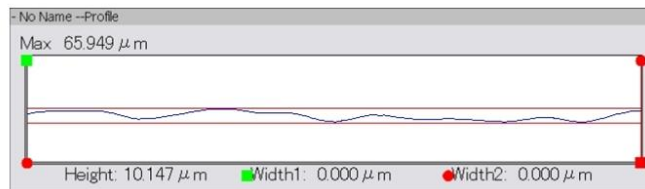


Figura 10. Resultados de la rugosidad superficial del alojamiento del bulón



a.) Vista de la superficie en 2D del alojamiento del bulón

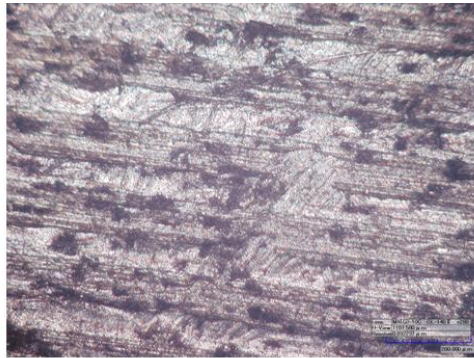
b.) Vista de la superficie en 3D del alojamiento del bulón



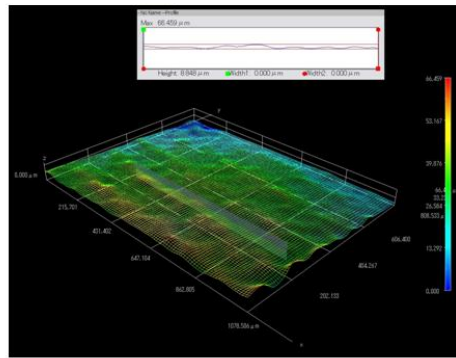
c.) Resultados de la rugosidad superficial

Fuente: Microscopio HIROX del grupo de investigación GIMAT

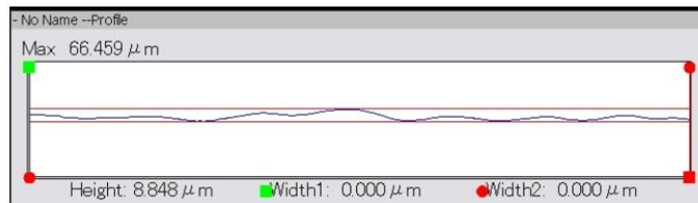
Figura 11. Resultados de la rugosidad superficial de la falda



a.) Vista de la superficie en 2D de la falda



b.) Vista de la superficie en 3D de la falda



c.) Resultados de la rugosidad superficial

Fuente: Microscopio HIROX del grupo de investigación GIMAT

2.4 ENSAYOS DESTRUCTIVOS

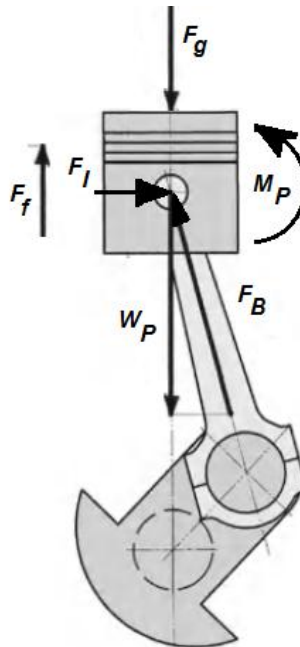
Los ensayos destructivos permiten conocer mediante una serie de pruebas las propiedades internas del material que no se pueden conocer a simple vista y cuyo conocimiento es esencial para la completa caracterización del émbolo. En total se realizaron cinco ensayos: de compresión, químicos, metalográfico, de dureza y de microdureza.

Los ensayos destructivos son aquellos en los que la pieza de estudio se somete a una destrucción parcial o total con el fin de afectar su integridad estructural para el

estudio de su composición y de los diversos tratamientos a los que fue sometido para su fabricación.

2.4.1 Ensayo de compresión El émbolo básicamente es un elemento de transmisión de potencia. Dentro del motor, la energía contenida en el combustible se convierte rápidamente en calor y presión durante el ciclo de combustión. Los valores de calor y de presión aumentan de manera considerable dentro de un período muy corto de tiempo.

Figura 12. Diagrama de cuerpo libre del émbolo.



El émbolo, como parte móvil de la cámara de combustión, tiene como tarea convertir esta energía liberada en trabajo mecánico. Como se explicó en detalle en la anexo A, el émbolo es un cilindro hueco por un lado y sellado por su cabeza o

corona por el otro, mecanizado en su zona media con un alojamiento donde se colocara el bulón y en su zona superior con ranuras donde se alojan sus anillos.

La cabeza del émbolo transfiere las fuerzas de los gases (F_g) de la combustión de la mezcla combustible-aire a través del bulón, que a su vez lo transmite a la biela y al cigüeñal (figura 12). Con el fin de conocer un valor aproximado del máximo valor de esta fuerza, aplicamos un ensayo de compresión sobre la cabeza del émbolo.

Para este procedimiento se usó una maquina universal para ensayos mecánicos (figura 13) perteneciente al laboratorio de ensayos mecánicos del centro de ensayo de materiales del Sena en Bogotá con capacidad de hasta de 50 toneladas para usos de probetas de un diámetro máximo de 50 milímetros. Esta máquina realiza pruebas destructivas de tracción, compresión y flexión para materiales metálicos cuyo procedimiento se hace de acuerdo a la norma ASTM A 370.

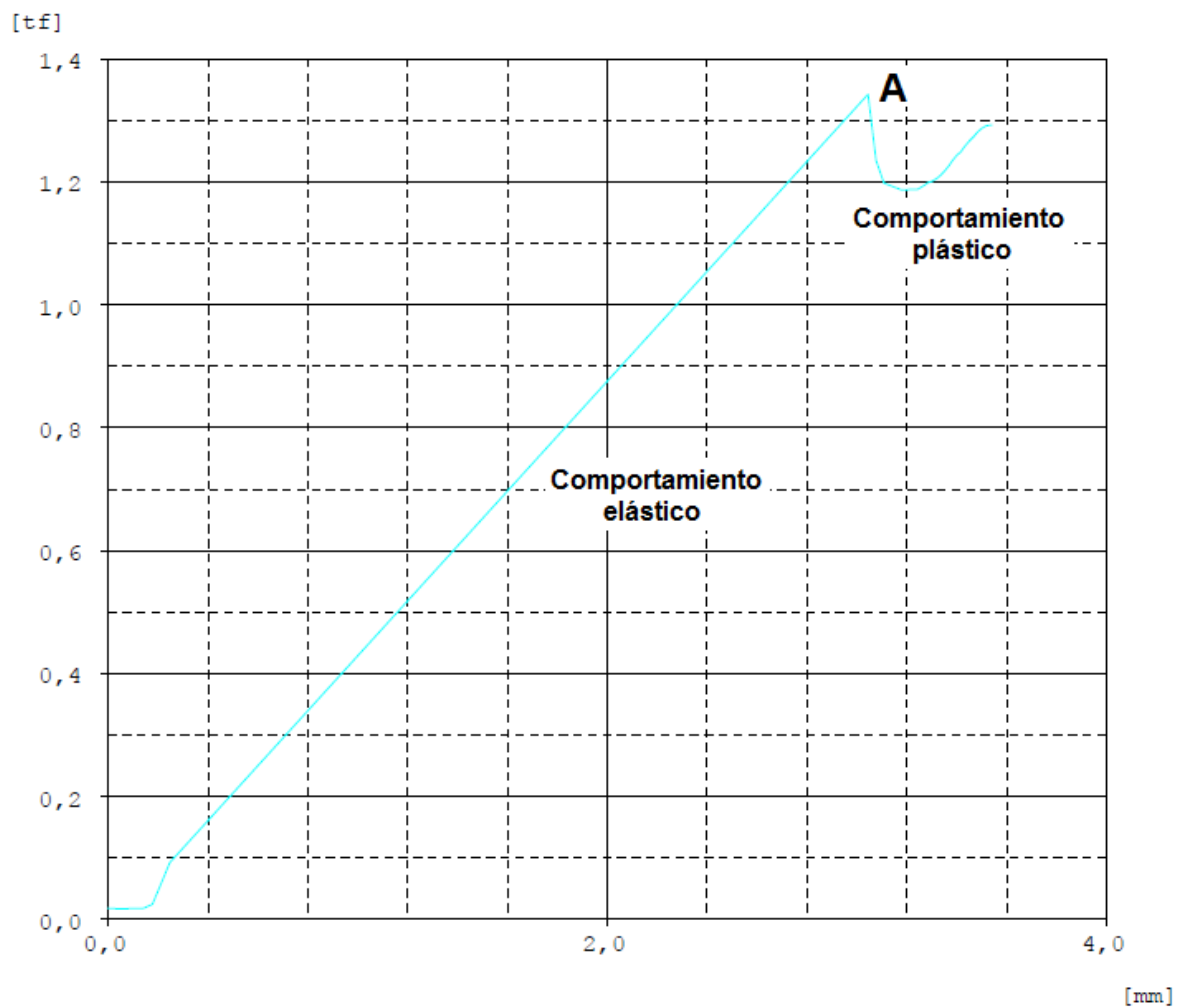
Figura 13. Maquina universal de ensayo



Fuente: Sena. [Online]. En:< http://materialesyensayosena.blogspot.com/p/blog-page_5.html

El ensayo produjo una fuerza límite que estableceremos como la fuerza de los gases hacia el émbolo y cuyo valor es 2960.40 lbf (1.34 tf). En el gráfico obtenido, se pueden visualizar los periodos de elasticidad y plasticidad (figura 14). El valor aproximado de F_g es la fuerza límite de proporcionalidad y se puede determinar por el punto A donde termina el segmento rectilíneo de la dependencia lineal entre la carga y el alargamiento.

Figura 14. Diagrama fuerza contra desplazamiento ensayo de compresión del émbolo.



Fuente: Laboratorio de ensayos mecánicos SENA

2.4.2 Ensayo de espectrometría de emisión óptica La espectrometría de emisión es una técnica cuyo objetivo es analizar las longitudes de onda de los fotones emitidos por átomos o moléculas cuando estos están en transición desde un estado excitado a un estado de menor energía. Cada elemento emite un conjunto característico de longitudes de onda discretas en función de su estructura electrónica. Al observar estas longitudes de onda se puede determinar la composición elemental de la muestra del émbolo.

Este ensayo se hizo en el laboratorio de espectrometría del centro de materiales y ensayos del SENA en Bogotá, mediante un espectrómetro de vacío Angstrom V-950 (Figura 15).

Figura 15. Espectrómetro de emisión óptica

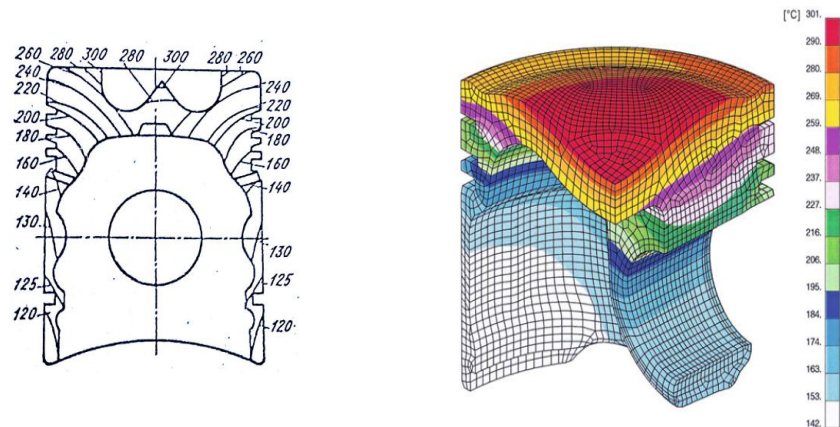


Fuente: Sena. [Online]. En:< http://materialesyensayosena.blogspot.com/p/blog-page_4.html >.

Figura 16. Corte de la cabeza del émbolo



Figura 17. Distribución de temperatura en °C en la cabeza del émbolo de un motor a gasolina



Fuentes: JÓVAJ, M. Motores de automóvil. URSS: Ed. Mir. 1982. p. 268; BINDER, I y otros. Pistons and engine testing. Stuttgart: Ed. MAHLE GmbH. 2012. P.18.

Para que el ensayo se efectuara adecuadamente fue necesario que la muestra se preparara en forma de una superficie plana con dimensiones mínimas de 20

milímetros tanto de largo como de ancho por 3 milímetros de espesor, geoméricamente la cabeza del émbolo fue el área que más se adecua a estas especificaciones (véase la figura 16).

Resultó de bastante utilidad hacer el análisis en esta zona del émbolo teniendo en cuenta que la descripción del comportamiento térmico tomada de los libros especializados en la materia revela que, es en ésta zona, donde el elemento va a estar sometido a mayores temperaturas cuando esté realizando su trabajo y por lo tanto es allí donde habrá mayor transferencia de calor como se muestra en la figura 17.

El informe de los resultados obtenidos por la técnica espectroscópica nos muestra la composición química del émbolo y el porcentaje de cada elemento que compone el émbolo como se puede ver en la tabla 3.

Tabla 3. Informe del ensayo de espectrometría de emisión óptica

Matriz de la muestra		Cast aluminium							
Elemento	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti
Porcentaje	77.139	17.245	0.572	4.181	0.084	0.638	0.084	0.016	0.041

Fuente: SENA- Centro de materiales y ensayos - Laboratorio de espectrometría.

Bajo los datos obtenidos mediante el ensayo espectrométrico se hace evidente que el émbolo en estudio está fabricado mediante una aleación de moldeo (cast compositions) y se intuye que debe pertenecer a la serie 3xx.x donde el aluminio tiene como aleado principal al silicio que conforma el 17.245% de la aleación.

Para conocer de manera exacta la designación de la aleación hacemos uso de la página de internet www.matweb.com, la cual posee una base de datos de las

propiedades de distintos materiales de ingeniería, incluyendo las aleaciones de aluminio, basta con proporcionar los porcentajes de tres materiales de la aleación, para que identifique a qué serie pertenece el material, los resultados se muestran en la figura 18.

Como se puede observar los datos obtenidos son aleaciones de la serie 390.0⁶, los cuales tienen en común los porcentajes en peso de los tres elementos que escogimos para hallar la serie de la aleación pero que se diferencian en la asignación de prefijos (A y B) y sufijos (F, T5, T6, T7)⁷.

Los sufijos indican el tipo de temple al que fue sometido la aleación y los prefijos se usan cuando las variaciones en los límites de la composición son demasiado pequeños como para requerir un cambio en la designación numérica, así que su diferenciación se indica mediante una letra (A, B, C, etc.) que antecede el número de la aleación.

Por ejemplo la numeración 390.0 no tiene ningún prefijo, esto indica que es la primera versión de la aleación, en la aleación A390.0 la letra A le antecede a su numeración, esto indica que es la primera variación de la aleación original, por consiguiente la aleación B390.0 sería la segunda variación y así sucesivamente.

La designación numérica de la aleación se establece según el porcentaje de peso de cada uno de sus componentes, los resultados del análisis espectrométrico comparados con los datos obtenidos mediante la base de información obtenida por matweb.com especifican precisamente las tres primeras aleaciones de la familia 390.0, aunque no nos puede proporcionar información relativa al temple pues esta información no se puede obtener mediante la espectrometría.

⁶ Esta numeración es parte de la clasificación establecida por la ANSI (American National Standard Institute) para aleaciones de moldeo, para más detalle acerca del tema, véase el anexo A.

⁷ Sufijos característicos de los tratamientos térmicos, para más detalle véase los anexos F.

Figura 18. Resultados obtenidos por la base de datos de materiales de ingeniería.

Choose up to 3 Material Compositions (Optional)
Set the range by entering the minimum and/or maximum values for each selected property.

Aluminum, Al ▼
Min: Max: Unit: % ▼

Silicon, Si ▼
Min: Max: Unit: % ▼

Copper, Cu ▼
Min: Max: Unit: % ▼

Material Name
Aluminum A390.0-T6, Permanent Mold Cast
Aluminum A390.0-T6 Sand Cast
Aluminum A390.0-T7, Permanent Mold Cast
Aluminum A390.0-T7 Sand Cast
Aluminum A390.0-F, -T5, Permanent Mold Cast
Aluminum A390.0-F, -T5 Sand Cast
Aluminum B390.0-F Die Casting Alloy
Aluminum 390.0-F Acurad Castings
Aluminum 390.0-F Conventional Die Cast
Aluminum 390.0-T5 Acurad Castings
Aluminum 390.0-T5 Conventional Die Cast
Aluminum 390.0-T6 Acurad Castings
Aluminum 390.0-T7 Acurad Castings

a.) Selección de tres materiales que componen la aleación, con valores porcentuales según los datos obtenidos por el análisis de espectrometría

b.) Resultados obtenidos mediante la base de datos de la página www.matweb.com

Fuente: Metal and alloy composition search. [Online]. En :<
<http://www.matweb.com/search/CompositionSearch.aspx>>.

Al analizar la composición química de las aleaciones (tablas 4, 5 y 6) con la composición de la aleación del émbolo en estudio (tabla 10), se hace evidente que la aleación de la muestra corresponde a la designación B390.0, siendo la única que contiene Níquel en su composición y cuyos porcentajes totales son afines (para más detalle de las propiedades químicas de esta y otras aleaciones recomendadas para la fabricación del émbolo véase el anexo C).

Tabla 4. Composición de la aleación 390.0

Designación	Composición química							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti
390.0	16.0-18.0	1.3 máx.	4.0-5.0	0.10 máx.	0.45-0.65	----	0.1 máx.	0.2 máx.
La aleación 390.0 se ha registrado en la Asociación del Aluminio y designado por la norma ASTM ⁸ .								

Fuentes: DAVIS, J. Aluminum and aluminum alloys. USA: Ed. ASM international. 1993. P.27.

Tabla 5. Composición de la aleación A390.0

Designación	Composición química							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti
A390.0	16.0-18.0	0.5 máx.	4.0-5.0	0.10 máx.	0.45-0.65	----	0.1 máx.	0.2 máx.
La aleación A390.0 se ha registrado en la Asociación del Aluminio y designado por la norma ASTM.								

Fuente: ASM⁹ Handbook volume II: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international. 1990. p.95.

Tabla 6. Composición de la aleación B390.0

Designación	Composición química							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti
B390.0	16.0-18.0	1.3 máx.	4.0-5.0	0.50 máx.	0.45-0.65	0.1 máx.	1.5 máx.	0.2 máx.
La aleación B390.0 se ha registrado en la Asociación del Aluminio y designado por la norma ASTM.								

Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international. 1990. p.95.

⁸ ASTM es una organización que desarrolla y publica acuerdos sobre normas técnicas para una amplia gama de materiales y productos. Es uno de los mayores contribuyentes de las técnicas ISO y es líder en la definición de materiales y métodos de prueba en casi todas las industrias, especialmente en el área petrolera y petroquímica.

⁹ ASM es la Sociedad Americana de Metales (American Society for Metals), una organización profesional dirigida por y para científicos e ingenieros, cuyo enfoque es el estudio y análisis de los metales.

2.4.3 Ensayo metalográfico Existen diversas disciplinas que se encargan del estudio de las estructuras que conforman los materiales con las que podemos analizar el material del émbolo en estudio, entre ellas encontramos la metalografía. La disciplina de la metalografía es la encargada de examinar y determinar los componentes en una muestra de metal haciendo uso de varios niveles de magnificación que pueden ir desde 20x hasta 1'000.000x.

Figura 19. Proceso de elaboración de la baquelita.



Baqelita sometida a la prensa de compresión.



Segmento del émbolo por corte transversal embebido en la baquelita.

Estos son realizados por medio del uso de microscopios especiales como el estereoscópico. Gran parte del estudio metalográfico comprende la observación de granos, dirección, tamaño y composición que caracterizan a la muestra; estas microestructuras pueden ser observadas dentro de un rango que oscila entre 10^{-8}m y 10^{-2}m .

El proceso comienza mediante la creación de una baquelita que contiene un segmento del material mediante una prensa de compresión (figura 19), una vez tomados los segmentos del émbolo y embebidos en la baquelita se pasan bajo la lupa del microscopio estereoscópico Olympus del laboratorio de la Escuela de Metalurgia y Ciencia de los materiales.

El estudio de la metalografía integra dos tipos de análisis: el macroscópico y microscópico.

Primero analizaremos el examen macrográfico. Este tipo de examen se realiza sin una preparación previa de la muestra que será sometida a análisis, simplemente es llevada directamente al estereoscopio y se magnifica la visualización en busca de irregularidades, patrones o formas con la que se puede hacer una identificación preliminar del tipo de estructura que conforma la pieza. Este tipo de examen no nos permite hacer un examen objetivo para el análisis del material, debido a que las aleaciones de aluminio son muy diversas y para su identificación se necesita una visualización más profunda.

Después el examen micrográfico. Este examen exige más detalle y demanda de un microscopio con aumentos muy superiores a los de la prueba anterior, que generalmente oscilan desde los 100X hasta los 2000X además del uso de un reactivo especial para la prueba. El reactivo que usualmente se usa para atacar

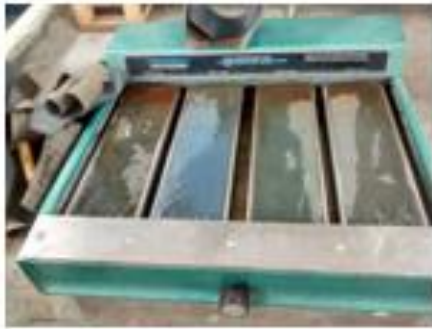
metales en este tipo de exámenes es el Keller¹⁰, este reactivo es una solución de ácidos fluorhídrico, clorhídrico y nítrico en agua (composición 2 ml de HF, 3 ml de HCl, 5 ml de HNO₃ en 190ml de H₂O) que bajo la norma ASTM E407 se identifica con el número 3. Si se quiere aumentar la velocidad de ataque se agrega más ácido nítrico. Este examen requiere del seguimiento de cierto tipo de pasos específicos para su correcta realización como se explica a continuación:

1. Se realiza un corte transversal a una muestra del émbolo para someterla a estudio.
2. Una vez obtenida la muestra se somete a un proceso de desbaste y pulido buscando un acabado tipo espejo.
3. La muestra se ataca químicamente con Keller por cinco segundos aproximadamente
4. Inmediatamente después del proceso de ataque químico, la muestra se limpia con abundante agua.
5. Se observa la muestra a través del microscopio estereoscópico aumentado la visualización de la muestra desde 100X hasta 2000X.

Preliminarmente, las muestras fueron sometidas a un proceso de pulido con lijas de agua, inicialmente se utilizó la P180 que es la más gruesa hasta llegar a la más fina, la P800 mediante una lijadora de banda marca BUEHLER (figura 20-a). Luego las muestras fueron montadas en una pulidora metalografía modelo FORCIPOL 2V de la marca Metkon (figura 20-b) que se compone de dos platos con una relación de diámetros 200/250 mm que actúan a una velocidad de 246 rpm. Después de este proceso de pulido final las muestras fueron observadas en el microscopio Olympus, cuyas imágenes se observan en la figura 21.

¹⁰ AMERICAN SOCIETY TESTING MATERIALS. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. ASTM E407 – 07. West Conshohocken, USA: ASTM, 2003. 23 p.

Figura 20. Lijadora de banda para metalografía

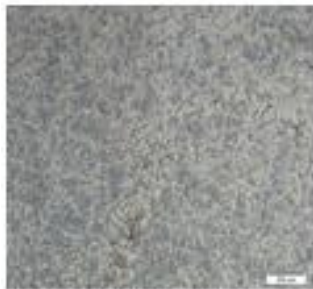


a.) Lijadora de banda para metalografía

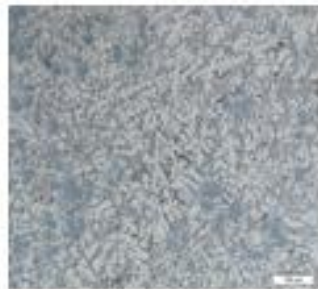


b.) Pulidora metalografía

Figura 21. Muestra del émbolo en probeta de diferentes vistas sometidas a ataque Keller.



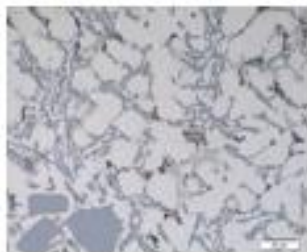
Vista 100X



Vista 200X



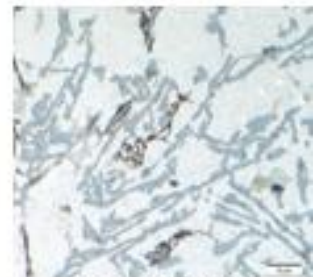
Vista 500X



Vista 1000x



Vista 1500X

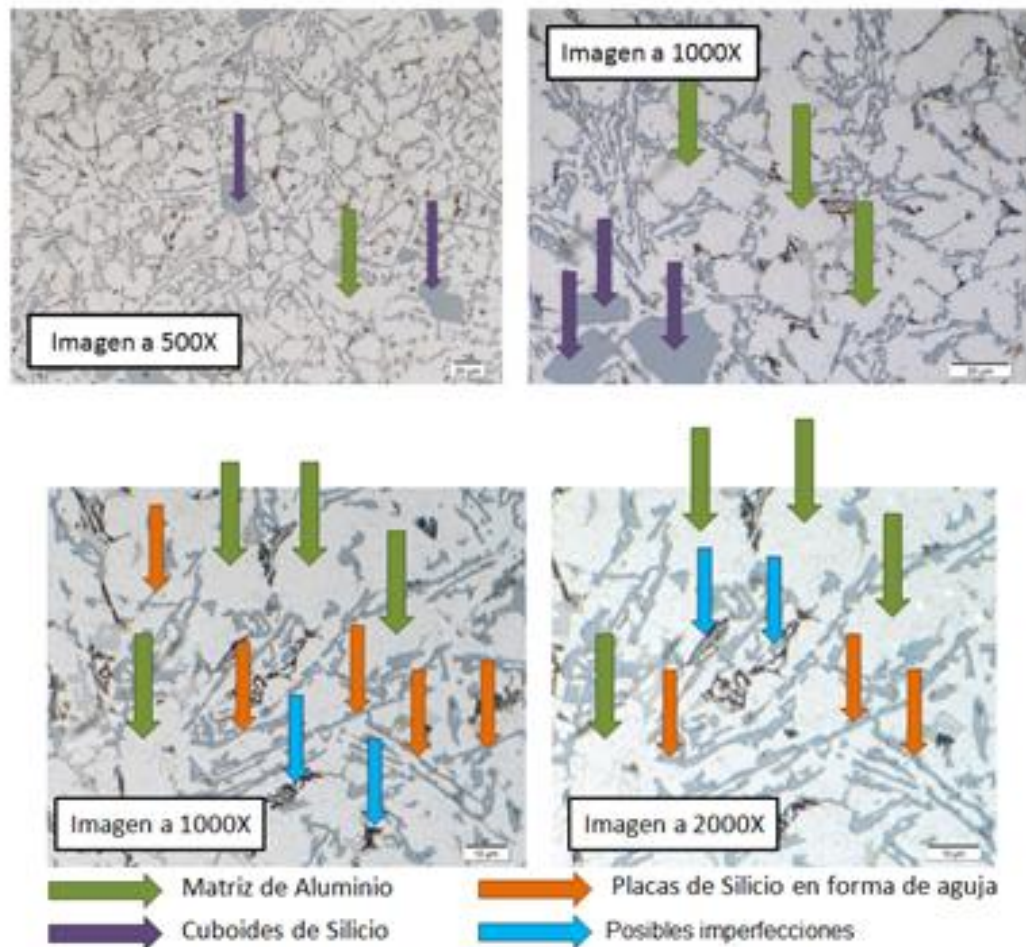


Vista 2000X

Fuente: Microscopio estereoscópico Olympus.

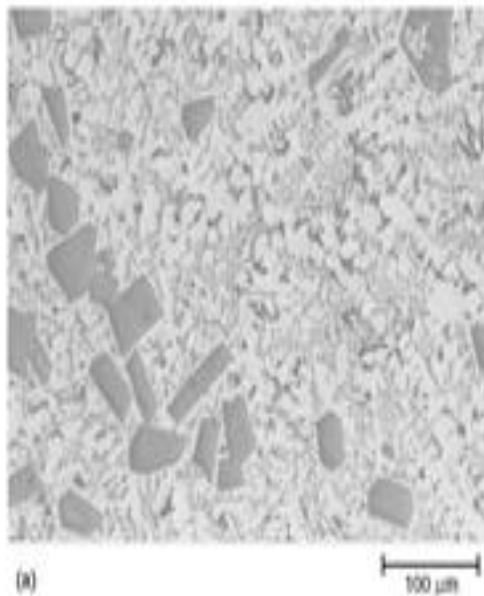
Haciendo un análisis más detallado de las diferentes vistas obtenidas del émbolo en estudio, se denota una microestructura aleada en una matriz de aluminio (flechas verdes). Como se ve en la figura 22, en las imágenes de 500X y 1000X se hacen visibles los cuboides de Silicio típicos en la aleación Aluminio-Silicio (flechas moradas) y en las imágenes de 1500X y de 2000X se muestran placas de Silicio en forma de aguja también típicas en este tipo de aleación (flechas moradas).

Figura 22. Descripción de la morfología de la aleación del émbolo en estudio

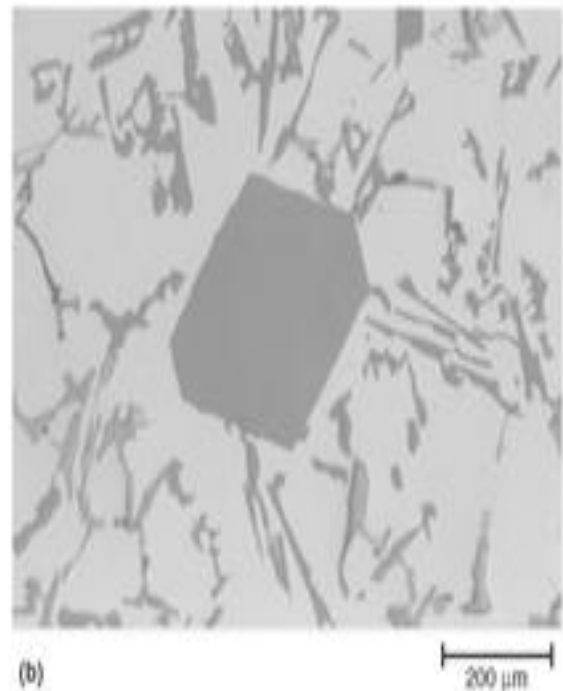


Tomando como referencia las microestructuras del atlas de microfractografía de la ASM, vemos las características típicas de la microestructura de las aleaciones 390.0 y se hace evidente que la dominación proporcional del Aluminio y el Silicio (figura 23) son concordantes en cuanto a composición y forma con la microestructura obtenida mediante el análisis de metalografía (figura 24). Lo cual es coherente con los resultados del ensayo de espectrometría.

Figura 23. Microestructuras de la aleación 390.0.



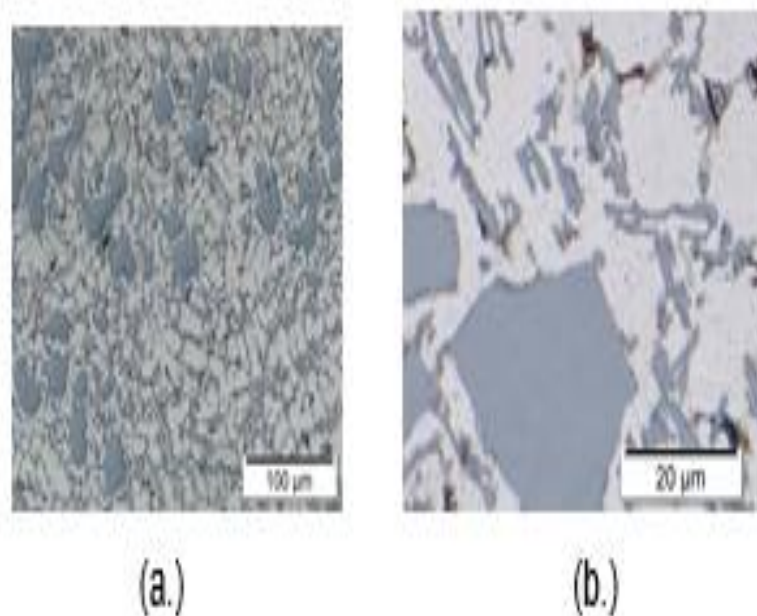
(a) Vista de la aleación de 150X.



(b) Aleación donde se distingue el Silicio en forma de cuboide y en forma de aguja, vista a 750X.

WARMUZEK, M. Aluminum-Silicon casting alloys (Atlas of Microfractographs). USA: Ed. ASM international. 2004. p.95

Figura 24. Microestructuras del émbolo en estudio a 200X y 1000X



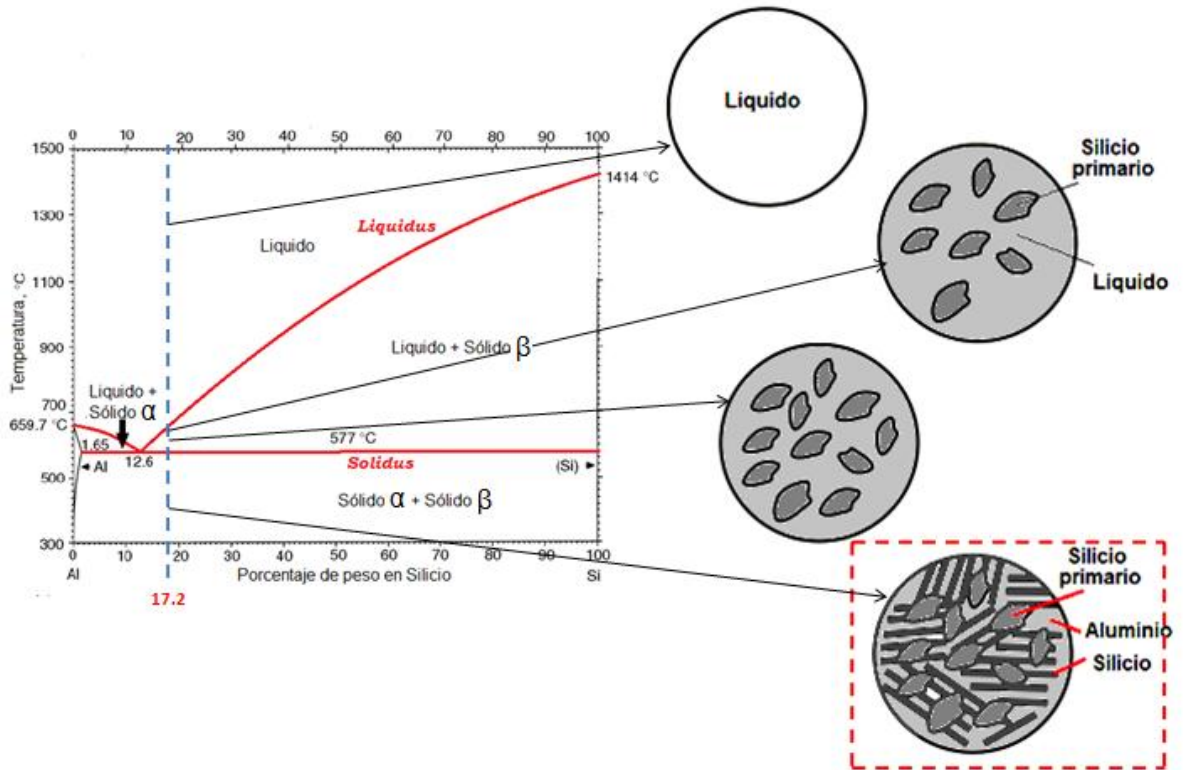
(a) Fracción de la vista de la aleación de 200X. (b) Fracción de la aleación donde se distingue el Silicio en forma de cuboide y en forma de aguja, vista a 1000X.

Fuente: Microscopio estereoscópico Olympus.

Las aleaciones con contenido mayor de 12.6% de Si se conocen como "hipereutéticas". El líquido de esta composición se enfría lentamente hasta la temperatura eutética, mostrando en su fase sólida partículas de Silicio en forma de cuboides y agujas distribuidas aleatoriamente en la matriz de aluminio como se puede observar en las figuras 25 y 26.

Al compararlas con la vista a 500X de la microestructura del émbolo en estudio (figuras 21 y 22) podemos reconocer que la aleación típica 390.0 tiene una condición hipereutética.

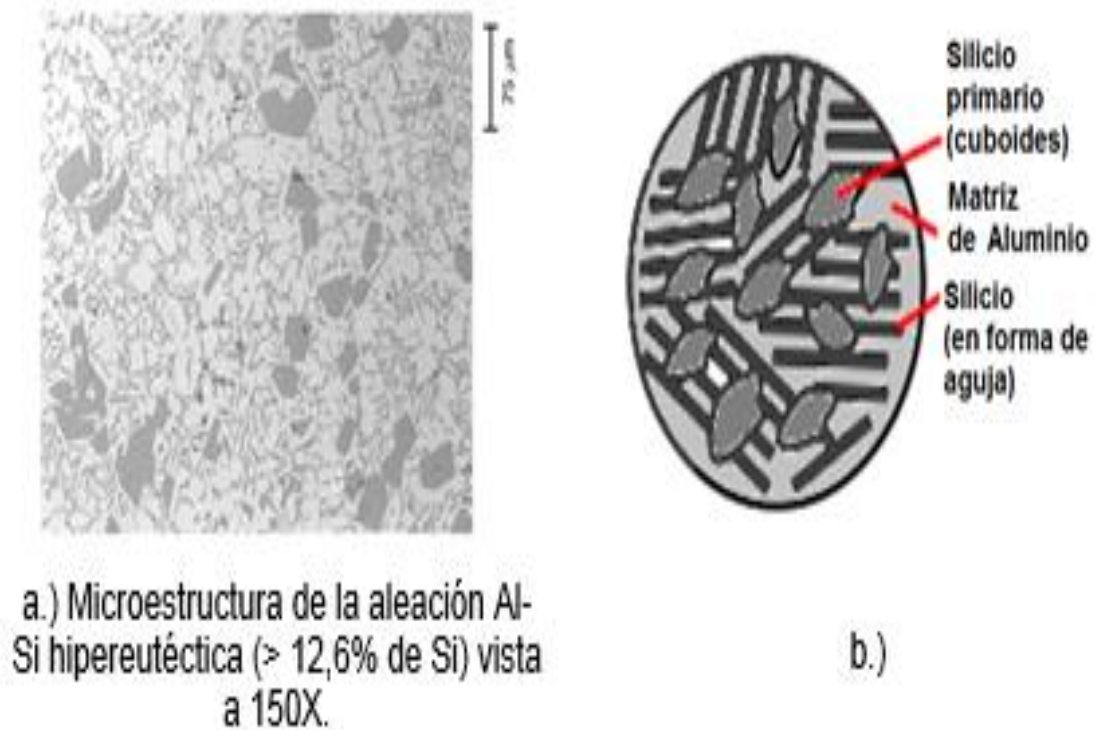
Figura 25. Diagrama de fases de aleación Al-Si hipereutéctica



Los émbolos hipereutéticos están fabricados de una aleación de aluminio que tiene mucho más silicio, el cual es soluble en la matriz del aluminio a la temperatura de funcionamiento. El aluminio hipereutético tiene un menor coeficiente de expansión térmica, lo que permite que se construya el émbolo a tolerancias mucho más ajustadas, aunque hay que tener en cuenta que si la mezcla tiene contenidos de silicio superiores al 25% de silicio hay una reducción significativa de la fuerza en la aleación, por lo que los émbolos hipereutéticos comúnmente usan un nivel de silicio entre 12% al 19%, este tipo de aleaciones se destacan por su elevada resistencia al desgaste, gracias a la gran dureza que le confieren su porcentaje en partículas de silicio primario (cuboides). En términos generales los émbolos hipereutéticos son más fuertes que la mayoría de émbolos

fabricados con aluminio por moldeo y se utilizan en muchas aplicaciones de alto rendimiento.

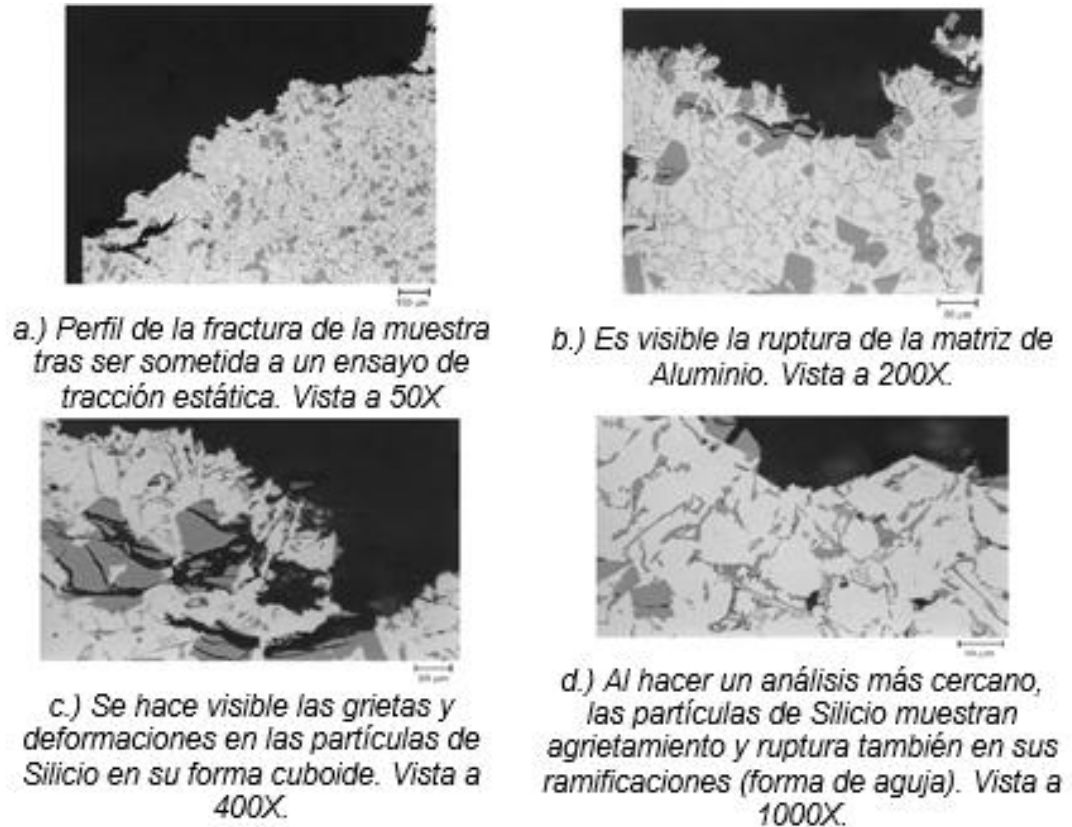
Figura 26. Microestructura de la aleación Al-Si hipereutética



Fuentes: a.) WARMUZEK, M. Aluminum-Silicon casting alloys (Atlas of Microfractographs). USA: Ed. ASM international. 2004. p.2; b.) Autores

Además de reconocer las características anteriormente mencionadas en la aleación en que fue construido el émbolo, el análisis micrográfico nos permite establecer si la muestra en estudio no presenta ningún tipo de fractura estructural, lo cual se establece al comparar las vistas analizadas de la microestructura (figuras 21 y 22) con las de la aleación 390.0 cuando se somete a fractura (figura 27).

Figura 27. Perfiles de fractura de la aleación 390.0



Fuente: WARMUZEK, M. Aluminum-Silicon casting alloys (Atlas of Microfractographs). USA: Ed. ASM international. 2004. p.96.

Para más detalle respecto a los diagramas de fase característicos de la aleación Al-Si véase el anexo D.

2.4.4 Ensayos de durezas. Antes de tomarse las muestras del émbolo para su estudio metalográfico, estas fueron sometidas a ensayos de dureza y microdureza.

En general el término "dureza" se define como la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones tales como la penetración, la abrasión, el rayado, la cortadura, las deformaciones permanentes, entre otras.

Primero hallamos la dureza del émbolo por ensayo Rockwell (HR), Los ensayos de dureza miden la resistencia de un material a la penetración de un indentador, los resultados de este tipo de ensayo generalmente se entregan en números de dureza Rockwell o Brinell, para el émbolo sujeto a análisis se hizo uso de una maquina especialmente diseñada para este fin conocida como durómetro y que pertenece al laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Escuela de Metalurgia de la Universidad Industrial de Santander, como se puede ver en la figura 28.

El durómetro de las instalaciones del laboratorio de metalurgia utiliza la escala de dureza Rockwell para la entrega de resultados. En este tipo de ensayo mediante el durómetro se fuerza a un penetrador que puede ser cónico esferoidal de diamante o esférico de acero endurecido contra la superficie de la muestra a analizar y se mide la profundidad de la huella hecha en el ensayo.

El número de dureza Rockwell (HR) se define como un número que se deriva del incremento de la profundidad del penetrador cuando se fuerza desde una magnitud de fuerza preliminar hasta una fuerza final y que posteriormente retoma su valor preliminar

Figura 28. Ensayo preliminar de la dureza del émbolo mediante durómetro Wilson



a.) Durómetro marca Wilson



b.) Medidor del durómetro



c.) Indentador aplicando fuerza a la muestra del émbolo



d.) Muestra sometida al ensayo de dureza.

Los parámetros establecidos para el ensayo de dureza Rockwell se muestran en la tabla 7 y los resultados de su ejecución se muestran en la tabla 8.

Tabla 7. Parámetros de ensayo escala B de dureza Rockwell.

Escala	Penetrador	Carga total [kg]	Color de la escala
B	Esfera de acero de 1/16" (1.588 mm)de diámetro	100	Rojo

Fuente: ASM Handbook volume VIII: Mechanical Testing and Evaluation. USA:
Ed. ASM international. 2000. p.432

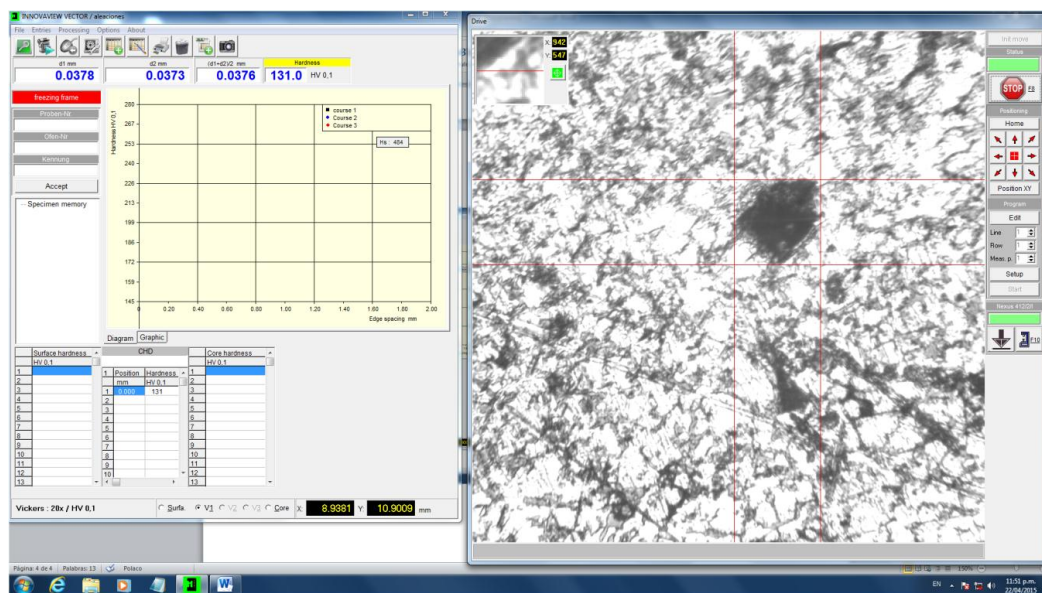
Tabla 8. Resultados de ensayo de dureza Rockwell

Resultados de ensayo del émbolo en estudio	Media aritmética del ensayo en su entero más cercano
68 HRB	65.833 HRB≈66HRB
66 HRB	
62 HRB	
64 HRB	
67 HRB	
68 HRB	

La numeración de dureza Rockwell viene seguido de una letras mayúsculas que denotan su escala y ensayo, por ejemplo observando la notación de los ensayos de la tabla 18, notamos que la muestra del émbolo en promedio tiene una dureza Rockwell de 66 unidades en la escala B, cuyo ensayo se hace aplicando a la muestra una carga total de 100 kgf mediante un penetrador esférico, después de denotar la escala se le puede agregar la letra "S" si la esfera que se penetra en la muestra es de acero como es nuestro caso o "W" si la esfera es de carburo de tungsteno, por tanto la notación completa para el ensayo en estudio es 66 HRBS. Para los ensayos de dureza Rockwell el tiempo de aplicación de la carga difiere según la norma con que se guie la prueba, para las normas ASTM E 18-79 el tiempo de aplicación de la carga total no debe ser mayor a dos segundos.

Después se halla la microdureza del émbolo por ensayo Vickers (HV) Al igual que el ensayo de dureza, la microdureza es un método que se utiliza para medir la resistencia de un material cuando es penetrado solo que en este caso la huella producida es tan pequeña que solo se puede observar con la ayuda de un microscopio y es la única manera en que su valor pueda ser medido y valorado.

Figura 29. Visualización del software Innovaview Vector



Fuente: Microdurómetro Innovatest Europe BV

Para este ensayo se usó el equipo INNOVATEST Europe BV que básicamente es un microdurómetro de alta precisión el cual hace parte del laboratorio del grupo de investigación GIC de la Escuela de Metalurgia y Ciencias de los Materiales de la universidad, localizado en el Parque Tecnológico de Guatiguará.

La muestra fue sometida a una carga de prueba de 0.1 kgf, sus resultados son cuantificados en dureza Vickers por medio del software del microdurómetro llamado Innovaview Vector (figura 29). El ensayo Vickers usa un penetrador

piramidal de diamante con un Angulo base de 136° como se describe en la figura 30.

Mediante una carga predeterminada se fuerza un penetrador piramidal de base cuadrada mediante el uso de una máquina calibrada contra la superficie que estará sometida a ensayo, una vez removida la carga se mide la diagonal resultante de la impresión como se describe en la figura 30.

Figura 30. Ensayo de dureza Vickers.



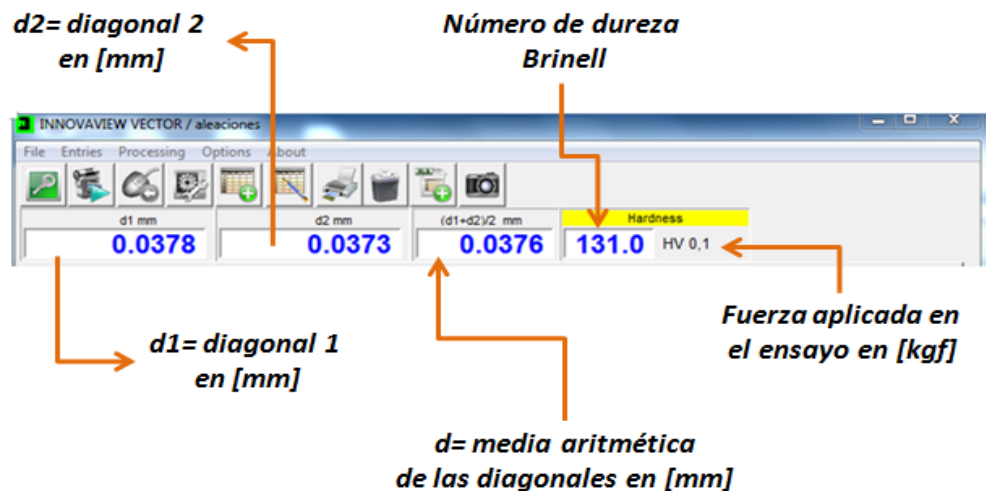
Fuentes: a.) CALLE, G. Laboratorio de resistencia de materiales. [Online]. En: <<http://www.utp.edu.co/~gcalle/DUREZAVICKERS.pdf>>; b.) Microdurómetro Innovatest Europe BV

Por definición, la dureza Vickers (HV) es la relación de la carga P que efectúa en el penetrador y el área de la superficie de la huella. Matemáticamente se puede expresar de la siguiente manera:

$$HV = \frac{P}{A} = \frac{P}{\left(\frac{d^2}{2 * \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\right)} \quad (1)$$

Donde HV es el número de dureza Vickers, P es la carga aplicada en kilogramos fuerza y d es la media aritmética de las diagonales d₁ y d₂. El software que usamos para el ensayo nos muestra todos los datos anteriormente mencionados (figura 31).

Figura 31. Datos proporcionados por el software Innovaview Vector



Fuente: Microdurómetro Innovatest Europe BV

Como sabemos que el valor del ángulo α es constante e igual a 136° , la ecuación anterior se simplifica para usos prácticos con lo cual queda:

$$HV = \frac{P}{A} = 1.8544 * \frac{P}{d^2} \quad (2)$$

Lo cual es coherente con los datos proporcionados por el software, pues los reemplazamos en la ecuación 2 y nos queda:

$$HV = 1.8544 * \frac{0.1[\text{kgf}]}{0.0376^2[\text{mm}]^2} = 131.168 \approx 131$$

Para este tipo de ensayos existe una estandarización del método y se maneja bajo los siguientes parámetros:

Tabla 9. Parámetros estándar de cálculo de dureza Vickers para microdureza.

Penetrador:	Pirámide de diamante con $\alpha = 136^\circ$
Carga (P):	0,1.....1 kgf
Duración de carga (t):	10.....15 s

Como la carga en el ensayo se establece dentro de unos intervalos mostrados en la tabla 9, se debe complementar la notación del número de dureza Vickers agregando el número de carga con que se hizo el ensayo, por ejemplo para los resultados del ensayo la notación es 131 HV 0.1 esto indica una dureza Vickers de 131 bajo una carga de 0.1 kilogramos-fuerza aplicado en un tiempo de 10 a 15 segundos.

Si al ensayo se aplicará en intervalos de tiempo fuera del rango establecido en la tabla 9, la notación debe añadir ese nuevo tiempo de aplicación de la prueba, por ejemplo, si el ensayo anterior se hizo bajo la misma fuerza y tuvo el mismo resultado en su dureza, pero se hizo en un tiempo de 25 segundos, la notación sería 131 HV 0.1/25.

La sociedad americana de metales ha establecido referencias para usos científicos e ingenieriles sobre las diversas propiedades de los metales. Para la cuantificación de la dureza del aluminio y sus aleaciones utilizan el ensayo Brinell.

Para este tipo de ensayo se usa como penetrador una esfera, a este penetrador se le aplica una carga que fuerza a la esfera contra la superficie, luego se estudia

el diámetro de la huella o impresión que esta deja y con ello se determina la dureza, este ensayo se estandariza bajo la norma ASTM E 10.

Tabla 10. Parámetros estándar de cálculo de dureza Brinell

Diámetro de la esfera (D):	10 mm
Carga (P):	500 Kg-f
Duración de carga (t):	10.....15 s

Existe una estandarización del método para las aleaciones del Aluminio y se maneja bajo los siguientes parámetros de la tabla 10.

Normalmente utilizaríamos los datos de la ASM para compararlos con los resultados obtenidos en las pruebas de dureza y microdureza con el fin establecer el tipo de temple y procesos de moldeo al que puede someterse el material. Por ejemplo si la muestra hubiese sido la primera versión de la aleación y sus pruebas de dureza y microdureza hubiesen tenido resultados cercanos a 110HB, sabríamos que su proceso de fundición seria Acurad¹¹, que su temple podría ser F o T5 (para más detalle sobre temple véase anexo F), lo cual estableceríamos mediante un ensayo a su límite elástico que en teoría descartaría uno de los temples (tabla 11).

Pero para el caso particular del émbolo en estudio, el análisis de espectrometría de emisión óptica estableció que la aleación es la B390.0, lo cual facilita nuestro análisis, puesto que esta aleación está sometida a un solo tipo de temple que proporcionara a su vez un solo valor de dureza.

¹¹ Acurad es un proceso de fundición a presión desarrollado por General Motors a finales de los años 1950. El nombre es un acrónimo de precisión (accurate), confiabilidad (reliable) y densidad (dense).

Tabla 11. Propiedades mecánicas típicas de temperatura ambiente de probetas de ensayo de las aleaciones de 390,0

Aleación	Resistencia a la tracción.		Límite elástico		Temple	Dureza HB ^(a)
	MPa	ksi	MPa	ksi		
390.0	Moldeo por inyección convencional (Conventional die castings.)					
	280	40.5	240	35	F	120
	295	43	260	38	T5	125
	Moldeo Acurad (Acurad castings)					
	205	30	195	28	F	110
	205	30	200	29	T5	110
	365	53	365	53	T6	150
	275	40	275	40	T7	125
(a) Dureza Brinell donde la muestra es penetrada por una bola de 10 mm bajo una carga de 500 kgf.						

Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international. 1990. p.643.

Tabla 12. Dureza típica de la muestra del émbolo a temperatura ambiente (unidades de ingeniería)

Aleación	Temple	Dureza HB ^(a)
Moldeo por inyección (Die casting) o moldeo en arena (Sand casting)		
B390.0	F	120
(a) Dureza Brinell donde la muestra es penetrada por una bola de 10 mm bajo una carga de 500 kgf.		

Fuente: KAUFMAN, J. Aluminum alloys castings. USA: Ed. ASM international. 2004. p.84.

De acuerdo con los datos obtenidos en la tabla 12, podemos establecer que la aleación B390.0 tiene un temple F, es decir que es un material, sin ningún tratamiento posterior a su moldeo, básicamente como salió de la fábrica, además es un material que usualmente se usa para procesos de manufactura de fundición por inyección o en arena.

Según la ASM, la dureza de la aleación B390.0 tiene la notación 120 HBS esto indica una dureza Brinell de 120 bajo las condiciones expuestas en la tabla 10. Al hacer una comparación de este valor de dureza respecto a los valores hallados por los ensayos de dureza y microdureza, se da cierto margen de error (véase tabla 13), debido a que los ensayos realizados no cuentan con el nivel tecnológico y de control que puede tener los laboratorios de ensayos bajo la tutela de la sociedad americana de metales. Además, los valores que establece la ASM son producto de ensayos hechos a probetas especialmente preparadas para este fin y no de especímenes extraídos de émbolos de fundiciones comerciales como es nuestro caso (para más detalle sobre los aspectos teóricos de las durezas analizadas véase el anexo E).

Tabla 13. Comparación entre resultados de dureza

Referencia	Brinell (HBS)	Rockwell (HRB)	Vickers (HV)	% Error ^(b)
SAE	120 ^(a)	76	141	----
Ensayo de dureza	107	66 ^(b)	124	12.1
Ensayo de microdureza	112	70	131 ^(c)	7.09

(a) Valor de dureza según la SAE.
 (b) Resultado de ensayo de dureza.
 (c) Resultado de ensayo de microdureza.
 Los otros valores están basados en las conversiones de dureza para productos de aluminio según la norma ASTM E 140 – 02.

3. OPCIONES DE MANUFACTURA DEL PROCESOS DE MOLDEO Y DE SELECCIÓN DE ALEACIONES DE ALUMINIO PARA LA FABRICACIÓN DEL ÉMBOLO

Como se ha explicado con anterioridad las aleaciones de aluminio son la base de la fabricación de la gran mayoría de émbolos, incluyendo el de nuestro análisis, lo cual fue reafirmado mediante los ensayos destructivos y no destructivos, los cuales nos permitieron conocer las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la aleación con que fue fabricado, además de su método de manufactura. Sin embargo dentro de la industria de fabricación de componentes mecánicos, existe una serie de recomendaciones en la selección de los materiales metálicos de acuerdo al tipo de pieza que se va a construir y su función. Por esto se hace necesario hacer una investigación a dichas fuentes con el fin de realizar una la correcta selección del material con que se fabricara el émbolo. A continuación se presentara un compendio de estos materiales.

3.1 OPCIONES DE PROCESO DE MOLDEO

El aluminio es uno de los pocos metales que se puede someter a prácticamente cualquier proceso de moldeo. Los principales procesos para la manufactura del émbolo, dependen del tipo de molde y cantidad de producción y se clasifican de la siguiente manera: Si el molde es permanente bien puede ser moldeo a presión en matriz (die casting) o colada en coquilla (permanent mold casting) pero si el molde es desechable es porque el émbolo se hará por moldeo en arena (sand casting), analizando los factores expuestos en la tabla 14 , el moldeo en arena resulta ser el método más viable para fabricar el émbolo prototipo. Para observar con más detalle las otras opciones de procesos de moldeo para el émbolo véase el anexo G.

Tabla 14. Factores que influyen en la selección del proceso de fundición de aleaciones de aluminio.

Factor	Proceso de fundición		
	Fundición en molde de arena (sand casting)	Colada en coquilla (Permanent mold casting)	Moldeo a presión en matriz (Die casting)
Costos de equipo	Sus costos son los más baratos, el equipo requiere de pocos elementos.	Los equipos son más costosos que los de fundición de arena, pero más económicos que los de moldeo a presión en matriz.	Es la fundición que requiere mayores costos en equipamiento
Tasa de fundición	La tasa es la más baja.	Tasas promedio de 11 (kg/h); son las tasas promedio más altas posibles	Tasa promedio de 4,5 (kg/h), aunque pueden lograr en algunos casos tasas de 45 (kg/h).
Tamaño de la fundición	Más grande que cualquier otro método de fundición	Limitado por el tamaño de la máquina	Limitado por el tamaño de la máquina
Formación de partes externas e internas	El más adecuado para formas complejas	Se pueden utilizar machos simples de arena, pero son más difíciles de insertar que en piezas de fundición en arena	Los machos deben tener un sistema hidráulico o mecánico para poder sacarlo de la matriz, porque los machos son de metal.
Espesor mínimo de las paredes de los moldes	Rango de 3.0 a 5.0 mm; 4.0 mm como promedio.	Rango de 3.0 a 5.0 mm ; 3.5 mm como promedio	Rango de 1,0 a 2,5 mm; depende del tamaño de la fundición.
Tipo de núcleos o corazones.	Los machos de arena pueden realizarse con geometrías complejas.	Si los machos son reutilizables generalmente se hacen en acero. Si no es reutilizable se puede hacer de arena.	Los núcleos son de acero; pero deben ser simples y directos, para que puedan ser retirados
Tolerancia obtenidas	Son las más pobres; su mejor tolerancia lineal es de 300 (mm/m)	Su mejor tolerancia lineal es de 10 (mm /m)	Su mejor tolerancia lineal es de 4 (mm /m)
Acabado superficial	Rango de 6.5 a 12.5 μ m	Rango de 4.0 a 10 μ m	Acabado superficial de 1.5 μ m. El mejor resultado de los tres procesos de fundición.
Porosidad de gases	Produce la porosidad más baja posible si se usa una buena técnica	Es hermético; es buena la posibilidad de una baja porosidad.	La porosidad puede estar presente.

Continuación de la tabla 14.

Velocidad de enfriamiento	0.1-0.5 °C/s	0.3-1.0 °C/s	50-500 °C/s
Tamaño de grano	Grueso	Fino	Muy fino en la superficie
Resistencia	Menor	Excelente	La más alta
Propiedades de fatiga	Buena	Buena	Excelente
Resistencia al desgaste	Buena	Buena	Excelente
Calidad de temple	Depende de la técnica de la fundición	De máxima calidad	Tolerancia muy buenas
Observaciones	Muy versátil en cuanto a tamaño, forma y configuraciones internas del fundido	-----	Excelente para las tasas de producción rápidas

Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international. 1990. p.527.

La opción de proceso por conformado o forja es un proceso destinado para émbolos de necesidades muy especiales; los materiales, procesos de manufactura y costos de fabricación superan a los de cualquier proceso de moldeo, para más información sobre este tema véase el anexo J.

3.1.1 Fundición en molde de arena (Sand casting) Es el método de fundición de metales más tradicional para trabajos de fundición, el proceso básicamente consiste en verter la aleación de aluminio aun líquida en un molde de arena hecho en base a la metrología del émbolo para luego dejar solidificar el producto del fundido, luego se rompe el molde y se retira el émbolo a espera del mecanizado. El producto se tiene que limpiar e inspeccionar y si es necesario someterlo a tratamiento térmico para mejorar sus propiedades metalúrgicas.

Las operaciones de fundición generalmente utilizan como material para el molde la arena sílice (SiO_2) o sílice mezclada con otros minerales debido a su bajo costo y por sus características térmicas que tiene el mineral en las que se resalta su elevado punto de fusión, ya que su capacidad refractaria le permite soportar altas temperaturas sin que se funda o se degrade (véase la figura 32).

Figura 32. Arena sílice para fundición



Fuente: <https://www.camimex.org.mx/index.php/secciones1/sala-de-presa/uso-de-los-metales/arena-silica/>

La arena sílice o sílica es el compuesto resultante de la combinación del silicio con el oxígeno, formada por la composición química de un átomo de sílice y dos átomos de oxígeno, formando la molécula SiO_2 , la cual es muy estable.

Los usos del sílice en la industria de la fundición se derivan de sus particulares propiedades físicas y químicas, en las que se destacan su dureza, resistencia química y alto punto de fusión. La arena siempre debe estar limpia y si es posible debe ser nueva, además debe ser compuesta por granos finos y redondos que faciliten la compactación del apisonamiento y así reforzar la resistencia del molde, aunque el grano fino puede reducir la permeabilidad del molde, lo cual limita el escape de gases durante la fundición, es por eso que se tamiza la arena, de tal forma que la arena más fina es la que entra en contacto con el modelo del émbolo,

mientras que la arena más gruesa da el cuerpo al molde para permitir la salida de los gases y el aire.

Existen diversos tipos de moldes en arena, los más utilizados son los moldes de caja fría, los moldes sin cocción y los moldes de arena verde. Los que se denominan como procesos de curado en frío son los de moldeo en caja fría y los de moldeo sin cocción (no cocido).

En el molde de caja fría se mezcla la arena con ciertos aglutinantes que unen químicamente los granos de arena con el fin de aumentar la resistencia del molde, logrando una buena precisión dimensional a expensas de sus elevados costos.

En los moldes sin cocción, a la arena se le mezcla una resina sintética y después de realizar la mezcla uniformemente esta se endurece a temperatura ambiente. El moldeo por arena verde es el más utilizado de los tres, se denomina "verde" porque se mantiene húmeda la arena mientras se vacía la aleación en el interior del molde, básicamente es el producto de la mezcla de arena, arcilla y agua, este molde es muy barato de fabricar y la arena se puede reciclar con facilidad para el moldeo de otras piezas.

En la figura 33 se describen las principales partes de los moldes de arena en general, sus principales características se muestran a continuación:

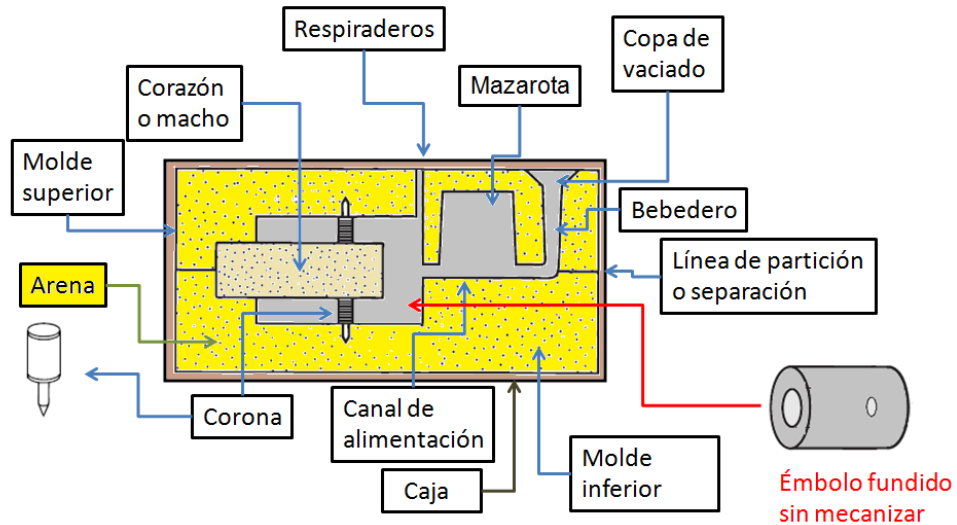
- Caja: Los moldes de arena tienen dos secciones o piezas (molde superior y molde inferior), la función de la caja es la de soportar y mantener unidas las secciones del molde.
- La copa de vaciado: también conocida como bacín, es la entrada donde se vierte la aleación fundida.

- El bebedero: es el primer canal por el que entra la aleación al molde, donde fluye hacia abajo.
- Canal de alimentación: transporta la aleación desde el bebedero hacia la cavidad del molde.
- La mazarota: muy importante en el proceso de fundido, suministra una cantidad adicional de la aleación fundida conforme se vaya contrayendo durante la solidificación.
- El corazón o macho: es un injerto de arena que se coloca al molde debido a que el émbolo tiene una geometría interna que se tiene que definir durante la fundición.
- Corona: Son soportes que buscan alinear el corazón del molde en su debida ubicación, generalmente están hechos de un metal con punto de fusión superior a la de la aleación que vamos a fundir.
- Respiraderos: Su objetivo es el de dejar escapar el aire de la cavidad del molde conforme fluye la aleación, también busca extraer de los moldes los gases producidos por el contacto de la aleación fundida con la arena del molde y del corazón.

Hay diversos factores que pueden determinar la calidad del molde. Uno de los factores es la resistencia que tiene el molde para conservar la forma y resistir a la erosión producida por el flujo de la aleación, otro factor es la permeabilidad que tiene el molde para permitir que pase el aire o los gases durante el proceso de moldeo, el molde también debe tener una estabilidad térmica que le permite resistir al agrietamiento o deformación cuando entra en contacto con la fundición, además se busca que la arena de moldeo sea reutilizable, para ello la arena debe

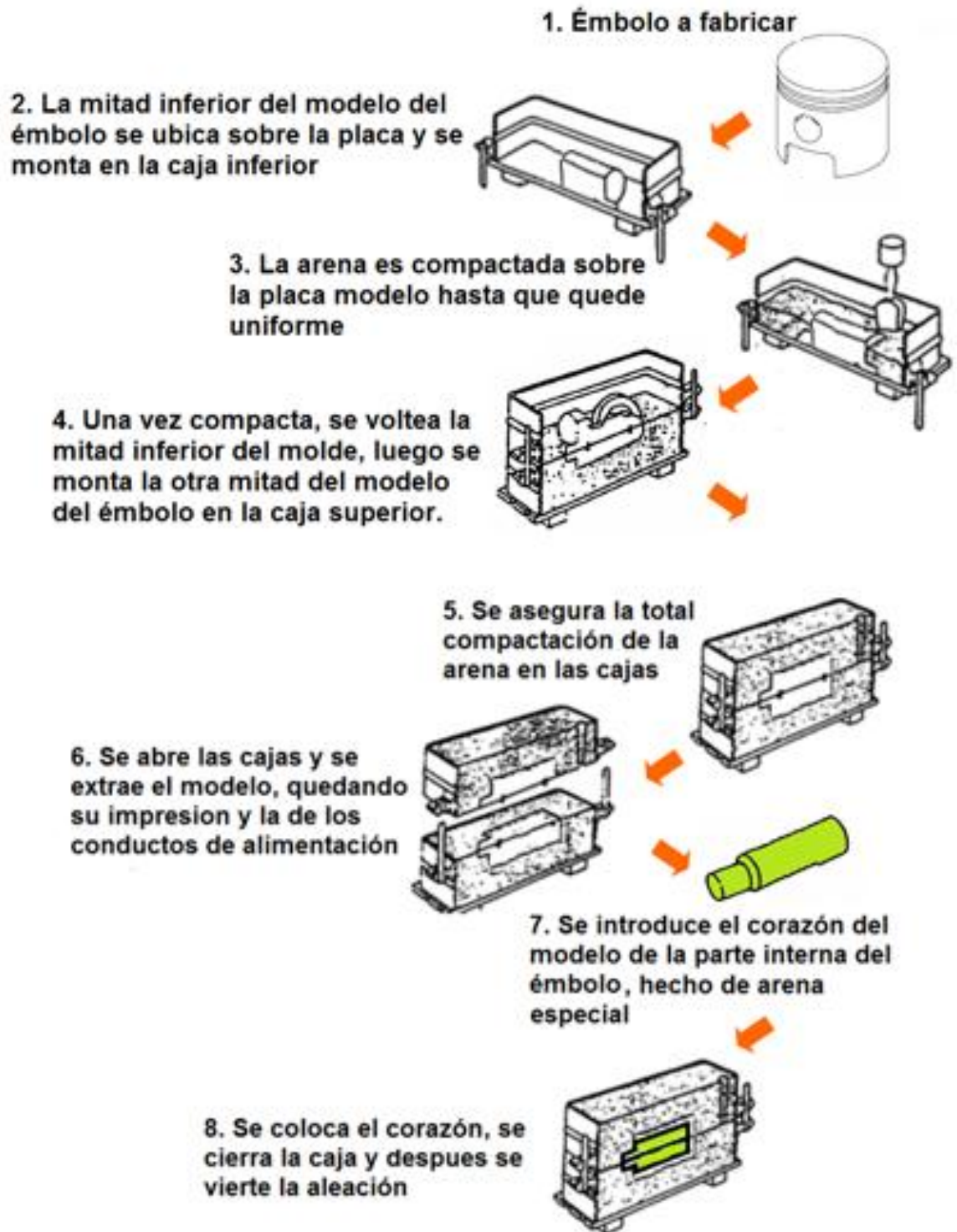
tener unas propiedades que le permitan no agrietarse cuando la fundición se contraiga.

Figura 33. Principales partes de los moldes de arena



Existe una secuencia operacional para la fundición de arena y generalmente siguen los siguientes pasos: Se hace un plano que se utiliza como referencia para general el diseño del modelo de la pieza, como el que se hizo en la metrología. Se coloca el modelo con la forma del émbolo para que quede impresa en la arena en las dos secciones del molde, luego se incorpora un sistema de alimentación al molde, que se conforma de un sistema de vaciado y de la mazarota (generalmente), después se retira el modelo separando las dos mitades del molde, como el fundido del émbolo debe tener una superficie interior entonces debe incluirse el corazón del molde, luego se llena la cavidad con la aleación fundida, se deja enfriar la aleación hasta que se solidifique, luego se separa el molde del émbolo de la arena y finalmente se retira la aleación solidificada. La secuencia descrita se muestra gráficamente en la figura 34 para una mayor comprensión.

Figura 34. Secuencia de operación del fundido de arena del émbolo



Las ventajas de la fundición de aleaciones de aluminio en molde de arena son:

- Es el proceso más económico de fundición de metales. Solo en Estados Unidos, cada año se funden alrededor de 15 millones de toneladas metálicas mediante este proceso.
- Casi todas las aleaciones de fundición pueden fundirse mediante el proceso de arena, pues es uno de los pocos procesos que pueden usarse para metales que tienen altas temperaturas de fusión.
- Su versatilidad permite la fundición de piezas de casi cualquier tamaño, que varía de pequeño (0,01 kg) a muy grande (sin límites).
- Las piezas obtenidas logran una precisión dimensional buena.
- Se puede producir piezas con secciones cuyo espesor mínimo es de 3 milímetros a indefinida.
- El proceso bien realizado presenta niveles aceptables de porosidades en su molde.
- Los moldes de arena con que se hace el proceso, son reciclable en aproximadamente el 90% de los casos.

Las desventajas de la fundición de aleaciones de aluminio en molde de arena son:

- Es difícil de automatizar, prácticamente todo el proceso se tiene que realizar manualmente, requiriendo de varias horas de trabajo.
- Aunque por este método se pueden fundir piezas de prácticamente cualquier tamaño, resulta complejo el manejo de los modelos para piezas de piezas grandes.
- El proceso no es muy útil cuando la geometría es compleja, generalmente la pieza se tiene que mecanizar si se quieren acabados superficiales muy precisos.

- Cuando se debe incluir un corazón en el molde de arena, este se debe sacrificar cada vez que se retire el émbolo fundido.

3.2 OPCIONES DE MATERIALES

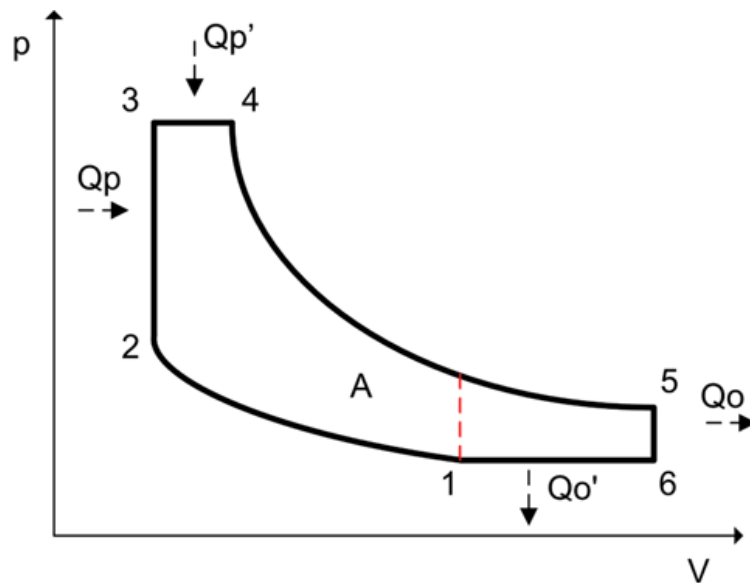
Ya seleccionado el método de moldeo por fundición de arena, se investigó cuáles son las aleaciones recomendadas para la fabricación del émbolo por moldeo de arena, según la ASM, las aleaciones recomendadas son las 222.0-T6, 242.0-T571, 242,0-T77, 328-F, 328-T6 y la B390.0-F, esta última es la que hallamos en el émbolo original y la que elegimos para la fabricación del émbolo prototipo, las razones se pueden ver en el capítulo 5. Dentro de la labor investigativa se hizo un compendio de todas las aleaciones recomendadas para la fabricación de émbolos (véase los anexos H e I), donde se especifica sus procesos de moldeo y todas sus propiedades constitutivas, todo lo anteriormente mencionado se establece según los parámetros de la ASM, la cual es una sociedad investigativa en el área de la ingeniería y de las ciencia de los materiales, que han incluido dentro de sus trabajos, una serie de libros y manuales de referencia que proporcionan diversidad de datos sobre los distintos tipos de metales, incluyendo las aleaciones de aluminio, estos manuales son reconocidos como un estándar en la industria para el análisis y selección de metales para distintas aplicaciones.

4. DISEÑO DEL ÉMBOLO PROTOTIPO

4.1 CÁLCULOS Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL ÉMBOLO

4.1.1 Análisis del ciclo termodinámico En la figura 35 se muestra el diagrama en el que se idealiza el comportamiento de la presión de los gases internos en el cilindro conforme varía el volumen; esto a causa de que el diseño del embolo requiere del valor de fuerza máxima ocasionada por la presión máxima generada entre las paredes de camisa del cilindro y la cabeza del embolo en el ciclo termodinámico.

Figura 35. Ciclo termodinámico en motores de dos tiempos.



Fuente: HEYWOOD, J. Internal Combustion Engine Fundamentals Hardcover. 1988. p. 163.

4.1.2 Presión de admisión para motores de dos tiempos Según Jovaj¹², a presión de admisión en el ciclo para un motor de 2T está dada por:

$$P_a = 1,05p_k \quad (3)$$

$$p_k = p_o \quad (4)$$

Donde,

P_a = Presión de alimentación [Pascales]

p_k = Presión a la entrada [Pascales]

La presión a la entrada p_k es igual a la presión atmosférica p_o ya que no existe sobre alimentación y su "valor medio en Bucaramanga es 90659 [Pa]"¹³. Entonces:

$$P_a = 1,05(90659 \text{ [Pa]})$$

$$P_a = 95191 \text{ [Pa]}$$

El valor obtenido, cuya equivalencia es aproximadamente a 0,95 [bar], se encuentra en el rango de presión de 0,8 a 1,6 [bar] que para un motor de dos tiempos de baja cilindrada que trabaja entre las 3500 [rpm] a 7500 [rpm]¹⁴.

4.1.3 Temperatura de admisión La temperatura de admisión en el ciclo para un motor de 2T está dada por:

$$T_a = \frac{T_o + \Delta T + \varphi \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r} \quad (5)$$

Dónde:

T_a = Temperatura de admisión del ciclo, en grados Kelvin [K]

T_o = Temperatura inicial, en grados Kelvin [K]

ΔT = Incremento de temperatura en el proceso.

φ = Relación entre los calores específicos de la carga y la mezcla.

γ_r = Coeficiente de Gases Residuales.

¹² JÓVAJ, M. S. Motores de automóvil. Moscú: Mir, 1982.

¹³ PUERTO, Efraín. Presiones atmosféricas de las capitales de Colombia. [Citado el 3 de marzo de 2015] Disponible en internet: <<https://efrainpuerto.wordpress.com/2011/02/26/f1-2/>>

¹⁴ CLIMENT, Héctor. Modelado unidimensional de los motores de dos tiempos de pequeña cilindrada. Editorial Reverté. Barcelona. 2004. p. 70-71.

T_r = Temperatura de los gases residuales.

Sabiendo que: $T_o = 295,15$ [K] (Temperatura promedio en la ciudad de Bucaramanga) y que $\phi = 1$, ya que se desprecia la relación entre los calores específicos de la carga fresca y los gases residuales, entonces $c_p'' = \phi c_p$ (ver Jovaj p. 93). También se conoce que $\Delta T = 20[^\circ\text{C}] = 20$ [K] (Ver Jovaj p. 92).

El coeficiente de presión de los gases residuales γ_r varia entre 0,03 y 0,06 tomamos el valor que hace que la fuerza sea máxima ósea $\gamma_r = 0,06$ (adimensional).

El valor de T_r varía entre 700 [K] y 900 [K] para motores a gasolina por ende tomamos el valor de temperatura máxima.

Reemplazando en la ecuación 5, tenemos:

$$T_a = \frac{295,15 \text{ [K]} + 20 \text{ [K]} + (1)(0,06)(900\{\text{K}\})}{1 + 0,06} = 348,24 \text{ [K]}$$

Entonces la temperatura de admisión del Ciclo será 348,24 [K]

Este resultado se encuentra en el rango de temperatura común para un motor de dos tiempos que va de 250 a 2500 [K] en el rango de giro de 0° a 45° ¹⁵.

4.1.4 Presión de compresión Se procedió al cálculo de la presión luego de terminado el ciclo de compresión, utilizando la siguiente ecuación:

$$P_c = P_a \epsilon^{n1} \text{ (Jovaj, p.112.)} \quad (6)$$

Dónde:

P_c = Presión de compresión en el ciclo [MPa].

P_a = Presión de admisión en el ciclo [MPa].

¹⁵ FERGUSON, Colin R. Internal Combustion Engine. Editorial John Willy & Sons, Inc. New York. 2001. p. 44.

n_1 = Exponente Politrópico medio de compresión (Adimensional).

ϵ = Relación de Compresión (Véase tabla 15).

Reemplazando los datos en la ecuación 6:

$$P_c = 95191 [\text{Pa}] (8)^{1,36}$$

$$P_c = 1609897,669 [\text{Pa}] = 1,61 [\text{MPa}]$$

La anterior es la presión de compresión del ciclo.

4.1.5 Temperatura de compresión Se procede a calcular la temperatura del ciclo de compresión con la siguiente ecuación:

$$T_c = T_a \epsilon^{n_1 - 1} \quad (\text{Jovaj, p.112.}) \quad (7)$$

Dónde:

T_c = Temperatura del ciclo de compresión [K].

Reemplazando en la ecuación 7, tenemos:

$$T_c = (348,24 [\text{K}]) (8)^{1,36 - 1} = 736,19 [\text{K}]$$

4.1.6 Temperatura de combustión Esta temperatura es la resultante después de la combustión en la cámara. Tomando como base la teoría del libro de Jovaj:

T_z = Tempertura del ciclo de la explosión [K].

U_z'' = La energía interna de los productos de combustión.

$$U_z'' = 68600 \left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right]$$

Para esta energía interna de los productos de combustión le corresponde una temperatura: $T_z = 2615 [\text{K}]$ (Ver Jovaj, p. 639).

4.1.7 Presión de combustión La presión máxima del ciclo de combustión está dada por la siguiente ecuación:

$$P_z = \mu_r \frac{T_z}{T_c} P_c \text{ (Jovaj, p. 640.)} \quad (8)$$

Donde:

P_z = Presión en la explosión [MPa].

μ_r = Coeficiente real de variación molecular (adimensional).

μ_o = Es el coeficiente teórico de variación molecular.

$\mu_o = 1.08$ (Adimensional).

Sabiendo que la fórmula del coeficiente real es:

$$\begin{aligned} \mu_r &= \frac{\mu_o + Y_r}{1 + Y_r} \quad (9) \\ \mu_r &= \frac{(1,08) + (0,06)}{1 + (0,06)} \\ \mu_r &= 1,075 \end{aligned}$$

Reemplazando en la ecuación 8, obtenemos que:

$$P_z = 1,075 * \frac{2615 \text{ [K]}}{736,19 \text{ [K]}} * 1,6 \text{ [MPa]}$$

$$P_z = 6,11 \text{ [MPa]}$$

Esta presión determina la fuerza máxima en la cabeza del émbolo, y será la fuerza máxima en el ciclo.

4.1.8 Fuerza máxima del mecanismo manivela-biela-émbolo La fuerza máxima en el mecanismo manivela-biela-émbolo del motor ubicada sobre el área

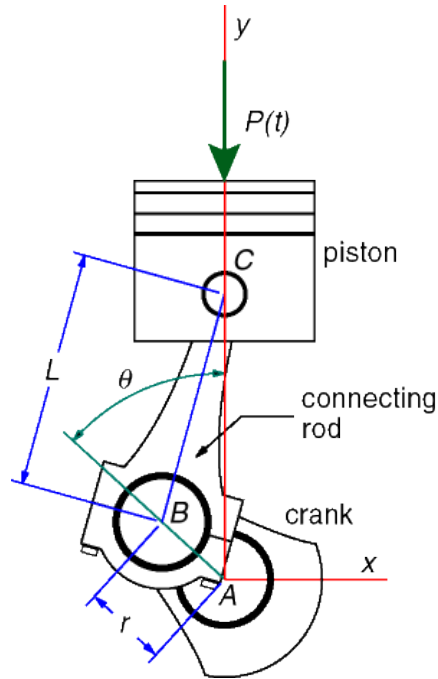
superior del pistón es calculada a continuación con base es los datos suministrado por el fabricante del motor Shindaiwa B450 de la tabla 15.

Tabla 15. Datasheet motor Shindaiwa B450

Guadañadora B450/ Brushcutter B450		
Motor / Engine	MCI	Enfriado por aire
Tipo / Type	2 strokes	
Marca / Trademark	Shindaiwa	
Modelo / Model	B450	
Manufactura / Manufacture	Japón	
Cilindrada / Displacement	41,5	cc
No. Cilindros / No. of cylinders	1	Vertical
Potencia / Power (@7500 rpm)	2.3	HP
Combustible / Fuel	Gasolina/aceite	
Capacidad tanque / Capacity	1000	ml
Proporción comb.	50;1	Gasolina/aceite
Diámetro/carrera / Bore/Stroke	40/33	mm
Relación compresión / Compression ratio	8	
Torque máx. / Max torque	126.7	N*m
Carburador / Carburetor	Si marca TK	Válvula deslizante
Bujía / Plug	Champion CJ8	NGK BMR6A
Transmisión / Transmission	Embrague centrifugo	Engranajes cónicos

Fuente: Manual motor Shindaiwa.

Figura 36. Fuerza máxima mecanismo manivela–biela–émbolo



Fuente: [Citado el 06 de junio de 2015] Disponible en internet:
 <http://www.esm.psu.edu/courses/emch12/intdyn/activities/kinetics_rigid/slider-crank2/>

Las características básicas del émbolo son las siguientes:

Diámetro del émbolo = $\varnothing = 39,8$ [mm] (basado en la metrología)

Carrera = $S = 33$ [mm], relación de compresión = 8

4.1.9 Cilindrada unitaria Cálculo de la cilindrada unitaria

$$V_h = Z * \frac{\pi \varnothing^2 S}{4} \quad (10)$$

V_h = Cilindrada unitaria [cm³]

$Z= 1$ Número de cilindros [Adimensional]

\varnothing = Diámetro del émbolo [cm]

S= Carrera del émbolo [cm]

$$V_h = (1) * \frac{\pi(3,98[\text{cm}])^2 * 3,3[\text{cm}]}{4}$$

Cilindrada total de la guadaña

$$V_h = 41,47 [\text{cm}^3]$$

Volumen de la cámara:

$$V_c = \frac{V_h}{\epsilon - 1} \quad (11)$$

V_c = Volumen de la cámara [cm^3]

$\epsilon = 10$: Relación de Compresión [Adimensional]

$$V_c = \frac{41,47 [\text{cm}^3]}{8 - 1}$$
$$V_c = 5,92 [\text{cm}^3]$$

Volumen total del cilindro:

$$V_a = V_c + V_h \quad (12)$$

$$V_a = 5,92 [\text{cm}^3] + 41,47 [\text{cm}^3] = 47,38 [\text{cm}^3]$$

Área de la cabeza del émbolo:

$$\text{Area}_{\text{pistón}} = \frac{\pi \phi^2}{4} \quad (13)$$

$$\text{Area}_{\text{pistón}} = \frac{\pi(4\text{cm})^2}{4} = 12,57 [\text{cm}^2]$$

Para el cálculo de la fuerza en la cabeza del émbolo:

$$F_e = P_z * \text{Area}_{\text{pistón}} \quad (14)$$

$$F_e = 6,11 \text{ [Mpa]} * \frac{12,57}{10000} \text{ [m}^2\text{]} = 7680,3 \text{ [N]}$$

Y sabiendo por la prueba de compresión (sección 2.4.1) que la fuerza máxima que requiere el émbolo para que se deforme permanentemente es de 2960.40 [lbf]=13168,5152[N], observamos que el material B390.0 es adecuado para su fabricación. La relación entre la fuerza máxima y la fuerza hallada en la ecuación 14, da como resultado 1.7146, este es el factor de seguridad hallado. Este sobredimensionamiento busca Este sobredimensionamiento se justifica por diversas causas, por ejemplo: previsiones de desgaste o corrosión del material, posibles errores en las propiedades previstas den la aleación, diferencias entre las propiedades calculadas y las obtenibles en la realidad, la propia incertidumbre del método de cálculo, etc.

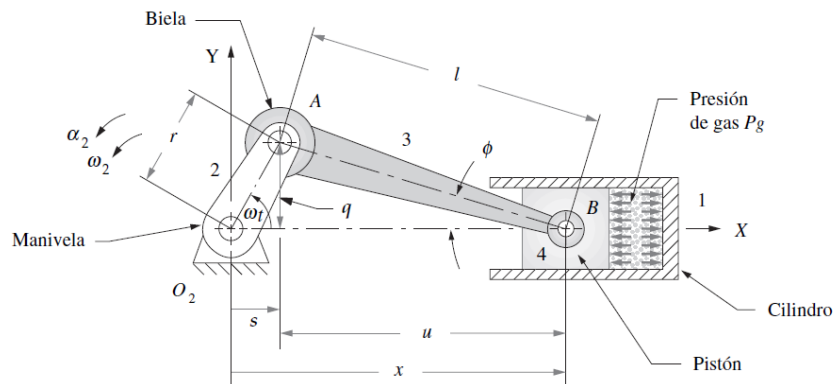
4.2 ANALISIS DINAMICO DEL MECANISMO MANIVELA-BIELA-CORREDERA

Uno de los mecanismos más conocidos y aplicados en la industria es el denominado mecanismo de manivela-biela-corredera, este es usado como principio de funcionamiento en motores de combustión interna, en compresores, bombas y en diferentes accionamientos mecánicos como puertas automáticas entre muchas otras aplicaciones.

4.2.1 Posición, velocidad y desplazamiento del émbolo Para nuestro caso particular el émbolo tiene el comportamiento típico de la corredera, por tanto

el análisis geométrico, cinemática y cinético de dicho mecanismo es fundamental para la presente investigación y cuyo desarrollo se presenta en la figura 37.

Figura 37. Diagrama geométrico mecanismo Manivela-biela-émbolo



Fuente: NORTON, R. Diseño de maquinaria, síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. México: McGraw-Hill. 2008. p. 576.

Para el desarrollo del cálculo del mecanismo, usaremos la siguiente nomenclatura

ω =Velocidad Angular

θ =Angulo de la manivela

r = Radio de la manivela

l = Longitud de la biela

ϕ =El Angulo q forma la biela con el eje x

Se elaboran los triángulos rectángulos formados por las longitudes r - q - s y l - g - u (según la figura 37) y por relaciones geométricas, obtenemos que:

$$q = r \sin(\theta) = l \sin(\phi) \quad (15)$$

Sabiendo que

$$\theta = \omega t \quad (16)$$

Entonces

$$r \operatorname{sen}(\omega t) = l \operatorname{sen}(\emptyset) \quad (17)$$

$$\frac{r}{l} \operatorname{sen}(\omega t) = \operatorname{sen}(\emptyset) \quad (18)$$

$$s = r \cos(\omega t) \quad (19)$$

$$u = l \cos(\emptyset) \quad (20)$$

$$x = s + u = r \cos(\omega t) + l \cos(\emptyset) \quad (21)$$

$$\cos(\emptyset) = \sqrt{1 - \operatorname{sen}(\emptyset)^2} \quad (22)$$

$$\cos(\emptyset) = \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \operatorname{sen}(\omega t)\right)^2} \quad (23)$$

$$x = r \cos(\omega t) + l \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \operatorname{sen}(\omega t)\right)^2} \quad (24)$$

Se obtiene la ecuación de la velocidad derivando la ecuación anterior, suponiendo ω constante:

$$\dot{x} = -\omega r * \operatorname{sen}(\omega t) + l * \frac{-r^2 \operatorname{Sen}(\omega t) * \operatorname{Cos}(\omega t) * \omega}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \operatorname{sen}(\omega t)\right)^2}} \quad (25)$$

Nuevamente se deriva obteniendo la ecuación de la aceleración, aplicando el teorema binomial para expandir el radical de la expresión:

$$(a + b)^n = a^n + n a^{n-1} b + \frac{n(n-1)}{2!} a^{n-2} b^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!} a^{n-3} b^3 + \dots + \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \operatorname{sen}(\omega t)\right)^2} \quad (26)$$

Sabiendo que:

$$a = 1; \quad b = -\left(\frac{r}{l} \operatorname{sen}(\omega t)\right)^2; \quad n = 1/2 \quad (27)$$

Entonces

$$\begin{aligned} & \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \operatorname{sen}(\omega t)\right)^2} \\ & = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{l} \operatorname{sen}(\omega t)\right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{r}{l} \operatorname{sen}(\omega t)\right)^4 - \frac{1}{16} \left(\frac{r}{l} \operatorname{sen}(\omega t)\right)^6 \dots \end{aligned} \quad (28)$$

Lo interesante y útil de esa expresión es que todos los términos contienen la relación r/l elevada a una potencia:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \operatorname{sen}(\omega t)\right)^2} = 1 - \frac{r^2}{2l^2} \operatorname{sen}^2(\omega t) + \frac{r^4}{8l^4} \operatorname{sen}^4(\omega t) - \frac{r^6}{16l^6} \operatorname{sen}^6(\omega t) \dots \quad (29)$$

Se puede ignorar todos los términos seguidos del segundo término con un error mínimo, quedando entonces:

$$x = r \cos(\omega t) + l \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \operatorname{sen}(\omega t)\right)^2} \quad (30)$$

$$x = r \cos(\omega t) + l \left(1 - \frac{r^2}{2l^2} \operatorname{sen}^2(\omega t) + \frac{r^4}{8l^4} \operatorname{sen}^4(\omega t) \dots\right) \quad (31)$$

$$x = r \cos(\omega t) + l - \frac{r^2}{2l} \operatorname{sen}^2(\omega t) \quad (32)$$

Aplicando propiedades de ángulos dobles se tiene que:

$$x = r\cos(\omega t) + l - \frac{r^2}{2l} \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos(2\omega t)}{2} \right) \quad (33)$$

$$x = r\cos(\omega t) + l - \frac{r^2}{4l} + \frac{r^2 \cos(2\omega t)}{4l} \quad (34)$$

Derivando se tiene:

$$\dot{x} = -\omega r \sin(\omega t) - \frac{r^2 \sin(2\omega t) 2\omega}{4l} \quad (35)$$

Derivando nuevamente se obtiene la expresión aproximada para la aceleración:

$$\ddot{x} = -\omega^2 r \cos(\omega t) - \frac{r^2 \cos(2\omega t) 4\omega^2}{4l} \quad (36)$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 r \cos(\omega t) - \frac{r^2 \cos(2\omega t) \omega^2}{l} \quad (37)$$

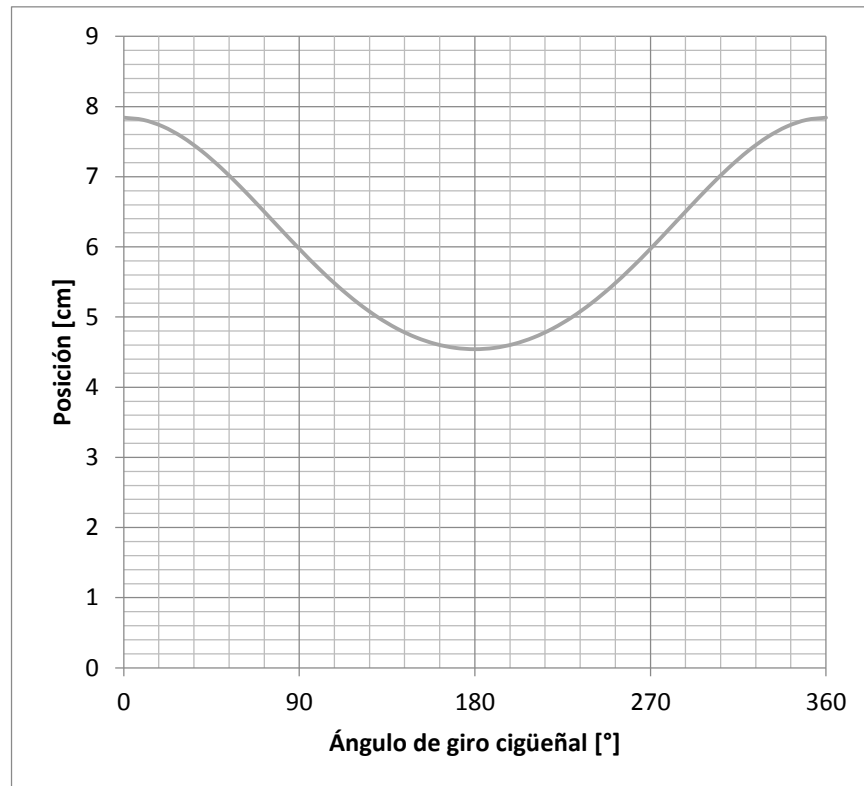
Con estas expresiones obtenidas de las ecuaciones 15 hasta la 37 y los datos de la tabla 15 se procede a obtener las gráficas de posición, velocidad y desplazamiento utilizando la herramienta de Excel, desarrollado por Andrés Lizcano y José Villamizar para el proyecto “Desarrollo del proceso de reingeniería para la manufactura de la biela de un motor de dos tiempos de pequeña cilindrada de aplicación agrícola”:

Tabla 16. Datos geométricos del motor B-450

Variable ^(a)	Valor	Unidad
r	16,5	Milímetros [mm]
l	61,95	Milímetros [mm]
b	40	Milímetros [mm]
s	33	Milímetros [mm]
$\lambda=r/l$	0,266	Adimensional
(a) Variables basadas en la figura 37		

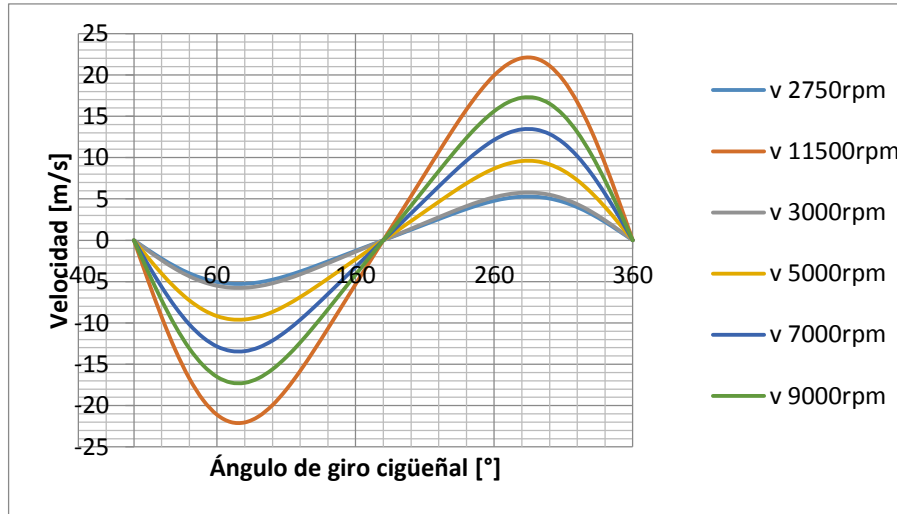
Fuente: Manual motor Shindaiwa

Figura 38. Posición [cm] vs ángulo [grados]



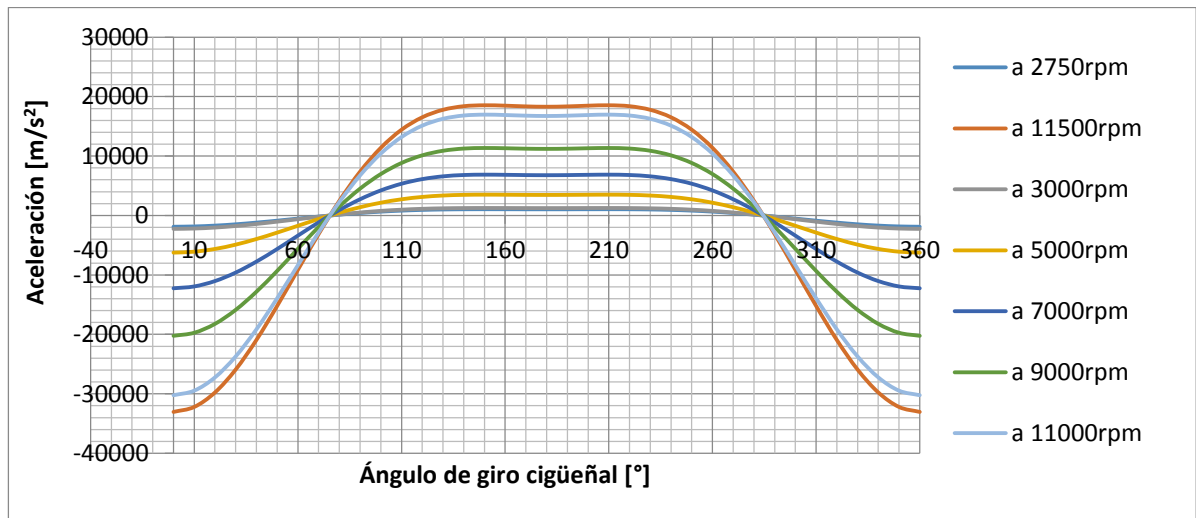
En la figura 38 se observa que el desplazamiento máximo y el mínimo del émbolo es de 7,8 [cm] es de 4,6 [cm] respectivamente.

Figura 39. Velocidad en el PMS¹⁶ [cm/s] vs ángulo [grados]



En la figura 39 se observa que la velocidad máxima del émbolo es de 22 [m/s] cuando el motor gira a 11500 [rpm] cuando el Angulo es 75° aproximadamente.

Figura 40. Aceleración [cm/s²] vs ángulo [grados]



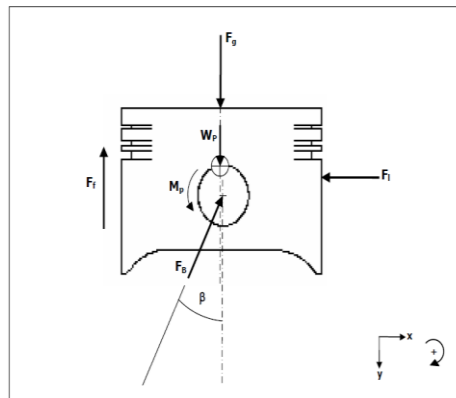
¹⁶ El punto muerto superior (PMS) se refiere a la posición que alcanza el émbolo al final de una carrera ascendente, escape o compresión, en el cual no existe fuerza que actúe sobre él y sólo se encuentra moviéndose gracias a su inercia o fuerza potencial.

En la figura 40 se puede observar que la aceleración máxima que experimentada por el émbolo ocurre en el PMS a 11500[rpm].

4.2.2 Fuerza de fricción existente entre el émbolo y las paredes del cilindro

En la figura 41 se puede detallar el diagrama de cuerpo libre correspondiente al sistema conformado por el émbolo con sus componentes complementarios (bulón y anillos) y sus respectivas cargas, así mismo se define el sistema de coordenadas que se ha utilizado.

Figura 41. Diagrama del cuerpo libre del émbolo



Fuente: MONTROYA, V. Contribución al estudio experimental de la fricción pistón-camisa en un motor de combustión interna. 2008. p 94.

Dónde:

F_f es la fuerza de fricción de generada por el contacto entre los anillos y el cilindro.

F_g es la fuerza causada por los gases de combustión.

F_1 es la fuerza normal a la superficie del émbolo.

F_B es la fuerza causada por la biela.

W_p es el peso del émbolo.

β es el Angulo que forma la biela con la vertical.

Aplicando la segunda ley del movimiento de Newton en la dirección axial se obtiene la expresión:

$$\sum F_y = F_g + W_p - F_b \cos \beta - F_f = m_p \ddot{X} \quad (38)$$

Dónde:

m_p : masa del conjunto émbolo, segmentos y bulón

$$m_p = m'_p + m_s + m_B \quad (39)$$

m'_p : masa del émbolo sin accesorios.

m_s : masa de los segmento

m_B : masa del bulón, rodamiento y separadores

De los datos físicos del émbolo mostrados en la figura 6, tenemos que:

m'_p	41,5 [g]
$m_s + m_B$	24,8 [g]

Entonces la masa total:

$$m_p = 41,5 + 24,8 = 66,3 \text{ [g]}$$

El peso del émbolo estará dado por:

$$W_p = m_p * g \quad (40)$$

$$W_p = 0,65 \text{ [N]}$$

Agregando las magnitudes obtenidas de las ecuaciones 38, 39 y 40 a la hoja de datos de Excel tenemos las variables del comportamiento dinámico de las fuerzas durante la operatividad del émbolo:

En la figura 42 se muestra que el valor máximo de la fuerza en el émbolo a 3000 [rpm] es de aproximadamente 7600 [N] cuando el Angulo de giro del cigüeñal es de 20° aproximadamente.

Figura 42. Comportamiento dinámico de la fuerza a diferentes r.p.m.

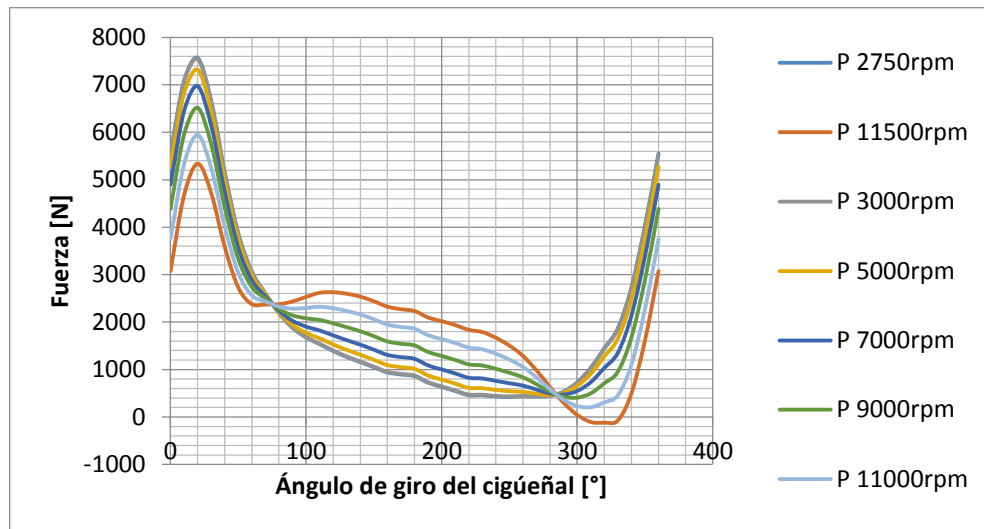
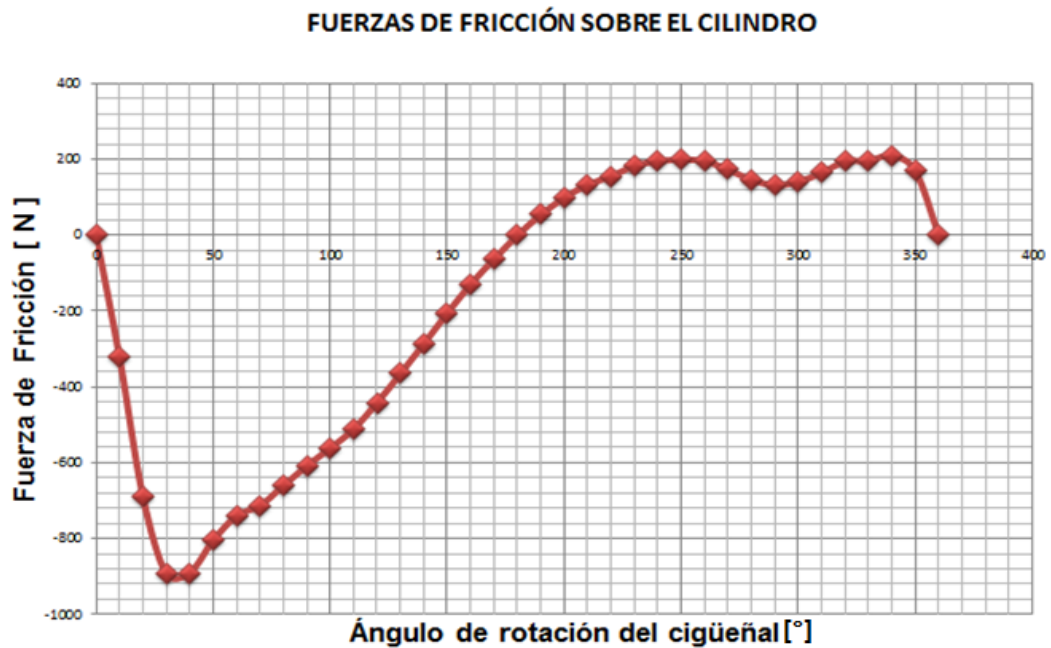


Figura 43. Fuerzas de fricción sobre el cilindro



En la figura 43 se observa que la máxima magnitud existente de la fuerza de fricción entre el émbolo y el cilindro es de aproximadamente 900 [N] en un ángulo de rotación aproximadamente de 35°, el valor negativo de dicha fuerza se atribuye al hecho de que al analizar las fuerzas ejercidas sobre las paredes del cilindro esta fuerza se encuentra ingresando.

4.2.3 Condiciones de trabajo para el cálculo del émbolo Dentro del grupo pistón incluyen el émbolo, los segmentos o anillos, el bulón y los elementos de sujeción del bulón. Dentro de las funciones principales del pistón tenemos:

- Formar superficie para la cámara de combustión con volumen variable.
- Transmitir a la biela la fuerza que absorbe de la presión ejercida por los gases de combustión.
- Hacer un sello hermético dentro del cilindro evitando la fuga de los gases dentro del cilindro.
-

Para determinar la configuración del émbolo, se calcula el esfuerzo por flexión $\sigma_{flexion}$ sobre a cabeza del émbolo:

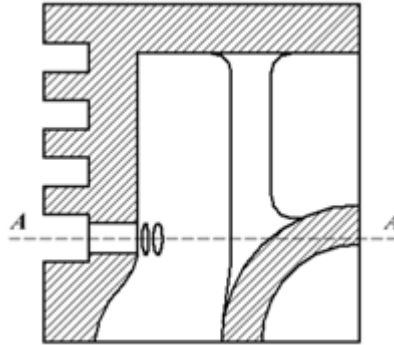
$$\sigma_{flexion} = 0,25 * P_{Max} \left(\frac{d_b}{\delta_d} \right) \quad (41)$$

Donde d_b = diámetro interno de la cabeza

δ_d = profundidad de la cabeza

P_{Max} = Presión de combustión

Figura 44. Sección de menor área transversal del émbolo



Fuente: JÓVAJ, M. S. Motores de automóvil. Moscú: Mir, 1982.p.468

El esfuerzo de compresión se calcula en la sección del émbolo con menor área. Para el caso del émbolo, este se encuentra en la sección A-A, donde se encuentran los orificios de la salida del aceite (véase figura 44) y se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$\sigma_{\text{com.AA}} = F_{\text{Max}}/A_{\text{A-A}} = P_{\text{Max}} * A_{\text{CABEZA}}/A_{\text{A-A}} \quad (42)$$

Donde

$\sigma_{\text{com.AA}}$ es el esfuerzo de compresión en la sección A-A

$A_{\text{A-A}}$ es el área de la sección transversal A-A.

F_{Max} es la fuerza máxima soportada por la cabeza del émbolo

El esfuerzo $\sigma_{\text{com.AA}}$ no debe sobrepasar el rango de 30 a 40 [MPa] para émbolo de aleación de aluminio ni el rango de 60 a 80 [MPa] para émbolos de fundición gris. Los esfuerzos de tensión o de tracción debidos a la fuerza de inercia del grupo pistón sobre la sección A-A de los orificios de aceite ($\sigma_{\text{p.AA}}$), se calculan según la siguiente ecuación:

$$\sigma_{\text{p.AA}} = F_{\text{p.AA}}/A_{\text{A-A}} \quad (43)$$

Donde $F_{p.AA}$ es la fuerza de inercia del grupo pistón sumada al de los anillos que está por encima de la sección A-A, cuyo cálculo se da por:

$$F_{p.AA} = -m_{pA-A} * r * \omega^2(1 + \lambda) \quad (44)$$

La masa de la cabeza del émbolo (m_{pA-A}) se determina por geometría, y generalmente corresponde a un porcentaje correspondiente a un rango de 0,4 a 0,6% de todo grupo pistón. La variable “r” es un dato mostrado en la tabla 16.

El $\sigma_{p.AA}$ máximo varía en un rango de 4 a 10 [MPa] en los émbolos de aleación de aluminio y en un rango de 8 a 20 [MPa] en los émbolos de hierro fundido.

El primer tabique se calcula como un aro alrededor de la circunferencia ya que está cargado en su superficie debido a la presión de los gases. Las tensiones a la flexión en la ranura en unidades de [MPa] y se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma_{flex.pis.r} = 0,0045P_{zMáx}(D/h_r)^2 \quad (45)$$

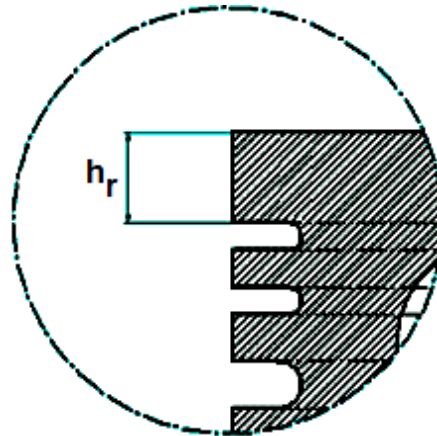
$$\tau_{flex.pis.r} = 0,0314P_{zMáx}(D/h_r) \quad (46)$$

Dónde: h_r es la altura del primer tabique (figura 45)

$\sigma_{flex.pis.r}$ es el esfuerzo normal que siente el tabique

$\tau_{flex.pis.r}$ es el esfuerzo de corte o cizallamiento que siente el tabique

Figura 45. Sección transversal del émbolo mostrando los tabiques

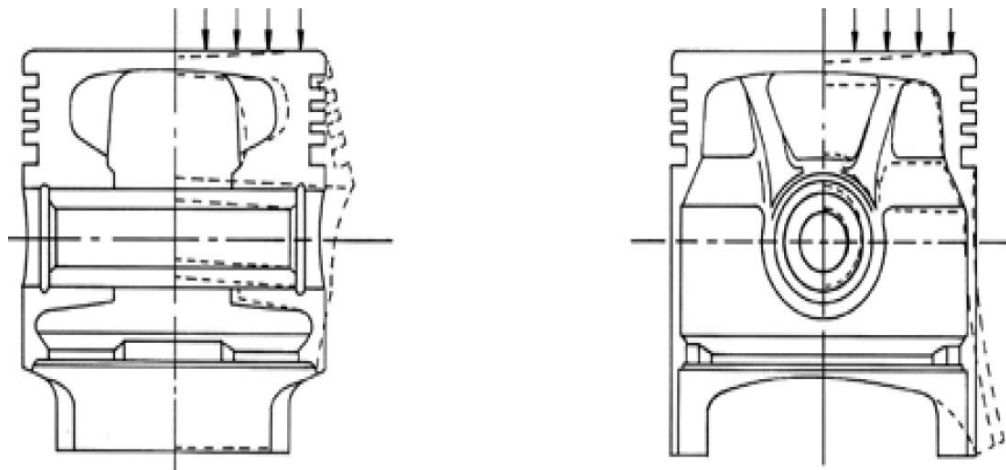


Fuente: JÓVAJ, M. S. Motores de automóvil. Moscú: Mir, 1982.p.468

Los esfuerzos totales son:

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\sigma_{\text{flex.pis.r}}^2 + 4 * t_{\text{flex.pis.r}}^2} \quad (47)$$

Figura 46. Comportamiento del émbolo sometido a la presión de los gases



Fuente: MAHLE, Manual técnico MAHLE: Motores de Combustão Interna. Brasil: MAHLE international. 1990. p.61.

Este esfuerzo no debe pasar el rango de 20 a 40 [MPa] en émbolos de aleación de aluminio ni puede pasar rangos de 60 a 80 [MPa] en émbolos de fundición gris. En la figura 46 se muestra ciertos parámetros de comportamiento cuando el émbolo se somete a esfuerzos como los analizados anteriormente,

4.2.4 Análisis por fatiga del émbolo Según P. Orlov: “Las piezas que se someten a una carga variable y repetida duradera se rompen a tensiones considerablemente menores que el límite de rotura del material a carga estática. Esta circunstancia tiene gran significación para las máquinas modernas de altas revoluciones, cuyas piezas trabajan en condiciones de carga cíclicas con un número total de ciclos que alcanza muchos millones, en todo el período de servicio de la máquina.

Cómo demuestra la estadística, no menos del 80% de roturas y averías que tienen lugar durante la explotación de las máquinas modernas está vinculado con los fenómenos de fatiga. Por eso, el problema de la resistencia a la fatiga es el problema clave para elevar la fiabilidad y longevidad de las máquinas. Las cargas cíclicas están expresadas con más evidencia en las máquinas y mecanismos con movimiento alternativo de las piezas (máquinas de émbolo, mecanismos de leva).

No obstante, también en las máquinas con marcha suave (máquinas rotativas del tipo turbinas) son inevitables las cargas cíclicas, por ejemplo debido al desequilibrio de los rotores, a los abatimientos radiales y laterales de los rotores, etc. El número de ciclos de las cargas que el material soporte sin romperse depende de la magnitud de la tensión máxima y de la magnitud del intervalo entre los valores extremos de las tensiones del ciclo.

A medida que disminuye la magnitud de las tensiones el número de ciclos, que provocan la rotura, aumenta y a cierta suficientemente pequeña tensión el material

adquiere la capacidad de soportar un número ilimitadamente grande de ciclos sin rotura. Esta tensión llamada límite de fatiga sirve de base del cálculo de resistencia de las piezas sometidas a cargas cíclicas.”¹⁷

Para llevar a cabo un análisis dinámico de fatiga sobre el émbolo prototipo se debe tener en cuenta que a diferencia de los ejes, flechas y columnas, hasta ahora no es posible encontrar una teoría concreta de diseño a la fatiga aplicada a émbolos de máquinas térmicas alternativas, debido a que las cargas alternantes que actúan sobre las superficies del émbolo, cámara de combustión o cilindro, son cargas de tipo térmico por los diferentes cambios de temperatura en cada uno de los ciclos que componen el proceso termodinámico de dos o cuatro tiempos en motores de combustión interna.

Otro tipo de esfuerzo aplicado a cabeza del émbolo son los esfuerzos mecánicos causados por los cambios alternantes de la presión, producto de la combustión de la mezcla aire-combustible.

Para el estudio de los esfuerzos de fatiga producidos por los ciclos de combustión sobre un bloque de motor se requiere implementar un banco de simulación de cargas, tanto mecánicas como térmicas, con la finalidad de obtener datos reales de los distintos parámetros de funcionamiento que afectan la vida del elemento, mediante una instrumentación del cilindro a través de sensores de temperatura y presión localizados estratégicamente sobre las superficies internas del cilindro. Actualmente, en el área metropolitana de la ciudad de Bucaramanga no se cuenta con un banco de simulación de cargas térmicas y mecánicas de este tipo.

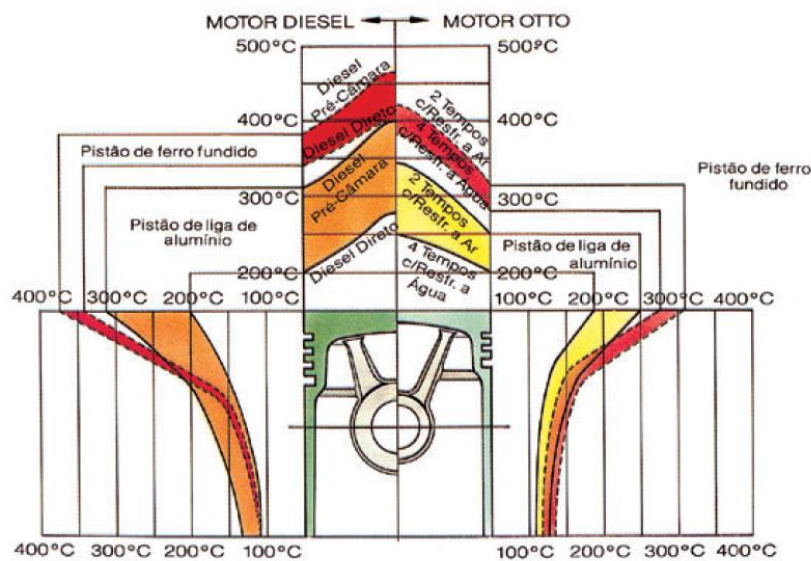
4.2.5 Análisis térmico del émbolo La figura 47 resume la distribución típica de temperatura del émbolo desde su cabeza hasta el final de lo largo de su falda.

¹⁷ORLOV, P. Ingeniería de diseño, tomo uno. 2da Edición, Editorial MIR, Moscú. 1985. P. 352.

En un motor de ciclo diesel (izquierda) y un motor de ciclo Otto (derecha), en condiciones de plena potencia.

Para ambos casos, tanto para motores de gasolina y de diesel aparecen intervalos de temperatura alcanzadas en émbolos fabricados en aleaciones de hierro y aluminio

Figura 47. Resumen de la distribución de temperatura



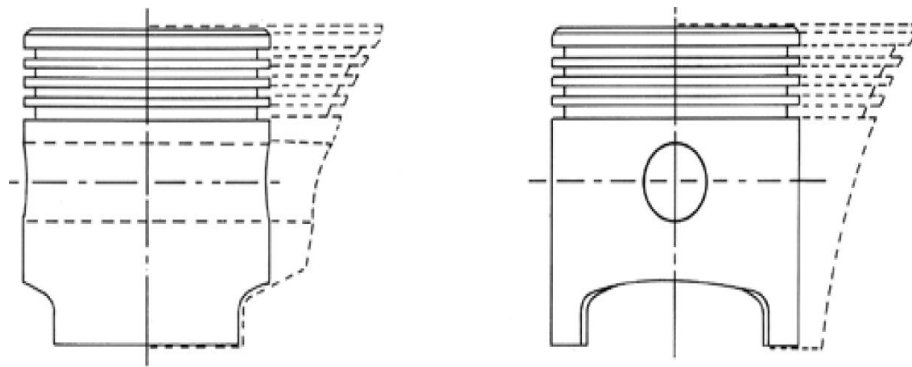
Fuente: MAHLE, Manual técnico MAHLE: Motores de Combustão Interna. Brasil: MAHLE international. 1990. p.58.

Los límites superiores de temperatura son los límites máximos, se puede observar que afortunadamente aunque la temperatura dentro de la cámara de combustión podría alcanzar los 2.000 [°C], la temperatura máxima del émbolo en el caso del ciclo de Diesel con pre-cámara, que es el más crítico, puede lograr temperaturas de 460 [°C] para hierro fundido, y para émbolo de aleación de aluminio puede alcanzar temperaturas de 400 [°C]. En el ciclo del motor Otto de dos tiempos, la máxima sería, respectivamente, 420 [°C] para el émbolo de hierro fundido y 340

[°C] para aleaciones de aluminio. En ambos ciclos de la temperatura es mucho más baja en el pie de la falda, en un rango de 120 [°C] a 200 [°C]. La máxima temperatura de los émbolos de aleación de aluminio de trabajo, ha permitido el uso de relaciones de compresión más altas que las que serían posible con el hierro, teniendo en cuenta que las piezas se someten a dilataciones debido a los cambios térmicos que sufre durante la operación.

La cara del émbolo es difícil de enfriar porque se separa de la camisa de agua o superficies de refrigeración con aletas exteriores.

Figura 48. Comportamiento de dilatación debido a cambios de temperaturas



Fuente: MAHLE, Manual técnico MAHLE: Motores de Combustão Interna. Brasil: MAHLE international. 1990. p.61.

Las tolerancias y ajustes en el montaje dependen principalmente del diferencial de temperatura y de las propiedades de los materiales de los elementos en contacto. Su magnitud se determina para una temperatura inicial $T=t_0$ que generalmente se toma como la temperatura ambiente, generalmente se toma a 15[°C] como la referencia más baja en ese entorno. Los huelgos del diámetro teóricos para la cabeza y la falda en estado en estado frío (Δ_{cab} y Δ_{falda} , respectivamente) se determinan por las siguientes formulas:

$$\Delta_{cab} = D - d_{cab} \quad (48)$$

$$\Delta_{falda} = D - d_{falda} \quad (49)$$

Donde D es el diámetro del cilindro para este caso, es casi igual al diámetro del émbolo, pero como existe un huelgo muy pequeño entonces denominaremos d_{cabeza} y d_{falda} como el diámetro de la cabeza y de la falda respectivamente.

Sin embargo estos diámetros se determinan partiendo de las condiciones necesarias de trabajo normal en caliente. Las tolerancias entre el émbolo y las paredes del cilindro deben mantenerse idénticas en toda la altura del émbolo y para ello se utilizan las siguientes formulas:

$$\Delta'_{cab} = D' - d'_{cab} \quad (50)$$

$$\Delta'_{falda} = D' - d'_{falda} \quad (51)$$

Donde Δ'_{cab} , Δ'_{falda} son los huelgos del diámetro teóricos para la cabeza y la falda en caliente; D' es el diametro del cilindro cuando está en caliente, es decir dilatado, d'_{cab} , d'_{falda} , como los diámetros de la cabeza y de la falda del émbolo en estado caliente del motor. Estas ecuaciones en estado caliente se pueden expresar de la siguiente forma:

$$\Delta'_{cab,p} = [D + D\alpha_{cilindro}(t_{cilindro} - t_0)] - [d + d\alpha_{pistón}(t_{cab,p} - t_0)] \quad (52)$$

$$\Delta'_{falda,p} = [D + D\alpha_{cilindro}(t_{cilindro} - t_0)] - [d + d\alpha_{pistón}(t_{falda,p} - t_0)] \quad (53)$$

Dónde: $\alpha_{cilindro}$ y $\alpha_{pistón}$ son coeficientes de dilatación del cilindro y del pistón respectivamente.

La temperatura $t_{cilindro}$ es correspondiente a la pared del cilindro. $t_{cilindro}$ está entre 110 y 115 [°C]

La temperatura $t_{cab,p}$ es correspondiente a la cabeza del pistón. Esta temperatura oscila entre 220 y 3200 [°C] para aleación de aluminio y 250 y 400 [°C] para fundición gris.

La temperatura del embolo $t_{falda,p}$ en la zona de la falda. $t_{falda,p}$ esta entre 150 y 200 [°C] para aleación de aluminio y 180 y 240[°C] para fundición gris.

Para los motores con enfriamiento con aire $t_{cab,p}$ y $t_{falda,p}$ se pueden aumentar entre 30 y 40% aproximadamente solo para aleaciones de aluminio, y para $t_{cilindro}$ entre 170 y 190 %.

Reemplazando en las ecuaciones anteriores los valores conocidos y resolviendo con respecto al $d_{cab,p}$ y $d_{falda,p}$, encontramos los diámetros del émbolo en estado frio.

$$d_{cab,p} = \frac{D[1 + \alpha_{cilindro}(t_{cilindro} - t_0)] - \Delta_{cab.}}{1 + \alpha_{pistón}(t_{cab,p} - t_0)} \quad (54)$$

$$d_{falda,p} = \frac{D[1 + \alpha_{cilindro}(t_{cilindro} - t_0)] - \Delta_{falda.}}{1 + \alpha_{pistón}(t_{falda,p} - t_0)} \quad (55)$$

Cuando estamos en un estado no caliente tendremos huelgos grandes entre el émbolo y la camisa. Por ende, durante el trabajo del motor en frio es posible que aparezcan ruidos extraños, vibraciones y otros fenómenos negativos. Con el fin de eliminar estos inconvenientes, éstos se fabrican en sección de ovalo y con ranuras de dilatación. Las anteriores ecuaciones se utilizaran de acuerdo a la selección de la aleación con que se fabricó el émbolo prototipo y según los datos suministrados del proyecto paralelo que se realizó sobre la fabricación del cilindro para el mismo motor Shindaiwa. Los resultados son mostrados en el siguiente capítulo.

4.3 GEOMETRÍA DEL DISEÑO

El émbolo debe ser contruido de una manera tal que permita una buena propagación del calor cuando este en operacion con el fin de evitar las altas tensiones moleculares provocadas por altas temperaturas en diferentes capas del material. Una mala distribución del calor ocasiona dilataciones desiguales en distintas partes del émbolo provocando roturas en el material, para motores de gran potencia es común el uso de cabezas de acero fundido para disminuir estos efectos.

En la construcción del émbolo se emplea generalmente fundición de grano fino, pero cuando se requiere fabricarlo en dos o más partes se usa el fondo de acero fundido para resistir mejor las tensiones producidas las elevadas temperaturas.

La estructura del émbolo y sus dimensiones quedan definidas por las cargas termicas y mecánicas, por la forma y disposición de la cámara de combustion, por el número de segmentos, por la presencia de nervios de reforamiento, por la posición del primer segmento en cuanto a la cámara de combustión, etc. Al diseñar el émbolo se utiliza los parámetros estadístico constructivos, referidos al diámetro D del cilindro o a la altura H del émbolo.¹⁸

En la tabla 17 se plantean las distintas cotas tenidas en cuenta para el planteamiento del cálculo de esfuerzos planteados por distintos autores, resumidos en este documento, entre estos el proyecto de investigación llamado “Software educativo para una metodología de diseño de piezas móviles de un motores de combustión interna para la asignatura máquinas térmicas alternativas”¹⁹

¹⁸ JÓVAJ, M. Motores de automóvil. Editorial MIR. Moscu.1982. pág. 467

¹⁹ MOLINA C, DONEL F; Software educativo para una metodología de diseño de piezas móviles de un motores de combustión interna para la asignatura máquinas térmicas alternativas

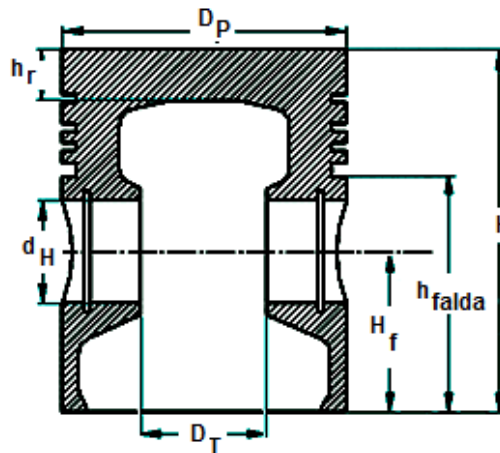
En la siguiente tabla se muestran los rangos de medidas relativas del émbolo.

Tabla 17. Medidas recomendadas para la geometría del émbolo

Parámetro	Jovaj	Van Bashuysen
Diametro D_p	-----	65-100 [mm]
Altura H	0,9 – 1,3	0,8 - 1
Diametro bulón d_H	0,24 – 0,28	0,2 - 0,25
Altura de compresión	-----	0,4 – 0,55
Altura de la zona de fuego h_r	0,05 – 0,08	2,5 – 3,5 [mm]
Altura primer tabique h_r	0,06 – 0,09	0,045- 0,06
Altura Falda h_{falda}	0,68 – 0,74	0,55 – 0,7
Distancia tetones (bulones flotantes)	0,4	0,25 – 0,35

Fuentes: VAN BASSHUYSEN, Internal combustion engine handbook. Warrendale: SAE International. 2004. p.81; JÓVAJ, M. S. Motores de automóvil. Moscú: Mir, 1982.p.467

Figura 49. Nomenclatura estándar de las medidas del émbolo



JÓVAJ, M. S. Motores de automóvil. Moscú: Mir, 1982. p.196

Tomando como referencia la tabla 17 cuya nomenclatura se representa en gran medida en la figura 49 y las propiedades del material seleccionado que es el B390.0 (cuya justificación es expuesta en el capítulo 8), se procede a calcular con las ecuaciones planteadas las medidas relativas del émbolo prototipo.

Donde:

$D = 40$ [mm], diámetro del cilindro que se usa para fabricar el émbolo del motor shindawa

$P_{\max} = P_z = 6,11$ [MPa], presión de explosión (desarrollada por la ecuación 8)

$m_{\text{pis}} = 0,663$ [kg] (medición mostrada en la figura 6)

$\omega_{\max} = 11500$ [rpm] $\approx 1204,3$ [rad/s] (resultado de excel mostrado en la figura 40)

$A_{\text{cabeza}} = 1247$ [mm²], mediante el cálculo del área $A_{\text{cabeza}} = \pi * D^2 / 4$

$A_{A-A} = 378$ [mm²] donde A_{A-A} es el área de la sección transversal A-A que se midió del émbolo original.

$r = 16,5$ [mm] , $\lambda = 0,266$ (tabla 16).

$t_{\text{cilindro}} = 213,7$ [°C]²⁰

$t_0 = 15$ [°C] recomendación capítulo anterior, página 93.

$t_{\text{cab,p}} = T_c = 736,19$ [F] = 463 [°C] Es el valor máximo de temperatura según el cálculo termodinámico (ecuación 7), pues es la misma temperatura de compresión, que es la máxima que debe haber dentro dentro del cilindro.

Por analogía con motores existentes, y los datos conocidos, tomamos el espesor tenemos que:

$\delta_d = 4$ [mm] = profundidad de la cabeza, $d_b = 34$ [mm] diámetro interno de la cabeza (datos tomados del émbolo original).

$h_p = 38$ [mm] = $0,95 * D$, Jovak recomienda entre 0,9 y 1,3 veces el diámetro D (tabla 17)

²⁰ FUENTES A; SUESCUN. J, Reingeniería y construcción del cilindro de un motor de dos tiempos mono-cilíndrico con pequeña cilindrada para aplicación agrícola. Figura 66 .p. 127.

$h_{falda} = 27,5[\text{mm}] = 0,68 \cdot D$, Jovak recomienda , 0,68 – 0,74 veces el diametro D (tabla 40)

$h_r = 3[\text{mm}] = 0,075 \cdot D$, (jovak recomienda , 0,06 – 0,09 veces el diametro D (tabla 40)

Del material del émbolo seleccionado, el B390.0 tenemos que $\alpha_{pis} = 18 \cdot 10^{-6} [^{\circ}\text{C}]^{-1}$, el material del cilindro tiene un $\alpha_{cilin} = 14,1 \cdot 10^{-6} [^{\circ}\text{C}]^{-1}$.

$t_{falda,p} = 245 [^{\circ}\text{C}]$, sacando un promedio de los rangos planteados en la pagina 191, teniendo en cuenta que se pueden aumentar entre 30 y 40% aproximadamente solo para aleaciones de aluminio, como se plantea en la ecuacion 85.

$$t_{falda,p} = \frac{150 + 200}{2} + \frac{150 + 200}{2} * 0,4 = 245 [^{\circ}\text{C}]$$

Entonces:

De acuerdo a la ecuacion 41, las tensiones a la flexión en la cabeza del émbolo sera,

$$\sigma_{fle} = 0,25 * 6,11[\text{MPa}] * \left(\frac{34[\text{mm}]}{4[\text{mm}]}\right)^2$$

$$\sigma_{fle} = 110,4 [\text{MPa}]$$

Las tensiones a la compresión en la seccion A-A, que en este caso no se encuentran orificios de lubricación, se calculan mediante la ecuacion 42 de la siguiente manera :

$$\sigma_{com,AA} = 6,11\text{Mpa} \left(\frac{1257[\text{mm}]^2}{378[\text{mm}]^2}\right) \quad (56)$$

$$\sigma_{com,AA} = 20,3 [\text{Mpa}]$$

El área de la sección A-A se determina por medio de las medidas de diseño del émbolo con un espesor de pared estimado de 3 [mm]. La recomendación nos da un rango entre 30 a 40 [MPa] y como vemos estamos lejos de la zona critica.

²¹ V.L. MALEEV, Internal combustion engines; 1945. p. 377.

Reemplazarlo la ecuacion 43 en la ecuacion 44, obtenemos la tension a la tracción en esta sección, la cual es:

$$\sigma_{p.AA} = \frac{0,4 * 0,0663\text{Kg} * 0,0165\text{m} * \left(\frac{1204,3\text{rad}}{s}\right)^2 * (1 + 0,266)}{378 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_{p.AA} = 2,13 \text{ [MPa]}$$

Los limites recomendados estan en un rango de 4 a10 [MPa] y con esto verificamos que estamos alejados de la zona critica.

De las ecuaciones 45 y 46 hallamos las tensiones a la flexión y corte de la primera ranura del anillo, cuyo calculo da:

$$\sigma_{\text{flex.pis.r}} = 0,0045 * 6,11\text{[MPa]} * \left(\frac{39,85\text{mm}}{3\text{mm}}\right)^2$$

$$\sigma_{\text{flex.pis.r}} = 4,85\text{[MPa]}$$

$$\tau_{\text{flex.pis.r}} = 0,0314 * 6,11\text{[MPa]} * \left(\frac{39,85\text{mm}}{3\text{mm}}\right)$$

$$\tau_{\text{flex.pis.r}} = 2,55\text{[MPa]}$$

Finalmente, el esfuerzo total se halla mediante la ecuacion 47, cuyo resultado es:

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{(4,85\text{Mpa})^2 + 4 * (2,55\text{Mpa})^2}$$

$$\sigma_{\text{total}} = 7,05\text{Mpa}$$

Para σ_{total} el valor no debe pasar de un rango entre 30 a 40 [MPa], con el valor obtenido deja claro que estamos lejos de fallar por diseño.

Se tiene muy identificado que las fluctuaciones de temperatura dentro de la cámara de combustión ocasionan deformaciones radiales y longitudinales en el cuerpo del émbolo, por tanto se deben estudiar las tolerancias por medio del criterio planteado anteriormente.

Para hallar las tolerancias, hacemos uso de las ecuaciones 54 y 55, cuyos resultados se muestran a continuación:

$$d_{cabp} = \frac{40 * \left[1 + 14,16 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right) * (239^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C}) \right] - 0,02}{1 + 18 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right) * (463^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C})}$$

$$d_{cabp} = 39,79[\text{mm}]$$

$$d_{fal} = \frac{40 * \left[1 + 14,16 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right) * (239^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C}) \right] - 0,02}{1 + 18 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right) * (245^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C})}$$

$$d_{fal} = 39,94[\text{mm}]$$

De la misma manera se hicieron los cálculos de esfuerzos también para el émbolo original y se compararon con los obtenidos en el émbolo prototipo, estos resultados se pueden comparar en la tabla 18.

Tabla 18. . Comparación de esfuerzos entre el émbolo original y el fabricado

	Émbolo original	Émbolo prototipo
σ_{flex}	110,4Mpa	110,4Mpa
σ_{com}	20,32Mpa	20,32Mpa
σ_{ten}	2,126Mpa	2,126Mpa
$\sigma_{flex.pis.r}$	3,591Mpa	4,85Mpa
$\tau_{flex.pis.r}$	2,193Mpa	2,55Mpa
σ_{Total}	5,668Mpa	7,076Mpa

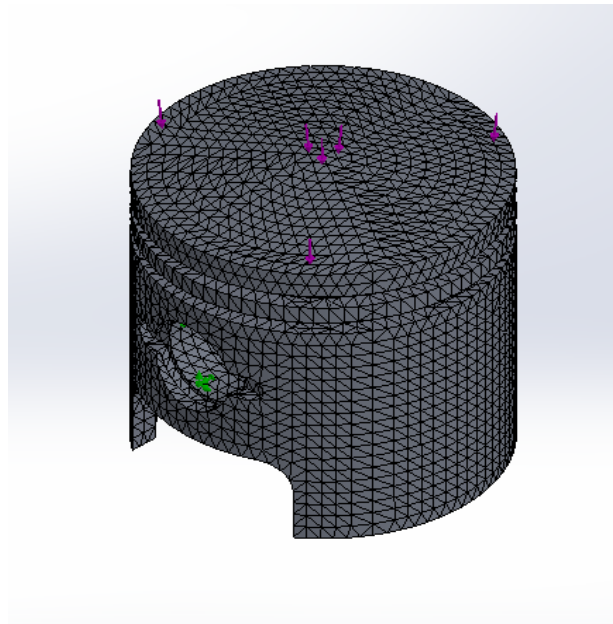
Se encuentra que la variación entre los valores de esfuerzos del émbolo original con respecto al fabricado, son insignificantes, por lo que podemos mantener la

geometría del émbolo original para la fabricación del prototipo sin ningún tipo de inconveniente.

La razón por la cual las magnitudes de los esfuerzos del émbolo prototipo difieren un poco de los esfuerzos del émbolo original, se debe al hecho de que el espesor del prototipo al ser hecho por moldeo en arena queda más robusto en su parte interna.

Mediante la herramienta informática SolidWorks. se realizó el análisis de esfuerzos mecánicos existentes en las superficies del émbolo prototipo con el fin de corroborar los resultados obtenidos mediante el análisis teórico de esfuerzos mecánicos, el cual llevo a cabo teniendo como referencia la metodología clásica de diseño de componentes para motores de dos tiempo, en este caso, el émbolo del motor.

Figura 50. Mallado émbolo prototipo

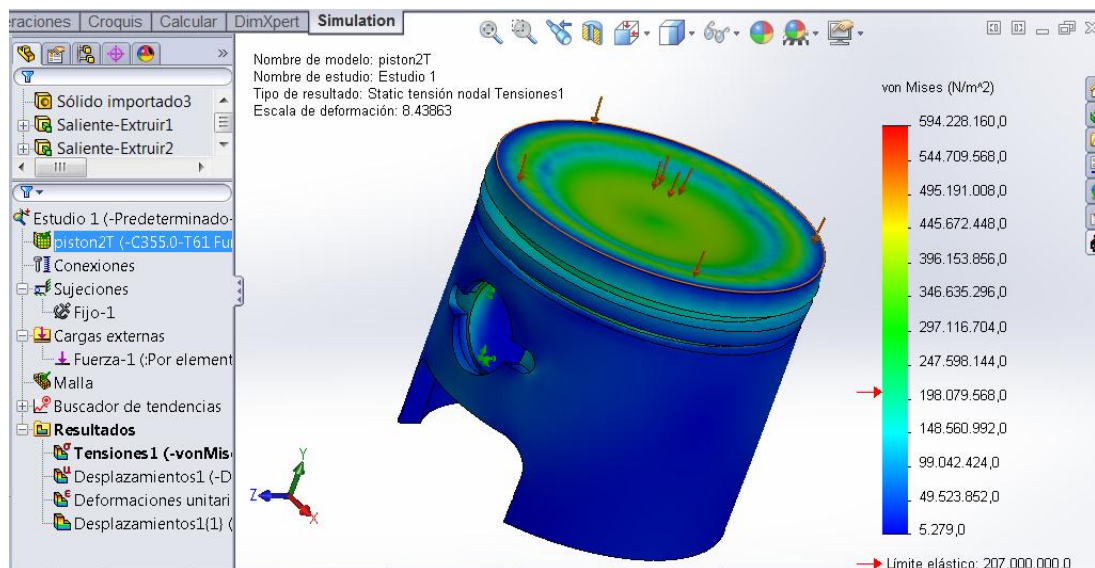


Para el desarrollo del análisis de esfuerzos mecánicos, primero se deben determinar las condiciones bajo las cuales se realizó el estudio, las cuales corresponden a la presión máxima alcanzada al interior del cilindro, la dirección de aplicación de las fuerzas, y definición del material.

En la figura 50 se muestra el respectivo mallado que se le realizó al émbolo prototipo.

Es necesario tener en cuenta que el valor de interés del esfuerzo equivalente, es el que se encuentra sobre las superficies internas y externas del émbolo, omitiendo así, los valores máximos arrojados por los concentradores de esfuerzos localizados en las aristas de las ranuras de los segmentos.

Figura 51. Distribución de esfuerzos mecánicos



En la figura 51 podemos notar como se distribuye el esfuerzo en el cuerpo del émbolo despues de ser sometido a una fuerza distribuida sobre la cabeza, el valor obtenido por el programa no es el que se deseaba obtener, ya que la aleación de

aluminio de la cual esta constituido el émbolo prototipo no se encuentra en la librería de la herramienta soldworks ni tampoco ninguna de las aleaciones recomendadas para el proceso de moldeo o conformado; pero este ejemplo realizado con otra aleación deja ver comovaria dicho esfuerzo en la longitud de émbolo. Notese que el esfuerzo maximo resaltado en rojo se presenta en el perimetro del émbolo con su interaccion con el cilindro y por la presion al que se somete en la explosion de gases.

5. ESTUDIO Y ANALISIS DE FACTIBILIDAD TECNICO-ECONOMICO DE LA MANUFACTURA DEL EMBOLO PROTOTIPO EN EL AREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA.

Además del estudio que se realizó en el capítulo 3 y en el anexo G, se evidencio dentro en el mercado nacional aún más razones por la cual el moldeo de arena es la opción más viable. La fabricación de émbolo por conformado mediante forja resulta sumamente costosa tanto por el proceso como por las aleaciones, en el mercado local la venta de aleaciones es muy limitada concentrándose en las series 6061-T6, 6063-T5 y 1100-H14 en presentaciones de lámina como de perfiles para uso especialmente estructural y de acabados. Las aleaciones que se recomiendan para la fabricación del émbolos (2218,2618 y 4032) no se consiguen en el mercado nacional y si así lo fueran resultarían muy costosas básicamente por tres razones; la primera es que las características constitutivas excepcionales de estas aleaciones requieren de un proceso de manufactura muy riguroso para que sean aceptados para el proceso de forjado pues se usan ampliamente en la industria aeroespacial, por ende la conformación de estas series son caras; la segunda es que generalmente vienen en presentaciones de barras cilíndricas de tres metros o más, lo cual resulta muy costosas teniendo en cuenta que nuestra producción se limita a un par de piezas y finalmente la tercer razón es que al no ser un producto comercializado en la industria nacional se tendría que importar, lo cual genera costos adicionales por transportación.

El proceso de forjado requiere de una matriz especial, que requeriría de un análisis igual o superior al hecho al émbolo, tendría que ser de un material con superiores propiedades térmicas y mecánicas que el aluminio aleado como por ejemplo el acero en caliente, esta matriz tendría que soportar cargas de fuerza en toneladas sin que ello cause deformidad en su estructura para que haga un buen proceso de conformado, el costo de una matriz con estas características sería

extremadamente grande y más tratándose de una producción tan limitada. Los costos del proceso de prensado también serían elevados. El proceso de forjado se justifica si la pieza se va a usar en condiciones extremas de operatividad y si el nivel de producción es grande (véase anexo J).

Con las aleaciones de aluminio para fundición, sucede algo similar, aunque las opciones de selección son más amplias (véase anexos H e I), el mercado nacional prácticamente no posee ninguna de estas aleaciones y más si la venta es al detal. La única aleación dentro de las recomendadas que se encontró comercialmente a la venta es la A380.0 en Itagüí, Antioquia, la cual se puede adquirir por medio de la sucursal en Bucaramanga de CELSA S.A, el gran inconveniente es que su presentación viene en lingotes de 10 kilogramos y su venta se hace en pedido por toneladas, por lo que nos resulta económicamente inviable.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado la opción más viable por economía y disponibilidad es la compra de émbolos usados del motor de dos tiempos Shindaiwa S450EC1, ya conocemos que están fabricadas con la aleación B390.0 y conocemos sus características. Esta aleación es apta para moldearse en cualquier proceso de fundición y no requiere de tratamiento térmico posterior a su fundido, lo cual disminuye aún más el costo del proceso. Aunque esta aleación es recomendada para procesos de fundición a presión en matriz, su adaptabilidad a cualquier proceso nos da un mayor margen de maniobra en la selección del proceso de fundido.

El proceso de fundición a presión y el moldeo por coquilla presentan el mismo problema que el de forja pero en menor proporción, pues el diseño, el material y la fabricación del sistema de moldeo de la matriz o de la coquilla son muy costosos. La matriz de presión debe construirse en un material que soporte la presión de inyección del sistema de cámara y que a la vez tenga un excelente acabado superficial para tener rangos de porosidad mínimos, lo cual requiere de

un trabajo de manufactura muy riguroso. La coquilla también debe tener un buen acabado por la misma razón y además debe ser resistente al trabajo en caliente, porque requiere de una buena resistencia al desgaste y a los cambios térmicos. En ambos casos su construcción es económicamente viable a largo plazo solo si el nivel de producción del émbolo es alto. En la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana la sucursal de la empresa CELSA S.A., cuya sede principal se encuentra en Medellín, Antioquia, ofrece la opción de moldeo a presión en matriz.

La fundición en arena a diferencia de los otros procesos es mucho más económica y casi toda aleación se puede fundir por este método, el proceso se adapta bien a la versatilidad de los espesores característicos del émbolo y si es realizado por personal experimentado, se logra una buena precisión dimensional.

Y aunque el acabado superficial no es tan bueno como el de los otros métodos, al finalizar la fundición de la pieza tendrá que someterse a un proceso de maquinado sin importar el método de moldeo. La relación costo-producción entre los dos métodos de moldeo encontrados en el área metropolitana de Bucaramanga se muestran en la tabla 19. Por todas las razones anteriormente mencionadas escogemos la fundición de arena como método de moldeo para la fabricación del émbolo.

Los costos de honorarios profesionales del director del proyecto se estiman según lo estipulado en el acuerdo 1279 de junio 19 de 2002, el cual se establece el régimen salarial y prestaciones de los docentes de las universidades estatales y que es aplicado en la UIS. Los costos de honorarios de los autores del proyecto se estiman en el acuerdo 020 de junio 13 de 2014, el cual establece el pago a estudiantes investigadores UIS, contemplado en el artículo 2. Basado en lo anteriormente mencionado el total de costos por trabajo intelectual en el presente proyecto se muestran en la tabla 20.

Tabla 19. Costo de los procesos de manufactura disponibles

Proceso de manufactura	Empresa	Costo unitario [\$/unidad]	Pedido mínimo [Unidad]	Costo total (\$COP)
Moldeo a presión en matriz (Die casting)	Celsa S.A.	80.000 ^(a)	1.000	80'000.000
Fundición en molde de arena (sand casting)	Suministros metalmecánicos SM	200.000 ^(b)	1	200.000
		70.000 ^(c)	4	280.000
Maquinado	Suministros metalmecánicos SM	90.000	1	90.000

(a) Precio unitario estimado en base a los costos sumados de proceso de moldeo, la elaboración de matrices, la adquisición de la aleación disponible A380.0-F (no requiere de posterior tratamiento térmico).

(b) Precio unitario estimado de la elaboración del modelo con caja de machos para la fabricación del émbolo

(c) Precio unitario estimado en base a los costos sumados de proceso de moldeo y la adquisición de la aleación B390.0-F (no requiere tratamiento térmico).

Tabla 20. Costo del trabajo intelectual

Profesionales	Horas/mes	Meses	Valor/hora	Valor total
Director Ph.D. Jorge Chacón	6	10	\$150.000	\$9'000.000
Wilfran Manuel Socarras Viloría	100	10	\$15.400	\$15'400.000
Stiven Fernando Cabra Brijaldo	100	10	\$15.400	\$15'400.000
Costo total trabajo intelectual				\$39'800.000

En la tabla 21 se muestra el costo total realizado en el proceso de investigación y fabricación del émbolo.

Tabla 21. Costo total de productos y servicios para el émbolo

Descripción	Costos (\$COP)
Ensayo de rugosidad	150.000
Ensayo de compresión	90.000
Ensayo de espectrometría	90.000
Ensayo metalográfico	300.000
Ensayo de microdureza	50.000
Viáticos	200.000
Útiles de oficina	60.000
Servicios de consumo (electricidad, internet entre otros)	300.000
Proceso de manufactura	570.000
Costo total para la fabricación del émbolo	1'810.000

6. OPERACION DEL PROCESO DE MANUFACTURA

En la industria manufacturera de elementos de máquinas y autopartes, existen un sin número de procesos de fabricación que dependiendo de la calidad final deseada del elemento fabricado, como se ha mencionado anteriormente, tomando en cuenta muchos factores entre ellos los costos de fabricación y la manufactura local, se llegó a la conclusión que el proceso más viable de realizarlo es por fundición en molde de arena (sand casting).

6.1 PROCESO DE FUNDICION EN MOLDE DE ARENA PARA EL EMBOLO PROTOTIPO

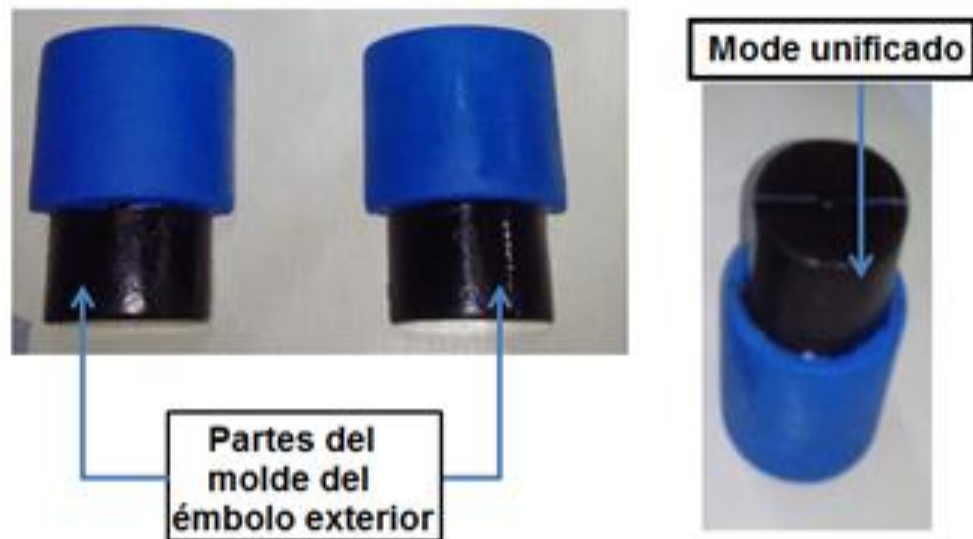
En el momento de fundir piezas de aluminio se debe tener en cuenta las formas, grado de dificultad, masa de la pieza, aleaciones, dimensiones, calidad superficial, número de piezas, características mecánicas y exactitud en las medidas que debe cumplir la pieza que va ser moldeada.

El molde se hace de arena con la ayuda de un modelo y los machos que se realizan con una mezcla de arena silica con agregados de marmolina y silicato de sodio. La realizacion del molde es viable debido a que la fundición en arena es apropiada para piezas fundidas aisladas y complejas, que se realizan para series pequeñas.

El modelo preliminar se realizo teniendo en cuenta que la pieza sera sometida a un posterior maquinado. Para la elaboración de los moldes fue necesario la elaboración de un modelo en madera que cumpliera con los parámetros de la geometría final que se deseaban en la fundición y para la elaboración del modelo fue necesario el uso de los planos del émbolo prototipo.

Teniendo en cuenta que el volumen del fundido debe ser ligeramente mayor se estableció que cuando la pieza salga del molde va a tener un diámetro de 43,47[mm] y una altura de 40,99 [mm] (los cálculos para llegar a estas magnitudes se pueden ver en el anexo K), para que el fundido resulte con este dimensionamiento, haremos el molde en madera para moldear la arena y lo cubriremos con pintura refractaria de color azul, también se agregó un soporte que posteriormente servirá para introducir el macho de sacrificio que permite moldear la parte interna del émbolo resaltada con una pintura refractaria de color negro (figura 52). El terminado del molde se le da un acabado superficial mediante estas pinturas refractarias derivadas de aceite con el fin de minimizar las posibles porosidades que la pieza pueda tener en el proceso de moldeo y para facilitar el retiro del molde sin dañar la imagen grabada en la arena.

Figura 52. Molde en madera terminado y listo para ser montado



Para observar las dimensiones del molde véase el anexo L.

Ahora se realiza el modelo de madera para el corazón del molde en la fundición en arena, se usa el émbolo original que se cortó en la mitad para el análisis de metrología con ello se preserva las medidas originales de la parte interna del émbolo, luego se le agrega a cada mitad un molde en madera que se adecua al soporte del molde como se puede ver en la figura 54, después se unen las piezas y se le llena en su parte interna con arena sílice (85%) con arcilla (%15) creando con esto el macho de sacrificio.

Figura 53. Adecuación preliminar del molde en madera moldear el macho de sacrificio



a.) Adecuación preliminar del molde en madera moldear el macho de sacrificio



b.) Molde en madera con pintura refractaria para el moldeo del macho
Para observar las dimensiones del molde, el proceso en detalle y el macho resultante véase el anexo M.

Se continúa con la preparación de la arena de moldeo (figura 54), donde se utilizó arena sílice conformada de un porcentaje aproximado de 15% de arcilla y 85% sílice. Para que el molde tenga una granulometría fina con el fin de que la pieza tenga un buen acabado se usó un aglutinante producto de mezcla de arena, agua y bentonita.

Figura 54. Preparación de la arena para el respectivo moldeo



Luego se procede con la ubicación del modelo dentro de la caja con arena previamente tamizada, las dimensiones de la caja son 34 cm de ancho, 34 cm de largo y 23.2 cm de alto. La arena es compactada para garantizar que se conserve la forma del modelo en el molde y no se desarme al momento de retirar el modelo.

Al colocar correctamente las cajas y los machos se procede a llenar los moldes con la aleación de aluminio B390.0 en fase líquida. Para la fundición de la aleación se empleó un horno de crisol basculante de aire (véase la figura 55), el cual puede alcanzar temperaturas cercanas a los 1000°C, por tanto el crisol tiene la capacidad

de fundir la aleación teniendo en cuenta que esta posee un rango de punto de fusión entre los 510°C a los 650°C.

Figura 55. Horno para fundición de crisol basculante



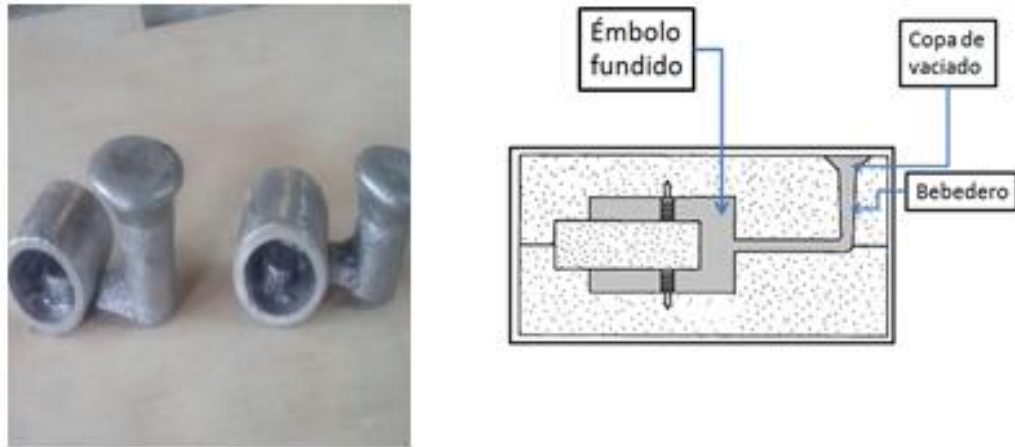
Inmediatamente el material esta listo para fundir, se vierte en el molde de arena como se observa en la figura 56.

Figura 56. Vertimiento del material en el molde



Después de ser vertido se deja enfriar aproximadamente 2 horas a temperatura ambiente con el fin de dejar que la pieza se solidifique lo mejor posible. Inmediatamente la pieza esta sólida, se extrae de la arena y se le realiza una limpieza a la aleación, quedando como se ve en la figura 57.

Figura 57. Acabado final después de extraer del molde



Como se ve en la figura anterior al molde de arena no se le agregó mazarota, la razón es que el volumen del émbolo es tan pequeño que no se justifica realizarla, esta afirmación está basada en cálculos de moldeo de arena (véase anexo N). En las hojas de ruta (véase tabla 23) se podrá ver con más detalle el proceso de moldeo.

6.2 PROCESO DE MECANIZADO Y TERMINADO DEL ÉMBOLO

Debido a que el proceso de moldeo no logra el acabado superficial que requerimos para la pieza se utilizó un modelo preliminar con una geometría

aproximada a la pieza deseada para posteriormente someterlo un proceso de mecanizado que le diera las características superficiales adecuadas para el alojamiento del bulón, la cabeza y la falda del émbolo. Además se usó este procedimiento para la elaboración de los distintos alojamientos de los elementos que constituyen a grupo pistón (anillos y bulón). En la figura 59 se muestra el diseño de la pieza obtenida del proceso de fundición después de que se le retire el bebedero.

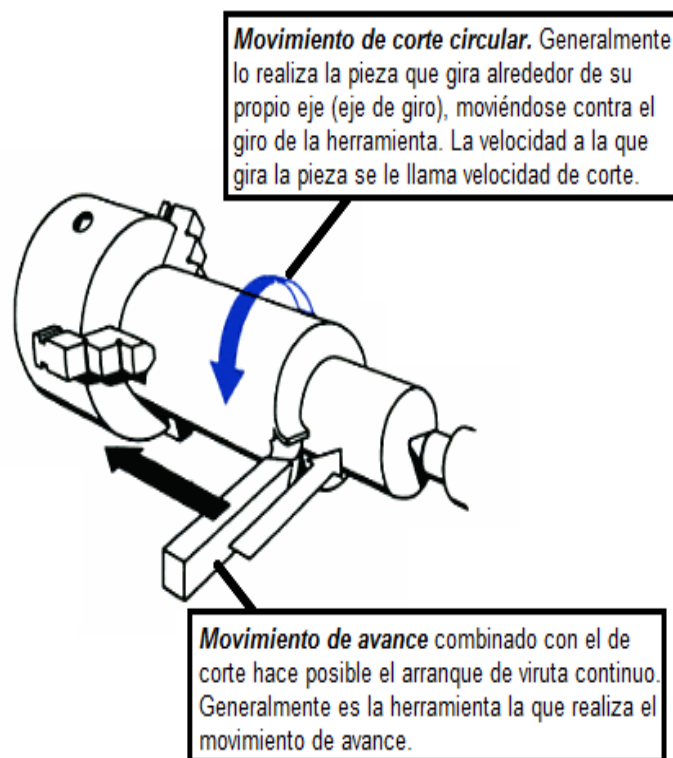
Figura 58: Pieza resultante del proceso de fundición en arena



Procedimiento de torneado: Tornear es un proceso en el que básicamente se arranca virutas mediante una cuchilla de una forma geométrica determinada, la cual ataca constantemente la pieza fundida con que se trabaja y cuyos movimientos se describen en la figura 59.

La diversidad de formas que hay que mecanizar de la pieza requieren distintos procedimientos de torneado. Las piezas cilíndricas se obtienen a partir del cilindrado, las superficies planas se hacen mediante refrentado, la conicidad mediante torneado cónico, entre otros procesos que se describirán con detalle en las hojas de ruta.

Figura 59. Movimientos de torneado



Fuente: GERLING, H. Alrededor de las máquinas-herramientas. Caracas: Ed. Reverte. 1974. p.13.

El proceso preliminar de maquinado fue llevado a cabo en un torno mecánico marca Lantaine (para ver ficha técnica véase anexo U), en el cual se cilindra la pared del cilindro fundido hasta conseguir un aproximado del diámetro final al que

se quiere llegar, a su vez se verifica que no se hayan formado porosidades o grietas en el proceso de fundido (figura 60).

Figura 60. Cilindrada preliminar



a.) Torneado de las paredes del cilindro



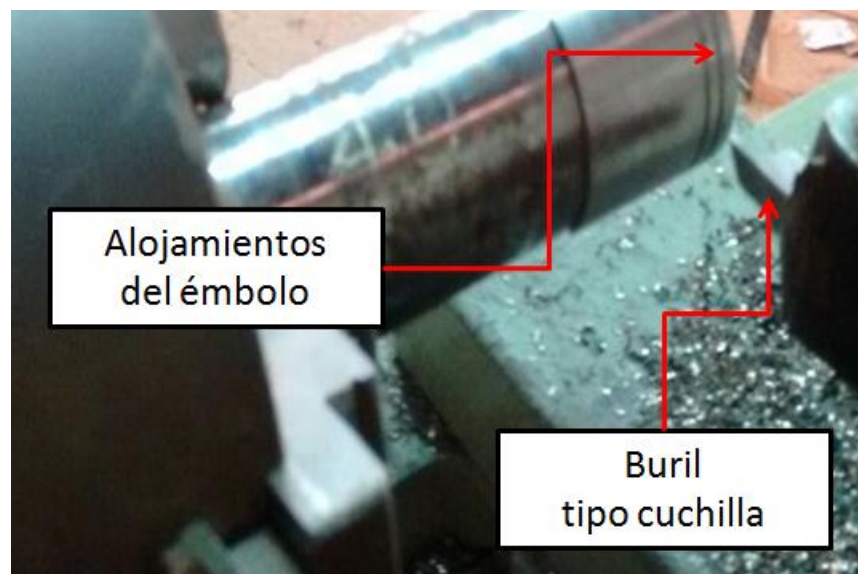
b.) Resultados del maquinado preliminar

La siguiente etapa en el proceso de maquinado corresponde al refrentado de las caras planas de los tetones, las cuales son paralelas entre sí, garantizando la ubicación simétrica de la cabeza de la biela. Este proceso se hizo con un taladro vertical marca Hyundai (para ver ficha técnica véase anexo U). Esta distancia debe ser bien precisa para evitar que se genere un desplazamiento lateral de la cabeza de la biela, la pieza es sujeta por las mordazas de la prensa del banco y se refrenta con un escañador como se puede ver en la figura 61.

Figura 61. Refrentado de los tetones



Figura 62. Realización de los alojamientos de los anillos



Ahora se realizan los alojamientos de los segmentos o anillos, el émbolo es insertado en un cilindro, que a su vez es agarrado por las mordazas o muelas del torno con el fin de no lastimar el acabado superficial del émbolo, una vez sujeto el cilindro se procede a realizar las ranuras mediante un buril tipo cuchilla con el espesor definitivo de acabado, además de lo anteriormente mencionado, se le da al émbolo su conicidad característica y un mejor acabado superficial (figura 62).

Continuando con el proceso, ahora se define en el cilindro donde se va a alojar el bulón y los alojamientos de las chavetas que sirven de topes a bulón, ya que este es de tipo flotante, esto se realiza en el mismo torno barrenado, como se puede ver en la figura 63.

Figura 63. Proceso de mecanizado de los alojamientos de bulón



Después de todo este largo proceso de acabado y detalles, llegamos hasta obtener el prototipo final, con todas las especificaciones geométricas que se requerían, en la figura 64 podemos detallar la pieza terminada, esperando a ser

sometida a distintos ensayos de verificación de calidad y funcionalidad. En las hojas de ruta (tablas 24 al 27) se podrá ver con más detalle el proceso de mecanizado del émbolo. En base a todo el trabajo desarrollado para la fabricación del émbolo prototipo, se incluyó como material adicional, un protocolo de pruebas y un análisis modal de fallos, los cuales se pueden ver en detalle en los anexos W y V.

Figura 64. Émbolo prototipo resultante

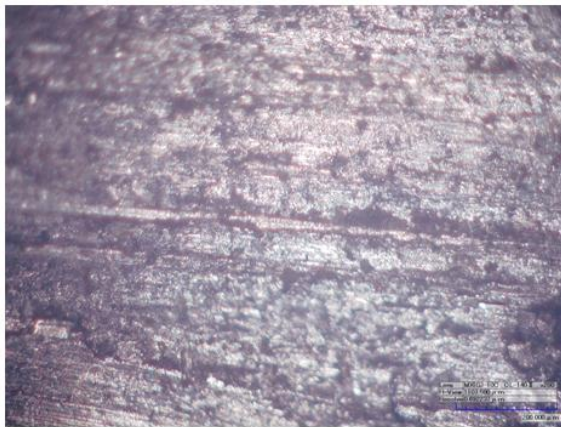


6.3 ENSAYO DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL DEL ÉMBOLO PROTOTIPO

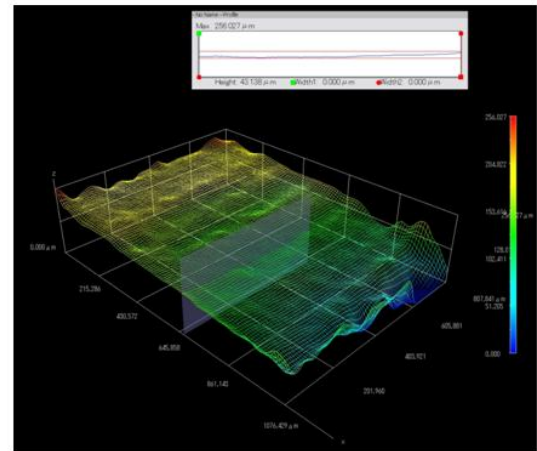
Con el propósito de comparar las rugosidades del émbolo prototipo respecto a la rugosidad de émbolo original (véase la sección 2.3.1), se realizó un ensayo de rugosidad superficial al alojamiento del bulón y a la falda de la pieza fabricada. El ensayo en el alojamiento del bulón obtuvo un pico máximo de $256.027 \mu\text{m}$ bajo un mínimo de referencia de $0 \mu\text{m}$, como se puede ver en la figura 103, bajo este rango de rugosidad se obtiene un promedio de $128.0135 \mu\text{m}$ (0.12 mm). En la

falda, el ensayo obtuvo un pico máximo de 105.136 μm bajo un mínimo de referencia de 0 μm como se puede ver en la figura 104, promediando una rugosidad de 52.568 μm (0.052 mm).

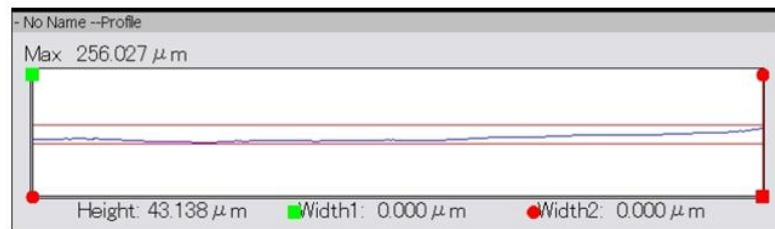
Figura 65. Resultados de la rugosidad superficial del alojamiento del bulón para el émbolo prototipo



a.) Vista de la superficie en 2D del alojamiento del bulón



b.) Vista de la superficie en 3D del alojamiento del bulón



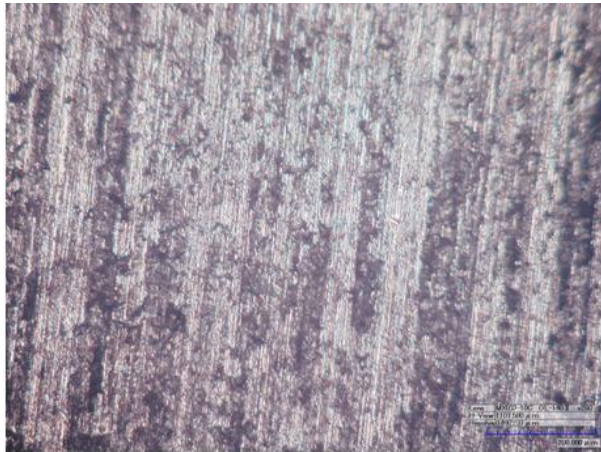
c.) Resultados de la rugosidad superficial

Fuente: Microscopio HIROX del grupo de investigación GIMAT

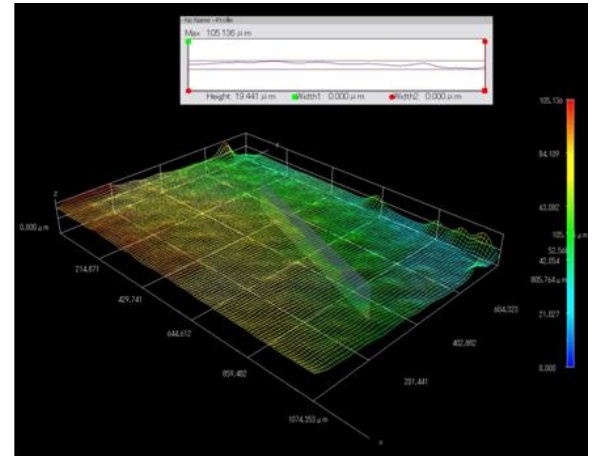
Los ensayos arrojan resultados aún mayores de los cuantificados en el émbolo original, los cuales en sí estaban por encima de los recomendados para la fabricación del émbolo, esto se debe a que el proceso al que se sometió la pieza fundida tiene limitaciones de todo proceso de mecanizado manual, el cual no

otorga rangos tan precisos como los de los émbolos de producción masiva, donde el proceso generalmente es automatizado y hay un control de calidad riguroso a cada parte del proceso.

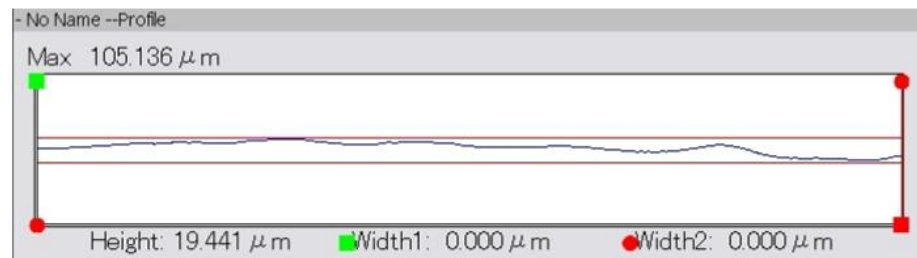
Figura 66. Resultados de la rugosidad superficial de la falda del émbolo prototipo



a.) Vista de la superficie en 2D de la falda



b.) Vista de la superficie en 3D de la falda



c.) Resultados de la rugosidad superficial

Fuente: Microscopio HIROX del grupo de investigación GIMAT

6.4 HOJAS DE RUTA

Tabla 22. Hoja de ruta del proceso completo de fabricación

		HOJA DE RUTA					
		NOMBRE DE PARTE	MATERIAL	NOMBRE DE PARTE	MATERIAL	NOMBRE DE PARTE	MATERIAL
ESCUOLA DE INGENIERIA MECANICA N°		Émbolo motor Shindaiwa B450 70210-41110 (Pistón)		Aleación aluminio-silicio Geometría cónica		30/07/2015	
		APLICACIÓN Shindaiwa/B450		TAMAÑO		0.1	
		NIVEL DE ING. PRODUCTO A 1		FECHA		1 de 1	
		PLAN DE CONTROL N°		REV		Dr. Ing. J. L. Characón	
		ELABORÓ		APROBÓ		TIEMPO DE CICLO	
OPERACIÓN		MAQUINA HERRAMIENTA		TIEMPO DE PREPARACIÓN		TIEMPO DE CICLO	
10	Elaboración de modelo en madera para conformación del molde de fundición a partir de la geometría definida en los planos entregados. Las medidas fueron aumentadas un 5% de la geometría final deseada teniendo en cuenta las contracciones térmicas.	Elaboración y fundición artesanal	2 horas	30 horas, 45 minutos			
20	Cilindrada preliminar de la superficie, velocidad de corte 1200 rpm.	Torno paralelo mecánico marca LAM Modelo 350RH	20 minutos	1 hora			
30	Refrentado de caras planas paralelas de los tetones, velocidad de corte de 1315 rpm.	Taladro vertical de mesa giratoria marca HOPEX Modelo ZJ4116Q.	35 minutos	2 horas, 30 minutos			
40	Barrenado de alojamientos bulón con 11 mm ± 0.02 mm y alojamientos chavetas topes bulón, velocidad de 1800 rpm.	Taladro vertical de mesa giratoria marca HOPEX Modelo ZJ4116Q.	45 minutos	3 horas, 30 minutos			
50	Ranurado de alojamientos de segmentos de 1,5 mm ± 0.1 mm, cilindrada con acabado final de la superficie, concavidad de la cara superior de la cabeza.	Torno paralelo mecánico marca LAM Modelo 350RH	35 min	7 horas, 25 minutos			
CONTROL DE CALIDAD							
Tamaño de la muestra _____		<input type="checkbox"/> Ø de la cabeza de émbolo: 39,85 mm ± 0,01 <input type="checkbox"/> Ø de la faldía del émbolo: 39,95 mm ± 0,01 mm <input type="checkbox"/> Ø del alojamiento del bulón: 11 mm ± 0,1 mm <input type="checkbox"/> Distancia entre cara de los tetones : 15,3 mm ± 0,1 mm					

Tabla 23. Página uno de la hoja de ruta del proceso de fundición



  ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA MÁQUINAS TÉRMICAS		HOJA DE OPERACIÓN: FUNDICIÓN DE ALUMINIO			
		PROCESO NÚMERO	O 1	FECHA	03/08/2015
		NOMBRE DEL PROCESO	Fundición de aluminio	REVISIÓN	O 1
		ENTIDAD RESPONSABLE	Suministros Metalmecánicos	ELABORO	Stiven Cabra, Wilfran Socarras
		MATERIA PRIMA	Aleación de Aluminio-silicio reciclada	APROBO	Dr. Ing. J. L. Chacón
Parte N°	Nombre de la pieza	Página	Descripción general		
70210-41110 (Pistón)	Émbolo motor Shindaiwa B450	1 de 2	Elaboración de modelo de manera artesanal para la fabricación del molde para verter el material fundido proveniente de émbolos reciclados mediante horno de inducción.		
Material	Tamaño	Piezas por lote			
Aleación de aluminio silicio		una(1)			
N°	OPERACIÓN	DETALLE	HERRAMIENTA	TIEMPO DE CICLO	
1	Elaboración de modelos en madera	Después de haber hecho los cálculos para las respectivas tolerancias del modelo de madera, se fabrica de manera artesanal el modelo de fundición en madera de cedro (Anexo K, L y M)	Herramientas enfocadas en trabajo de carpintería	16 horas y 45 minutos	
2	Recubrimiento del modelo con pintura	Cobertura en su totalidad del modelo de madera con pintura de aceite, con el fin de garantizar la eliminación de poros propios de la madera y además evitar que se pegue la arena.	brocha y pintura de aceite	10 min	
3	Elaboración del molde de fundición	Se hacen los respectivos cálculos que conlleva a la elaboración de dicho molde (véase anexo N), se procede a poner el modelo en madera en la caja de arena para la elaboración del molde, ubicación de puertos respiraderos, bebederos y copa de vaciado, (véase anexo O)	arena de sílice y bentonita	1 hora	

Tabla 24. Página dos de la hoja de ruta del proceso de fundición


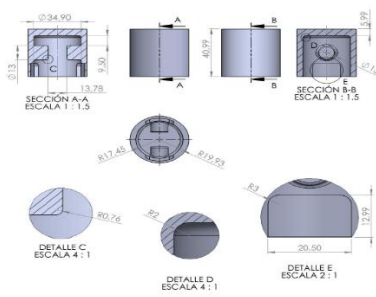
 ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA MÁQUINAS TÉRMICAS		HOJA DE OPERACIÓN: FUNDICIÓN DE ALUMINIO			
		PROCESO NÚMERO	O 1	FECHA	03/08/2015
		NOMBRE DEL PROCESO	Fundición de aluminio	REVISIÓN	O 1
		ENTIDAD RESPONSABLE	Suministros Metalmecánicos	ELABORÓ	Stiven Cabra, Wilfran Socarras
		MATERIA PRIMA	Aleación de Aluminio-silicio reciclada	APROBÓ	Dr. Ing. J. L. Chacón
Parte N°	Nombre de la pieza	Página	Descripción general		
70210-41110 (Pistón)	Émbolo motor Shindaiwa B450	2 de 2	Elaboración de modelo de manera artesanal para la fabricación del molde para verter el material fundido proveniente de émbolos reciclados mediante horno de inducción.		
Material	Tamaño	Piezas por lote			
Aleación de aluminio silicio		una(1)			
N°	OPERACIÓN	DETALLE	HERRAMIENTA	TIEMPO DE CICLO	
4	Fundición del material	Fundición de la aleación Aluminio-silicio reciclado mediante horno de inducción a 1800 °C.	Horno de inducción de crisol basculante	45 minutos	
5	Vertido del material	Manteniendo una velocidad constante, se vierte el material fundido dentro del molde.	Manualmente	5 minutos	
6	retirado de la pieza	Después de 2 horas de reposo se destruye el molde y se obtiene la pieza final, con las respectivas tolerancia calculadas anteriormente (Véase ilustración 52).	Manualmente	12 horas	
CONTROL DE CALIDAD Tamaño de la muestra _____ <input type="checkbox"/> Inspección visual <input type="checkbox"/> Sin grietas <input type="checkbox"/> Llenado completo <input type="checkbox"/> Presencia de burbujas de aire					

Tabla 25. Página uno de la hoja de ruta del proceso de cilindrado


HOJA DE OPERACIÓN: CILINDRADA SUPERFICIAL				
 ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA	PROCESO NÚMERO	O 2	FECHA	05/08/2015
	NOMBRE DEL PROCESO	Cilindrada preliminar de superficie	REVISIÓN	O 1
	ENTIDAD RESPONSABLE	Suministros Metalmecánicos	ELABORÓ	Stiven Cabra, Wilfran Socarras
	MATERIA PRIMA	Pieza fundida	APROBÓ	Dr. Ing. J. L. Chacón
	Parte N°	Nombre de la pieza	Página	Descripción general
70210-41110 (Pistón)	Émbolo motor Shindaiwa B450	1 de 2	Corrección de imperfecciones dejadas por el proceso de fundición en la partes exterior del émbolo con una cilindrada preliminar	
Material	Tamaño	Piezas por lote		
Aleación de aluminio silicio		una(1)		
N°	OPERACIÓN	DETALLE	HERRAMIENTA	TIEMPO DE CICLO
1	Montaje de pieza en copas del torno y selección de velocidad de corte	Se montan la pieza en la copa de 3 mordazas del torno paralelo y se le da el respectivo centrado para la cilindrada preliminar y se asigna una velocidad de corte de 1200 rpm (véase Anexo P).	Torno paralelo	40 minutos
2	Cilindrada	Se pone el torno en funcionamiento y de manera manual se le da avance, utilizando una herramienta de corte de acero rápido con un radio de 15° (véase Anexo P).	Torno paralelo	20 minutos

Tabla 26. Página dos de la hoja de ruta del proceso de cilindrado


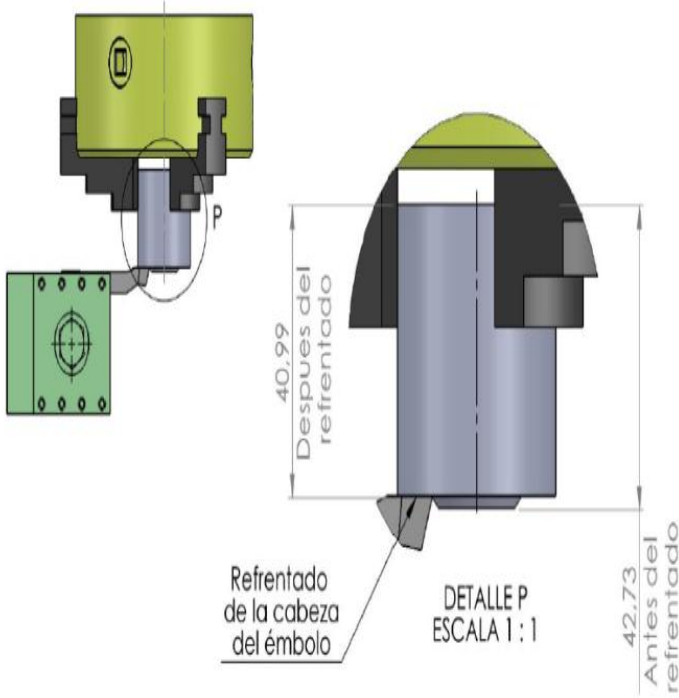
HOJA DE OPERACIÓN: CILINDRADA SUPERFICIAL				
 ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA	PROCESO NÚMERO	O 2	FECHA	05/08/2015
	NOMBRE DEL PROCESO	Cilindrada preliminar de superficie	REVISIÓN	O 1
	ENTIDAD RESPONSABLE	Suministros Metalmecánicos	ELABORÓ	Stiven Cabra, Wilfran Socarras
	MATERIA PRIMA	Pieza fundida	APROBÓ	Dr. Ing. J. L. Chacón
	Parte N°	Nombre de la pieza	Página	Descripción general
70210-41110 (Pistón)	Émbolo motor Shindaiwa B450	2 de 2	Corrección de imperfecciones dejadas por el proceso de fundición en la partes exterior del émbolo con una cilindrada preliminar.	
Material	Tamaño	Piezas por lote		
Aleación de aluminio silicio		una(1)		
CONTROL DE CALIDAD Tamaño de la muestra _____ <input type="checkbox"/> Inspección visual <input type="checkbox"/> Sin grietas <input type="checkbox"/> Llenado completo <input type="checkbox"/> Presencia de burbujas de aire				
Para información sobre las fichas técnicas de las máquinas utilizadas en el mecanizado y las velocidades de corte y revoluciones utilizadas en el proceso, véase anexos U y T.				

Tabla 27. Página uno de la hoja de ruta del refrentado de los tetones


 ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA MÁQUINAS TÉRMICAS ALTERNATIVAS		HOJA DE OPERACIÓN: REFRENTADO TETONES DEL ÉMBOLO			
		PROCESO NÚMERO	O 3	FECHA	05/08/2015
		NOMBRE DEL PROCESO	Refrentado caras planas tetones	REVISIÓN	O 1
		ENTIDAD RESPONSABLE	Suministros Metalmecánicos	ELABORÓ	Stiven Cabra, Wilfran Socarras
		MATERIA PRIMA	Pieza maquinada	APROBÓ	Dr. Ing. J. L. Chacón
Parte N°	Nombre de la pieza	Página	Descripción general		
70210-41110 (Pistón)	Émbolo motor Shindaiwa B450	1 de 2	Se refrentan las caras planas de los tetones del émbolo o alojamiento de la cabeza de la biela con una tolerancia de ± 1 mm.		
Material	Tamaño	Piezas por lote			
Aleación de aluminio silicio		una(1)			
N°	OPERACIÓN	DETALLE	HERRAMIENTA	TIEMPO DE CICLO	
1	Montaje émbolo en taladro vertical y ajustes de operación	Se monta el prototipo de émbolo en la presa de fijación del banco del taladro vertical, se instala la herramienta de corte en el mandril del taladro y se ajusta la velocidad de rotación de 1325 rpm (véase Anexo Q).	taladro vertical y escariador 1/4 "	50 minutos	
2	Corte de material	Se corta los tetones hasta conseguir la tolerancia deseada de 15,3 mm entre las caras planas, dando un avance de corte manual en línea recta de la mesa (véase Anexo Q).	taladro vertical y escariador 1/4 "	1 horas y 40 minutos	

Tabla 28. Página dos de la hoja de ruta del refrentado de los tetones


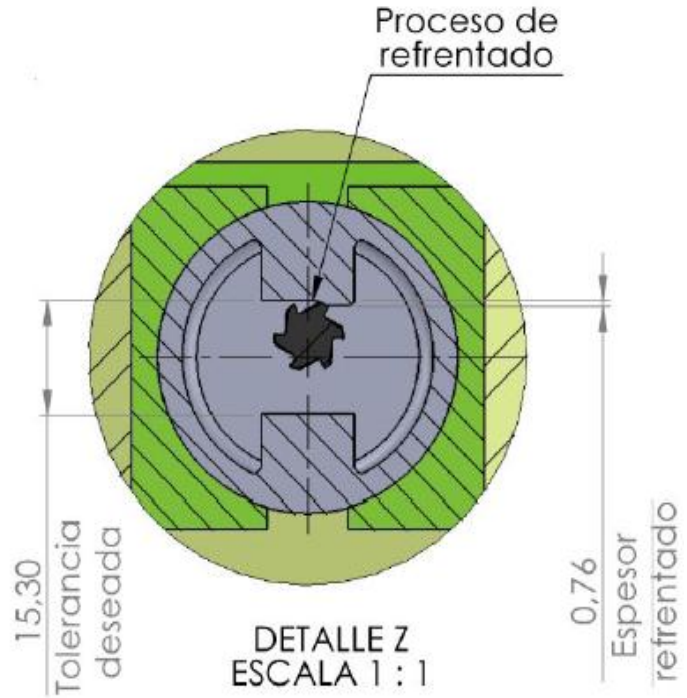
 ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA MÁQUINAS TÉRMICAS ALTERNATIVAS		HOJA DE OPERACIÓN: REFRENTADO TETONES DEL ÉMBOLO			
		PROCESO NÚMERO	O 3	FECHA	05/08/2015
		NOMBRE DEL PROCESO	Refrentado caras planas tetones	REVISIÓN	O 1
		ENTIDAD RESPONSABLE	Suministros Metalmecánicos	ELABORÓ	Stiven Cabra, Wilfran Socarras
		MATERIA PRIMA	Pieza maquinada	APROBÓ	Dr. Ing. J. L. Chacón
Parte N°	Nombre de la pieza	Página	Descripción general		
70210-41110 (Pistón)	Émbolo motor Shindaiwa B450	2 de 2	Se refrentan las caras planas de los tetones del émbolo o alojamiento de la cabeza de la biela con una tolerancia de $\pm 1\text{mm}$		
Material	Tamaño	Piezas por lote			
Aleación de aluminio silicio		una(1)			
CONTROL DE CALIDAD Tamaño de la muestra _____ <input type="checkbox"/> Inspección visual <input type="checkbox"/> Sin grietas <input type="checkbox"/> Llenado completo <input type="checkbox"/> Presencia de burbujas de aire					
Para información sobre las fichas técnicas de las máquinas utilizadas en el mecanizado y las velocidades de corte y revoluciones utilizadas en el proceso, véase anexos U y T.					

Tabla 29. Página uno de la hoja de ruta del barrenado del alojamiento del bulón y construcción de chaveteros


 ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA MÁQUINAS TÉRMICAS ALTERNATIVAS					HOJA DE OPERACIÓN: BARRENADO DE ALOJAMIENTO DE BULÓN Y CONTRUCCIÓN DE CHAVETEROS			
PROCESO NÚMERO		O 4	FECHA		07/08/2015			
NOMBRE DEL PROCESO		Barrenados alojamientos bulón y chavetas	REVISIÓN		O 1			
ENTIDAD RESPONSABLE		Suministros Metalmecánicos	ELABORÓ		Stiven cabra, Wilfran Socarras			
MATERIA PRIMA		pieza maquinada	APROBÓ		Dr. Ing. J. L. Chacón			
Parte N°	Nombre de la pieza	Página	Descripción general					
70210-41110 (Pistón)	Émbolo motor Shindaiwa B450	1 de 2	Se refrentan las caras planas de los tetones del émbolo o alojamiento de la cabeza de la biela con una tolerancia de ± 1 mm.					
Material	Tamaño	Piezas por lote						
Aleación de aluminio silicio		una(1)						
N°	OPERACIÓN	DETALLE	HERRAMIENTA	TIEMPO DE CICLO				
1	Montaje y alineación de pieza en taladro	Se monta el émbolo prototipo al taladro vertical y se alinea de manera que quede totalmente centrado lateralmente con el fin de barrenar el alojamiento del bulón y el de las chavetas topes del bulón.	Taladro vertical	30 minutos				
2	Taladrar barreno de alojamiento bulón	Se taladra un barreno con un diámetro de 11mm ± 0.1 mm, a la distancia alineada con una velocidad de 1800 rpm (véase anexo R).	Taladro vertical, broca de acero rápido de 11 mm de diámetro, micrómetro de interiores	30 minutos				

Tabla 30. Página dos de la hoja de ruta del barrenado del alojamiento del bulón y construcción de chaveteros


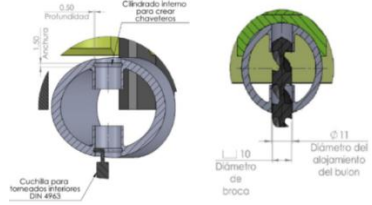
HOJA DE OPERACIÓN: BARRENADO DE ALOJAMIENTO DE BULÓN Y CONSTRUCCIÓN DE CHAVETEROS				
 <p>ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA MÁQUINAS TÉRMICAS ALTERNATIVAS</p>	PROCESO NÚMERO	O 4	FECHA	07/08/2015
	NOMBRE DEL PROCESO	Barrenados alojamientos bulón y chavetas	REVISIÓN	O 1
	ENTIDAD RESPONSABLE	Suministros Metalmecánicos	ELABORÓ	Stiven cabra, Wilfran socarras
	MATERIA PRIMA	Pieza maquinada	APROBÓ	Dr. Ing. J. L. Chacón
Parte N°	Nombre de la pieza	Página	Descripción general	
70210-41110 (Pistón)	Émbolo motor Shindaiwa B450	2 de 2	Se refrentan las caras planas de los tetones del émbolo o alojamiento de la cabeza de la biela con una tolerancia de ± 1 mm	
Material	Tamaño	Piezas por lote		
Aleación de aluminio silicio		una(1)		
N°	OPERACIÓN	DETALLE	HERRAMIENTA	TIEMPO DE CICLO
3	Desmontaje de la pieza del taladro y montaje en torno paralelo	Se desmonta el embolo del taladro y se monta en el torno paralelo con el fin de elaborar los chaveteros, se alinea y se selecciona una velocidad del torno de 1350 rpm.	Torno paralelo	30 minutos
4	Elaboración de alojamientos de chavetas	Se talla dentro del barreno del alojamiento del bulón, una ranura de 1 mm de espesor para el alojamiento de las chavetas de sujeción del bulón (véase Anexo R).	Torno paralelo, buril de acero al carbono con punta de radio de 1 mm de diámetro	2 horas
<p>CONTROL DE CALIDAD</p> <p>Tamaño de la muestra _____</p> <p><input type="checkbox"/> Inspección visual</p> <p><input type="checkbox"/> Sin grietas</p> <p><input type="checkbox"/> Llenado completo</p> <p><input type="checkbox"/> Presencia de burbujas de aire</p>				
<p>Para información sobre las fichas técnicas de las máquinas utilizadas en el mecanizado y las velocidades de corte y revoluciones utilizadas en el proceso, véase anexos U y T.</p>				

Tabla 31. Página uno de la hoja de ruta de la elaboración de los segmentos y acabado superficial final



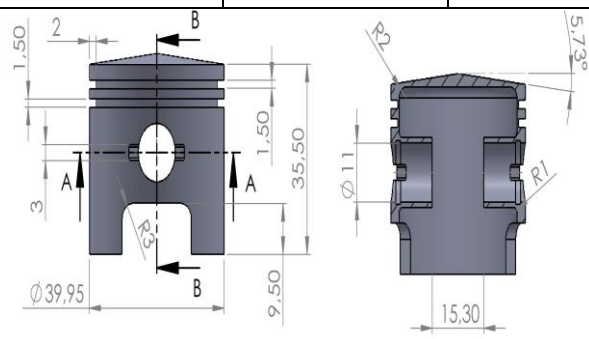
 HOJA DE OPERACIÓN: CONTRUCCIÓN ALOJAMIENTOS DE SEGMENTOS Y ACABADO SUPERFICIAL FINAL				
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA MÁQUINAS TÉRMICAS ALTERNATIVAS	PROCESO NÚMERO	O 5	FECHA	08/08/2015
	NOMBRE DEL PROCESO	Ranurado de alojamientos de segmentos	REVISIÓN	O 1
	ENTIDAD RESPONSABLE	Suministros Metalmecánicos	ELABORÓ	Stiven Cabra, Wilfran Socarras
	MATERIA PRIMA	Pieza maquinada	APROBÓ	Dr. Ing. J. L. Chacón
Parte N°	Nombre de la pieza	Página	Descripción general	
70210-41110 (Pistón)	Émbolo motor Shindaiwa B450	1 de 2	Se tallan sobre la superficie de los émbolos las ranuras de alojamientos de los segmentos y por último se le da acabado superficial cónico que caracteriza al émbolo.	
Material	Tamaño	Piezas por lote		
Aleación de aluminio silicio		una(1)		
N°	OPERACIÓN	DETALLE	HERRAMIENTA	TIEMPO DE CICLO
1	Montaje del émbolo en torno	Se elabora un sistema de sujeción especial con el fin de alinear y fijar el prototipo de manera que se le pueda crear las ranuras y dar el acabado final sin desmontar la pieza (véase anexo S).	Torno paralelo, comparador de caratula	1 hora
2	Corte de material	Se realiza las 2 ranuras a la distancia definida de 1,5 mm $\pm 0,01$ mm de ancho con una profundidad de 2 mm con una velocidad de corte de 1800 rpm (véase anexo S).	Torno paralelo, cuchilla de corte en acero rápido, calibrador pie de Rey, micrómetro de interiores	4 horas

Tabla 32. Página dos de la hoja de ruta de la elaboración de los segmentos y acabado superficial final

 ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA MÁQUINAS TÉRMICAS ALTERNATIVAS		HOJA DE OPERACIÓN: CONTRUCCIÓN ALOJAMIENTOS DE SEGMENTOS Y ACABADO SUPERFICIAL FINAL			
		PROCESO NUMERO	O 5	FECHA	08/08/2015
		NOMBRE DEL PROCESO	Ranurado de alojamientos de segmentos	REVISIÓN	O 1
		ENTIDAD RESPONSABLE	Suministros Metalmecánicos	ELABORÓ	Stiven Cabra, Wilfran Socarras
		MATERIA PRIMA	Pieza maquinada	APROBÓ	Dr. Ing. J. L. Chacón
Parte N°	Nombre de la pieza	Página	Descripción general		
70210-41110 (Pistón)	Émbolo motor Shindaiwa B450	2 de 2	Se tallan sobre la superficie de los émbolos las ranuras de alojamientos de los segmentos y por último se le da acabado superficial cónico que caracteriza al émbolo.		
Material	Tamaño	Piezas por lote			
Aleación de aluminio silicio		una(1)			
N°	OPERACIÓN	DETALLE	HERRAMIENTA	TIEMPO DE CICLO	
3	Acabado final	Se configura el carro móvil del torno de tal manera que consiga el ángulo requerido en la conicidad del émbolo prototipo y se pasa sobre la superficie del embolo cortando material a una velocidad de 1800 rpm (véase Anexo S)	torno paralelo, micrómetro de exteriores, cuchilla de corte de acero al carbono	2 horas y 25 minutos	
CONTROL DE CALIDAD Tamaño de la muestra _____ <input type="checkbox"/> Inspección visual <input type="checkbox"/> Sin grietas <input type="checkbox"/> Llenado completo <input type="checkbox"/> Presencia de burbujas de aire					
Para información sobre las fichas técnicas de las máquinas utilizadas en el mecanizado y las velocidades de corte y revoluciones utilizadas en el proceso, véase anexos U y T.					

7. CONCLUSIONES

- El análisis y el cálculo matemático de la mecánica, termodinámica y transferencia de calor del ciclo de dos tiempos del motor Shindaiwa S450EC1 fueron fundamentales para establecer los parámetros que permitieron el diseño del prototipo del émbolo. Para ello se contó con la ayuda de herramientas como el microsoft excel y EES (engineering equation solver).
- Existen serias deficiencias en la disponibilidad en el mercado regional de materiales que cumplan con las propiedades necesarias para que la fabricación del émbolo cumpla los estándares mínimos de manufactura. Prácticamente ninguna de las aleaciones recomendadas por la asociación americana de metales (véase anexos H, I, J) se consiguen a nivel nacional.
- La capacidad operativa e instrumental de los laboratorios de la sede de Guatiguara y de la escuela de metalurgia de la UIS, permiten desarrollar los análisis necesarios para establecer la caracterización del material con que fue fabricado el émbolo y en general cualquier elemento constitutivo del motor de combustión interna. Con lo anterior se evidencia el enorme potencial que tienen estos laboratorios como prestadores de servicios a la industria regional.
- A pesar de la complejidad geométrica que presenta su moldeo y acabado, la industria regional está en capacidad de fabricar émbolos con un nivel de calidad aceptable en cuanto a su constitución y operatividad, pero que no satisface los estándares establecidos para su fabricación.
- Para que la fabricación de émbolos y otros componentes de los motores de combustión sean viables, se debe implementar un análisis de costos y una

inversión en infraestructura que permitan un nivel de producción y calidad que haga su fabricación económicamente viable. Por ahora la industria regional no tiene la capacidad operativa ni técnica para ser competitiva en la fabricación y venta de émbolos, teniendo en cuenta la oferta del mercado de productos de este tipo provenientes de China.

8. RECOMENDACIONES

- En futuros proyectos que se realicen, se recomienda hacer un análisis más exhaustivo sobre el comportamiento mecánico, térmico y de transferencia de calor del émbolo mediante la adquisición o construcción de un banco de pruebas que simule su comportamiento dinámico y permita al operante tomar y analizar estos en datos en tiempo real.
- Se recomienda el desarrollo e implementación de un software que permita un análisis más exhaustivo de la distribución de cargas mecánicas y térmicas a las que se somete el émbolo y demás elementos del motor de combustión interna.
- Se requiere de un análisis de costos serio y exhaustivo sobre la viabilidad técnica, industrial y comercial que debe tener el sector regional para que sea competitivo en la fabricación y venta de elementos constitutivos para motores de combustión interna. Lo anteriormente mencionado debería estar sumado a políticas gubernamentales que promuevan e incentiven la creación empresarial en Bucaramanga y su área metropolitana.
- Se recomienda realizar un banco de pruebas utilizando las partes constitutivas de motor de combustión interna fabricadas mediante el análisis de este y otros proyectos que se vienen realizando mediante la guía del director de este proyecto.

BIBLIOGRAFIA

ASM Handbook volume II: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international. 1990. 3470 p.

ASM Handbook volume VIII: Mechanical Testing and Evaluation. USA: Ed. ASM International. 2000. 2235 p.

ASM Handbook volume XV: Casting. USA: Ed. ASM international. 1988. 2002 p.

ASM Handbook volume XIV: Forming and Forging. USA: Ed. ASM international. 1988. 2110 p.

ASM Handbook volume XVIII: Friction, Lubrication, and Wear Technology. USA: Ed. ASM international. 1992. 646 p.

BINDER, I. Pistons and engine testing. Stuttgart: Ed. MAHLE GmbH. 2012. 294p.

CASILLAS, A. L. Maquinas cálculos de taller. España: Paideia ediciones. 1958. 644 p.

DAVIS, J. Aluminum and Aluminum Alloys. Michigan: ASM International. 1993. 790 p.

DEGARMO, E. Materials and Processes in Manufacturing. USA: Wiley. 2003. 1252 p.

FUENTES, A; SUESCUN, J. Reingeniería y construcción del cilindro de un motor de dos tiempos mono-cilíndrico con pequeña cilindrada para aplicación agrícola. UIS. 2015. 231p.

GERLING, H. Alrededor de las máquinas-herramientas. Caracas: Ed. Reverte. 1974. 225 p.

GROOVER, M. Fundamentos de manufactura moderna. México: McGraw-Hill. 2007. 1022 p.

JÓVAJ, M. S. Motores de automóvil. Moscú: Mir, 1982. 655p.

KALPAKJIAN, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. México: Pearson Educación. 2008. 1152 p.

LIZCANO, F; VILLAMIZAR, J. Desarrollo del proceso de reingeniería para la manufactura de la biela de un motor de dos tiempos de pequeña cilindrada de aplicación agrícola. UIS. 2015. 166 p.

MAHLE , Manual técnico MAHLE: Motores de Combustão Interna. Brasil: MAHLE. 1998. 98 p.

MERCADER, P. Elaboración de un análisis modal de fallos y efectos de un cigüeñal de fundición nodular para automoción. Cartagena: Universidad politécnica de Cartagena, 2008. 203p.

MONTOYA, V. Contribución al estudio experimental de la fricción pistón-camisa en un motor de combustión interna. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2008. 244 p.

NORTON, R. Diseño de maquinaria, síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. Cuarta edición. McGraw-Hill. 2008. 1014 p.

PAYRI, F. Motores de combustión interna alternativos. Barcelona: Ed. Reverté. 2012. 1024 p.

SÁNCHEZ, D; VELASCO, A. Reingeniería y construcción de un cigüeñal para un motor de dos tiempos mono-cilíndrico de pequeña cilindrada. UIS. 2015. 110 p.

SCHARER, U. Ingeniería de manufactura. México: CECSA. 1984. 740 p.

VAN BASSHUYSEN, Internal combustion engine handbook. Warrendale: SAE International. 2004. 812 p.

WARMUZEK, M. Aluminum-Silicon casting alloys (Atlas of Microfractographs). USA: Ed. ASM international. 2004. 321p.

SHINDAIWA. B450 desmalezadora: Manual del propietario/operador. Japón: Shindaiwa Inc. 2005. 26 p.

SHINDAIWA. Manual de servicio técnico: Podadoras, desmalezadoras y orilladoras. U.S.A.: Shindaiwa Inc., 1997. 118 p.

ANEXOS

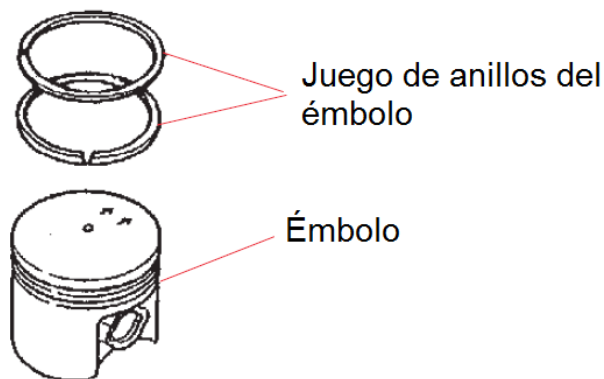
ANEXO A. Aspectos teóricos, funcionales y constitucionales del émbolo

A 1 Función del émbolo

La función del émbolo es la de transmitir la energía generada por la explosión en la cámara de combustión de la mezcla, la cual a su vez la dirige hacia el cigüeñal por medio de la biela. En este proceso el émbolo a causa del cambio de dirección en su recorrido descendente-ascendente y ascendente-descendente, comprime la mezcla y transmite la presión ejercida por la combustión.

Puede parecer, a simple vista, que el émbolo es una de los elementos más simples, pero en realidad es el que amerita más estudio dentro del funcionamiento del motor. El émbolo debe ser ligero para procurar que las cargas de inercia sean mínimas, pero a su vez debe ser rígido y resistente como para soportar el calor y la presión que se desarrolla en la cámara de combustión.

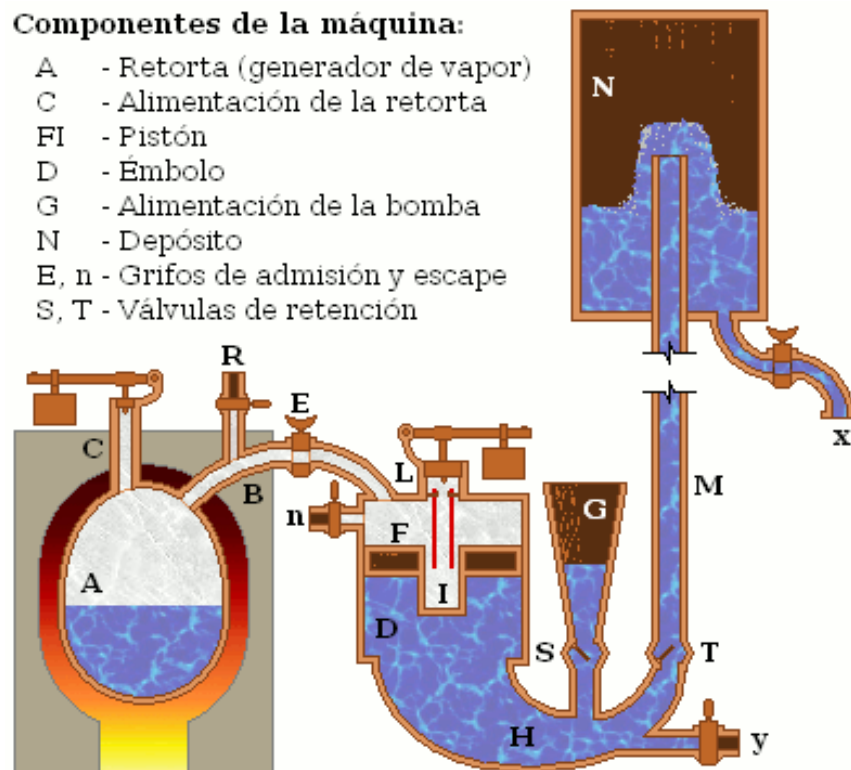
Ilustración 1. Émbolo y anillos del motor Shindaiwa S450EC1



Fuente: Shindaiwa illustrated parts list. [Online]. En: <<http://www.shindaiwa-usa.com/getattachment/f2c046fb-2b44-4e8b-ba64-da2a4085ab4a>>.

El primer motor que utilizó un émbolo para su funcionamiento fue desarrollado por el físico Denis Papin, su máquina se utilizaba para bombear agua. El motor de Papin aprovechaba el movimiento del aire y la presión del vapor. La máquina tenía un único cilindro que funcionaba también como caldera. Se colocaba una cantidad pequeña de agua en la parte inferior del cilindro que posteriormente se calentaba hasta producir vapor. La presión de vapor empujaba al émbolo que estaba acoplado al cilindro, tras lo cual se eliminaba la fuente de calor que estaba en la parte inferior. Conforme el cilindro se enfriaba, el vapor se iba condensando mientras que la presión del aire en el exterior empujaba al émbolo de nuevo hacia abajo. El mecanismo se observa en la ilustración 2.

Ilustración 2. Máquina de vapor de Papin.



Fuente: Wikipedia.org. Biografía de Dennis Papin. En:<
http://es.wikipedia.org/wiki/Denis_Papin>.

Condiciones típicas de un émbolo

Básicamente los motores de combustión interna se clasifican según su ciclo en:

- Motores de dos tiempos (2T) que efectúan una carrera útil de trabajo en cada giro
- Motores de cuatro tiempos (4T) que efectúan una carrera útil de trabajo cada dos giros.

Otra forma de clasificación es según su sistema de encendido en:

- MEP (encendido provocado por chispa)
- MEC (encendido por compresión).

Las diferencias básicas entre MEP y MEC se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 1. Diferencias entre el MEP y MEC.

	Motor de encendido provocado por chispa MEP	Motor de encendido por compresión MEC
Inventor	Otto	Rodolf Diesel
Formación de la mezcla	Durante la admisión: Entra la mezcla homogénea aire-combustible (hecha en el carburador) en el cilindro.	En el final de la compresión: Entra primero solo aire que generalmente es comprimido a 40 [kg/cm ²] hasta los 500-600[°C]
Encendido de la mezcla	Provocado por una chispa eléctrica (bujía) que provoca una explosión	Auto inflamación del combustible: provocada por inyección atomizada del combustible
Regulación de la carga	Cuantitativa (por mariposa)	Cualitativa (inyección de comb.)
Combustible	Gasolina, GLP, GN, etanol, biogás, gas pobre.	Diesel, acpm, biocombustibles
Fluido operante en el proceso de admisión	Aire + combustible	Aire
Combustión	Premezcla	Por Premezcla y muy alta por difusión

El émbolo que es objeto de investigación y desarrollo de este proyecto corresponde al de un motor de dos tiempos (2T) con sistema de encendido por chipa (MEP).

En general los émbolos tienen unas condiciones de trabajo y requerimientos básicos para que estos funcionen correctamente dentro del motor, tales requerimientos se resumen en el cuadro 2.

Cuadro 2. Condiciones de trabajo y requerimientos del émbolo.

CONDICIONES DE TRABAJO	REQUERIMIENTOS
Cargas mecánicas debido a la presión de los gases de combustión.	Elevada resistencia a cargas estáticas y dinámicas a elevadas temperaturas.
MEC: $P_{max} \approx 180$ [bar]	Pequeña deformación plástica.
Cargas debidas a la fuerza de inercia.	Mantenimiento de la dureza en elevado estado térmico.
Altas temperaturas debido a la combustión $T_{gas} \approx 1300$ [K]	Alta conductividad térmica.
Distribución de temperatura no uniforme tanto en dirección radial como axial.	Bajo coeficiente de fricción y elevada resistencia al desgaste
Condiciones críticas de fricción/lubricación en los segmentos y la falda.	Pequeña masa.
Cambio de contacto en la falda debido al movimiento pendular en el PMS. La fuerza lateral en la falda del émbolo alcanza hasta un 8% de la fuerza vertical originada por los gases y la fuerza de inercia.	Bajo coeficiente de dilatación térmica.

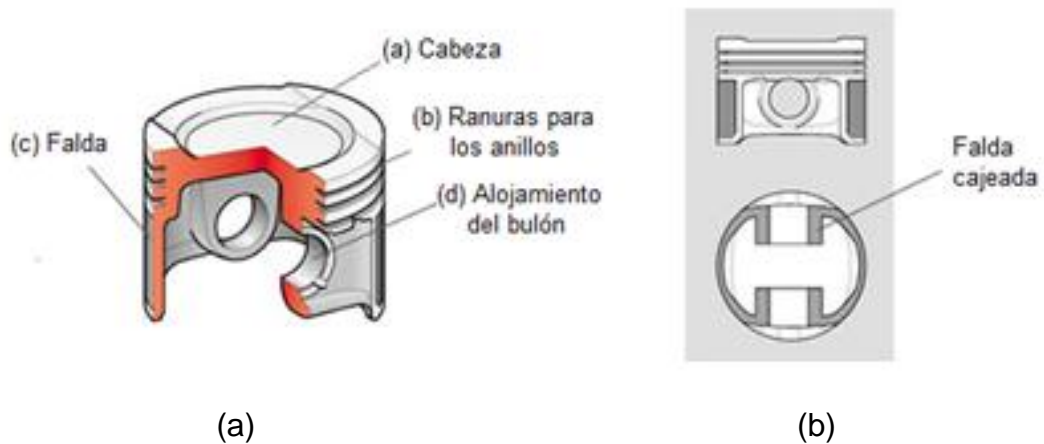
Fuente: PAYRI, F. Motores de combustión interna alternativos. Barcelona: Ed. Reverté. 2012. p. 871.

Partes fundamentales del émbolo

El émbolo es un cilindro que se fabrica completamente hueco para reducir su peso al máximo, conformado por una cabeza (a) que recibe esfuerzos de empuje provocados por la presión de los gases de la combustión. En el cilindro se mecanizan ranuras (b) que contienen aros que se encargan de hacer un cierre hermético con el cilindro con el fin de asegurar la estanqueidad de los gases y del aceite y a su vez disipar parte del calor del émbolo hacia el cilindro.

La parte inferior se llama falda (c), la cual guía al émbolo en su desplazamiento en el cilindro y va disipando el calor, en esta área se sitúa el alojamiento del bulón (d), su función básicamente es la de transmitir potencia desde la corona del émbolo hacia el brazo de la biela.

Ilustración 3. Partes fundamentales del émbolo



Fuente: a.) Elementos móviles de un motor. [Online]. En:<
<http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-elementos-moviles.htm>>. b.) PAYRI,
F. Motores de combustión interna alternativos. Barcelona: Ed. Reverté. 2012. p.
871.

Las características constitutivas del émbolo se hablaran con más detalle a continuación:

Cabeza del émbolo

La cabeza del émbolo puede adoptar diversas formas desde la más básica que es plana hasta formas más especiales que están destinadas a provocar turbulencias de gas, lo cual es típico en el comportamiento de los émbolos para motores Diesel. Otras formas complejas en la cabeza se crean para producir turbulencias en forma de deflector con el fin de conducir los gases en motores de conducción directa y de dos tiempos. Una descripción de las formas de cabeza creadas para los émbolos se muestra en las ilustraciones 4 y 5.

Ilustración 4. Formas de cabezas típicas del émbolo.



Fuente: Elementos móviles de un motor. [Online]. En:<
<http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-elementos-moviles.htm>>.

Ilustración 5. Formas particulares de la cabeza del émbolo de algunos motores.

De izquierda a derecha: émbolo de cabeza plana (Fiat 130) con concavidades laterales (para permitir montajes en ambos sentidos); émbolo con cabeza rebajada (concavo) y émbolo con cabeza inclinada y ligeramente bombeada, del Lancia Fulvia 1600 (motor en V estrecha).



De izquierda a derecha: émbolo bombeado (cabeza convexa) del Alfa Romeo 2000; émbolo preparado para el mismo auto (obsérvese el notable abombamiento y la aligeración realizada en los flancos), y émbolo preparado para el Fiat 500, dotado del deflector y de concavidades para las válvulas inclinadas y paralelas.



De izquierda a derecha: émbolo del motor Ferrari 312 B de 4 válvulas; émbolo de cabeza plana con una sola concavidad para las 4 válvulas del Lancia Stratos, y émbolo de motocicleta (Aermacchi) con resalte prismático para aumentar la relación de compresión.



Fuente: Definición de un pistón. [Online]. En:<
<http://diccionario.motorgiga.com/diccionario/piston-definicion-significado/gmx-niv15-con195150.htm>>.

Anillos del émbolo

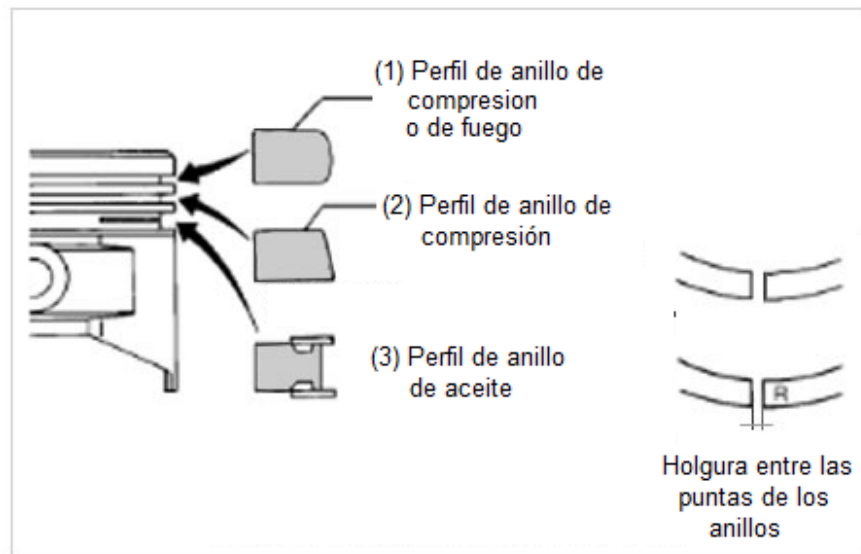
En general, los émbolos contienen tres anillos elásticos, dos de compresión, (1 y 2), donde el (1) es llamado "de fuego" porque es el primero que recibe los efectos de la explosión y el tercero (3) se conoce como anillo de aceite o de arrastre.

Estos tres anillos se instalan en las ranuras del émbolo con el fin de mantener el gas contenido dentro de los cilindros.

Los anillos de compresión tienen como función realizar un cierre hermético del cilindro, están ubicados en la parte superior del émbolo, lo que hace que estos sean los más afectados por las altas temperaturas y presiones que se originen durante el ciclo de la operación. Los émbolos de los motores de dos tiempos generalmente contienen solo estos anillos.

Los anillos de aceite están situados por debajo de los de los de compresión y tienen la función de barrer el exceso de aceite durante el descenso del émbolo por lo que también se le conocen como "rascadores", este exceso se deposita en las paredes del cilindro.


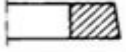
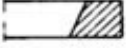
Ilustración 6. Anillos de un émbolo típico.



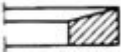
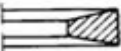

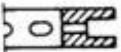

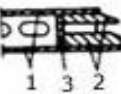
Fuente: Elementos móviles del motor. [Online]. En:<
<http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-elementos-moviles.htm>>.

Los anillos del émbolo se pueden clasificar según su forma y características, tales diferencias se normalizan alfabéticamente como se puede ver en el cuadro 3.

Cuadro 3. Clasificación de los anillos del émbolo según su forma.

Tipo de anillo	Forma	Perfil de corte	Características
A	Cilíndrico de sección rectangular		Se utiliza como segmento de fuego, al cual se le da un revestimiento de cromo con un espesor de 0,06 a 1 mm, según las características del motor. Presenta gran superficie de contacto que facilita la estanqueidad y la evacuación del calor.
B	Cónico		Se emplea como segmento de compresión y se sitúa debajo del segmento de fuego. Su forma acelera el asiento circular durante el rodaje como consecuencia de su conicidad. La cara superior debe venir marcada para no invertir su posición en el montaje ya que, en este caso, aumentaría considerablemente el paso de aceite.
C	Torsión		Este tipo de segmento conserva su forma cilíndrica en la parte exterior o superficie de asiento, pero tiene una cierta conicidad en la parte interior. A cada variación de sentido del émbolo tiende a bascular en su ranura, lo cual aumenta la estanqueidad durante la carrera de ascenso y durante el descenso hace las veces de segmento rascador.

Continuación del cuadro 3.

D	Trapezoidal lateral		Se utiliza en motores con elevada temperatura interna, como en los Diesel. La menor dimensión de la cara interna, debido a la forma trapezoidal, les permite bascular en ambos sentidos y evita que se queden clavados en la ranura por efecto de la mayor dilatación en esa zona. Se utiliza como segmento de fuego.
E	Trapezoidal bilateral		Se utiliza en motores con elevada temperatura interna, como en los Diesel. La menor dimensión de la cara interna, debido a la forma trapezoidal, les permite bascular en ambos sentidos y evita que se queden clavados en la ranura por efecto de la mayor dilatación en esa zona. Se utiliza como segmento de fuego.
F	Cilindro con expansor		Conserva las características de fundición en cuanto a la cara de deslizamiento, pero lleva sobre el fondo del alojamiento un resorte de banda de acero que le permite aumentar la presión superficial sobre el cilindro.
G	De engrase con labios rectos		Se emplean como segmentos de engrase. Tienen forma de U, con unos orificios o ranuras centrales a través de las cuales pasa el aceite al interior del pistón para su retorno al cárter. La forma de los labios puede ser recta (G) o en forma de bisel (H).
H	De engrase con labios en Bisel		
I	Aro compuesto		Se emplea también como segmento de engrase. Está formado por una arandela guía (1) a cada lado del segmento, un espaciador hueco (2) y un expansor (3) de lámina de acero.

Fuente: Elementos móviles del motor. [Online]. En:<
<http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-elementos-moviles.htm>>.

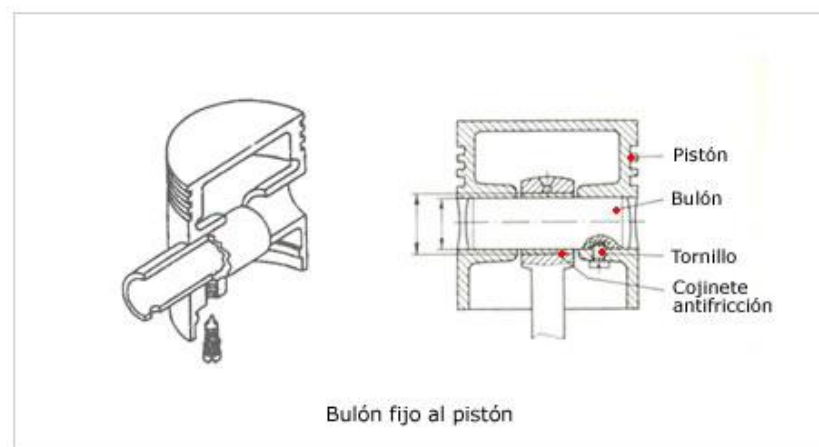
Alojamiento del bulón

El alojamiento del bulón debe ser lo más rígido posible con el fin de evitar deformaciones debido a las dilataciones térmicas y los esfuerzos, para este fin la mejor ubicación para el alojamiento del eje del bulón es el centro de gravedad del émbolo. El montaje del bulón, varía según la forma en que este se une con el émbolo y la biela, de acuerdo a lo anterior se distinguen cuatro tipos de montaje: bulón fijo al émbolo, bulón fijo a la biela, bulón flotante y bulón desplazado.

Bulón fijo al émbolo.

En este montaje como su nombre lo indica, el bulón queda fijo al émbolo por medio de un tornillo pasador o de una chaveta, con lo cual se garantiza la inmovilización del bulón mientras que la unión del bulón con la biela se hace mediante un cojinete de antifricción.

Ilustración 7. Montaje de bulón fijo al émbolo.

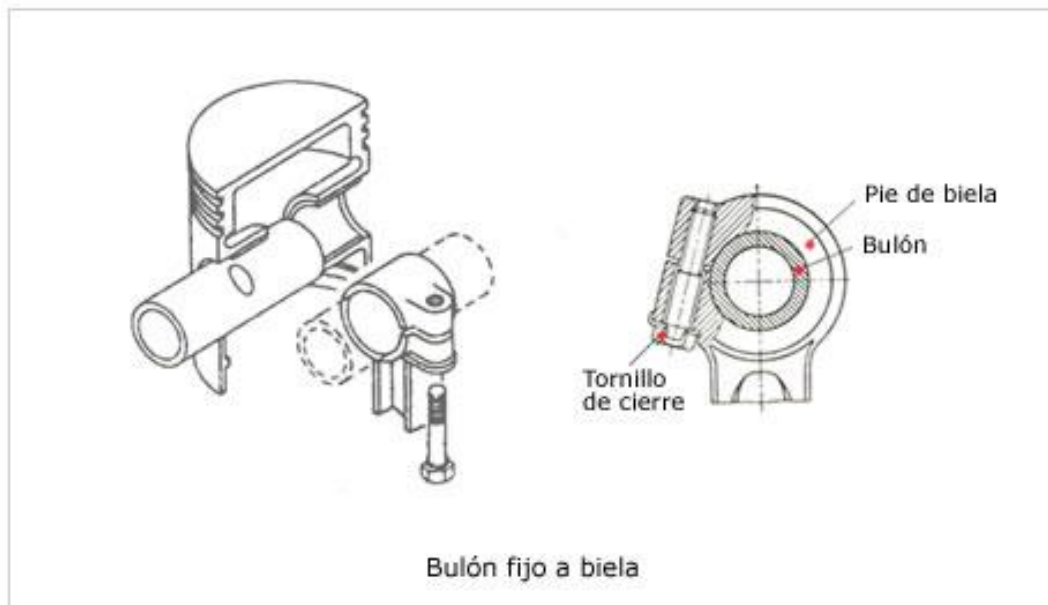


Fuente: Elementos móviles de un motor. [Online]. En:<
<http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-elementos-moviles.htm>>.

Bulón fijo a la biela.

En este tipo de montaje se fija la biela al bulón por medio de un tornillo de cierre, así el bulón gira sobre el alojamiento del émbolo.

Ilustración 8. Bulón fijo a la biela.



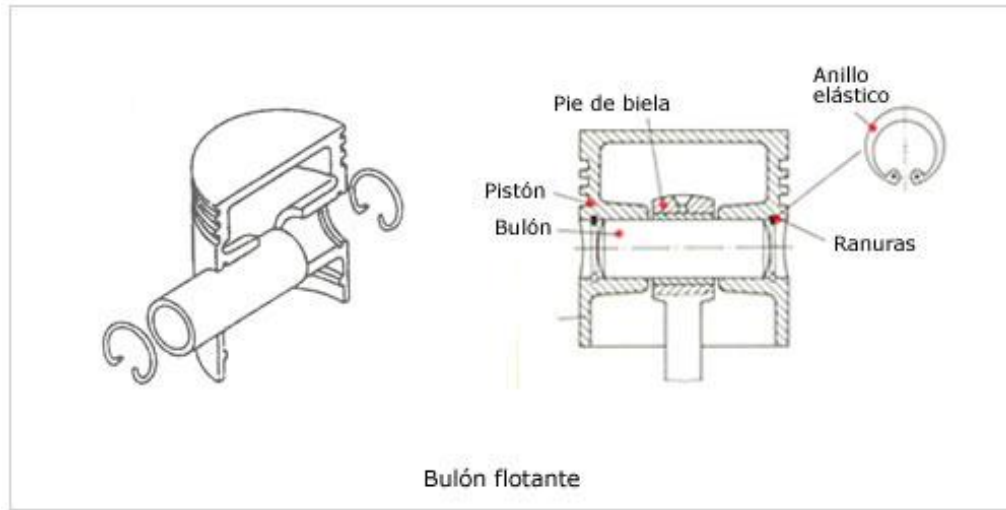
Fuente: Elementos móviles de un motor. [Online]. En:<
<http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-elementos-moviles.htm>>.

Bulón flotante

En este montaje el bulón queda libre tanto del émbolo como de la biela y es el sistema que más se emplea pues facilita el montaje y desmontaje del sistema además de repartir las cargas de rozamiento entre los elementos en contacto.

Para la unión de la biela con el émbolo se usa un cojinete antifricción, mientras que el bulón se monta en el émbolo mediante una ligera presión.

Ilustración 9. Bulón flotante



Fuente: Elementos móviles de un motor. [Online]. En:<
<http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-elementos-moviles.htm>>.

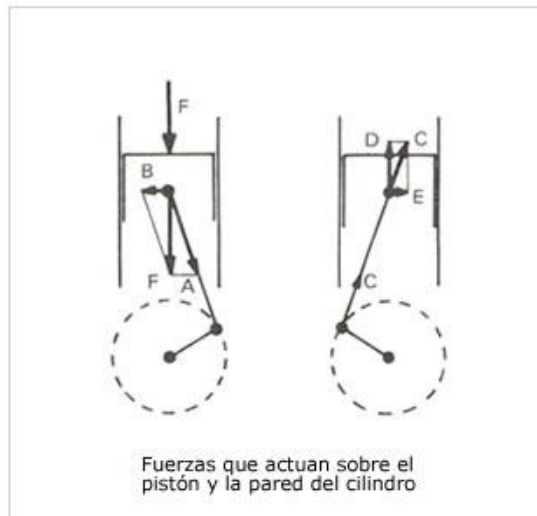
Bulón desplazado

Cuando los motores soportan grandes esfuerzos laterales usualmente se monta el bulón en el émbolo con un ligero desplazamiento hacia el lado donde hay mayor presión para mantener el equilibrio de los esfuerzos laterales y conservar el alineamiento del émbolo respecto a su desplazamiento y así reducir el desgaste en la zona del cilindro.

Entre el émbolo y el cilindro no se presenta un rozamiento regular como el que se podría desear, ocurre que durante la carrera de explosión se transmite un esfuerzo cuya fuerza F se transmite al émbolo, esta fuerza no pasa totalmente a la biela, sino que se descompone en dos esfuerzos cuya componentes de esa fuerza son A que actúa sobre la biela y B que produce que el émbolo este sometido a un empuje lateral el cual genera un fuerte rozamiento contra la pared del cilindro, provocando un desgaste en esta zona. Cuando la carrera es ascendente, la biela empuja al émbolo haciendo que este suba, este esfuerzo cuya fuerza es C se

descompone en la fuerza vertical ascendente D y en la fuerza horizontal E que el émbolo aplica contra la pared. Como se puede ver en la ilustración 10, el rozamiento es mayor cuando el émbolo desciende empujado por la explosión que cuando el émbolo asciende debido a la inercia del cigüeñal.

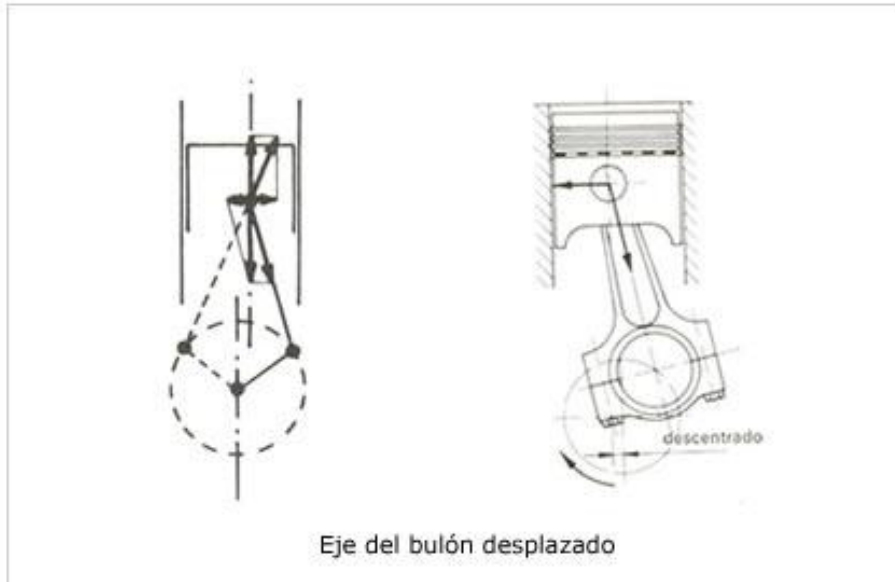
Ilustración 10. Fuerzas que actúan sobre el émbolo y la pared del cilindro.



Fuente: Elementos móviles de un motor. [Online]. En:<
<http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-elementos-moviles.htm>>.

Estos rozamientos producen un desgaste irregular en las paredes del cilindro, que normalmente se acentúa en el eje perpendicular al bulón. Para evitar esta situación se trata de igualar la presión lateral y rozamiento del émbolo, desplazando el eje del bulón, descentrándolo hacia el lado donde desciende la biela. Con el cambio anteriormente descrito se busca que las presiones que actúan sobre la cabeza del émbolo queden repartidas en forma desigual a ambos lados del eje, manteniendo el émbolo lo más alineado posible, reduciendo así, el rozamiento contra la pared izquierda, que es la que sufre mayor desgaste (ilustración 11).

Ilustración 11. Eje del bulón desplazado.



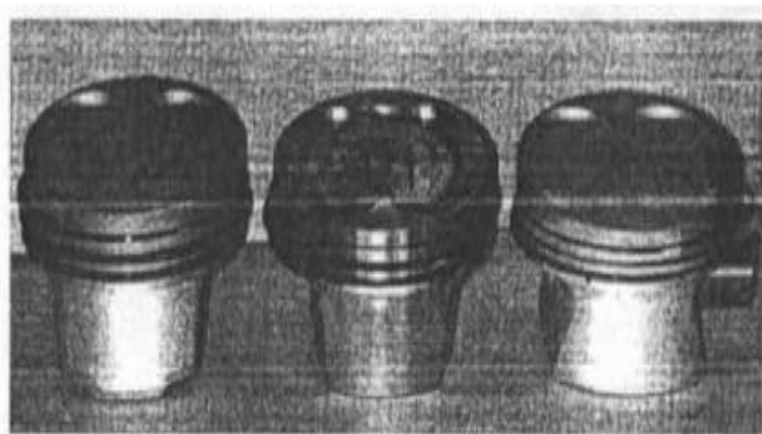
Fuente: Elementos móviles de un motor. [Online]. En:<
<http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-elementos-moviles.htm>>.

Falda

La falda guía al émbolo y reparte el esfuerzo normal debido a la oblicuidad de la biela. Con el fin de evitar que el émbolo cabecee, el juego entre la falda y el cilindro se reduce teniendo en cuenta que la falda debe tener una geometría tal que absorba las dilataciones diferenciales entre el émbolo y el cilindro.

En los motores MEC las faldas en general son completas mientras que en los motores MEP las faldas se suelen reducir eliminando peso al émbolo, sin embargo esto se hace generalmente por necesidades constructivas cuando se necesita permitir el paso de contrapesos del cigüeñal en el momento en que el émbolo este en el punto muerto inferior.

Ilustración 12. Diferentes configuraciones de falda.



MEP



MEC

Fuente: PAYRI, F. Motores de combustión interna alternativos. Barcelona: Ed. Reverté. 2012. p. 873.

Materiales constitutivos del émbolo

Los émbolos se construyen en gran variedad de materiales dependiendo del tipo de motor del cual hacen parte, generalmente los materiales más comunes que se usan para su construcción son:

Fundición de hierro

Según su elaboración los émbolos de hierro se pueden clasificar en:

- Émbolos elaborados en hierro común: Se usan en motores de combustión baja y velocidad media, posee buena elasticidad y resistencia al desgaste.
-
- Émbolos elaborados en fundición gris: Conocido como hierro colado o hierro fundido, presenta alta resistencia mecánica y gran capacidad de trabajo a

fricción, su inconveniente es el peso. Este material es normalmente utilizado en émbolos de motores pequeños.

Acero

Este material se usa en émbolos de motores de carros y aviación, en especial en la industria norteamericana, posee elevada resistencia mecánica y es muy ligero, normalmente viene acompañado de gran porcentaje de cobre.

Aluminio y sus aleaciones.

El aluminio por su alta conductividad térmica y resistencia a la corrosión se convierten en el material base de la industria de la fabricación de émbolos.

El aluminio es un metal que facilita su formado por ser bastante dúctil, su único inconveniente es que su resistencia es relativamente baja, aunque puede alearse y tratarse térmicamente para que sea competitivo con respecto a algunos aceros manteniendo aun sus características esenciales incluyendo su ligero peso.

En la actualidad las aleaciones más usadas en la fabricación de émbolos de aluminio-cobre y aluminio-silicio, siendo esta última la más dominantes en el mercado debido a sus buenas características mecánicas.

La aleación aluminio-silicio comprende la integración del silicio (que disminuye el coeficiente de dilatación y aumenta la dureza del material, aumentando con ello la resistencia al desgaste) con la adición de otros materiales como el cobre y el níquel que aumentan su resistencia térmica y por tanto su estabilidad dimensional.

Para motores MEP esta combinación generalmente se genera dentro del valor porcentual que se muestra en la cuadro 4.

La razón fundamental para alear al aluminio puro con otros elementos es lograr un material resultante con características mejoradas en resistencia, dureza y fluencia, entre otros. Para aplicaciones prácticas las aleaciones de aluminio se han dividido principalmente en dos categorías: aleaciones de aluminio para moldeo (casting compositions) y aleaciones de aluminio para conformado (wrought compositions).

Cuadro 4. Aleaciones combinadas en émbolos de aluminio para motores MEP.

Material	Porcentaje %
Silicio	11-19
Cobre	0,8-4
Magnesio	0,8-1,2
Níquel	0,8-3
Hierro	≤0,7

Fuente: PAYRI, F. Motores de combustión interna alternativos. Barcelona: Ed. Reverté. 2012. p. 873.

A su vez estas se clasifican en tratables térmicamente y no tratables térmicamente.

Series de aleaciones para conformado (wrought compositions)

Para las aleaciones de aluminio para conformado, se utilizan una designación numérica de cuatro dígitos (cuadro 5), esta designación es utilizada por la Asociación de Aluminio estadounidense (The Aluminum Association) de acuerdo con la norma H35.1 de la American National Standard Institute (ANSI) emitidas también por Estados Unidos.

Cuadro 5. Series de aleaciones para conformado

Serie	Aleante(s) principal(es)	Termotratables
1xxx	Aluminio puro (99% o más)	No
2xxx	Cu	Si
3xxx	Mn	No
4xxx	Si	No
5xxx	Mg	No
6xxx	Si. Mg	Si
7xxx	Zn	Si
8xxx	Otros	

Fuente: DAVIS, J. Aluminum and Aluminum Alloys. Michigan: ASM International. p.59.

Series 1xxx: Esta serie es prácticamente pura en su contenido de aluminio (99,00% o más), tiene muchas aplicaciones en la industria eléctrica y química. Esta serie de aleación se caracteriza por su excelente resistencia a la corrosión, alta conductividad tanto térmica como eléctrica, aunque tiene bajas propiedades mecánicas.

Serie 2xxx: En esta serie el principal elemento de aleación es el cobre, generalmente se le adiciona magnesio en menor medida. Estas aleaciones requieren un tratamiento térmico para optimizar sus propiedades. Algunas aleaciones que pertenecen a esta serie presentan condiciones similares e incluso superiores a los aceros de bajo carbono y se usa ampliamente en la industria aeroespacial. En casos particulares se emplea el tratamiento térmico de precipitación (envejecimiento) para aumentar sus propiedades mecánicas. Tal tratamiento aumenta la tensión de fluencia. Las aleaciones de esta serie no tienen buena resistencia a la corrosión.

Serie 3xxx. En esta serie el principal elemento de aleación es el manganeso. Generalmente estas aleaciones no son tratables térmicamente, pero tienen hasta un 20% más de resistencia que las aleaciones de la serie 1xxx. Se utiliza como aleación de propósitos generales en aplicaciones arquitectónicas.

Serie 4xxx. El principal elemento de esta aleación es el silicio, que puede ser añadido en cantidades no superiores al 12 % con lo que se reduce su rango de fusión sin producir fragilidad. Por esta razón, las aleaciones de aluminio-silicio se utilizan en alambres de soldadura. La mayoría de estas aleaciones no son tratables térmicamente.

Serie 5xxx. El principal elemento de aleación es el magnesio. Cuando se utiliza manganeso como aleación secundaria, da como resultado un endurecimiento que aumenta la resistencia de la aleación. Estas aleaciones poseen buenas características de soldadura y buena resistencia a la corrosión cuando está en contacto en ambientes marinos, por lo que es muy utilizado en los cascos de embarcaciones navieras.

Serie 6xxx. Las aleaciones de esta serie contienen silicio y magnesio en proporciones adecuadas para que se forme siliciuro de magnesio (Mg_2Si). Bajo estas condiciones esta aleación es tratable térmicamente. Esta serie tiene buena soldabilidad, maquinabilidad y resistencia a la corrosión, aunque no posee la misma resistencia que el resto de aleaciones, en especial comparándola con las series 2xxx y 7xxx. Esta aleación se usa ampliamente en aplicaciones arquitectónicas.

Serie 7xxx. El principal elemento de esta aleación es el zinc, en cantidades que oscilan de 1 al 8%, cuando se combina con magnesio en un menor porcentaje, la aleación resulta tratable térmicamente bajo niveles de moderada a alta resistencia. Generalmente se añaden otros elementos como cobre, cromo y pequeñas

cantidades de escandio (Sc) para mejorar sus propiedades. Las aleaciones de la serie 7xxx se utilizan en estructuras de fuselajes, equipos celulares y piezas sujetas a altas tensiones. Esta serie es utilizada en componentes estructurales aeroespaciales y en otras aplicaciones donde se necesitan materiales de alta resistencia.

Serie 8xxx: Esta serie la conforman aleaciones con una amplia gama de composiciones químicas. Para mejorar el rendimiento de la aleación bajo altas temperaturas se usa la aleación Al-Fe-Ce (por ejemplo, la 8019) o aleaciones Al-Fe-Si (por ejemplo, 8009, fabricadas por pulvimetalurgia²²). Si se quiere lograr una baja densidad y una alta rigidez se utilizan aleaciones de esta serie que contengan litio (por ejemplo, 8090); con ello, se logra un mejor endurecimiento por precipitación, logrando que esta aleación puedan reemplazar las series 2xxx o 7xxx en aplicaciones aeroespaciales.

Serie 9xxx: Esta serie está reservada para aleaciones futuras de conformado (serie no utilizada).

Series de aleaciones de aluminio para moldeo (casting compositions)

Las aleaciones de aluminio para moldeo (fundición) tienen los mismos sistemas de aleación de aluminio para conformado y generalmente se refuerzan por los mismos mecanismos (con la excepción del endurecimiento por deformación).

Las aleaciones para moldeo también se codifican de acuerdo con la norma H35.1 de la ANSI y se utiliza una designación numérica de cuatro dígitos, separados por un punto entre el tercer y cuarto dígito (cuadro 6). La principal diferencia con respecto a la aleación para conformado es que estas contienen agregados de

²² La pulvimetalurgia también conocida como metalurgia de polvos es un proceso de fabricación en base a polvos finos que se compactan para calentarse bajo un entorno controlado para la obtención de una pieza.

silicio muy por encima de las cantidades utilizadas en la mayoría de las aleaciones de conformado.

Cuadro 6. Series de aleaciones para moldeo

Serie	Aleante(s) principal(es)	Termotratables
1xx.x	Aluminio puro (99% o más)	No
2xx.x	Cu	Si
3xx.x	Si, Cu, Mg	La mayoría
4xx.x	Si	Solo algunas
5xx.x	Mg	No
6xx.x	No usada	-
7xx.x	Zn	Si
8xx.x	Sn	Si

Fuente: DAVIS, J. Aluminum and Aluminum Alloys. Michigan: ASM International.
p.88.

Serie 1xx.x: Básicamente es una fundición de aluminio puro (99.0 de pureza). Esta serie posee excelente ductibilidad y resistencia a la corrosión, su resistencia eléctrica en cambio es bastante pobre. Esta fundición generalmente se emplea para la elaboración de piezas moldeadas en arena y coquillas, también se usa en inyección aunque esto ocurre en raras ocasiones. Es ampliamente utilizada en la industria química y eléctrica que usan elementos que no necesitan grandes propiedades mecánicas. Se usa en la fabricación de rotores de motores asíncronos de baja resistencia.

Serie 2xx.x: Es un aluminio aleado con cobre. Sus características mecánicas son más elevadas que la de los demás aluminios para moldeo, entre ellas se destaca su resistencia a la tracción, límite elástico, alargamiento, tenacidad y resistencia al desgaste, especialmente cuando está sometida a altas temperaturas.

Serie 3xx.x: Aluminio aleado principalmente con silicio y con adiciones secundarias de cobre y/o magnesio. Las aleaciones de esta serie tienen una amplia gama de aplicaciones puesto que sus características mecánicas son mejores que otras series de aleaciones para moldeo, sobre todo en altas temperaturas. La serie 3xx.x comprende casi el 90% de todas las piezas de fundición producidas.

Serie 4xx.x: Esta fundición de aluminio esta aleada principalmente con silicio al 12% (punto eutéctico), porcentaje que le confiere gran fluidez al material, estas características permiten el diseño y la conformación de piezas complejas que se pueden realizar con cambios importantes en su espesor. Las aleaciones de esta serie se caracterizan por su buena soldabilidad y ductibilidad.

Serie 5xx.x: Esta fundición de aluminio esta aleada principalmente con magnesio, la cual le proporciona una gran resistencia a la corrosión, incluso en contacto con agua de mar y entornos salinos. Esta serie se caracteriza por su buena maquinabilidad y se facilita su pulido. Por sus características se usa ampliamente en la industria naval y química. En general las aleaciones de esta serie resultan de difícil moldeo.

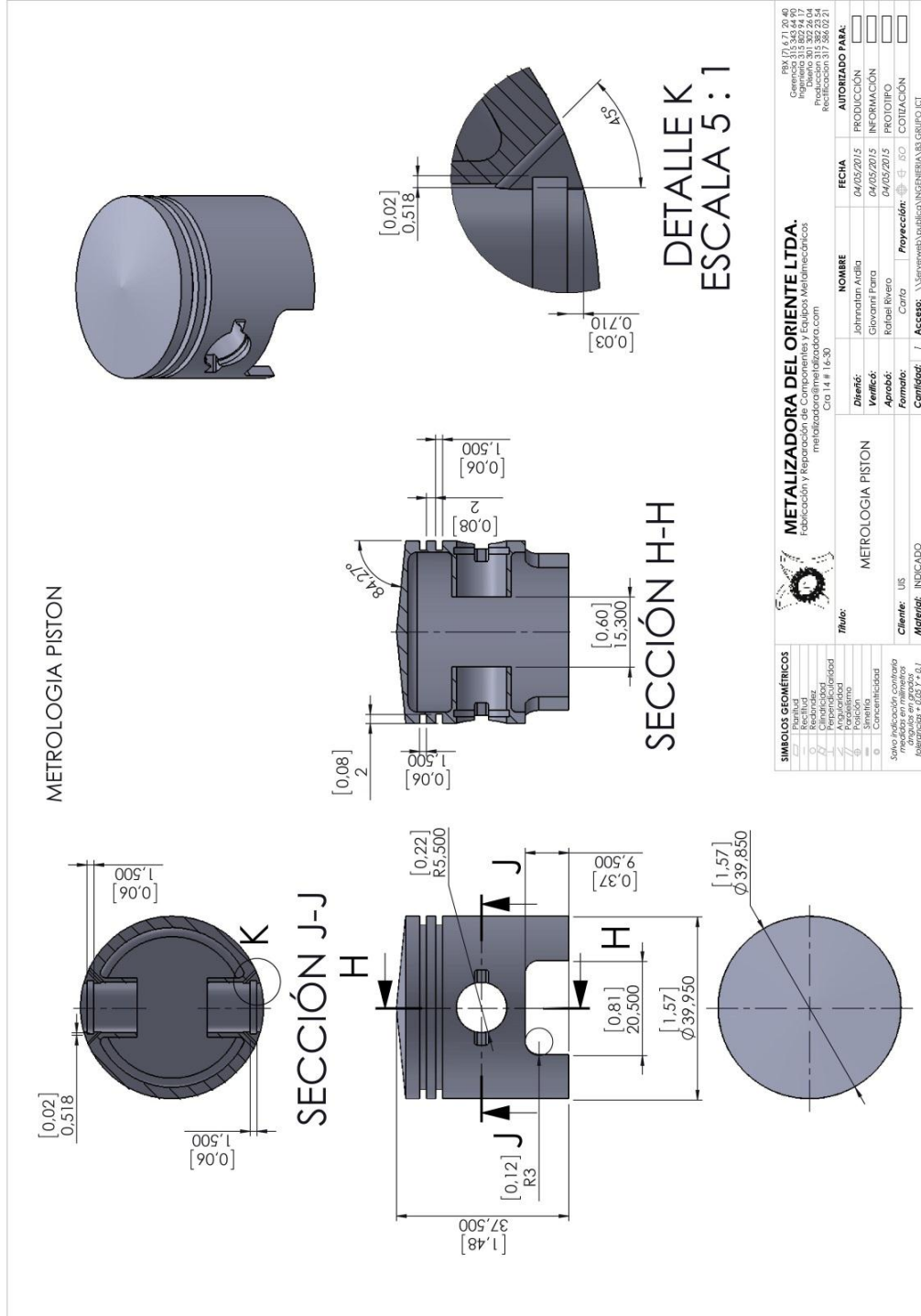
Serie 6xx.x: Esta serie no se usa.

Serie 7xx.x: En esta fundición de aluminio su aleación principal es el zinc, sumado a aleaciones secundarias de cobre y magnesio. Esta serie se caracteriza principalmente por su capacidad de auto-templarse sin necesidad de solubilización, seguido de una maduración natural que dura semanas o de una maduración artificial que se da en horas, lo anterior facilita que en base a esta aleación se fabriquen piezas grandes que posean buenas características mecánicas como tenacidad, maquinabilidad, estabilidad y resistencia a la corrosión.

Serie 8xx.x: En esta fundición de aluminio su aleación principal es el estaño.

Serie 9xx.x: Serie para usos futuros.

ANEXO B. Plano del dimensionamiento del émbolo



ANEXO C. Propiedades químicas de las aleaciones recomendadas para la fabricación del émbolo por fundición

Cuadro 7. Composición química de las aleaciones recomendadas para la fabricación del émbolo

Designación de la aleación según la Asociación de Aluminio	Proceso de fundición recomendado	Composición química en porcentaje en peso									
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Sn	Ti
Aleaciones estándar de uso general (Standard general-purpose alloys)											
B390.0	D, S, P ^(a)	16.0-18.0	1.3	4.0-5.0	0.5	0.45-0.65	---	0.1	1.5	---	0.2
413.0	D	11.0-13.0	2.0	1.0	0.35	0.1	---	0.5	0.5	0.15	---
Aleaciones para émbolos y otros propósitos de elevada temperatura (Piston and elevated-temperature alloy)											
222.0	S,P	2.0	1.5	9.2-10.7	0.5	0.15-0.35	---	0.5	0.8	---	0.25
242.0	S,P	0.7	1.0	3.5-4.5	0.35	1.2-1.8	0.25	1.7-2.3	0.35	---	0.25
243.0	S	0.35	0.4	3.5-4.5	0.15-0.45	1.8-2.3	0.2-0.4	1.9-2.3	0.05	---	0.06-0.2
328.0	S	7.5-8.5	1.0	1.0-2.0	0.2-0.6	0.2-0.6	0.35	0.25	1.5	---	0.25
332.0	P	8.5-10.5	1.2	2.0-4.0	0.5	0.5-1.5	---	0.5	1.0	---	0.25
336.0	P	11.0-13.0	1.2	0.5-1.5	0.35	0.7-1.3	---	2.0-3.0	0.35	---	0.25
360.0	D	9.0-10	2.0	0.6	0.35	0.4-0.6	---	0.5	0.5	0.15	---
A360.0	D	9.0-10	1.3	0.6	0.35	0.4-0.6	---	0.5	0.5	0.15	---
364.0	D	7.5-9.5	1.5	0.2	0.1	0.2-0.4	0.25-0.5	0.15	0.15	0.15	---
380.0	D	7.5-9.5	2.0	3.0-4.0	0.5	0.1	---	0.5	3.0	0.35	---
A380.0	D	7.5-9.5	1.3	3.0-4.0	0.5	0.1	---	0.5	3.0	0.35	---
384.0	D	10.5-12.0	1.3	3.0-4.5	0.5	0.1	---	0.5	3.0	0.35	---
390.0	D	16.0-18.0	1.3	4.0-5.0	0.1	0.45-0.65	---	---	0.1	---	0.2

Aleación encontrada en el émbolo en estudio
 Aleación mas recomendada para la fabricación de émbolo según ASM
P: Colada en coquilla (Permanent mold casting)
S: Fundición en molde de arena (Sand casting)
D: Moldeo a presión en matriz (Die casting)
(a): Para esta aleación es recomendado el moldeo a presión en matriz, sin embargo se adapta bien a los otros métodos de fundición.

Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international. 1990. p.80, 81, 82, 85, 86, 91, 93, 94, 95, 96.

Cada uno de los elementos que los conforman tienen un propósito específico cuando se alean con la matriz del aluminio, como se muestra a continuación:

Silicio (Silicon -Si): El efecto más sobresaliente que tiene el silicio sobre las aleaciones de aluminio es que mejora las características de su fundición. Cada adición de silicio mejora drásticamente la fluidez y la resistencia al desgarro cuando la aleación está en caliente. Gracias al silicio se hace posible que la industria de la fundición y del conformado se maneje a un nivel comercial, pues permite su producción en grandes volúmenes. Los agregados de silicio permiten que se puedan producir piezas de diseños complejos, de gran superficie y calidad. Esto se debe a que el silicio permite que las aleaciones moldeadas por fundición aumenten su fluidez, reduciendo así la formación de grietas.

Por todo lo anterior muchas de las aleaciones que se usan para los procesos de moldeo utilizan el silicio como una de sus composiciones principales. Las aleaciones comerciales que contienen el silicio como aleante principal abarcan en su comportamiento de hipoeutético a hipereutético rangos aproximados de 30% de Si. El aumento de contenido de silicio en la aleación, mejora la fluidez en el proceso de llenado de paredes delgadas, muy útil para la fabricación del émbolo, pues su diseño y detalles dimensionales requieren esta característica.

- **Hierro (Iron - Fe):** El hierro mejora la resistencia al desgarro en caliente durante el proceso de fundición o de conformado, también disminuye la tendencia que puede tener el fundido a adherirse a la matriz o coquilla según sea el caso. Aunque los incrementos en el contenido de hierro producen una disminución sustancial de la ductilidad de la aleación.

- **Cobre (Copper - Cu):** El cobre mejora sustancialmente la resistencia y dureza de la aleación en los procesos de fundición o de conformado y posteriores tratamientos térmicos. Si las aleaciones contienen composiciones de cobre dentro de un rango de 4 al 5.5% responden más eficientemente a los tratamientos

térmicos y por tanto logran propiedades mejoradas. El cobre generalmente reduce la resistencia a la corrosión, es por eso que se recomienda tener concentraciones bajas de cobre en las aleaciones de aluminio.

- Manganeseo (Manganese - Mn): Dentro de los procesos de fundición se le considera una impureza en la aleación, por eso se debe controlar que la aleación tenga los niveles de manganeseo más bajos posibles. Como el manganeseo es un elemento importante en aleaciones forjadas, es probable encontrar altos niveles de manganeseo si la fundición resulta ser una operación secundaria, lo cual no sería la situación más ideal, ante la falta de endurecimiento o deformación que proporciona el elemento en la aleación. En el proceso de forja las adiciones de manganeseo o cromo permiten la formación de precipitados que retardan crecimiento granular durante el recalentamiento de la aleación.
- Magnesio (Magnesium - Mg): El magnesio es de suma importancia para que la aleación aluminio-silicio desarrolle fuerza y dureza durante los tratamientos térmicos. Dentro de las composiciones de la aleación de aluminio-silicio se especifican valores de magnesio dentro de un rango de 0.4 a 0.7% para que esta tenga de alta resistencia.
- Cromo (Chromium- Cr): El cromo mejora la resistencia a la corrosión en ciertas aleaciones, pero en particular para las aleaciones para fabricación de émbolos prácticamente no se usan como se puede ver en la tabla 26 y en la tabla 35, la razón es que generalmente produce inestabilidades térmicas y si a la aleación se le hace tratamiento térmico solo puede ser por envejecimiento a temperatura ambiente. Normalmente las aleaciones que contiene cromo se encuentran a veces en los procesos de fundición a presión en matriz y raras veces cuando la fundición es por gravedad o de forja.

- Níquel (Nickel- Ni): El níquel se emplea generalmente junto al cobre para mejorar las propiedades de la aleación cuando se somete a elevadas temperaturas, pues reduce el coeficiente de expansión térmica. En las aleaciones para émbolos el valor de Níquel tiende a ser del 0.5%.
- Cinc (Zinc - Zn): El zinc no ofrece beneficios significativos en los procesos de fundición o de conformado de las aleaciones de aluminio, sin embargo acompañado por la adición de otros elementos como el cobre y/o el magnesio, proporcionan a la aleación buenos resultados durante el tratamiento térmico.
- Estaño (Tin - Sn): La adición del estaño resulta eficaz en la mejora de las características antifricción de la aleación, por tanto es muy útil en la fabricación de émbolos. Las adiciones de estaño también mejoran la maquinabilidad de la aleación.

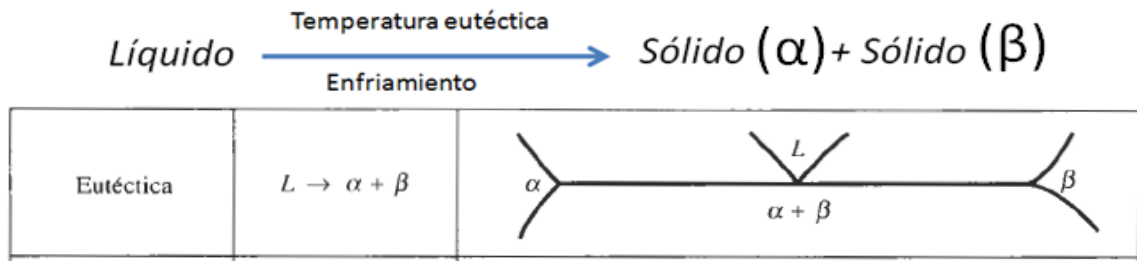
ANEXO D. Diagramas de fases características de la aleación AL-SI

Dependiendo el tipo de aleante principal que acompaña al aluminio, se tiene un diagrama de fase característico de la aleación (véase ilustración 18), que describe el comportamiento de la aleación según su temperatura y porcentaje del aleante secundario. El diagrama de fase de la aleación de Silicio y Aluminio describe un sistema eutéctico simple y es la base para las aleaciones 3xx.x. Una de sus características principales es que en la solución sólida de dos fases, los elementos en estado sólido forman una aleación cuyos elementos se distribuyen de manera uniforme en la masa sólida ($\alpha + \beta$). La presencia de estas dos fases sólidas, alfa (α) y beta (β) describen la solubilidad que está limitada por la concentración máxima de átomos del soluto en el solvente, la fase α representa una solución sólida de silicio en aluminio en el lado izquierdo de los diagrama y la fase β representa una solución sólida de aluminio en silicio en el lado derecho de los diagramas (figura 38).

La aleación del émbolo en estudio no es una aleación binaria pura, pero los dos componentes mayoritarios conforman el 89.384% del material (aluminio con 77.139% y silicio con 17.245%) por lo que es un referente apropiado para el análisis metalográfico. El punto de intersección de las líneas liquidus se denomina punto eutéctico, la temperatura en dicho punto (577°C) se denomina temperatura de solidificación y en este punto la aleación obviamente es eutéctica y corresponde a 12.6% de Silicio y 87.4% de aluminio (figura 39). Cuando el líquido de esta composición se enfría lentamente hasta la temperatura eutéctica, la fase líquida se transforma casi instantáneamente en dos fases sólidas aleadas, es el punto en el que el silicio es plena y exactamente soluble en el aluminio, tal transformación se da por la reacción eutéctica descrita en la ilustración 13.

La aleación Al-Si eutéctica tiene una microestructura en fase sólida basada en una matriz de Aluminio aleada con Silicio en forma de aguja distribuidas aleatoriamente como se ve en las ilustraciones 14 y 15.

Ilustración 13. Reacción y diagrama de fases binarias eutécticas



Fuente: GROOVER, M. Fundamentos de manufactura moderna. México: McGraw-Hill. 2007. p. 258.

Ilustración 14. Diagrama de fase de la aleación aluminio-silicio eutéctica.

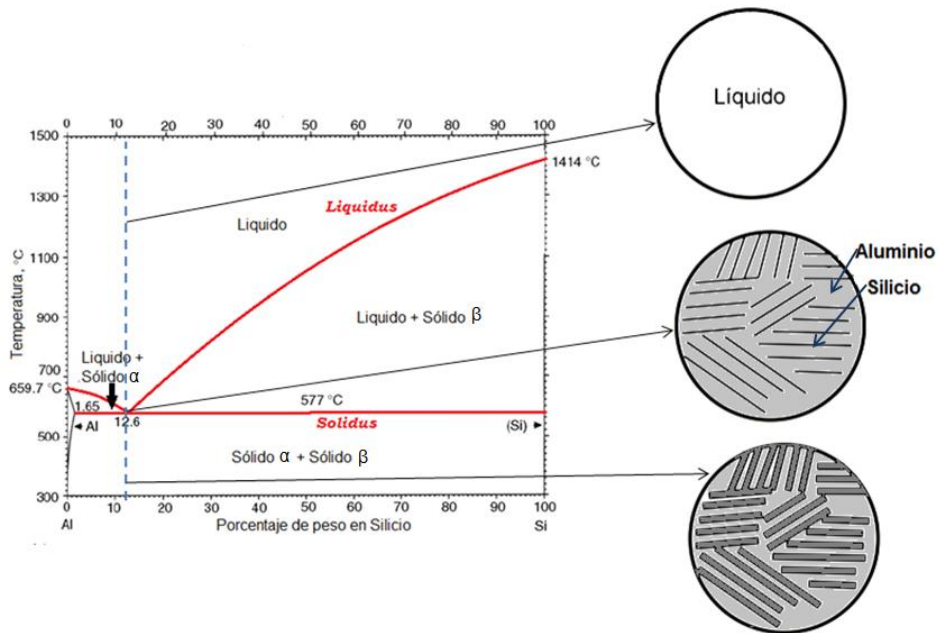
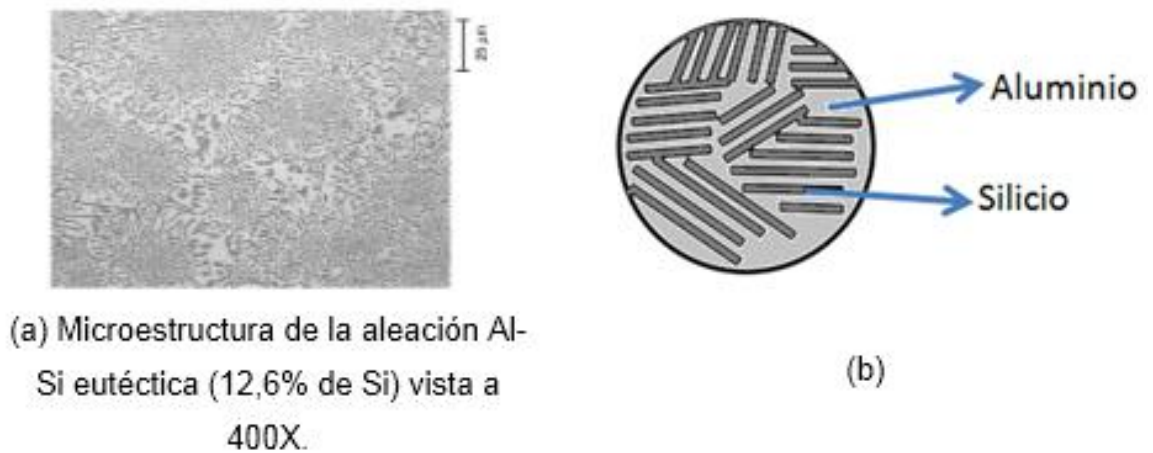
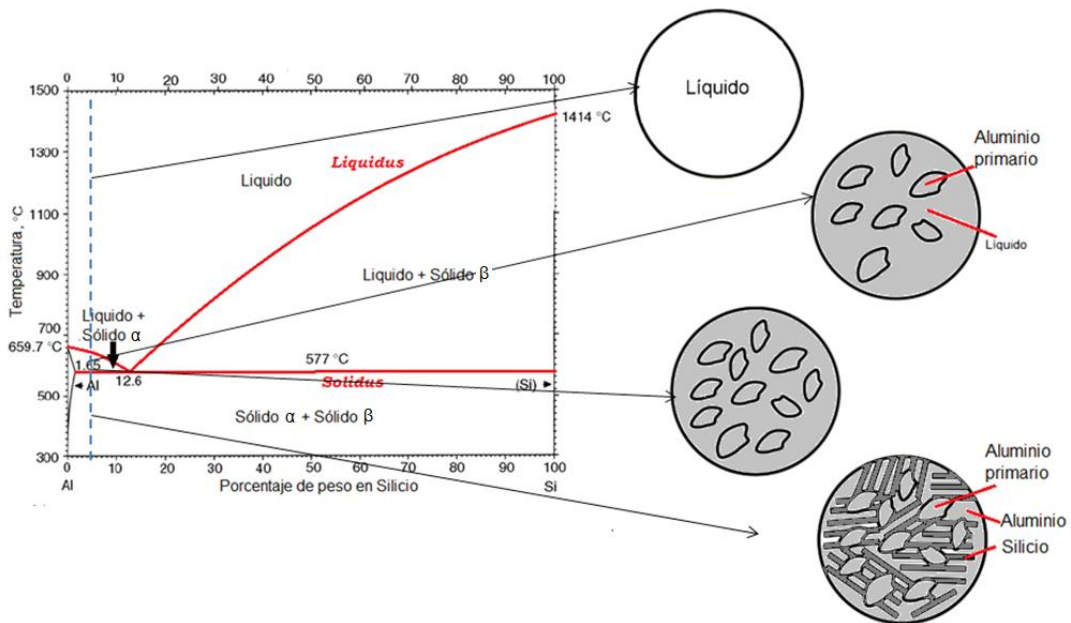


Ilustración 15. Microestructura de la aleación Al-Si eutéctica



Fuentes: a.) WARMUZEK, M. Aluminum-Silicon casting alloys (Atlas of Microfractographs). USA: Ed. ASM international. 2004. p.2; b.) Autores

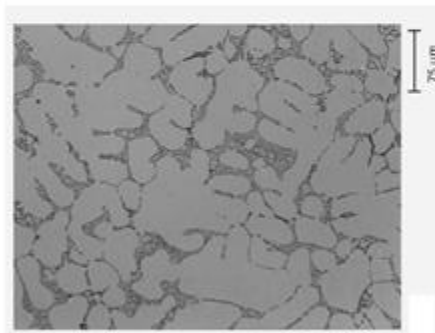
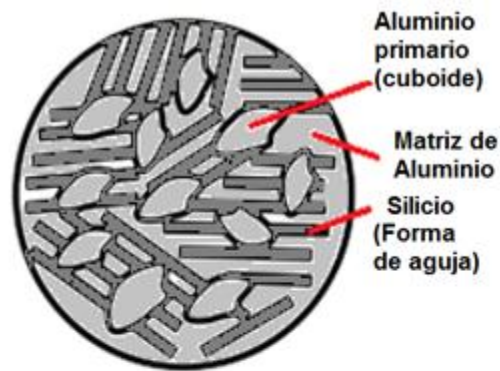
Ilustración 16. Diagrama de fases de aleación Al-Si hipoeutécticas



Las aleaciones con contenidos de 1.65 a 12.6% en peso de Si se denominan "hipoeutécticas" (ilustración 16), también se enfría lentamente hasta la

temperatura eutéctica pero su paso a fase solida aleada no es instantáneo sino progresivo teniendo como resultado una microestructura compuesta por una matriz de aluminio aleada con cuboides de aluminio y Silicio en forma de aguja como se puede observar en la ilustración 17.

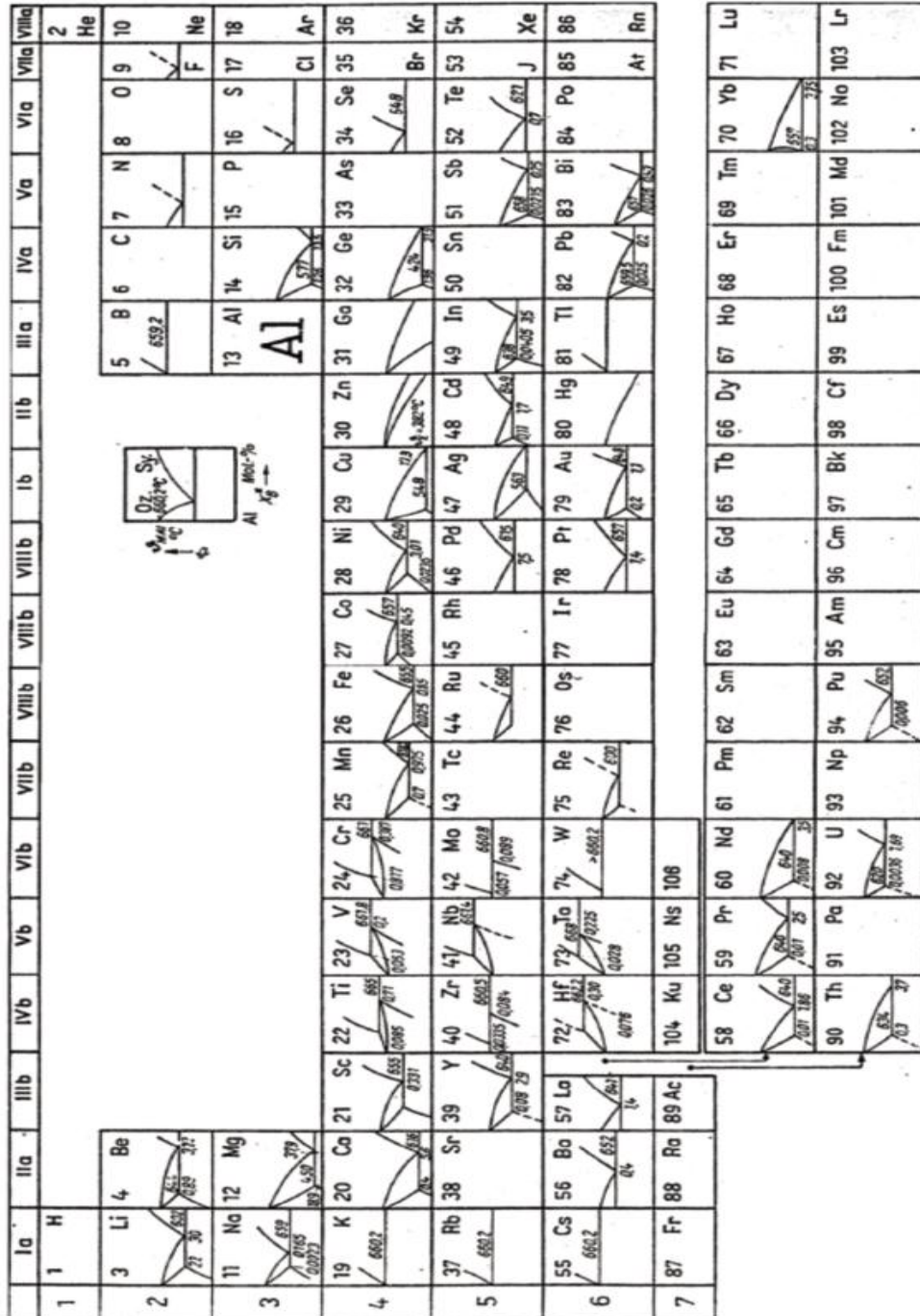
Ilustración 17. Microestructura de la aleación Al-Si hipoeutécticas



a.) Microestructura de la aleación Al-Si hipoeutécticas (1,65 a 12,6% en peso de Si) vista a 150X.

Fuentes: WARMUZEK, M. Aluminum-Silicon casting alloys (Atlas of Microfractographs). USA: Ed. ASM international. 2004. p.2.

Ilustración 18. Descripción grafica de los diversos diagramas de fases del aluminio según el elemento con que se vaya a alear.

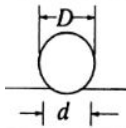
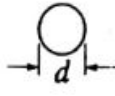
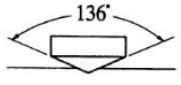

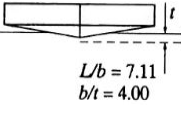
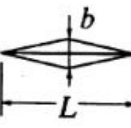
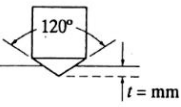

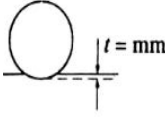



Fuente: DJURDJEVIC, M. Description of hypoeutectic Al-Si-Cu alloys based on their known chemical compositions. Revista de metalúrgica. 2013. p.3.

ANEXO E. Teoría de ensayo de dureza

En el campo de la metalúrgica, la dureza es básicamente la resistencia que opone un material a la penetración de otro que debe ser más duro que él. Entre mayor sea la penetración, se deduce que más blando es el material. Los valores de dureza obtenidos dependen del tipo de ensayo que se efectuó, así que podemos obtener tantas durezas como tipos de ensayos realizados (cuadro 8).

Cuadro 8. Características generales de los métodos de ensayo de dureza.

Ensayo	Indentador	Forma de la indentación		Carga (P)	Numero de dureza
		Vista lateral	Vista superior		
Brinell	Bola de acero de 10 milímetros de carburo de tungsteno			500 Kg 1500 Kg 3000 Kg	$HB = \frac{2P}{(\pi D) (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pirámide de diamante			1 a 120 kg	$HV = \frac{1.854P}{d^2}$
Knoop	Pirámide de diamante			25 g a 5 kg	$HK = \frac{14.2P}{L^2}$
Rockwell (A, C, D)	Cono de diamante			60 kg (A) 150 kg (C) 100 kg (D)	$\left. \begin{matrix} HRA \\ HRC \\ HRD \end{matrix} \right\} = 100 - 500t$
Rockwell (B, F, G)	Bola de acero de 1/16" de diámetro			100 kg (B) 60 kg (F) 150 kg (G)	$\left. \begin{matrix} HRB \\ HRF \\ HRG \end{matrix} \right\} = 130 - 500t$
Rockwell (E)	Bola de acero de 1/8" de diámetro			100 kg (E)	$HRE = 130 - 500t$

Fuente: KALPAKJIAN, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. México: Pearson Educación. 2002. p.69.

Teoría de la dureza Rockwell (HR)

El ensayo comienza cuando el penetrador se fuerza sobre la superficie por acción de una carga previa que llamaremos P_0 , esta carga se mantiene durante todo el proceso del ensayo para evitar errores de los resultados que se pueden producir por las vibraciones o las irregularidades de la superficie de la muestra.

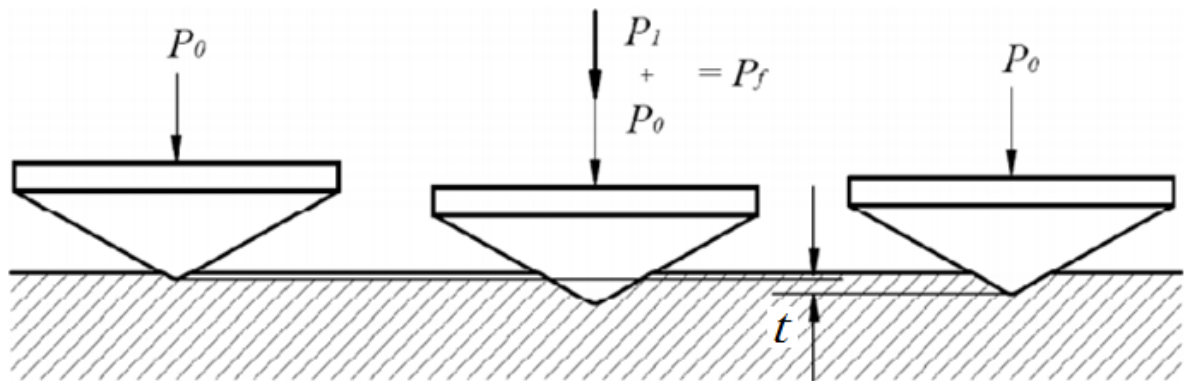
Posteriormente se le agrega al penetrador una carga adicional P_1 , de modo que la muestra es penetrada bajo la acción de una carga total P_t , entonces:

$$P_t = P_0 + P_1$$

Una vez se le retira al penetrador la carga adicional P_1 , tanto el penetrador como la muestra se recuperan elásticamente ya que la superficie de la muestra solo está bajo la acción de su carga preliminar P_0 , ahora se determina el número de dureza Rockwell midiendo la profundidad de penetración "t" producto de todo el proceso de ensayo.

Tal proceso esta estandarizado mediante las normas ASTM E18-03 y se describe en la ilustración 19.

Ilustración 19. Descripción de la medición de la dureza Rockwell.



Fuente: CALLE TRUJILLO, Gabriel. Laboratorio de resistencia de materiales. [Online]. En: <<http://www.utp.edu.co/~gcalles/DUREZAROCKWELL.pdf>>.

El número de dureza Rockwell depende del tipo de penetrador que se usa para el ensayo.

- Para el ensayo con el cono de diamante como penetrador:

$$HR = 100 - 500t$$

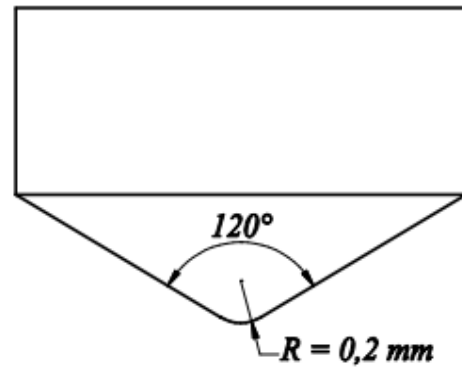
- Para el ensayo con esferas de acero como penetrador:

$$HR = 130 - 500t$$

Para uso práctico no se usan estas fórmulas, ya que las máquinas que realizan dichos ensayos, dan los resultados del número de dureza Rockwell de manera directa.

Los penetradores esféricos que se usan en este tipo de ensayo tienen diámetros de 1/16, 1/8, 1/4 y 1/2 pulgadas. Los penetradores cónicos esferoidales para el ensayo de dureza Rockwell tienen características geométricas específicas que se muestran con detalle en la ilustración 20.

Ilustración 20. Penetrador cónico esferoidal de Rockwell.



Fuente: CALLE TRUJILLO, Gabriel. Laboratorio de resistencia de materiales. [Online]. En: <<http://www.utp.edu.co/~gcalle/DUREZAROCKWELL.pdf>>.

Cuadro 9. Aplicaciones típicas de escalas regulares de dureza Rockwell

Escala ^(a)	Aplicaciones típicas
B	Aleaciones de cobre, aceros suaves, aleaciones de aluminio, hierro maleable
C	Acero, hierros duros para fundición, hierro maleable perlítico, titanio, acero endurecido, y otros materiales con durezas mayores a 100 HRB
A	Carburos cementados, acero fino y acero endurecidos superficialmente
D	Acero fino, acero medio endurecido, hierro perlítico maleable
E	Hierro fundido, aleaciones de magnesio
F	Aleaciones de cobre recocido, chapas blandas y delgadas
G	Bronce fosforado, cobre con berilio, hierros maleables.
H	Aluminio, zinc, plomo
K, L, M, P, R, S, V	Metales y otros materiales muy blandos o delgados.
<p>(a) La escala N de dureza Rockwell se utilizan para materiales similares a los analizados en las escalas Rockwell C, A, y D, pero con muestras de calibres más delgado. La escalas T de dureza Rockwell se utilizan para materiales similares a los analizados en las escalas Rockwell B, F y G, pero en muestras de calibre más delgado. Las escalas de dureza Rockwell W, X, e Y se utilizan para materiales muy blandos.</p>	

Fuente: ASM Handbook volume VIII: Mechanical Testing and Evaluation. USA: Ed. ASM international. 2000. p.594

Dentro de los parámetros establecidos en la norma ASTM E 18-03 en el ensayo de dureza Rockwell se pueden aplicar las cargas establecidas en el cuadro 9.

Cuadro 10. Cargas establecidas para el ensayo de dureza Rockwell.

Carga previa P_0 [kgf]	10		
Carga principal P_1 [kgf]	50	90	140
Carga total P_f [kgf]	60	100	150

Como se puede inferir de la tabla anterior existen distintas combinaciones de carga para la realización del ensayo Rockwell como también existen diversos penetradores que se usan para llevarlas a cabo.

Es por esto que la estandarización ASTM E18 definió 15 escalas de dureza Rockwell que integran los tipo de combinaciones que se pueden dar según el penetrador y la carga total a que se somete la superficie de la muestra de estudio, estas escalas se representan por orden alfabético donde B y C son las más utilizadas, para la muestra del émbolo por ser una aleación de aluminio se usa la escala B como se recomienda en el cuadro 10.

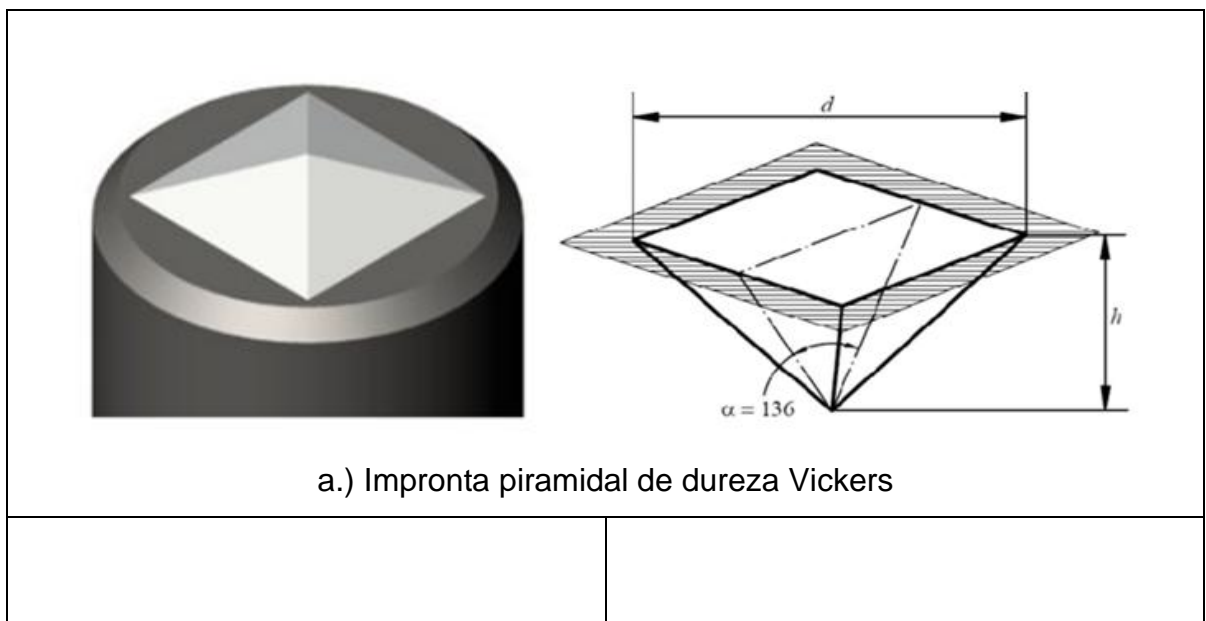
Teoría de la dureza Vickers (HV)

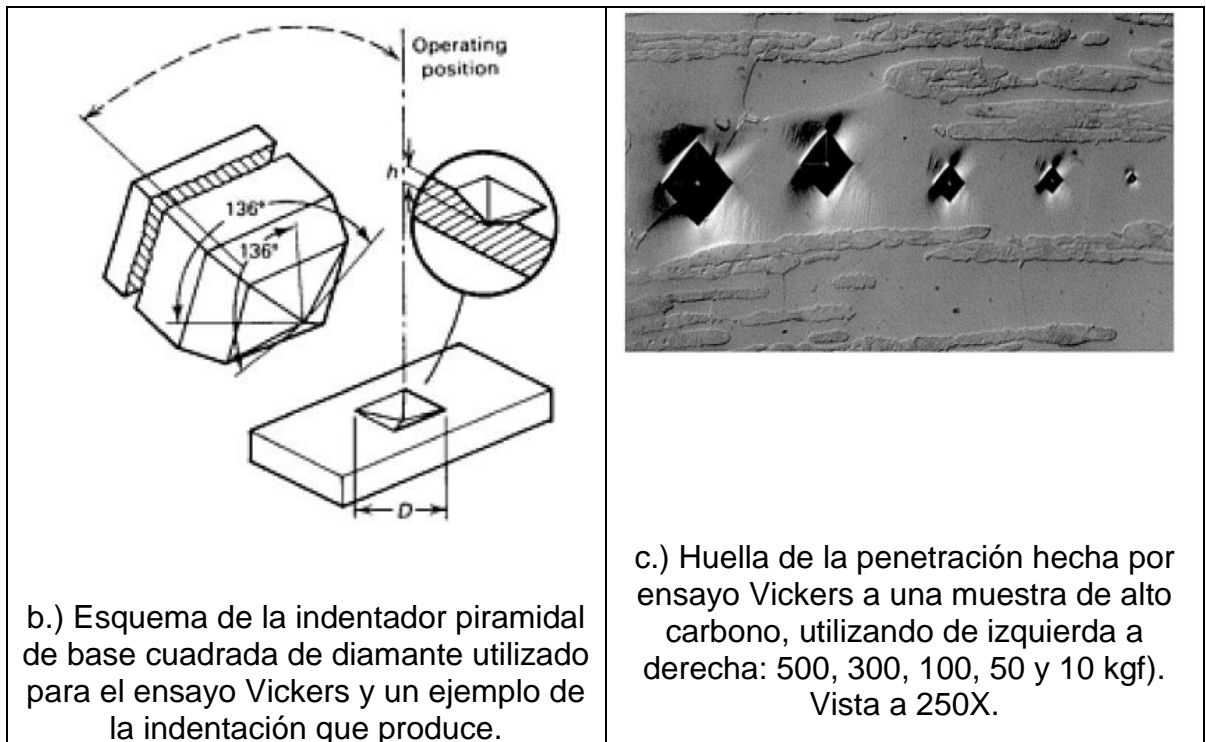
Para el ensayo de dureza Vickers se usa una impronta piramidal como la que se muestra en la ilustración 21.

La utilización de un penetrante piramidal tiene las siguientes ventajas:

- 1.) La geometría piramidal por sus perfiles resultan cómodas para la medición.
- 2.) La dureza hallada mediante el penetrante piramidal es coincidente con el hallado en el ensayo Brinell para materiales de dureza media.
- 3.) El ensayo de Vickers se aplica con igual éxito para materiales blandos y duros, sobre todo si el ensayo es hecho en probetas delgadas y las capas son superficiales.

Ilustración 21. Penetrador para ensayo Vickers





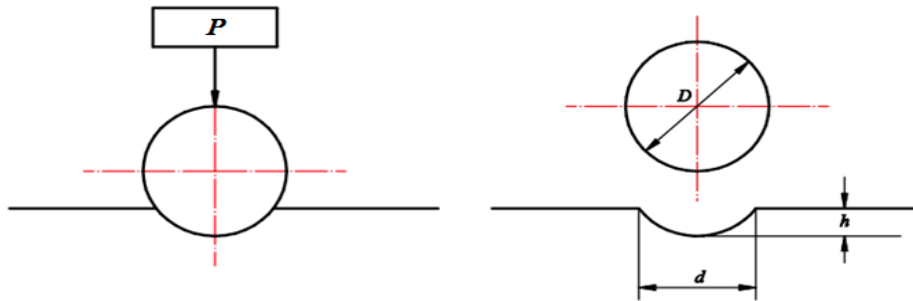
Fuente: a.) CALLE TRUJILLO, Gabriel. Laboratorio de resistencia de materiales. [Online]. En: <<http://www.utp.edu.co/~gcalle/DUREZAVICKERS.pdf>>. b.) y c.) ASM Handbook volume VIII: Mechanical Testing and Evaluation. USA: Ed. ASM international. 2000. p.470

El procedimiento del ensayo de dureza Vickers esta estandarizado bajo la norma ASTM E384 para microdureza (con carga de prueba de 1 kgf o menos) o la norma ASTM E 92-82 para macrodureza (con carga de prueba de más de 1 kgf).

Teoría de la dureza Brinell (HB)

El ensayo de la dureza Brinell básicamente se describe en la ilustración 22.

Ilustración 22. Descripción de proceso de ensayo Brinell.



Fuente: CALLE, Gabriel. Dureza Brinell. [Online]. En: <http://www.utp.edu.co/~gcalle/DUREZABRINELL.pdf>.

Por definición, el número de dureza Brinell (HBS o HBW) es la relación de la carga P que efectúa en el penetrador esférico de diámetro D, al área de la superficie de la huella.

Matemáticamente se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{HBS o HBW} = \frac{P}{A} = \frac{P}{\frac{\pi * D}{2} * (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Donde HBS es el número de dureza Brinell para casos en que se utilice bola de acero y HBW es el número de dureza Brinell para casos en que se utilice bola de carburo de tungsteno, D es el diámetro de la bola en milímetros, P es la carga aplicada en kilogramos-fuerza y d es el diámetro medio de la indentación en milímetros.

ANEXO F. Tratamientos térmicos

Tratamientos térmicos de las aleaciones de aluminio

En el momento de realizar un proceso de manufactura a una aleación de aluminio, se espera que el émbolo tenga ciertas propiedades, comportamientos y desempeño en su vida útil. Los anteriores factores dependen en gran medida de la composición, estructura y tratamiento térmico al que se somete la aleación. A

continuación se hablara de una serie de tratamientos importantes a las que pueden ser sometidas la mayoría de aleaciones.

➤ Templado para aleaciones de aluminio (Tempers)

Además del sistema numérico de cuatro dígitos para identificar a las aleaciones de aluminio de moldeo y conformado, se utiliza otro tipo de nomenclatura para denominar sus estados de entrega o tempers resultantes de los tratamientos térmicos, los cuales buscan mejorar las propiedades de las aleaciones de aluminio. El temple básicamente consiste en el endurecimiento de un metal mediante calentamiento profundo para posteriormente someterlo a un enfriamiento brusco. El proceso de temple consta básicamente de dos fases, la primera tiene como objetivo el mejorar la dureza del material y su flexibilidad modificando su estructura interna mediante calor, la segunda fase consiste en el enfriamiento brusco, el cual permite que el metal conserve las características previamente adquiridas. Los tratamientos térmicos pueden realizarse en cualquier momento de la secuencia del proceso de manufactura o antes, por ejemplo si se necesita ablandar la aleación para que sea más formable mientras está caliente, entonces el tratamiento se hace antes del formado, también se puede realizar al finalizar la manufactura, para que la aleación del émbolo sea un producto terminado más resistente y duro.

Este sistema se aplica tanto a las aleaciones de aluminio conformadas como las fundidas y está basado en los tratamientos que se utilizan para desarrollar los diversos tempers, se representan en forma de letras que se agregan a los dígitos de la aleación, por ejemplo si la aleación es 4xxx-O, la letra "O" indica que la aleación fue recocida. El sistema básico de esta normalización se puede ver en el cuadro 11. Si se agrega después de la letra, uno o más dígitos, estos indican subdivisiones de los tempers y estos se muestran cuando influyen significativamente en las características de la aleación.

Generalmente los elementos aleantes que están presentes en aleaciones de aluminio sobre todo a nivel comercial son cobre, magnesio, manganeso, silicio y zinc, todos ellos proporcionan a la aleación alta resistencia. Estos elementos tienen una solubilidad significativa en los aluminios. En todos los casos la solubilidad aumenta con la temperatura, por lo cual son tratados térmicamente, logrando en algunos casos temple estable (T tempers) o temples inestables (W tempers).

Las aleaciones de aluminio que no son tratadas térmicamente son endurecidas por trabajo en frío, pero no por tratamiento térmico. La resistencia inicial de estas aleaciones, es proporcionada por el efecto de endurecimiento de sus elementos de aleación. El fortalecimiento adicional puede ser creado por trabajo de deformación en frío que induce endurecimiento por deformación (temple H).

Los tratamientos térmicos que se utilizan para mejorar las propiedades de las aleaciones de aluminio son los tratamientos de precipitación²³. La letra "T" representa la designación de este tipo de tratamiento, esta letra es seguida por un número del 1 al 10 (T1, T2,.....T10), cada uno de estos números indica una secuencia específica de tratamientos básicos. Los tratamientos térmicos constan de etapas de puesta en solución, temple y maduración o envejecimiento.

Cuadro 11. Sistema básico de normalización de los temples

F	De fábrica: Básicamente están en estado bruto, tal como sale del proceso de fabricación. El material es extruido sin temple, sin ningún tratamiento posterior. Se usa para procesos de fundición o conformado en la que no se emplea ningún control especial sobre condiciones térmicas o endurecimiento por deformación.
O	Recocido mediante tratamiento térmico: Las aleaciones para conformado son recocidas para obtener una menor resistencia al temple. Las aleaciones para moldeo son recocidas para mejorar la ductilidad y la estabilidad dimensional. El recocido es un proceso en el cual el metal se calienta a

²³ **Precipitación** implica la formación de pequeñas y finas partículas (precipitados) que son de una fase diferente, estas se dispersan de manera uniforme en la matriz de la fase original (aluminio en este caso) y actúan para bloquear el movimiento de las dislocaciones y hacer más resistente y dura a la aleación.

	una temperatura determinada, la cual se mantiene en un tiempo establecido (recalentamiento), posteriormente se deja enfriar lentamente. Básicamente este proceso se realiza para reducir la dureza del material con el fin de ablandarlo y mejorar su formabilidad o maquinabilidad.
W	Se trata de un temple inestable aplicable solamente a las aleaciones cuya resistencia natural (espontánea) cambia a temperatura ambiente durante un período de meses o incluso años después del tratamiento térmico de la solución
H	(Solo para aleaciones de conformado). Estas aleaciones han sido fortalecidas por endurecimiento por deformación, con o sin tratamiento térmico. "La H va seguida de dos dígitos, el primero de los cuales indica un tratamiento térmico, si lo hubiera; y el segundo, indica el grado de endurecimiento por trabajo restante; por ejemplo: H1X indica que hubo tratamiento térmico después del endurecimiento por deformación, en donde X tiene un rango de 1 a 9, que indica el grado de endurecimiento por trabajo. H2X indica un recocido parcialmente, donde X es el grado de endurecimiento por trabajo remanente en el producto. H3X indica un estabilizado, donde X es el grado de endurecimiento por trabajo remanente. Estabilizado significa calentar ligeramente por arriba de la temperatura de uso que se prevé." ²⁴
T	Temple estable obtenido por tratamiento térmico a la solución con o sin tratamiento mecánico. Produce templados estables diferentes de F, H u O.

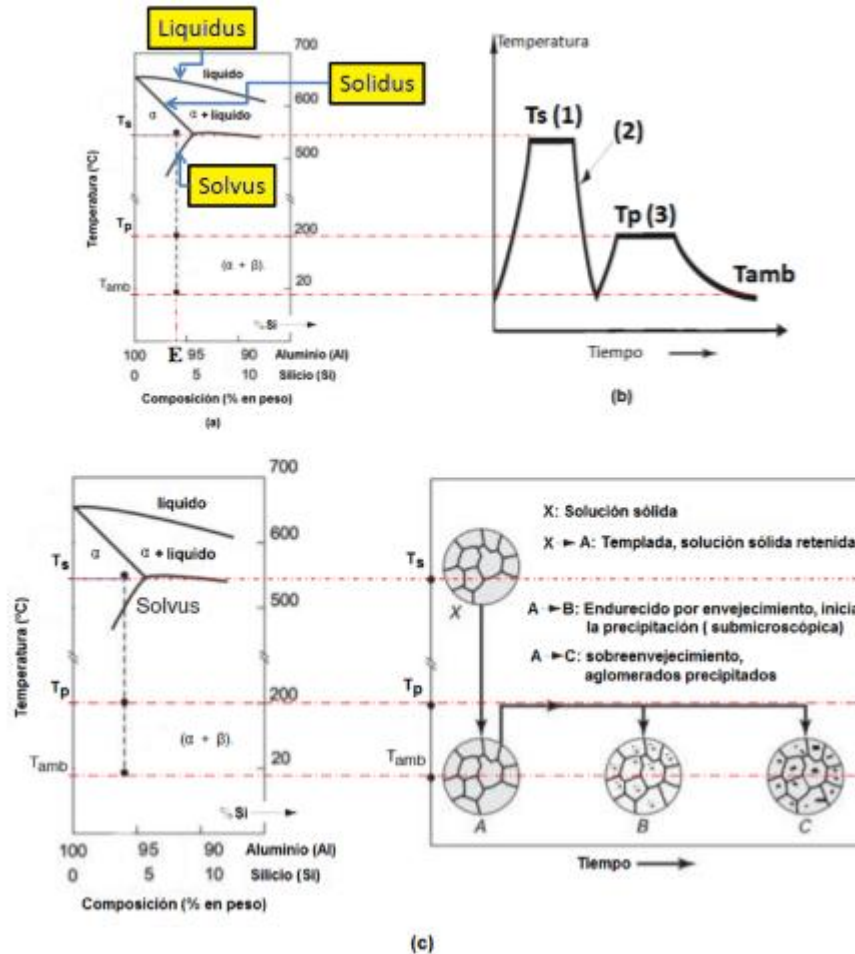
Fuente: Source book on selection and fabrication of aluminum alloys SAE International. 1978. p. 12.

En los cuadros 13, 14 y 15 se especifican los tratamientos térmicos de las aleaciones recomendadas para la fabricación de émbolos mediante el proceso de fundición y en los cuadros 20, 21 y 24 se muestran los tratamientos térmicos de las aleaciones recomendadas para el proceso de forjado, además de otras propiedades físicas, térmicas y eléctricas que hay que tener en cuenta en el proceso de fundición, sobre todo para hallar la constante de moldeo, de la que se hablara en capítulos posteriores.

Los tratamientos térmicos constan de etapas de puesta en solución, temple y maduración o envejecimiento.

²⁴ Fuente: KALPAKJIAN, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. México: Pearson Educación. 2002. p.114.

Ilustración 23. Diagrama de fase y tratamiento térmico de una aleación



El diagrama de fase es un indicador que nos permite establecer si la aleación puede ser endurecida por precipitación, pues si presenta la línea inclinada solvus esta puede ser tratada térmicamente (figura 62a). La aleación se endurece por precipitación cuando contiene dos fases a temperatura ambiente, pero que se puede calentar a una temperatura que disuelva la segunda fase, la composición E cumple tal requerimiento (figura 62b), el proceso de tratamiento térmico se basan en tres pasos:

- **Tratamiento con solución (1):** la aleación se calienta hasta la temperatura T_s , que está arriba de la línea solvus dentro de la región de la fase α y se

mantiene el tiempo suficiente para disolver la fase β (estructura X en la figura 62c).

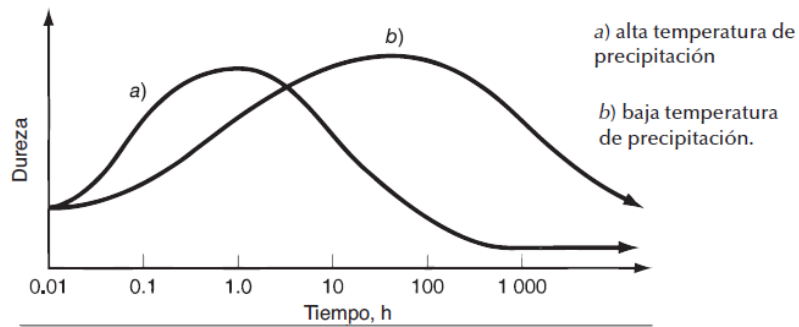
- **Enfriamiento por inmersión o temple (2):** después se enfría rápidamente a temperatura ambiente (estructura A en la figura 62c), en donde la aleación hasta este punto tiene una resistencia moderada y una buena ductibilidad.
- **Tratamiento por precipitación (endurecimiento por envejecimiento) (3):** una vez obtenida la estructura A, esta se puede fortalecer por este tratamiento, lo que se hace es calentar la aleación a una temperatura intermedia T_p , que está por debajo de T_s y por encima de la temperatura ambiente, la aleación se mantiene a esa temperatura durante un tiempo mientras ocurre la precipitación. En el caso de la aleación Al-Si, los átomos de silicio se difunden y se combinan con los átomos del aluminio, el proceso produce la precipitación de partículas finas de la fase β , que se muestran en la estructura B (figura 62c) como puntos pequeños que están dentro de los granos de la fase α , lo cual hace que esta estructura sea más fuerte que la estructura A, pero con menor ductibilidad. El proceso se conoce también como endurecimiento por envejecimiento porque la precipitación depende del tiempo y de la temperatura. El envejecimiento sería natural si se realizara a temperatura ambiente, pero como se realiza a una temperatura T_p , su envejecimiento es artificial, en el caso de los émbolos este tratamiento se lleva a cabo a temperaturas entre 100 °C y 300 °C. Si las aleaciones se envejecen naturalmente, primero se les templan y después de ser necesario, se les da forma mediante deformación plástica a temperatura ambiente, este proceso les otorga resistencia y dureza a la aleación.

Si la aleación se sigue recalentando a la misma temperatura por un tiempo más largo, los precipitados comienzan a crecer y a coalescer²⁵, resultando en precipitados más grandes pero más escasos, la aleación es más suave pero más débil, este proceso se conoce como sobre-envejecimiento. Por lo anteriormente mencionado es fácil concluir que la aleación durante el proceso de envejecimiento logra un aumento significativo de su resistencia y dureza, pero necesita que haya un control sobre la combinación de tiempo y temperatura en el proceso de precipitación pues cuando hay un aumento considerable de la dureza y la fuerza de la aleación, esto puede llevar a aumentos indeseables en el volumen del émbolo, que al ser una pieza de precisión, este cambio le resulta sumamente inconveniente. Por ejemplo si la temperatura es elevada en el tratamiento de envejecimiento (ilustración 24a), la dureza también se eleva y llega a su máximo valor en un tiempo muy corto, pero si el proceso se hace a temperaturas más bajas (ilustración 24b), la aleación requiere más tiempo para endurecerse, pero su dureza máxima será probablemente más grande.

La curva de envejecimiento depende del tiempo de exposición y el nivel de temperatura. El envejecimiento artificial se lleva a cabo a temperaturas entre 100 °C y 300 °C. Si el envejecimiento artificial se hace a temperaturas superiores, la aleación pierde algo de fuerza con el tiempo, pero se consigue una mejor estabilidad en el volumen del émbolo (ilustración 25).

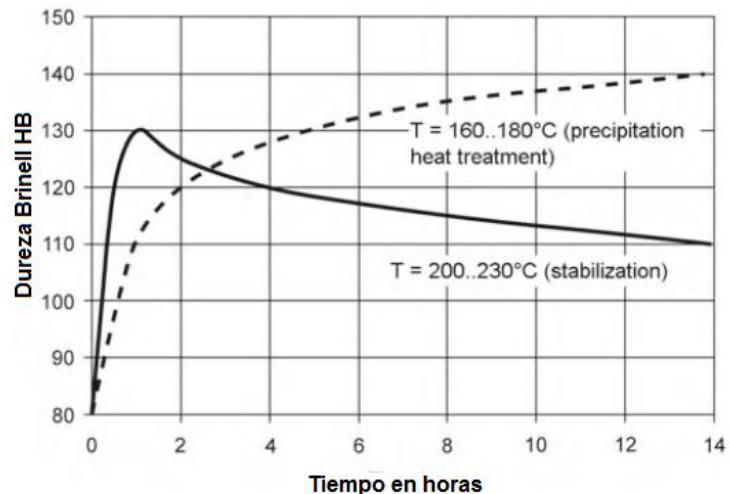
Ilustración 24. Efecto de la temperatura y el tiempo durante el tratamiento por precipitación (envejecimiento)

²⁵ La coalescencia es una propiedad o capacidad de ciertas sustancias a fundirse con otras, resultando en una sola.



Fuente: GROOVER, M. Fundamentos de manufactura moderna. México: McGraw-Hill. 2007. p. 653.

Ilustración 25. Curva tiempo-dureza para el envejecimiento artificial de aleaciones aluminio-silicio para el émbolo.



Fuente: Pistons and engine testing. MAHLE GmbH, Stuttgart 2012. p. 62.

Si al material no se le hace ningún tratamiento térmico, la aleación tiene una designación "F" (fabricada en bruto). Cuando las aleaciones de aluminio se usan en la fabricación de émbolos generalmente se les realiza los tratamientos térmicos T4, T5, T6 y T7, los cuales tienen las siguientes características:

Cuadro 12. Tratamientos térmicos "T" más utilizados en las aleaciones de aluminio para la fabricación de émbolos

	<p>T4: Solución tratada térmicamente y envejecida a temperatura ambiente (naturalmente) hasta alcanzar una condición estable (sin trabajo en frío). Si los productos son aplanados o enderezados, los efectos del trabajo en frío impartidos por este proceso no se contabilizan en los límites de propiedad especificados en el material.</p>
	<p>T5: Enfriado desde un proceso desde la temperatura de fabricación durante el proceso de conformación para luego ser envejecido artificialmente. Si los productos son aplanados o se enderezan después del enfriamiento del proceso de conformación, los efectos de este trabajo no se contabilizan las propiedades específicas del material.</p>
	<p>T6: Solución tratada térmicamente para luego ser envejecido artificialmente. Si los productos son aplanados o enderezados, los efectos del trabajo en frío impartidos por aplanamiento o enderezamiento no se contabilizan en los límites de propiedad especificados en el material.</p>
	<p>T7: Solución tratada térmicamente para luego ser estabilizado por sobreenvejecido. El temple T7 se aplica a productos forjados a los que se le precipita su estado térmico más allá del punto de máxima resistencia para proporcionar alguna característica especial, como una mayor resistencia al agrietamiento por tensión de corrosión o por exfoliación. Se aplica a productos que están envejecidos artificialmente después del tratamiento térmico para proporcionarles mayor estabilidad dimensional y resistencia.</p>

Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international. 1990. p.115.

A los tratamientos térmicos anteriormente descritos (T4 al T7), cuando se le hacen tratamientos adicionales se le agregan otros dígitos, tales como T5X, T5XX, T6X, etc., donde X no puede ser cero.

ANEXO G. Opciones para la fundición del émbolo distintas al moldeo en

arena

Moldeo a presión en matriz (Die casting)

El moldeo en matriz es un proceso de fundición en el cual la aleación de aluminio en fase líquida es forzada a fluir bajo presiones que varían de 0.7 a 700 MPa (0.1 a 100 ksi) en dirección de una cavidad hasta el molde que para este proceso se le conoce como matriz o troquel. El molde está compuesto de dos secciones generalmente hechas de acero endurecido que ha sido mecanizado previamente. Estas secciones se mantienen juntas de manera controlada mediante un mecanismo de mordazas de sujeción para que soporte altas presiones. Una vez la aleación llega a la matriz, la aleación se enfría rápidamente hasta que se solidifica, inmediatamente después la matriz se abre y el émbolo aun en caliente se retira, se cierra de nuevo la matriz y el proceso de fundición se repite nuevamente. Una vez expulsado el émbolo se mecaniza la falda, la cabeza y los alojamientos de los anillos.

Las piezas moldeadas por este tipo de proceso de fundición se caracterizan por tener muy buen acabado de la superficie y su consistencia dimensional. Debido al rápido enfriado al que se somete la aleación en el interior de la matriz, el émbolo obtiene una alta dureza superficial, lo cual permite mayor fortaleza en todas sus secciones incluyendo la falda cuyo espesor es relativamente pequeño.

Hablando en términos del producto en tonelaje, el uso de las aleaciones de aluminio por moldeo a presión en matriz es casi dos veces mayor que el uso de las aleaciones de aluminio en todos los demás métodos de fundición combinados. Además este tipo de fundición usa ampliamente como material base las aleaciones de aluminio más que para cualquier otro metal.

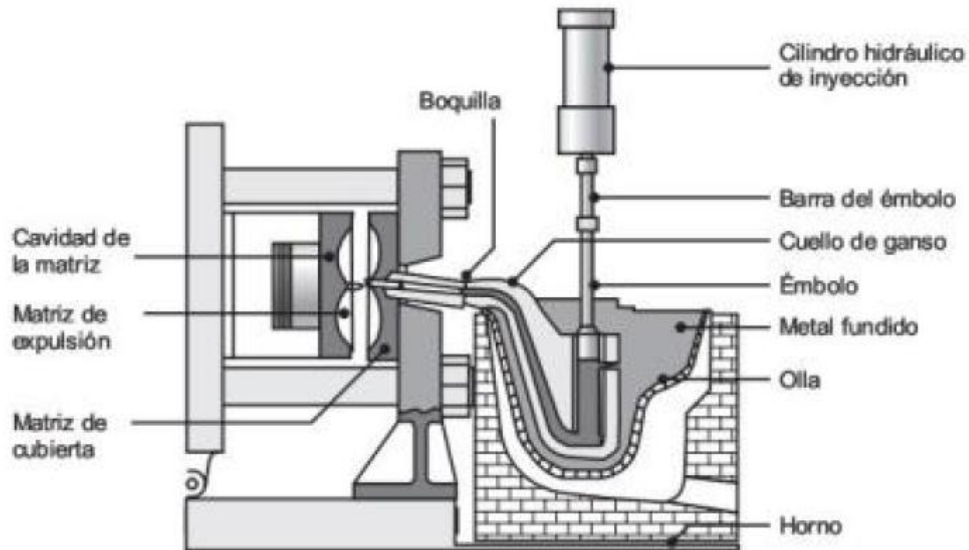
Dependiendo del tipo de metal que se está moldeando, el proceso se hace en una cámara caliente o en cámara fría.

Proceso de cámara en caliente

En el proceso en cámara caliente un émbolo que es accionado neumática o hidráulicamente obliga a que parte del volumen del metal fundido fluya con una presión que en promedio llega a 15 MPa (2000 psi) aunque puede alcanzar presiones de hasta 35 MPa (2000 psi), la fuerza que genera esta presión fuerza al metal a dirigirse hacia la cavidad de la matriz a través de un sistema compuesto por un conducto al que llaman "cuello de ganso" y una boquilla, el émbolo trabaja en ciclos rápidos (aproximadamente 15 ciclos por segundo), la presión a la que se somete el material se mantiene hasta que la matriz se solidifique (ilustración 26). Puede manejar tasas de producción de hasta 500 piezas hora.

Para que la vida útil de la matriz mejore y se acelere el enfriamiento del material con el fin de reducir los ciclos de inyección la matriz se enfría por medio de un sistema que permite que se circule agua o aceite dentro del molde. En la fundición mediante cámara caliente, gran parte del sistema de inyección se encuentra sumergido en el metal, es por eso que está limitado a aplicaciones con aleaciones de punto bajo de fusión como las magnesio, zinc, estaño, entre otros. Es por esto que no se recomienda fundir las aleaciones de aluminio mediante este proceso porque al tener alto punto de fusión tiende a atacar y erosionar el metal del crisol (cavidad en el horno que recibe la aleación fundida) y al émbolo del sistema de inyección, esto no solo va dañando la cámara sino que además arrastra parte del material erosionado hacia la matriz alterando las propiedades de la aleación, por tanto este método no es para nada adecuado para moldear émbolo.

Ilustración 26. Proceso de fundición a presión en matriz de cámara caliente

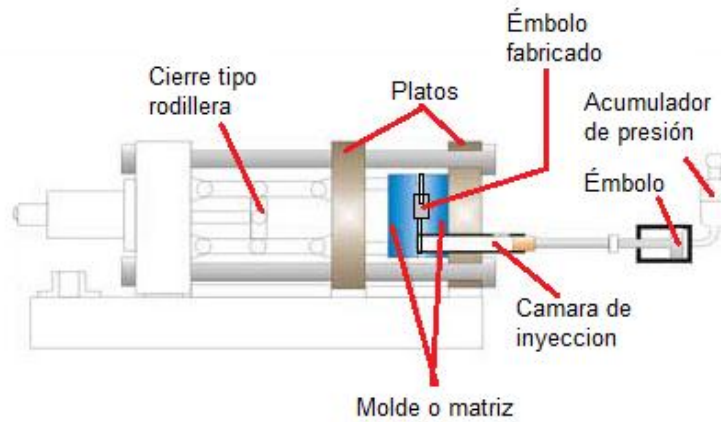


Fuente: KALPAKJIAN, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. México: Pearson Educación. 2008. p.306.

Proceso de cámara en frío

Este método se utiliza cuando las aleaciones no se pueden moldear en la cámara caliente como es nuestro caso. La aleación de aluminio fundido se vacía dentro del cilindro de inyección, que básicamente es una cámara de disparo la cual no se calienta, de allí se deriva el nombre. El disparo lo genera un émbolo hidráulico o mecánico y las cantidades de la aleación inyectadas deben ser muy precisas para evitar solidificación dentro de la cámara. La aleación es forzada dentro de la cavidad de la matriz a presiones en un rango de 20 a 70 MPa (3 a 10 ksi), aunque puede alcanzar valores de hasta 150 MPa (20 ksi). El sistema que se usan para este proceso tiende a ser muy grande en comparación al tamaño del embolo fundido debido a que se requieren de grandes fuerzas para mantener la dos secciones de la matriz unidas bajo presión (ilustración 27).

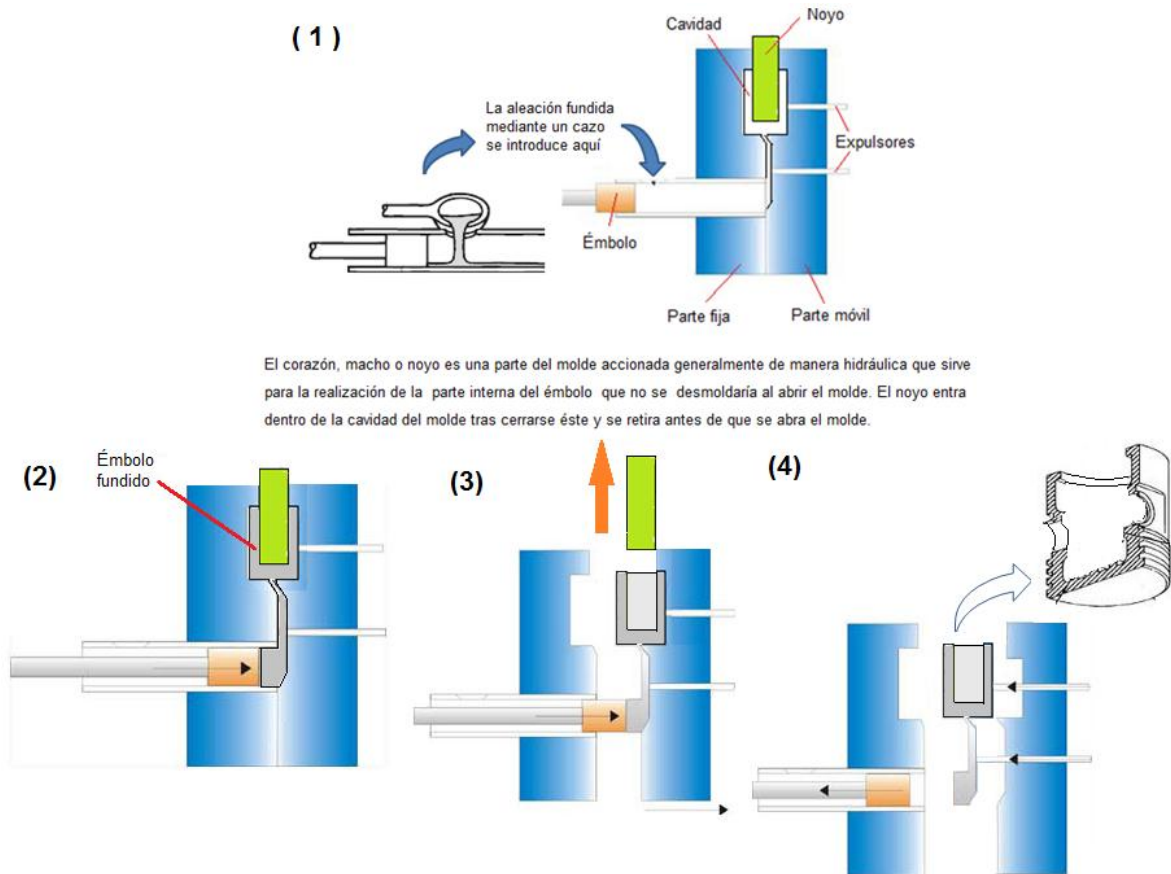
Ilustración 27. Proceso de fundición a presión en matriz de cámara en frío



Se puede iniciar el proceso con la aleación a una temperatura de casi 600°C, el alto punto de fusión de aleación de aluminio no afecta el proceso de fundición ni la estructura del sistema, por lo que se puede usar la cámara con normalidad para el moldear el émbolo. Comparado con el proceso de cámara caliente, el ciclo de moldeo de cámara fría por lo general no es tan rápido debido a que se tiene que vaciar la aleación previamente fundida desde el exterior hacia la cámara, no obstante también es un proceso de elevada producción. Su secuencia operacional maneja los siguientes pasos (véase ilustración 28):

1. Se cierra la matriz para la fundición y la aleación fundida es cargada e inyectada en la cámara fría.
2. El émbolo empuja la aleación dentro de la cámara fría, la cual se mantiene bajo presión hasta que el émbolo se solidifica.
3. Se retira el noyo, la matriz se abre, parte del émbolo solidificado aún caliente se expone unido aun a la mazarota.
4. Los expulsores empujan el émbolo ya fundido y lo separan de la otra sección de la matriz mientras el émbolo de inyección vuelve a su posición inicial.

Ilustración 28. Secuencia operacional para el proceso de fundición a presión en matriz de cámara en frío.



Debido a que el material del que está construida la matriz tiene una porosidad insignificante y a que la aleación fluye con rapidez debido a la inyección, se deben crear sistemas de ventilación dentro de la matriz para evacuar el aire y los gases dentro de la cavidad. Aunque el sistema de refrigeración tiene cavidades muy pequeñas, estas se llenan con la aleación durante el proceso de fundido, este exceso se retira junto a la rebaba y el bebedero durante el proceso de mecanizado del émbolo.

Ventajas de la fundición de aleaciones de aluminio por moldeo a presión en matriz

Todo proceso de moldeo presenta características particulares que la distinguen de otras, es por eso que su selección se debe basar en los beneficios particulares que estos presentan respecto a otros métodos. El moldeo por fundición a presión en matriz ofrece una serie de ventajas que lo caracterizan sobre otros procesos de fundición.

- Este proceso posee la capacidad de producir piezas de alta calidad y de geometrías complejas, lo cual hace que el moldeo sea idóneo para la fabricación del émbolo.
- No requiere gran demanda de mano de obra, debido a que la operatividad del proceso es sencilla, además como la pieza resultante tiene buena precisión dimensional y acabado superficial, no se requiere un proceso complejo de maquinado.
- Se pueden producir piezas de espesores muy delgados, hasta de 0.38 milímetros, debido a las grandes presiones a la que se somete la matriz.
- Este tipo de proceso permite que se produzca piezas con geometrías complejas y buenos acabados superficiales, algo a tener muy en cuenta en la fabricación del émbolo sobre todo en su parte interna., la pieza puede tener una rugosidad superficial Ra de 1 a 2,5 micrómetros.
- Gracias a que durante el proceso la aleación se enfría rápidamente, el émbolo resultante posee una capa superficial dura y resistente.
- Tiene una buena relación resistencia-peso, lo que permite la construcción de piezas ligeras, factor muy apreciado en la fabricación de émbolos.

Desventajas de la fundición de aleaciones de aluminio por moldeo a presión en matriz.

- Su principal desventaja es el elevado capital que se tiene que invertir en el diseño y en la fabricación tanto del sistema de moldeo como el de la matriz, este costo solo se justifica si el nivel de producción es alto.
- Por ser una aleación de aluminio la que se va a fundir se requiere que el moldeo se haga en cámara fría, cuya mayor desventaja es que el tiempo de ciclo de producción se hace más lento debido a la necesidad de transferir la aleación fundida desde un horno externo hasta la cámara fría.
- A veces, cuando el proceso de fundición se efectúa a presión estándar, la pieza resultante podría tener una pequeña cantidad de porosidad. Esto es un inconveniente si se necesita hacerle un tratamiento térmico al émbolo, ya que con el calor, el gas en los poros tiende a expandirse, lo que provocaría microgrietas en su estructura.
- El proceso se limita a aleaciones que tengan alta fluidez.

Colada en coquilla (Permanent mold castings)

En esta fundición se usa un molde metálico (coquilla) que se reutiliza varias veces en el mismo proceso, generalmente la coquilla está construida en dos o más secciones que están previamente diseñadas para abrirse y cerrarse con precisión y facilidad; generalmente los moldes están hechos de acero o hierro fundido, que poseen alta resistencia a la fatiga y a la erosión. Las secciones de las coquillas al unirse generan la cavidad y todo el sistema de alimentación, estas secciones se fabrican maquinadas con el fin de garantizar un buen acabado superficial y precisión dimensional del émbolo.

La coquilla se cierra por medios mecánicos y se recubren inicialmente con una película de grafito que cumple básicamente dos funciones, la de facilitar el desmolde de la pieza y la de facilitar el llenado de la aleación fundida. El proceso se inicia calentando las secciones una vez están juntas a temperaturas entre 150 a 200°C con el fin de evitar el choque térmico entre la aleación fundida y la cavidad de la coquilla, este proceso también facilita el flujo de la aleación y calidad del proceso de fundición.

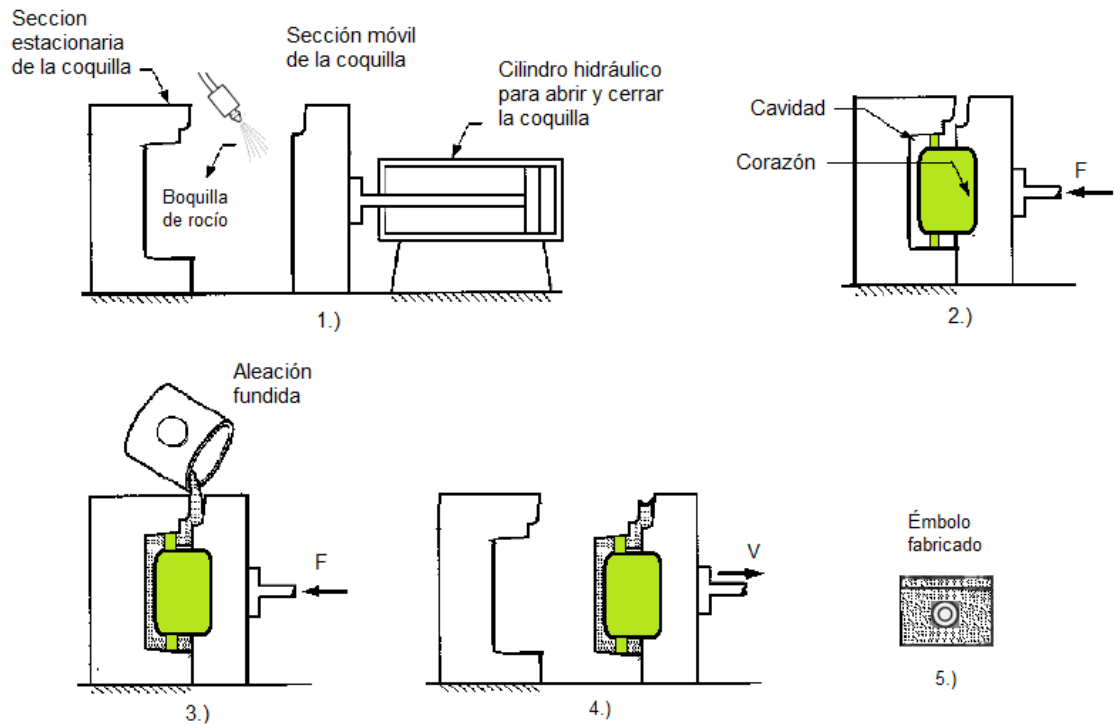
La coquilla empieza su proceso de enfriamiento mediante un sistema de canales de refrigeración para poder separar al émbolo de la coquilla una vez este solidificado. Dependiendo de la presión que se utiliza para llenar la cavidad de la coquilla, el proceso de moldeo permanente se clasifica en:

Fundición en molde permanente por gravedad. (Permanent mold (gravity die) casting)

Dentro de los procesos de colada de coquilla, este es el método más sencillo. Básicamente la aleación de aluminio en su fase fundida se vierte dentro de la cavidad de la coquilla y se utiliza la fuerza de gravedad como método para garantizar que la cavidad se llene en su totalidad (ilustración 29).

Lo primero que se hace es precalentar el molde generalmente a temperaturas entre 150 a 200 °C para facilitar la fluidez de la aleación a través de la cavidad, luego se le rocían recubrimientos a las secciones de la coquilla para facilitar la separación del émbolo fundido del molde y para que ayude a disipar el calor. Después de vertida la aleación se espera a que esta se solidifique, se abre la coquilla y se retira el émbolo en espera de su proceso de mecanizado.

Ilustración 29. Fundición en molde permanente por gravedad.

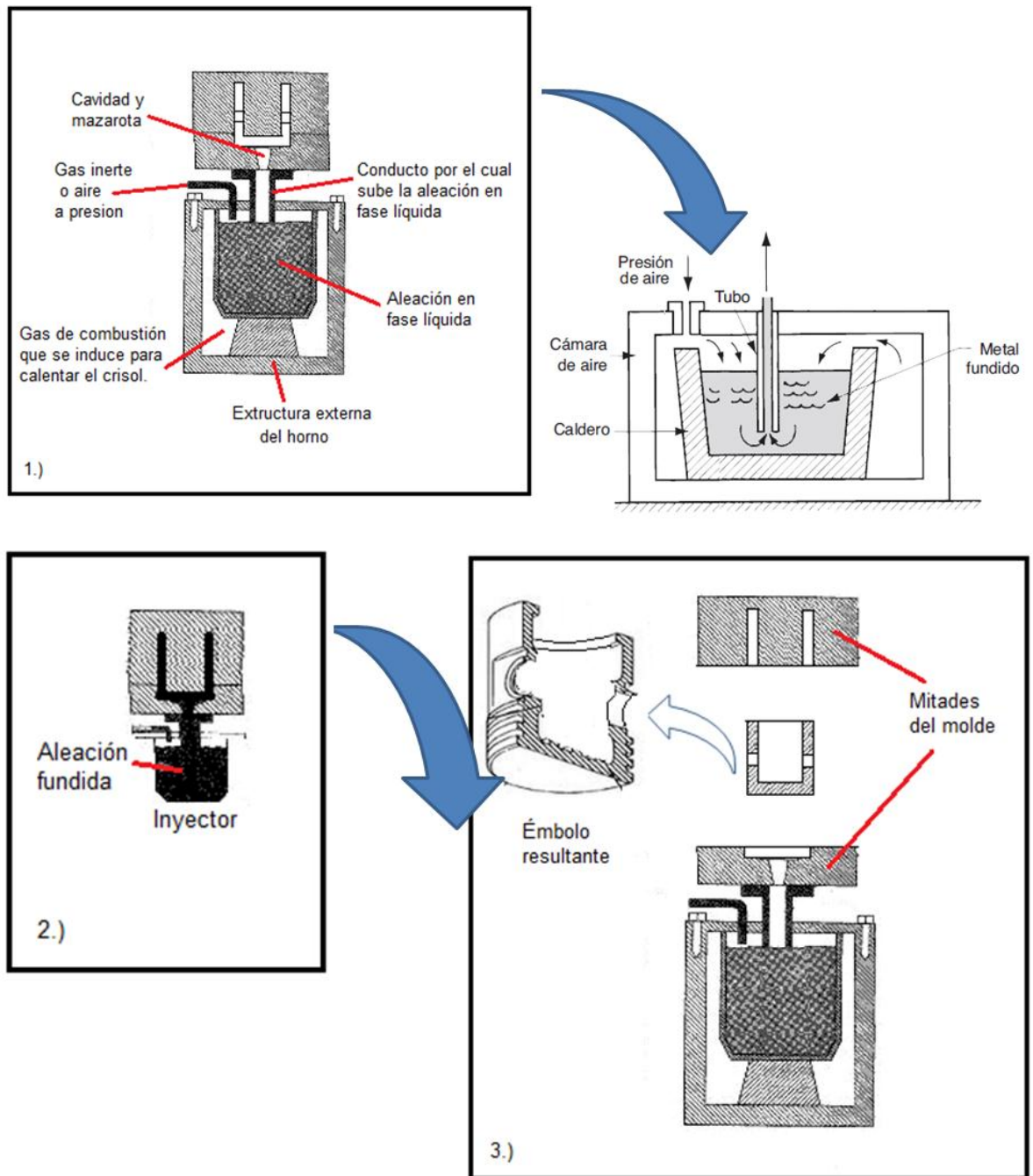


Fuente: Autores

Fundición en molde permanente a baja presión. (Pressure permanent mold-LPPM)

La fundición a baja presión es un sistema de fusión donde se coloca un conducto o tallo sobre un crisol que está previamente sellado, al inyectar presión al centro del crisol la única salida de la aleación de aluminio en fase líquida será el tallo, lugar hacia donde fluye lentamente debido a acción de la presión, que aunque es baja, tiene la fuerza suficiente para obligar a la aleación a llenar la mazarota la cual es la cavidad que se llena del material fundido y que suministra la cantidad adicional necesaria para contrarrestar el proceso de contracción durante la solidificación de la aleación cuando está llenando el molde (ilustración 30).

Ilustración 30. Fundición en molde permanente a baja presión



En este procedimiento la aleación pasa directamente del crisol hacia el molde sin exponer el material al aire, lo cual disminuye la porosidad que se produce por

gases, mejorando con ello sus propiedades mecánicas. La presión necesaria para que la aleación fluya varía de 3 a 15 psi, esta presión se debe mantener hasta que la aleación del émbolo se solidifica. Mediante el moldeo a baja presión las propiedades mecánicas del material fundido tienden a mejorar alrededor de un 5% más que si se hiciera mediante el proceso por gravedad, pero tiene la desventaja que su proceso requiere de ciclos más largos de tiempo.

Fundición al vacío en molde permanente.

Este proceso es una variación de la fundición en molde permanente a baja presión, solo que emplea el vacío para impulsar la aleación fundida hacia la cavidad de la coquilla. La configuración general del proceso de fundición al vacío es similar a la que se utiliza en la fundición a baja presión. La diferencia está en el proceso, se utiliza la presión reducida de aire desde el vacío de la coquilla y con la fuerza que esta proporciona se lleva la aleación en fase líquida hacia la cavidad. Este proceso reduce aún más la cantidad de gases disueltos en la aleación respecto al procedimiento a baja presión. Las propiedades mecánicas del moldeo resultante por lo general mejoran en un 10 a un 15% respecto a las obtenidas mediante el moldeo por gravedad. Su desventaja es que el procedimiento está limitado a aleaciones de bajo peso, generalmente entre 0,2 a 5 kg.

Ventajas de la fundición de aleaciones de aluminio por colada en coquilla.

- Si se automatiza el proceso por colada en coquilla logra altas tasas de producción de moldeo.
- Por los buenos resultados de moldeo es un procedimiento muy usado para la fabricación de émbolos, sobre todo para el mercado automotriz.

- Logra piezas con buena precisión dimensional y con un buen acabado superficial, cuyos valores de Ra oscilan de 2,5 a 7,5 micrómetros.
- Generalmente puede lograr piezas de variados espesores, que varían de 3 a 50 mm.
- Este proceso pueden inducir y mejorar la solidificación del molde, si se hace cambios en los espesores de la coquilla, logrando con ello buenos niveles de dureza en el material.
- La vida útil de la coquilla en general es alta. Por ejemplo, si la coquilla es de acero para trabajo en caliente como la AISI H13, su uso oscila de 20.000 a 25.000 fundiciones.
- Si los moldes son de cobre de alto rendimiento (los cuales tienen una conductividad térmica 10 veces mayor que la del acero AISI H13) los procesos de limpieza de la coquilla se reducen entre 1 y 2 veces cada 8 horas.
- Si el procedimiento es de baja presión, se pueden fabricar piezas de hasta de 30 kg y es rentable para grandes cantidades de piezas si los requerimientos de calidad no son tan altos.

Desventajas de la fundición de aleaciones de aluminio por colada en coquilla

- Cuando la coquilla está hecha de acero hay que limpiarla y hacerle mantenimiento varias veces; reacondicionarla con procesos de chorros de arena entre 3 y 4 veces por cada turno de 8 horas; lo que implica tiempos muertos y pérdidas en horas hombre y uso de máquinas.
- Las coquillas generan altos costos en material y construcción, pues están construidas para trabajo en caliente, por tanto deben tener buena resistencia al desgaste y a los cambios térmicos, si el material o el uso de la coquilla no es el adecuado

- La coquilla presentara problemas principalmente de generación de fisuras por los repetitivos cambios y por los choques térmicos a la que se somete cuando es vertida la aleación, aún más si se tiene en cuenta que entre la fundición y la limpieza, es necesario volver a precalentar la coquilla a la temperatura adecuada. Todo esto, afecta tanto la vida útil de la coquilla como la calidad del émbolo ya fundido.

ANEXO H. Opciones de aleaciones de aluminio de moldeo para émbolos

Los principales factores que influyen en la selección de la aleación para aplicaciones de fundición dependen del proceso de manufactura que se utilizará para la fundición, el diseño, las propiedades requeridas para el material y las consideraciones económicas.

, las aleaciones para moldeo en la fabricación de émbolos se dividen en dos categorías:

Aleaciones estándar de propósito general

Estas aleaciones tienen al Silicio como constituyente principal, son de lejos las más importantes de todas las aleaciones comerciales, sobre todo debido a sus características superiores de fundición. Aleaciones binarias de aluminio-silicio como las 443.0, 444.0, 413.0, y A413.0 ofrecen ventajas adicionales de alta resistencia a la corrosión, buena soldabilidad y baja gravedad específica, aunque las piezas moldeadas de este tipo de aleaciones son difíciles de mecanizar, por eso cuando son grandes las cantidades generalmente se usan las herramientas de carburo sinterizado para mecanizarlas.

Las aleaciones 390.0 pertenecen a esta categoría, este tipo de aleación ha disfrutado de un gran crecimiento en los últimos años. Tienen una alta resistencia al desgaste y un coeficiente de expansión (dilatación) térmica baja. La aleación hallada por los ensayos destructivos que se le hizo al émbolo, la B390.0 es la versión de 390.0 con baja cantidad de hierro, se puede utilizar con ventaja para la fundición en arena. Algunos de sus usos y aplicaciones también incluyen bloques para motor.

Aleaciones para émbolos y otros propósitos de elevada temperatura.

La aceptación universal de los émbolos de aluminio por la mayoría de fabricantes de motores de combustión interna se puede atribuir al peso ligero de la aleación y su alta conductividad térmica. Cuando el lote de producción es grande se recomienda que la fabricación se realice mediante procesos de fundición de molde permanente, pues permite buen balance entre flexibilidad de diseño y economía. La aleación más comúnmente utilizada en la fabricación de émbolos para motores de combustión interna aplicados en distintos campos, en especial el automotriz es la aleación 332.0-T5, pues posee una excelente combinación de propiedades mecánicas, de fundición y características físicas, incluyendo su baja expansión térmica y es una aleación que se deja manejar muy bien durante su proceso de moldeo. El tratamiento térmico que se le realiza, el T5, mejora su dureza, su maquinabilidad y restringe los cambios permanentes que se podrían generar en su dimensionamiento debido al envejecimiento que se puede dar a altas temperaturas de operación.

Cuando las aleaciones de émbolo se fabrican para motores de trabajo pesado se consideran especialmente las aleaciones 336.0-T551 y la 332.0-T5. La aleación 242-T571 también se utiliza en algunos émbolos de este tipo, debido a nivel superior de conductividad térmica a temperaturas elevadas.

ANEXO I. Propiedades físicas, eléctricas y térmicas de las aleaciones recomendadas para la fabricación del émbolo

Cuadro 13. Propiedades térmicas y físicas de aleaciones de aluminio recomendadas para la fabricación del émbolo por fundición.

Aleación	Tratamiento térmico	Densidad [g/cm ³]	Gravedad específica	Coeficiente medio de expansión térmica [10 ⁻⁶ /°C]	Rango de fusión aproximado [°C]	Conductividad térmica a 25[°C] [W/m*K]
				20-100 [°C]		
Aleaciones estándar de uso general para moldeo a presión en matriz (Standard general-purpose alloys - Die casting)						
B390.0 ^(a)	F	2.73	2.73	18.0	510-650	134
413.0	F	2.66	2.66	20.4	574-582	121
Aleaciones para émbolos y otros propósitos de elevada temperatura para moldeo a presión en matriz (Piston and elevated-temperatures alloys - Die casting)						
360.0	F	2.63	2.63	21.0	557-596	113
A360.0	F	2.68	2.68	21.1	570-590	113
364.0	F	2.63	2.63	20.9	560-600	121
380.0	F	2.74	2.74	22.2	540-595	96
A380.0	F	2.71	2.71	21.8	540-595	96
384.0	F	2.82	2.82	21.0	516-584	96
390.0	F	2.73	2.73	18.5	510-650	133
	T5	2.73	2.73	18.0	510-650	133
Aleaciones para émbolo y otros propósitos de elevada temperatura para fundición en moldes de arena (Piston and elevated-temperature sand cast alloys)						
222.0	T61	2.95	2.95	22.1	520-630	129
242.0	T571	2.81	2.81	22.7	525-635	133
	T77	2.81	2.81	22.7	525-635	150
328.0	F	2.70	2.70	21.4	520-600	121
	T6	2.70	2.70	21.4	520-600	---
Aleaciones para émbolo y otros propósitos de elevada temperatura para colada en coquilla (Piston and elevated-temperature alloys - permanent mold castings)						
242.0	T61	2.81	2.81	22.7	525-635	133
332.0	T5	2.76	2.76	20.7	525-585	104
336.0	T551	2.72	2.72	19.8	540-570	117
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: flex-start;"> <div style="width: 15%;"> <div style="background-color: yellow; width: 20px; height: 10px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="background-color: lightblue; width: 20px; height: 10px; margin-bottom: 5px;"></div> </div> <div style="width: 85%;"> <p>Aleación encontrada en el émbolo en estudio</p> <p>Aleación más recomendada para la fabricación de embolo según ASM</p> <p>(a): Para esta aleación es recomendado el moldeo a presión en matriz, sin embargo se adapta bien a los otros métodos de fundición. (Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international. 1990. p.510.)</p> </div> </div>						

Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international.

Densidad y gravedad específica: Una de las razones por las cuales se fabrican los émbolos mediante aleaciones de aluminio, es el hecho de que el aluminio tiene una densidad de solamente 2,7 [g / cm³], aproximadamente un tercio de la densidad del acero, del cobre o latón (7.83, 8.93 y 8,53 [g / cm³] respectivamente); a pesar de su ligereza mantiene una excelente resistencia a la corrosión en la mayoría de los entornos posibles, incluyendo la atmósfera y el agua (sea dulce o salada). Las ilustraciones nos indican que los efectos de las aleaciones sobre el aluminio, no altera de manera significativa la densidad del aluminio, situación que resulta sumamente conveniente. La gravedad específica (densidad relativa) tiene una magnitud similar a la densidad debido a su relación con la densidad absoluta del agua, cuyo valor es de 1[g/cm³] y como se puede observar en las aleaciones de aluminio para la fabricación de émbolos, su gravedad específica es baja.

El coeficiente de expansión térmica (dilatación térmica): es una medida que describe el cambio en la longitud que sufre la aleación cuando cambia su temperatura, es una propiedad física importante que se debe tener en cuenta durante el proceso de fundición o forjado del émbolo y durante su tratamiento térmico. También es un factor a considerar en la dinámica operacional del sistema émbolo-biela-cigüeñal.

El coeficiente de expansión térmica para el aluminio y sus aleaciones es el doble que para el acero, es por eso que se debe tener un cuidado especial al seleccionar la aleación, la cual debe tener un coeficiente de expansión térmica baja.

Los intervalos de fusión de las aleaciones de aluminio son considerablemente más bajos en comparación a las de cobre o las de acero. Los rangos de temperatura de fusión característicos para cada aleación (según sus volúmenes específicos) determinan que cantidad de calor se requiere para que los procesos de fundición o

forja a los que será sometida la aleación se hagan de manera correcta al igual que sus tratamientos térmicos

Conductividad térmica: Es típico que las aleaciones de aluminio muestren una excelente conductividad eléctrica y térmica. La conductividad térmica afecta más que todo la soldabilidad de los metales en general, en el caso de las aleaciones de aluminio la conductividad térmica es cuatro veces la del acero de bajo carbono, esto significa que en el proceso de fundición se debe suministrar calor cuatro veces más rápido para las aleaciones de aluminio que a las de acero en las mismas condiciones de temperatura y cantidad de fundido o conformado, razón por la cual las aleaciones de los émbolos deben tener una alta conductividad térmica.

La conductividad eléctrica aumenta durante los procesos de fabricación del émbolo a medida que aumenta el calor, la aleación tiene una mayor capacidad para conducir la corriente eléctrica, esta fluidez de la corriente en la aleación hace que se acerque o llegue al punto de fusión más rápido.

En general el aluminio aleado tiene una mayor conductividad que el acero, lo que significa que se requieren corrientes mucho más altas para producir el mismo efecto de calentamiento.

Para las aleaciones de aluminio, esta capacidad se expresa como un porcentaje de la norma internacional de cobre recocido (IACS- International Annealed Copper Standard) que establece un estándar basado en la conductividad del cobre recocido comercial.

Resistividad eléctrica: Esta definida por $\rho=R \cdot A/L$, donde "R" es la resistencia en [ohm], "A" es la sección transversal de la aleación en milímetros cuadrados y "L" es su longitud en metros. Su valor describe el comportamiento (resistencia) de

cada aleación frente al paso de corriente. El valor de $(1/58) [\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2 / \text{m}]$ a 20 [°C] es la resistividad equivalente a IACS para un 100% de conductividad.

Cuadro 14. Propiedades de conductividad térmica y eléctrica de aleaciones de aluminio para la fabricación del émbolo por fundición.

Aleación	Tratamiento térmico	Conductividad eléctrica ^(b)		Resistividad eléctrica a 20[°C] [Ohm·mm ² /m]	Calor específico a 20[°C] [J/kg · °C]
		Volumen [%IACS]	Peso [%IACS]		
Aleaciones estándar de uso general para moldeo a presión en matriz (Standard general-purpose alloys - Die casting)					
B390.0 ^(a)	F	27	89	0.065	963
413.0	F	31	102	0.056	963
Aleaciones para émbolos y otros propósitos de elevada temperatura para moldeo a presión en matriz (Piston and elevated-temperatures alloys - Die casting)					
360.0	F	30	99	0.066	963
A360.0	F	29	95	0.057	963
364.0	F	---	---	0.059	963
380.0	F	27	89	----	963
A380.0	F	23	76	0.064	963
384.0	F	22	72	0.075	963
390.0	F	---	---	---	---
	T5	---	---	---	--
Aleaciones para émbolo y otros propósitos de elevada temperatura para fundición en moldes de arena (Piston and elevated-temperature sand cast alloys)					
222.0	T61	33	108	0.052	963
242.0	T571	34	112	0.051	963
	T77	38	125	0.045	963
328.0	F	30	99	0.057	963
	T6	---	---	---	---
Aleaciones para émbolo y otros propósitos de elevada temperatura para colada en coquilla (Piston and elevated-temperature alloys - permanent mold castings)					
242.0	T61	33	108	0.052	963
332.0	T5	26	85	0.066	963
336.0	T551	29	95	0.059	963
<div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="width: 15px; height: 10px; background-color: yellow; margin-right: 5px;"></div> Aleación encontrada en el émbolo en estudio </div> <div style="display: flex; align-items: flex-start; margin-top: 5px;"> <div style="width: 15px; height: 10px; background-color: lightblue; margin-right: 5px;"></div> Aleación más recomendada para la fabricación del émbolo según ASM </div> <p>(a): Para esta aleación es recomendado el moldeo a presión en matriz, sin embargo se adapta bien a los otros métodos de fundición. (Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international. 1990. p.510.)</p> <p>(b): % IACS, porcentaje de la Norma internacional de cobre recocido</p>					

Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international.


El calor específico o (capacidad calorífica específica), permite saber la cantidad de energía que se necesita para aumentar la temperatura de la masa de la aleación, su magnitud no varía de una aleación a otra, pero es un factor que se debe tener en cuenta en el calentamiento de los crisoles en los procesos de fundición y en el precalentamiento de las matrices de la forja, también se ha de tener en cuenta en los posteriores tratamientos térmicos.

Resistencia última a la tracción, a menudo abreviado como resistencia a la tracción o resistencia a la rotura, es la tensión máxima que la aleación puede soportar mientras se estira antes de llegar a la falla. El límite elástico, es la tensión máxima que la aleación puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes. Si se aplican tensiones superiores a este límite, el material experimenta deformaciones permanentes y no recupera su forma original al retirar las cargas de la coquilla o de las matrices, estos valores se deben tener en cuenta sobre todo en el cálculo de la dinámica del sistema émbolo-biela-cigüeñal conductividad.

La dureza es la oposición que ofrecen la aleación a la penetración, la abrasión, el rayado, etc., es un tema que se trató ampliamente en la sección 3.4.4. Mediante los tratamientos térmicos, se busca que la aleación logre magnitudes adecuadas de dureza y resistencia que permitan al émbolo tener propiedades mecánicas adecuadas para su funcionamiento.

El envejecimiento natural, por ejemplo aumenta significativamente la dureza y resistencia del material, con un aumento insignificante en volumen, pero cuando el envejecimiento es artificial el aumento de la dureza y la resistencia puede llevar a aumentos indeseables de volumen si no se hace un buen tratamiento térmico. Por tanto el émbolo debe tratarse térmicamente de acuerdo a los parámetros de dureza y resistencia de la aleación seleccionada para evitar estos indeseables efectos.

Cuadro 15. Propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio recomendadas para la fabricación del émbolo por fundición.

Aleación	Tratamiento térmico	Resistencia a la rotura [ksi]	Limite elástico [ksi]	Dureza Brinell HB ^(b)
Aleaciones estándar de uso general para moldeo a presión en matriz (Standard general-purpose alloys - Die casting)				
B390.0^(a)	F	46	36	120
413.0	F	43	21	80
Aleaciones para émbolos y otros propósitos de elevada temperatura para moldeo a presión en matriz (Piston and elevated-temperatures alloys - Die casting)				
360.0	F	44	25	75
A360.0	F	46	24	75
364.0	F	43	29	---
380.0	F	46	23	80
A380.0	F	47	23	80
384.0	F	48	24	85
390.0	F	40.5	35	---
	T5	---	---	---
Aleaciones para émbolo y otros propósitos de elevada temperatura para fundición en moldes de arena (Piston and elevated-temperature sand cast alloys)				
222.0	T61	41	40	115
242.0	T571	40	34	105
	T77	30	23	75
328.0	F	25	14	45-75
	T6	---	---	---
Aleaciones para émbolo y otros propósitos de elevada temperatura para colada en coquilla (Piston and elevated-temperature alloys - permanent mold castings)				
242.0	T61	47	42	110
332.0	T5	36	28	105
336.0	T551	36	28	105
<p> Aleación encontrada en el émbolo en estudio</p> <p> Aleación más recomendada para la fabricación del embolo según ASM</p> <p>(a): Para esta aleación es recomendado el moldeo a presión en matriz, sin embargo se adapta bien a los otros métodos de fundición. (Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international. 1990. p.510.)</p> <p>(b): Prueba hecha bajo 500 kg de carga de fuerza, mediante una bola de 10 mm.</p>				

Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international.

Las aleaciones de aluminio para moldeo tienen muchos aspectos en común con las aleaciones de aluminio para conformado. En ambos casos para lograr las propiedades deseadas, se les adiciona elementos químicos a la matriz del aluminio y se le someten a tratamientos térmicos. Por ejemplo, para el moldeo por gravedad, la colabilidad depende de la capacidad de fluidez que la aleación tiene para llenar los moldes, de la resistencia que tiene para no sufrir fisuras mientras esté caliente durante y después de la solidificación, también depende del sistema de alimentación con que cuente el proceso en la solidificación para evitar o minimizar la formación de vacíos que contraigan la pieza. Para el moldeo a presión en matriz, los criterios de colabilidad son la resistencia a la fisuración en caliente, la fluidez, el soldeo en la matriz (que está muy influenciado por la composición química de la aleación) y el acabado superficial.

Lo que realmente diferencia las aleaciones de moldeo de las de conformado es la colabilidad (castability). La mayoría de los productos típicos de forjado forman piezas con secciones transversales básicas (redondas o rectangulares) con gran uniformidad en su solidificación; las aleaciones de moldeo por su parte pueden formar piezas de grandes complejidades, pero tiene un comportamiento variable de solidificación que depende del proceso de fundición y la calidad con que se efectuó. El término "colabilidad" no está formalmente definido. Se utiliza para estimar la idoneidad con que la composición debe estar para que durante el proceso de solidificación, la pieza quede libre de defectos y su formación sea completa y sana.



La fluidez también es un factor difícil de definir, es una función compleja que se puede cuantificar y definir matemáticamente. La fluidez es más fuertemente afectada cuando la aleación está a temperaturas dentro del área "liquidus" del diagrama de fases.

Cuadro 16. Valoración de colabilidad de las aleaciones recomendadas para la fabricación del émbolo por fundición

Aleación	Características de la aleación				
	Resistencia a agrietamiento en caliente ^(b)	Tendencia a la contracción ^(c)	Fluidez ^(d) / capacidad de llenado en el molde	Presión de estanqueidad ^(e)	Anti-soldado de matriz ^(f)
Aleaciones estándar de uso general para moldeo a presión en matriz (Standard general-purpose alloys - Die casting)					
B390.0 ^(a)	4	---	1	4	2
413.0	1	2	1	1	1
Aleaciones para émbolos y otros propósitos de elevada temperatura para moldeo a presión en matriz (Piston and elevated-temperatures alloys - Die casting)					
360.0	1	1	3	2	2
A360.0	1	1	3	2	2
364.0	2	3	1	2	---
380.0	2	1	2	2	1
A380.0	2	2	2	2	1
384.0	2	2	1	3	2
390.0	3	2	1	4	2
Aleaciones para émbolo y otros propósitos de elevada temperatura para fundición en moldes de arena (Piston and elevated-temperature sand cast alloys)					
222.0	4	4	3	4	---
242.0	4	3	4	4	---
328.0	1	---	1	2	---
Aleaciones para émbolo y otros propósitos de elevada temperatura para colada en coquilla (Piston and elevated-temperature alloys - permanent mold castings)					
332.0	1	2	1	2	---
336.0	1	2	2	3	---
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: yellow; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="font-size: small;">Aleación encontrada en el émbolo en estudio</div> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: blue; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div style="font-size: small;">Aleación más recomendada para la fabricación de embolo según ASM.</div> </div>					
Clasificaciones: 1, excelente; 2, muy bueno; 3, bueno; 4, aceptable; 5, pobre.					
<p>(a): Para esta aleación es recomendado el moldeo a presión en matriz, sin embargo se adapta bien a los otros métodos de fundición. (Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international. 1990. p.510.)</p> <p>(b) Capacidad de aleación de soportar tensiones de contracción mientras se enfría abruptamente después de estar en un rango alto de temperatura.</p> <p>(d) Capacidad de aleación líquida para fluir fácilmente en un molde y para llenar secciones delgadas.</p> <p>(c) Disminución en el volumen de la pieza aleada debido al proceso de enfriamiento en el proceso de solidificación.</p> <p>(e) Presión adecuada para controlar la fluidez de la aleación</p> <p>(f) Capacidad de la aleación a no soldarse con la matriz.</p>					

Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international.

Cuadro 17. Características de acabado de las aleaciones recomendadas para la fabricación del émbolo por fundición

Aleación	Características de acabado			
	Maquinabilidad ^(b)	Soldabilidad ^(c)	Pulido	Protección mediante anodizado ^(d)
B390.0 ^(a)	5	---	5	---
413.0	4	---	5	5
Aleaciones para émbolos y otros propósitos de elevada temperatura para moldeo a presión en matriz (Piston and elevated-temperatures alloys - Die casting)				
360.0	3	---	3	3
A360.0	3	---	3	3
364.0	3	---	---	---
380.0	3	---	3	3
A380.0	3	---	3	3
384.0	4	---	3	4
390.0	5	---	5	3
Aleaciones para émbolo y otros propósitos de elevada temperatura para fundición en moldes de arena (Piston and elevated-temperature sand cast alloys)				
222.0	1	3	2	3
242.0	2	3	2	4
328.0	3	1	3	2
Aleaciones para émbolo y otros propósitos de elevada temperatura para colada en coquilla (Piston and elevated-temperature alloys - permanent mold castings)				
332.0	3	2	4	---
336.0	3	2	4	---
<p> Aleación encontrada en el émbolo en estudio</p> <p> Aleación más recomendada para la fabricación de embolo según ASM.</p>				
Clasificaciones: 1, excelente; 2, muy bueno; 3, bueno; 4, aceptable; 5, pobre.				
<p>(a): Para esta aleación es recomendado el moldeo a presión en matriz, sin embargo se adapta bien a los otros métodos de fundición. (Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international. 1990. p.510.)</p> <p>(b) Valoración basado en la facilidad de corte, características de la viruta, la calidad del acabado, y vida útil de la herramienta.</p> <p>(c) Con base en la capacidad que tiene el material a soldarse en fusión con una varilla de relleno de misma aleación.</p> <p>(d) Mejoramiento de la superficie por formación de un recubrimiento que controla el óxido en los alojamientos y la falda del émbolo mediante tratamiento electroquímico.</p>				

Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international.

Cuadro 18. Características de desempeño de las aleaciones recomendadas para la fabricación del émbolo por fundición

Aleación	Características de desempeño		
	Resistencia a la corrosión (b)	Resistencia en temperaturas elevadas	Resistencia al desgaste
B390.0 ^(a)	5	3	1
413.0	2	3	3
Aleaciones para émbolos y otros propósitos de elevada temperatura para moldeo a presión en matriz (Piston and elevated-temperatures alloys - Die casting)			
360.0	2	1	2
A360.0	3	1	2
364.0	4	---	---
380.0	3	3	4
A380.0	3	3	4
384.0	3	2	2
390.0	3	3	1
222.0	4	1	---
242.0	4	1	---
328.0	3	2	---
332.0	3	1	3
336.0	3	1	---
<p> Aleación encontrada en el émbolo en estudio Aleación más recomendada para la fabricación de embolo según ASM. </p>			
Clasificaciones: 1, excelente; 2, muy bueno; 3, bueno; 4, aceptable; 5, pobre.			
<p>(a): Para esta aleación es recomendado el moldeo a presión en matriz, sin embargo se adapta bien a los otros métodos de fundición. (Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international. 1990. p.510.)</p> <p>(b) Sobre la base de la resistencia de aleación en ensayo estándar por cámara de niebla salina.</p>			

Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international.

Las composiciones más fluidas en las fundiciones convencionales son las que presentan una composición eutéctica o casi eutéctica y para mejorar la alimentación de la aleación dentro de los moldes se recomienda rangos solidus-liquidus más estrechos, lo cual se logra con un control de temperatura y del porcentaje de la aleación secundaria. La tendencia de agrietamiento durante la solidificación y después de esta, depende de la resistencia que tenga la aleación a elevadas temperaturas y en velocidad de solidificación en el proceso de la fundición.

Las calificaciones de colabilidad más utilizadas son productos de consensos basados en la experiencia práctica, estas determinan si el material tiene buenas o pobres características de fundición, para las aleaciones recomendadas en la fabricación del émbolo, sus calificaciones al respecto y otros factores a considerar se resumen en las ilustraciones 16, 17 y 18.

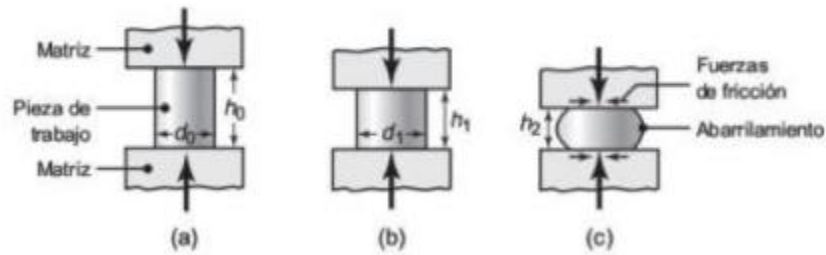
ANEXO J. Opciones de procesos de conformado y de selección de aleaciones de aluminio para la fabricación del émbolo

Para la fabricación del émbolo por conformado se usa el proceso de forjado, donde la pieza se conforma por deformación plástica mediante la fuerza de compresión ejercida por matrices accionadas. Este tipo de proceso es una de las operaciones más importantes y antiguas en el tratamiento de metales, se remontan a los primeros trabajos realizados en joyería y fabricaciones de monedas.

En la actualidad, el proceso de forjado incluye la conformación de piezas de trascendencia industrial como los rotores de turbinas y todas aquellas que requieren grandes lotes producción manteniendo precisión en sus acabados como es el caso de la fabricación de engranes, tornillos y remaches. El proceso de forjado depende del tipo de matriz con que se efectúa la operación. Si el forjado se hace con matriz abierta (forja libre), la deformación del metal no está sujeta a su forma o tamaño. Una manera de representar este proceso es la mostrada en la ilustración 64 donde la pieza a conformar se coloca entre dos matrices planas que mediante la compresión reducen su altura, este proceso también se conoce como recalado.

Obviamente el émbolo está sujeto a la forma y tamaño con que se debe fabricar, es por esto que su conformado se debe hacer mediante compresión por matriz cerrada. En este tipo de forja se coloca la pieza entre dos matrices que al cerrarse conforman una cavidad con la forma y dimensiones que se desean obtener del émbolo. Conforme avanza el proceso, la aleación se va deformando y adaptando a las matrices hasta que adquiere la geometría.

Ilustración 31. Forjado en matriz abierta



(a) Pieza a conformar recalcada entre dos matrices planas. (b) Deformación uniforme de la pieza si no existiese fricción con las matrices. (c) Deformación de la pieza donde se produce un abarrilamiento debido a la fricción entre la pieza y las matrices que le comprimen.

Fuente: KALPAKJIAN, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. México: Pearson Educación. 2002. p.374.

Proceso de conformado del émbolo mediante matriz cerrada

En el proceso de forjado por estampa, se selecciona la pieza de trabajo que se va conformar según sea la necesidad específica. Para este caso la pieza es una aleación para forja con dimensiones cilíndricas cercanas a la geometría exterior del émbolo pero ligeramente más grandes.

Las aleaciones de forja se comercializan en barras de aluminio aleado generalmente de tres metros de longitud (ilustración 65a), una sierra de discos mecánica corta la barra a longitudes que pueden variar según sea la necesidad mediante un sistema de control que determina el desplazamiento de la barra a diferentes intervalos (ilustración 65b), las piezas a conformar caen en un contenedor en espera de someterse al proceso de forja (ilustración 65c).

La pieza de trabajo una vez cortada se calienta en hornos del tipo eléctrico, de resistencia, de inducción, de alta frecuencia o de combustible líquido o gaseoso, los rangos de temperatura utilizados pueden ser los que están expuestos en el

cuadro 19. Esta fase de calentamiento es necesaria, a pesar de que la aleación haya sido previamente calentada para su preformado pues se debe reducir el choque térmico lo más que se pueda. Una vez la pieza cilíndrica ya este caliente, se coloca en la matriz de la prensa o martinete.

Ilustración 32. Pieza de trabajo para el proceso de forja.

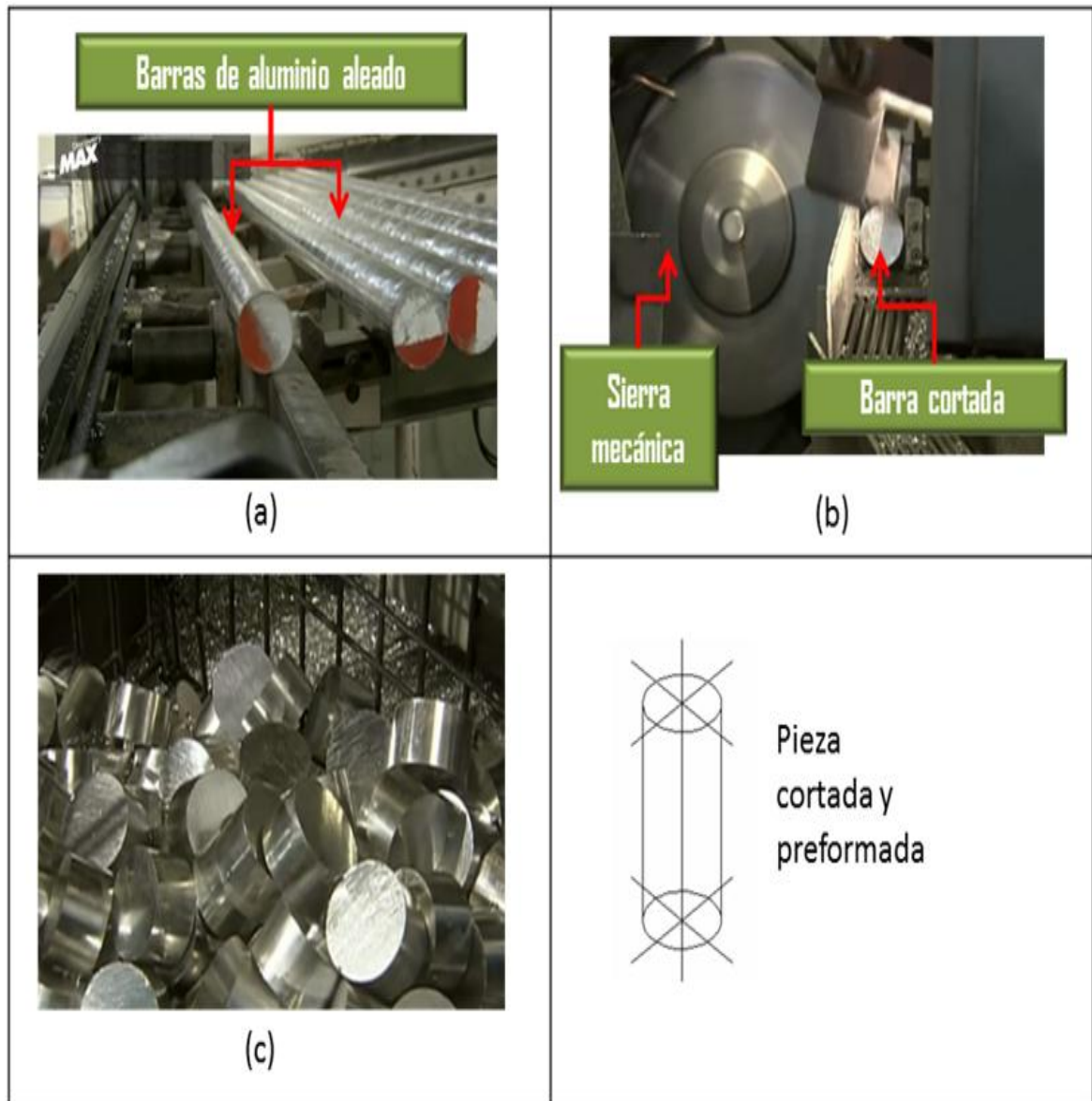
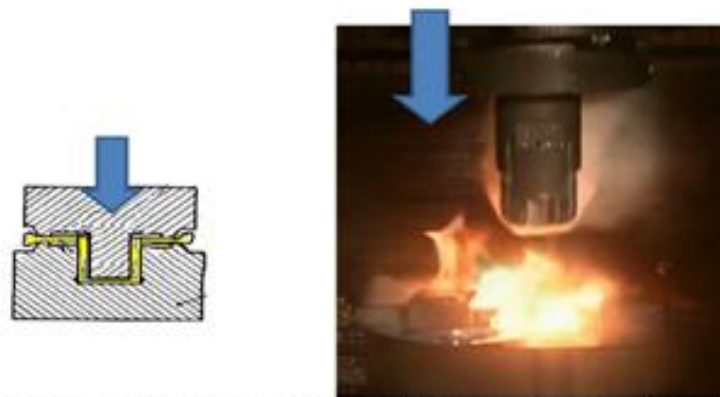


Ilustración 33. Proceso de forja para la fabricación del émbolo



a.) Iniciación de forja en matriz cerrada



b.) Proceso de conformado de la aleación (los dados se mantienen a altas temperaturas)



c.) Émbolo obtenido por forjado

Cuadro 19. Metales empleados en la forja en caliente.

Material	Rango de temperatura aproximada en grados Celsius	Facilidad de forjado
Aluminio y sus aleaciones	400-550	1
Magnesio y sus aleaciones	250-350	2
Cobre y sus aleaciones	600-900	3
Acero	1100-1250	4 o 5
Clasificaciones: 1, excelente; 2, muy bueno; 3, bueno; 4, aceptable; 5, pobre.		

Ya obtenida la pieza de trabajo, esta se coloca entre la dado inferior (inmóvil) y el dado superior (móvil), la aleación va tomando la forma de la cavidad de la matriz cerrada, los dados también se calientan a la misma temperatura del cilindro, la razón por la cual este proceso se realiza a temperaturas elevadas es para mejorar la ductibilidad de la aleación y disminuir fuerzas. Durante la deformación parte del material fluye hacia el exterior formando rebaba de forja, esta rebaba es muy importante en el proceso de forjado por matriz cerrada, pues debido a la alta temperatura y resistencia a la fricción resultantes, se restringe el flujo de la aleación hacia el exterior de la matriz, obligando a que la deformación plástica se realice en el interior de la matriz, pues la aleación tiende a fluir donde encuentre menos resistencia, el proceso se muestra en ilustración 60.

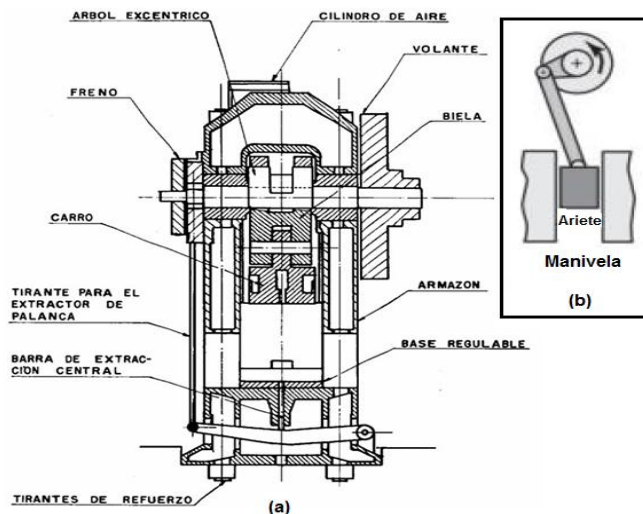
Máquinas para el proceso de forjado

Las máquinas de compresión utilizadas para el proceso de forjado básicamente se pueden dividir en dos grupos: máquinas que trabajan por impactos repetitivos mediante martinetes o martillos y máquinas que trabajan por presión, conocidas como prensas. Las prensas son las máquinas que usualmente se usan en el proceso de forjado de émbolos.

Prensas mecánicas

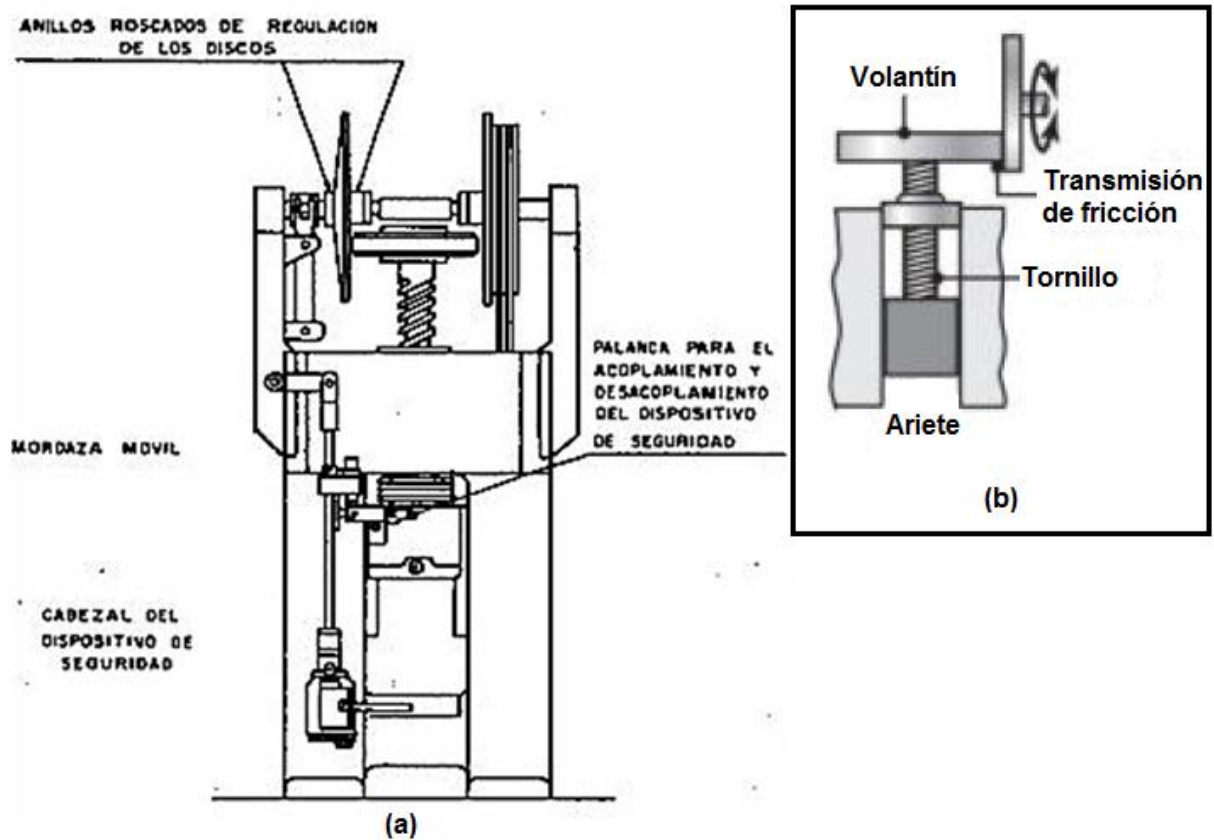
Existen de dos tipos, el primero es excéntrico donde el impulso en la mayoría de estas máquinas se genera mediante un mecanismo biela-manivela que transfiere su movimiento circular en movimiento recíproco como ocurre en los motores de combustión interna. Un volante acumula esa energía, la cual se usa sólo durante una pequeña parte de la revolución del eje excéntrico y es donde ocurre la deformación del émbolo mediante la matriz. La capacidad de la prensa excéntrica varía de 300 a 12000 toneladas (ilustración 61). El segundo tipo de prensa mecánica es de tornillo donde la carga necesaria para el forjado se transmite por medio de un tornillo vertical conectado al ariete que se detiene cuando se disipa la energía obtenida mediante un volantín accionado por un motor eléctrico, la capacidad de esta prensa puede variar de 160 a 31500 toneladas (ilustración 62). En general las prensas mecánicas varían su velocidad en rangos de 0.06 a 1.5 metros por segundos.

Ilustración 34. Prensa mecánica excéntrica



Fuente: (a) SCHARER, U. Ingeniería de manufactura. México: CECSA. 1984. p.178. (b) KALPAKJIAN, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. México: Pearson Educación. 2002. p.391.

Ilustración 35. Prensa mecánica por tornillo



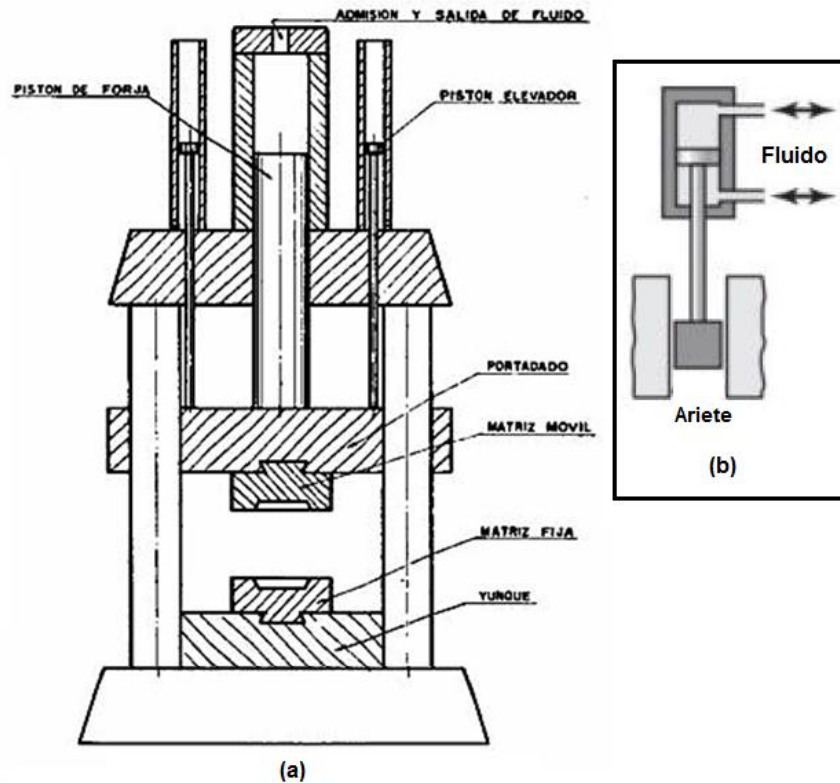
Fuente: (a) SCHARER, U. Ingeniería de manufactura. México: CECSA. 1984. p.179. (b) KALPAKJIAN, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. México: Pearson Educación. 2002. p.391.

Prensas hidráulicas

Estas máquinas funcionan a velocidades constantes y su carga es restringida, esto significa que se detiene si excede su carga requerida, por tanto su velocidad se puede controlar en magnitudes que varían de 0.06 a 0.3 metros por segundo, en general son más lentas y más caras que las prensas mecánicas, pero requieren menos mantenimiento. Su capacidad de prensado puede llegar a las 50000 toneladas. El sistema consta de un marco de forja con dos o cuatro

columnas y una serie de sistema de émbolos que se accionan por bombas hidráulicas accionadas por un motor eléctrico (ilustración 36).

Ilustración 36. Prensa hidráulica.



Fuente: (a) SCHARER, U. Ingeniería de manufactura. México: CECOSA. 1984. p.180. (b) KALPAKJIAN, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. México: Pearson Educación. 2002. p.391.

Ventajas del proceso de forja con matriz cerrada.

- Proporciona a la pieza niveles de compactación en su composición que difícilmente se pueden lograr en un proceso de fundición. Es por esto que los

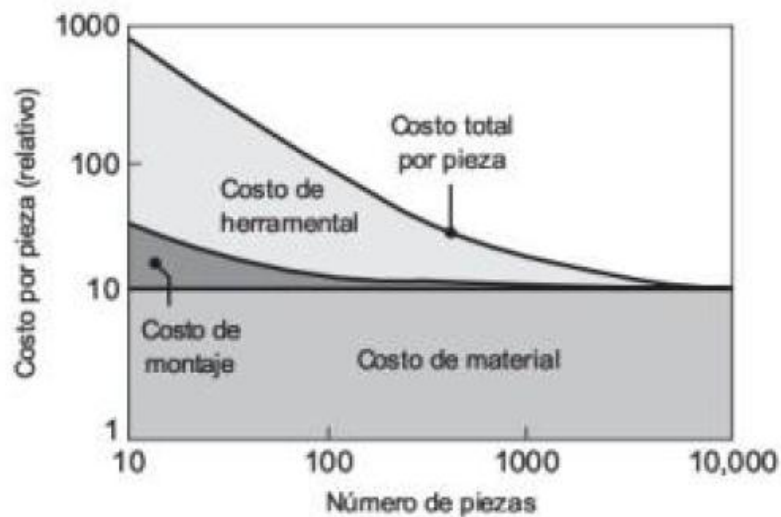
émbolos forjados son más fuertes y resistentes que los fundidos, lo cual los hacen ideales para condiciones extremas de operatividad.

- Los sistemas de forja generalmente manejan un control adecuado de la rebaba, logrando la fabricación de émbolos con un nivel muy bajo de desperdicio de material.
- Debido a las condiciones a las que serán sometidas, las matrices con que se forjan los émbolos poseen un proceso de manufactura superior a las matrices de fundición, lo que genera que las piezas resultantes obtengan muy buenos acabados superficiales y precisión dimensional.
- Los sistemas de producción mediante forjado se generan a altas velocidades de producción, superiores a la mayoría de procesos de fundición.

Desventajas del proceso de forja con matriz cerrada

- Se debe tener datos precisos de la forjabilidad del material, si la matriz produce una presión que sobrepase la capacidad de deformado de la aleación, la superficie sufrirá agrietamiento y no será útil. Se debe tener un control exacto de las cargas aplicadas sobre la aleación, ni tan alta que provoque agrietamiento ni tan baja que permita porosidad.
- Los costos de las matrices y en maquinaria de prensado son muy altos pues se debe hacer un análisis riguroso del material que se va a usar como matriz y de los procesos posteriores a que se va a someter (tratamiento térmico y acabado), así como de su diseño. En general no es un proceso nada económico y más si la producción es pequeña. Para hacerse a una idea del costo del proceso se puede observar la ilustración 64 que hace una relación entre el costo del proceso y la producción de piezas a producir.

Ilustración 37. Costo de forjado según el número de piezas.



KALPAKJIAN, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. México: Pearson Educación. 2002. p.393.

- El control de temperatura durante el proceso debe efectuarse con cuidado, de lo contrario la aleación puede sufrir agrietamiento por calor provocado por los ciclos de temperatura.

Opciones de aleaciones para la fabricación de émbolos para el proceso de forjado

Según la ASM para la fabricación de émbolos mediante conformado por forja solo se recomiendan tres series de aleaciones: la 4032-T6, la 2218-T61 y la 2618-T61. Al igual que en la fundición, a las piezas resultantes se les hace operaciones de acabado adicionales, generalmente mediante el tratamiento térmico con el fin de modificar sus propiedades y también se le somete a proceso de maquinado para crear las ranuras de los anillos, para obtener exactitud superficial y un buen

acabado dimensional indispensable en el en la fabricación del émbolo. Sus principales propiedades se resumen en las tablas 20, 21, 22, 23 y 24.

➤ Aleación 4032

Aplicaciones: Los usos típicos para esta aleación son la fabricación de émbolos para exigentes condiciones de operatividad y de otras piezas de servicio en condiciones de alta temperatura.

La razón por la que esta aleación se adapta bien a la producción de émbolos forjados es que posee un bajo coeficiente de expansión térmica, alta resistencia al desgaste y porque se puede tratar térmicamente, lo cual es una característica atípica en la familia de las aleaciones 4xxx.

➤ Aleaciones 2218 y 2618

Aplicaciones: Se utiliza para la realización de piezas forjadas de alta resistencia entre las que se destacan: émbolos para motores de aeronaves y para motores diésel de alto cilindraje, culatas de motores de aeronaves, impulsores y anillos para motores de reacción o jet.

Estas aleaciones como la mayoría de las de la familia 2xxx generalmente deben tratarse térmicamente para tener la propiedades que le caracterizan, las cuales incluso superan a las del acero en bajo carbono, también requieren una mecanización especial a través de superabrasivos y herramientas de dureza excepcional por la naturaleza de su composición y el proceso de conformado al que fue sometido.

Cuadro 20. Composición química de las aleaciones de aluminio recomendadas para la fabricación de émbolos mediante forjado.

Aleación	Composición química en porcentaje en peso								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
2218	0.9	1.0	3.5-4.5	0.2	1.2-1.8	0.1	1.7-2.3	0.25	---
2618	0.1-0.25	0.9-1.3	1.9-2.7	---	1.3-1.8	---	0.9-1.2	0.1	0.04-0.10
4032	11.0-13.5	1.0	0.5-1.3	--	0.8-1.3	0.1	0.5-1.3	0.25	---

Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international.

Cuadro 21. Propiedades térmicas y eléctricas de las aleaciones recomendadas para la fabricación del émbolo mediante forjado

Aleación	Tratamiento térmico	Coeficiente promedio de la expansión térmica ^(a) [$\mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$]	Intervalo de fusión aproximado (b)(c) [$^\circ\text{C}$]	Conductividad térmica a 25 [$^\circ\text{C}$]	Conductividad eléctrica at 20 $^\circ\text{C}$		Resistividad eléctrica a 20 [$^\circ\text{C}$]
				[$\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$]	Volumen [%IACS]	Peso [%IACS]	[$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]
2218	T61	22.3	505-635	154	40	126	0.043
2618	T61	22.3	550-638	147	37	120	0.0465
4032	T6	19.4	532-570	138	35	116	0.05

(a) El promedio del coeficiente se basa en temperaturas de 20 a 100 [$^\circ\text{C}$]

(b) Los rangos de fusión que se indican se aplican a las aleaciones de forjado de 6,35 mm de espesor o mayor.

(c) Basado en la composición típica de las aleaciones indicadas.

Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international.

Cuadro 22. Rango de temperatura para forjado y propiedades mecánicas de las aleaciones para la fabricación del émbolo mediante forjado.

Aleaciones y tratamiento térmico	Densidad [g/cm ³]	Rango de temperatura para forjado [°C]	Resistencia a la tracción [MPa] (límite elástico)	Dureza HB ^(a)	Resistencia al esfuerzo cortante último [MPa]	Límite de resistencia de fatiga [MPa]
2218-T61	2.82	---	225	95	205	---
2618-T61	2.76	410-455	370	115	260	125
4032-T6	2.68	415-460	315	120	260	110

(a) Mediante una carga de 500 [kg] mediante una esfera de 10 [mm].

Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international.

Cuadro 23. Calor específico de las aleaciones recomendadas para la fabricación del émbolo mediante forjado.

Aleación	Calor específico
2218	871 [J/kg·K] (0.208 [Btu/lb·°F]) a 20[°C] (68[°F])
2618	875[J/kg·K] a 20[°C] (68[°F])
4032	864 [J/kg · K] (0.206 [Btu/lb·°F]) a 20 [°C] (68 [°F])

Fuente: ASM Handbook volume II: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. USA: Ed. ASM international.

ANEXO K. Cálculos de las dimensiones del fundido resultante

De acuerdo a la metrología que se le hizo al émbolo, cuando este termine de mecanizarse su superficie externa tendrá una conocida apenas perceptible donde la cabeza del émbolo medirá 39.85 [mm] y el diámetro de la parte inferior de la falda del émbolo es de 39,95 [mm], esta última medida es la que tomaremos como primera referencia para la realización del molde en madera, para evitar agrietamientos en la fundición del émbolo durante el enfriamiento, se debe tener en cuenta ciertas tolerancias a la contracción del material durante el proceso de solidificación, en particular para las aleaciones de aluminio, la tolerancia normal a la contracción es de 1.3%²⁶ si se funde mediante moldes de arena. Además casi todos los fundidos de este tipo se deben maquinar hasta cierto grado a fin de que la pieza sea funcional, para ello se deja material adicional que llamaremos tolerancia de maquinado, normalmente varía en un rango de 1,5 a 3 [mm]²⁷. De modo que seleccionamos las dimensiones de la base del molde de acuerdo a lo anteriormente mencionado.

Sabiendo que:

$$d_{\text{émbolo}} = 39,95[\text{mm}]$$
$$\text{Tolerancia}_{\text{mecanizado}} = 3[\text{mm}]$$

La tolerancia por contracción es del 1,3%, entonces

$$\text{Tolerancia}_{\text{contracción}} = d_{\text{émbolo}} * \frac{1,3}{100}$$

²⁶ Fuente: KALPAKJIAN, S. Manufactura, ingeniería y tecnología. México: Pearson Educación. 2002. p.326.

²⁷ Fuente: GROOVER, M. Fundamentos de manufactura moderna. México: McGraw-Hill. 2007. p. 243.

$$\text{Tolerancia}_{\text{contracción}} = 0,5194[\text{mm}]$$

$$d_{\text{émbolo fundido}} = d_{\text{émbolo}} + \text{Tolerancia}_{\text{mecanizado}} + \text{Tolerancia}_{\text{contracción}}$$

$$d_{\text{émbolo fundido}} = 43,47[\text{mm}]$$

El dato anterior el diámetro base que debe tener el émbolo cuando sale del proceso de fundido. Como en el proceso de mecanizado tendremos que reducir esta magnitud hasta $d_{\text{émbolo}}$, primero realizaremos un mecanizado previo con una cuchilla de desbaste rapido, para posteriormente realizarle un desbaste final mas fino, cuya magnitud es la siguiente:

$$d_{\text{mecanizado previo}} = d_{\text{émbolo}} + \frac{d_{\text{émbolo fundido}} - d_{\text{émbolo}}}{2}$$

$$d_{\text{mecanizado previo}} = 41,71[\text{mm}]$$

Como el dimensionamiento es volumetrico tendremos que hacer calculos similares para la altura del embolo teniendo en cuenta las tolerancias de contracion y mecanizado explicadas anteriormente.

Sabiendo por medio de la metrologia del émbolo que su altura maxima es:

$$h_{\text{émbolo}} = 37,5[\text{mm}]$$

Entonces

$$\text{Tolerancia}_{\text{contracción h}} = h_{\text{émbolo}} * \frac{1,3}{100}$$

$$\text{Tolerancia}_{\text{contracción h}} = 0,4875[\text{mm}]$$

$$h_{\text{émbolo fundido}} = h_{\text{émbolo}} + \text{Tolerancia}_{\text{mecanizado}} + \text{Tolerancia}_{\text{contracción h}}$$

$$h_{\text{émbolo fundido}} = 40,99[\text{mm}]$$

ANEXO L. Dimensiones del molde en madera para el moldeo en arena

Ilustración 38. Molde (A) en madera para el proceso de fundición del émbolo

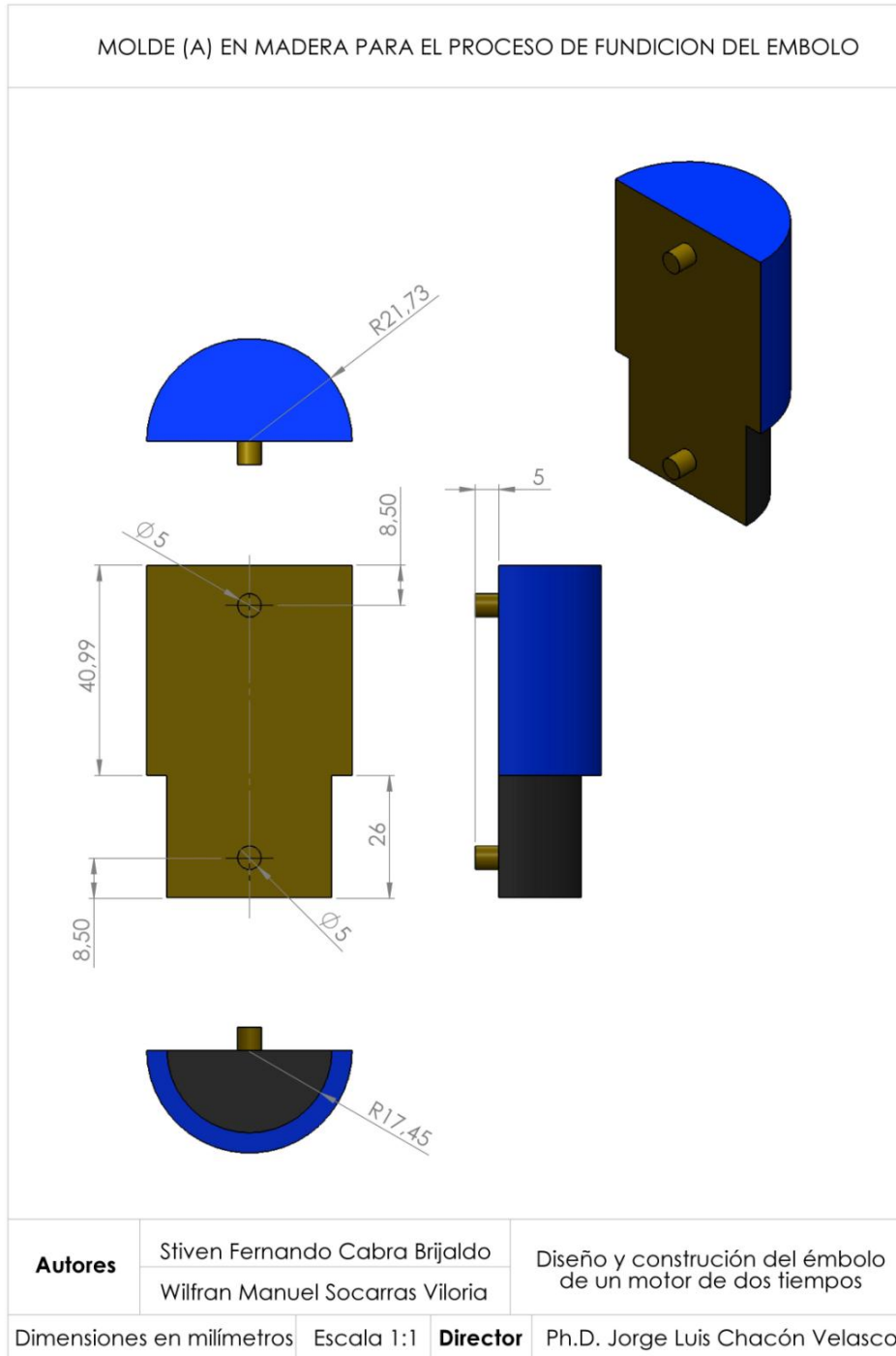
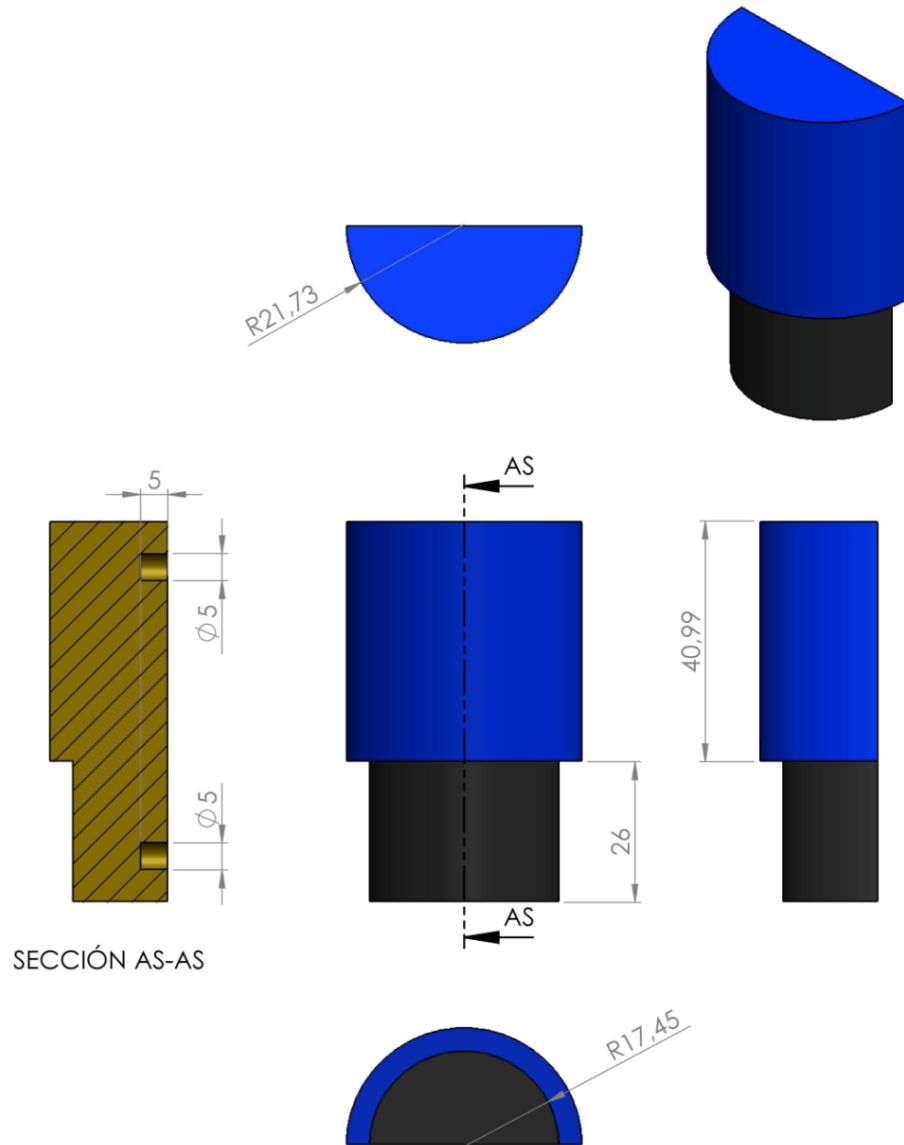


Ilustración 39. Molde (B) en madera para el proceso de fundición del émbolo

MOLDE (B) EN MADERA PARA EL PROCESO DE FUNDICION DEL EMBOLO



SECCIÓN AS-AS

Autores	Stiven Fernando Cabra Brijaldo	Diseño y construcción del émbolo de un motor de dos tiempos
	Wilfran Manuel Socarras Viloria	
Dimensiones en milímetros	Escala 1:1.5	Director Ph.D. Jorge Luis Chacón Velasco

ANEXO M. Dimensionamiento y desarrollo del macho del molde

Ilustración 40. Molde (a) en madera para moldear el macho

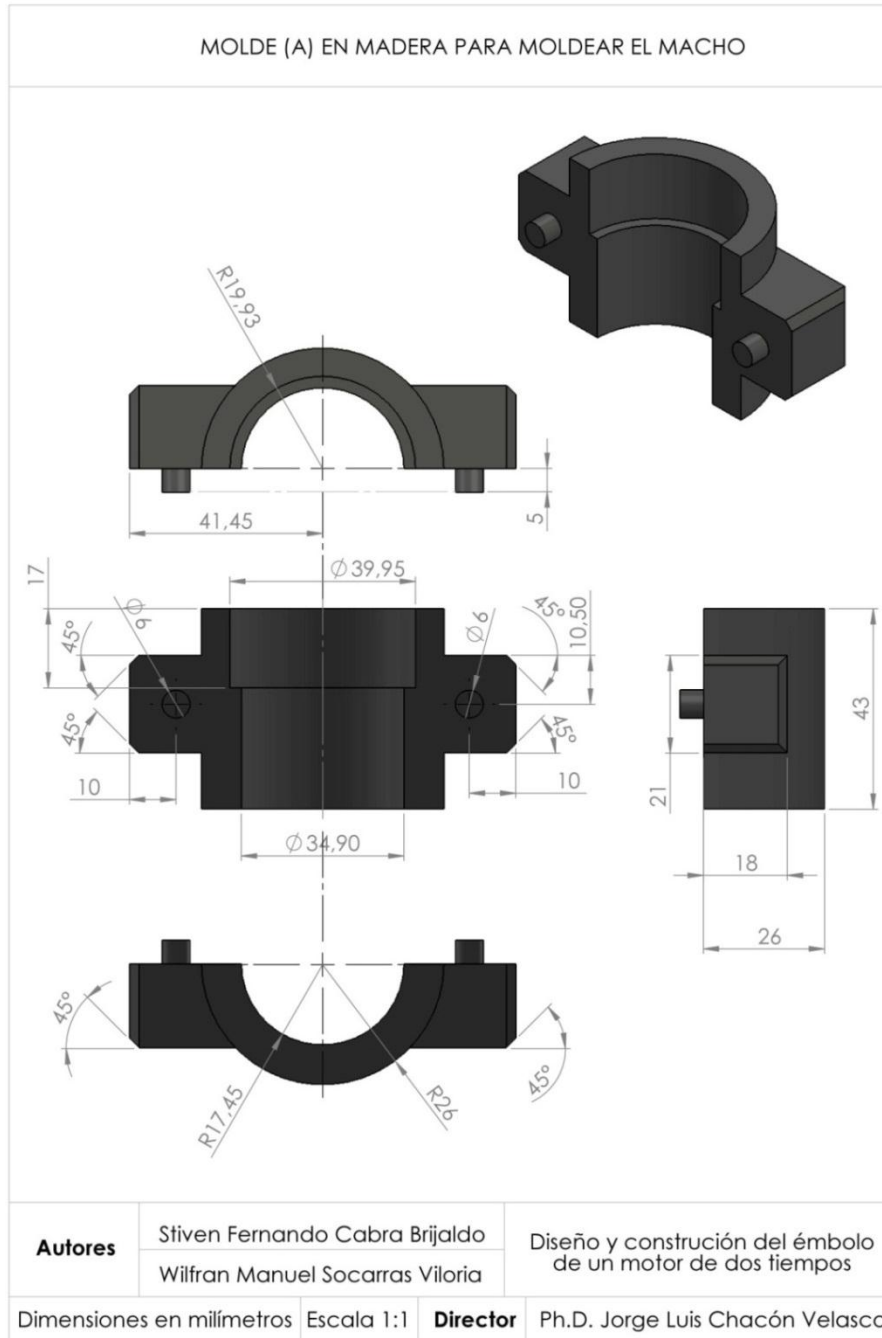


Ilustración 41. Molde (b) en madera para moldear el macho

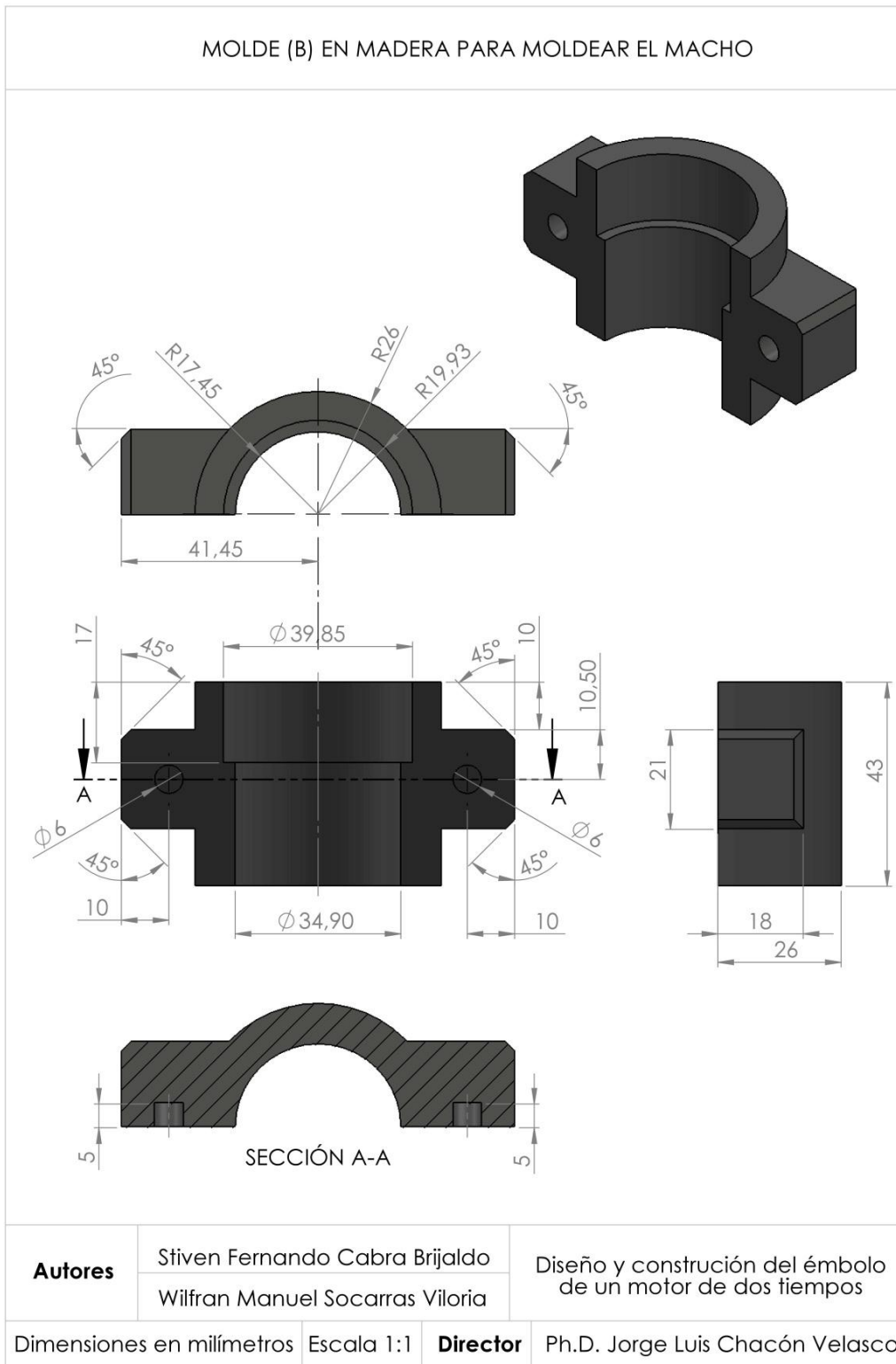


Ilustración 42. Tapones para los alojamientos del bulón

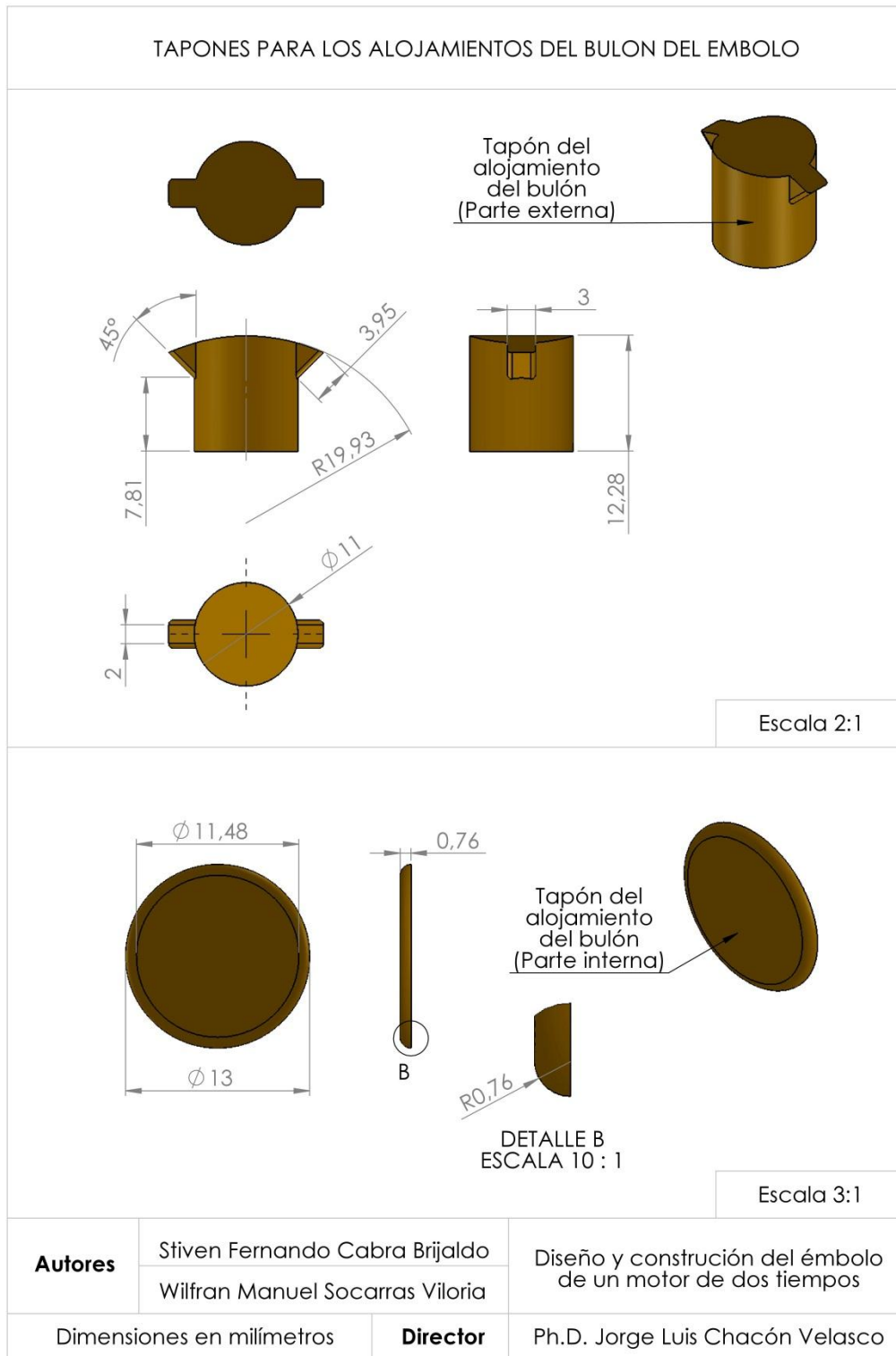


Ilustración 43. Descripción del proceso de elaboración del macho

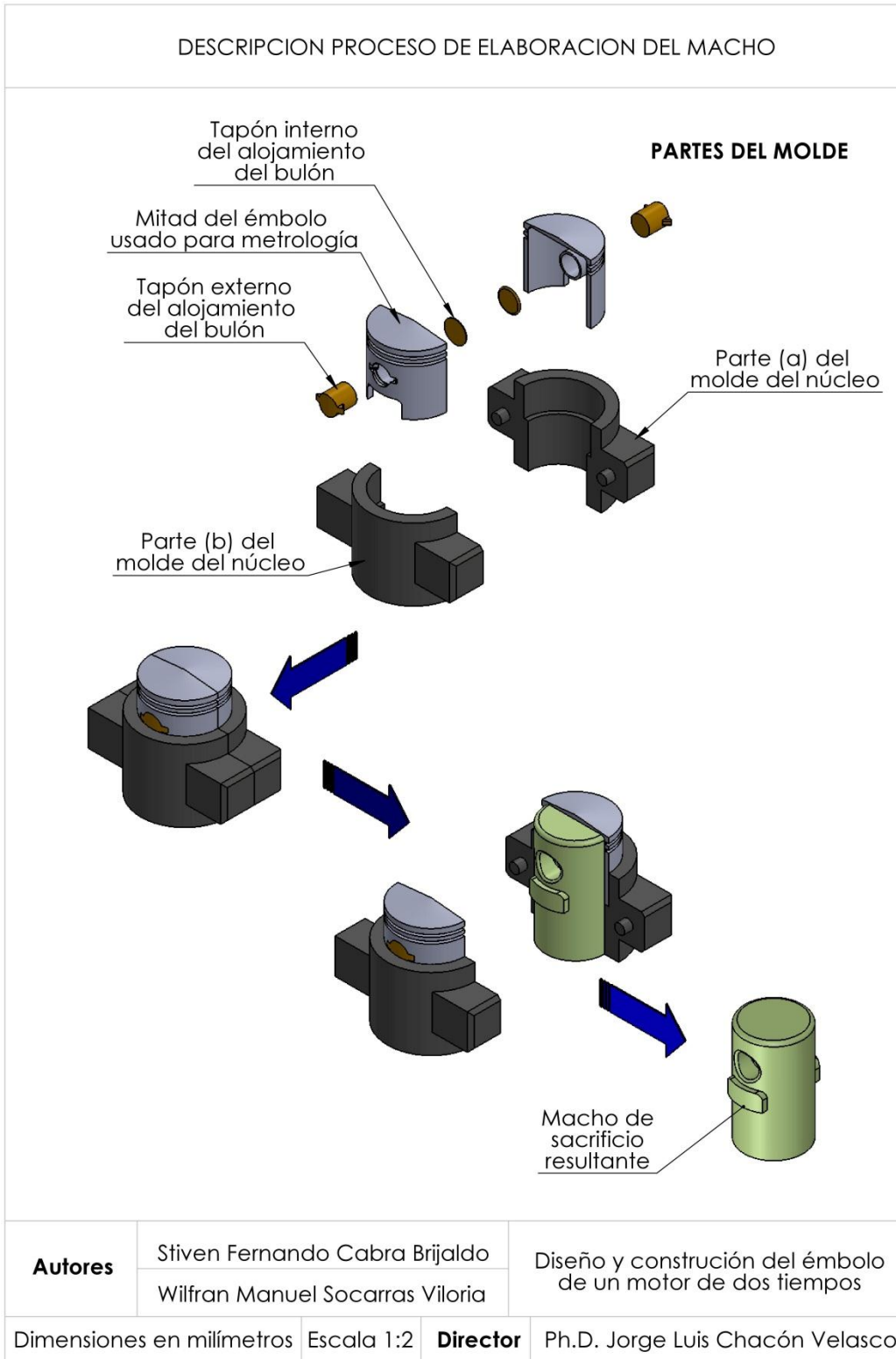
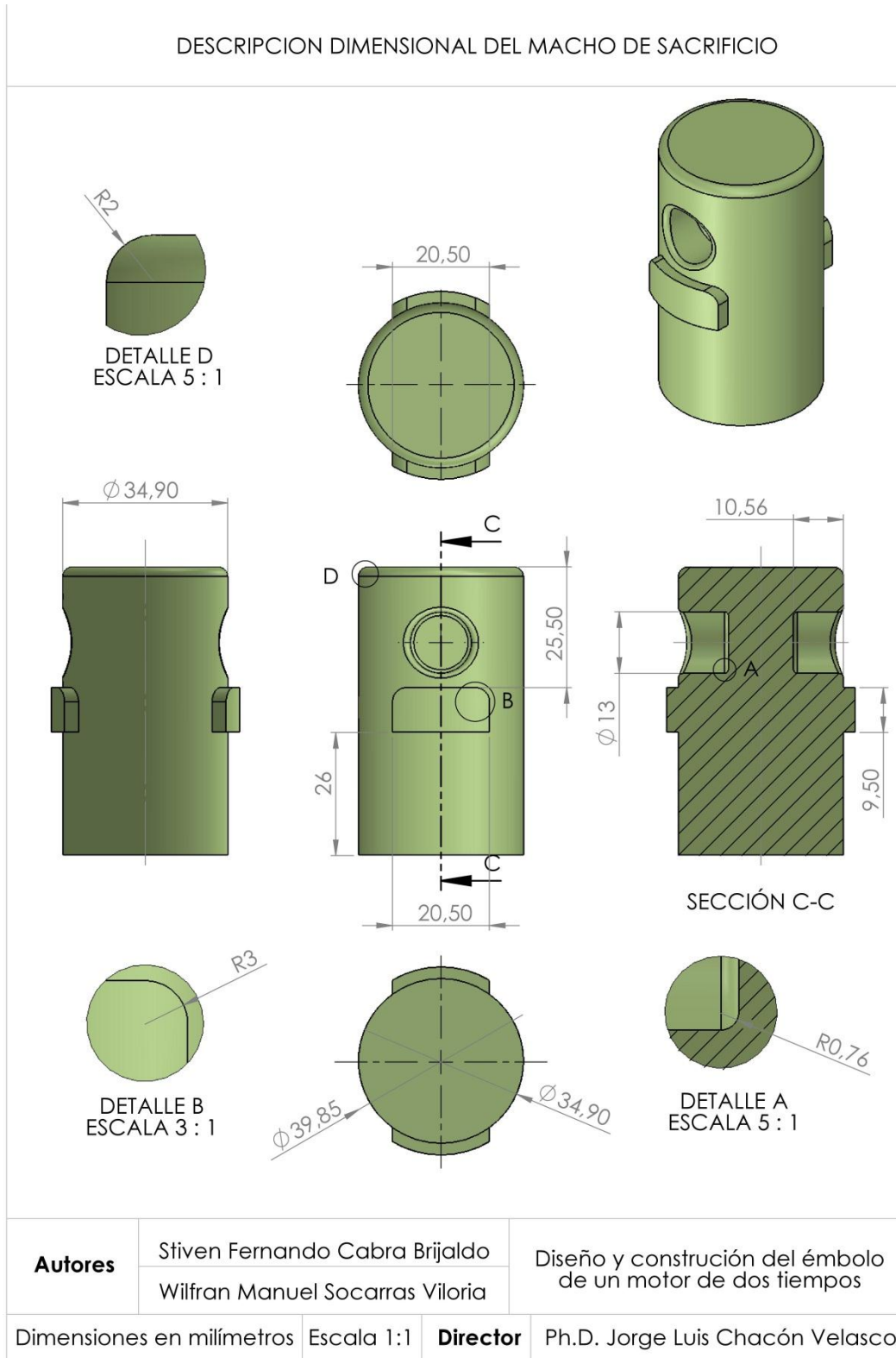


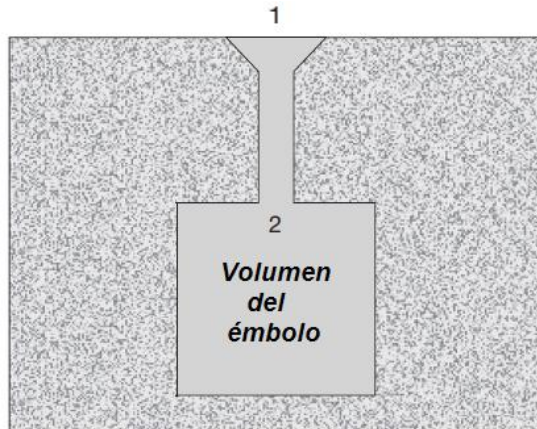
Ilustración 44. Descripción dimensional del macho de sacrificio



ANEXO N. Cálculos del moldeo en arena

Se requiere obtener una pieza para la construcción de un émbolo, en un molde de arena en el cual se diseñó un bebedero de 10,84[cm] de longitud hecha mediante un tubo de PVC conduit tipo pesado de 1/2 [pulgada]

Ilustración 45. Descripción básica del moldeo de arena



Tiempo mínimo requerido para el llenado

Primero calcularemos la velocidad del flujo en el bebedero de colada aplicando el teorema de Bernouilli entre el punto 1 y 2 de la figura xx. El teorema de Bernouilli establece que la suma de las energías (altura, presión dinámica, energía cinética y presión) en dos puntos cualesquiera de un líquido que fluye son iguales, matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$h_1 + \frac{P_1}{\rho * g} + \frac{v_1^2}{2 * g} + F_1 = h_2 + \frac{P_2}{\rho * g} + \frac{v_2^2}{2 * g} + F_2$$

Prescindiendo las pérdidas por la fricción y bajo presión atmosférica tenemos que:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2 * g} + F_1 = h_2 + \frac{v_2^2}{2 * g}$$

donde v_1 es la velocidad en la parte superior del bebedero y v_2 es la base del bebedero. Asumiendo $h_2=0$, la ecuación se reduce a:

$$v_2 = \sqrt{2 * g * h}$$

$$v_2 = \sqrt{2 * 981 * 10,84} = 145,84 \left[\frac{\text{cm}}{\text{s}} \right]$$

Aplicando la ley de continuidad que establece que la velocidad volumétrica del flujo permanece constante a través del líquido, calcularemos la velocidad del flujo volumétrico mediante la siguiente ecuación:

$$Q = v_1 * A_1 = v_2 * A_2$$

El bebedero se hizo con tubo de PVC de media pulgada cuyo diámetro exterior promedio es de 21,34[mm], entonces:

$$A_{\text{tubo}} = \pi * \frac{D_{\text{exterior}}^2}{4}$$

$$A_{\text{tubo}} = \pi * \frac{2,134^2}{4} = 3,577 [\text{cm}^2]$$

Por tanto

$$Q = v * A = 145,84 * 3,577 = 521,67 \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \right]$$

Gracias al análisis de metrología que se realizó de la pieza fundida que resultara del moldeo de arena mediante SolidWorks podemos establecer el volumen del émbolo es de 30,62[cm³], como se puede ver en la figura 46, el tiempo requerido para llenar la cavidad de este volumen es:

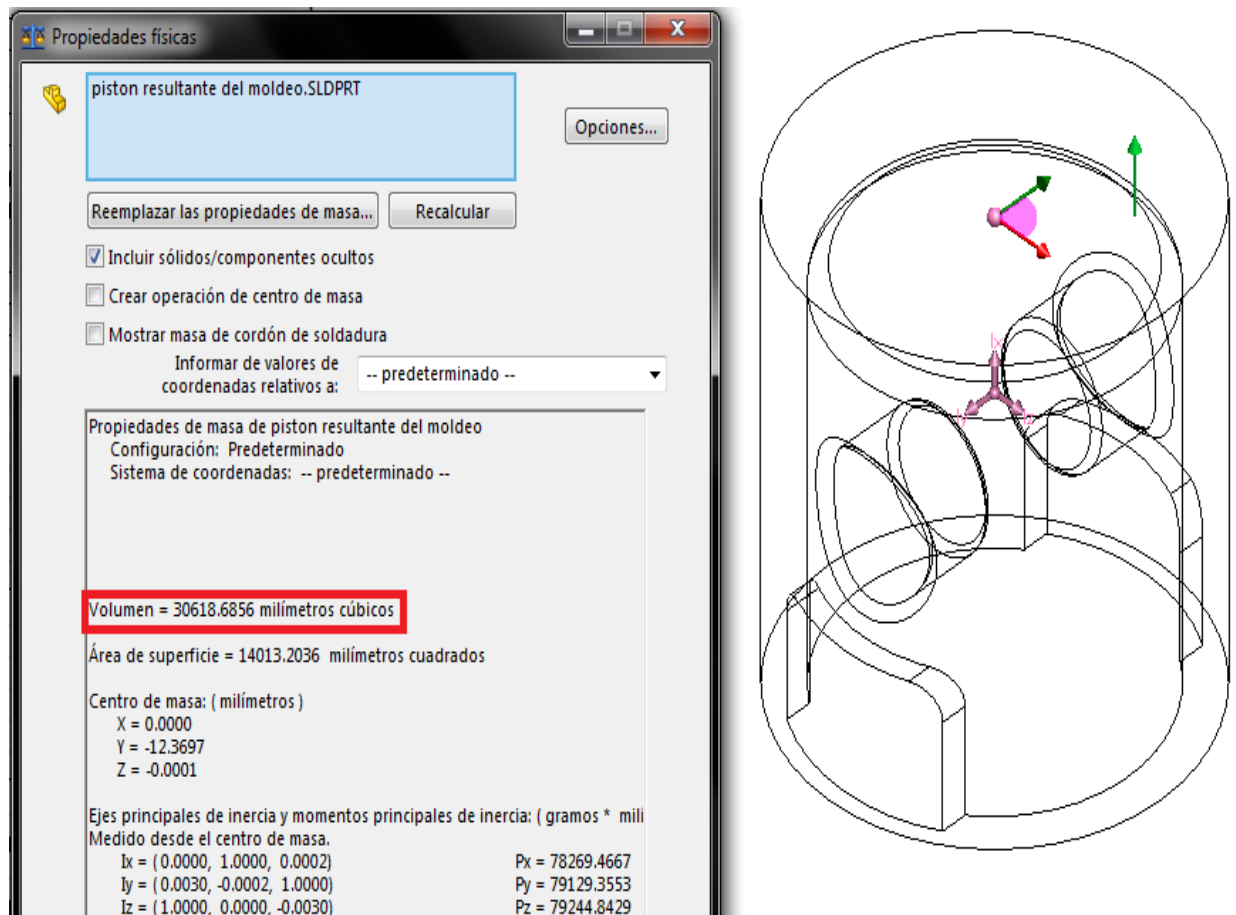
$$\text{MTF} = \frac{V}{Q}$$

donde V es el volumen de la cavidad, Q es la velocidad volumétrica de flujo y MFT es el tiempo de llenado, entonces:

$$MFT = \frac{30,62}{521,67} = 0,0587[s]$$

La razón por la que el tiempo mínimo es tan corto, se debe a que el volumen del émbolo es muy pequeño.

Ilustración 46. Volumen del émbolo obtenido a través de SolidWorks



Fuente: Software SolidWorks.

Tiempo de solidificación de la pieza

Para calcularlo aplicaremos la regla de Chvorinov²⁸, que indica el tiempo total de solidificación de la fundición después del vaciado según la relación:

$$TST = B * \left(\frac{V}{A_{\text{émbolo}}}\right)^n$$

donde TST es el tiempo de solidificación total, V el volumen de la fundición, $A_{\text{émbolo}}$ es el área superficial de la fundición, n es un exponente que generalmente toma el valor de 2 y “B” es la constante del molde.

La constante “B” depende de las propiedades de la aleación B390.0 (densidad, capacidad calorífica y calor de fusión) y del molde de arena, como su temperatura inicial, densidad, conductividad térmica y capacidad calorífica, matemáticamente se expresa de la siguiente manera²⁹:

$$B = \left(\frac{\rho_m * L}{T_m - T_o}\right)^2 * \left(\frac{\pi}{4k\rho C}\right) * \left(1 + \left(\frac{c_m * \Delta T_s}{L}\right)^2\right) * \frac{1}{60} \left[\frac{\text{min}}{\text{s}}\right] * \left(\frac{1}{10000}\right) \left[\frac{\text{m}^2}{\text{cm}^2}\right]$$

donde:

T_m es la temperatura de fusión de la aleación B390.0 que varía en un rango de 510[°C] a 650[°C], de la cual tomaremos su promedio que es 580[°C] (853,3[K]), datos tomados del cuadro 13.

²⁸ La regla de Chvorinov es una relación matemática formulada por Nicolas Chvorinov en 1940, la regla indica que un fundido con volumen grande, se enfriará y solidificará con más lentitud que otro de menor volumen. Este principio se emplea para diseñar la mazarota del molde

²⁹ Fuente: DEGARMO, E. Materials and Processes in Manufacturing. USA: Wiley. 2003. p. 281

T_o es temperatura inicial del molde que es la misma temperatura ambiente, la cual para Bucaramanga en promedio es de 23[°C] (296,2[K]).

T_{vertido} es la temperatura de vertido que sería la temperatura “liquidus” de la aleación B390.0 la cual es de 650[°C] (923,2[K]), datos tomados de ASM Handbook volume II: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, pagina 645.

ΔT_s es la temperatura sobrecalentamiento donde $\Delta T_s = T_{\text{vertido}} - T_m = 70[\text{K}]$.

L es el calor latente de fusión de la aleación, el cual es 389[J/g] (389000 [J.kg⁻¹]), según las bases de datos de matweb³⁰

Para la arena sílice (SiO₂), la conductividad térmica “k” del molde es 1,5 [W.m⁻¹.K⁻¹], “ρ” es su densidad la cual es 2649,9984[kg.m⁻³], “C” es el calor específico del molde y su valor es 730[J.kg⁻¹.K⁻¹], todo lo anterior según datos de la página de la base de datos de Azo materials³¹

Según el cuadro 13, la densidad “ρ_m” de la aleación B390.0-F (véase anexo I) es 2,73[g/cm³] (2730[kg.m⁻³]) y según el cuadro 14 (véase anexo I), el calor específico “c_m” de la aleación B390.0-F es 963 [J.kg⁻¹.K⁻¹], con todo lo anterior tenemos que:

$$B = \left(\frac{2730 * 389000}{853,3 - 296,2} \right)^2 * \left(\frac{\pi}{4 * 1,5 * 2649,9984 * 730} \right) * \left(1 + \left(\frac{963 * 70}{389000} \right)^2 \right) * \frac{1}{60} \left[\frac{\text{min}}{\text{s}} \right] \\ * \left(\frac{1}{10000} \right) \left[\frac{\text{m}^2}{\text{cm}^2} \right]$$

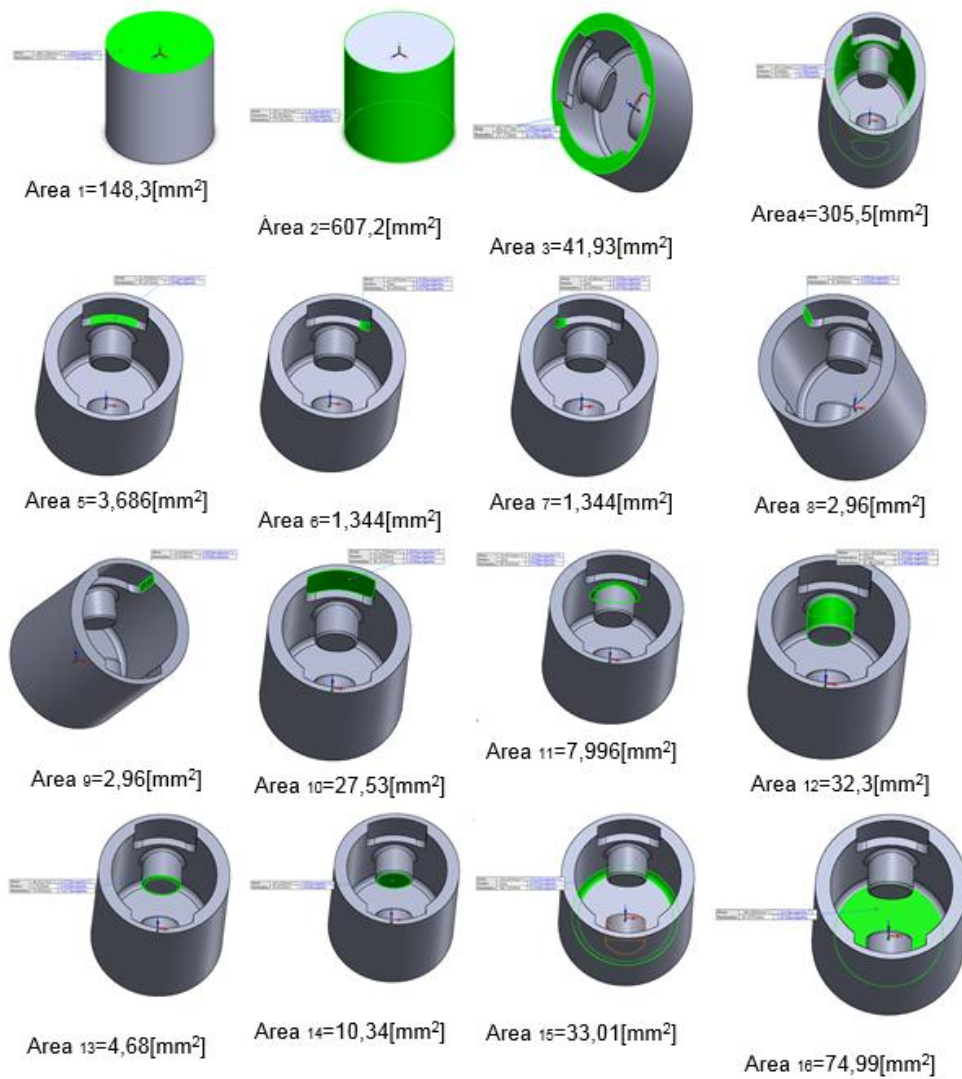
³⁰ Fuente: [Online]. En: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=5b9cd03099334810b4b6a5dcf01e200f>>.

³¹ Fuente: [Online]. En: <<http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1114>>.

$$B = 1,68 \left[\frac{\text{min}}{\text{cm}^2} \right]$$

El área superficial del émbolo (resaltada en verde) se halla por medio de SolidWorks, los resultados pueden verse en la ilustración 47.

Ilustración 47. Área total superficial del émbolo obtenido a través de SolidWorks



Fuente: Software SolidWorks

El área total es la sumatoria de todas las áreas mostradas en la ilustración 74 y su resultado es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 A_{\text{embolo}} &= A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + 2 \\
 &\quad * (A_5 + A_6 + A_7 + A_8 + A_9 + A_{10} + A_{11} + A_{12} + A_{13} + A_{14}) \\
 &\quad + A_{15} + A_{16} \\
 A_{\text{embolo}} &= 1401[\text{cm}^2]
 \end{aligned}$$

Reemplazando en la ecuación xx, tenemos que:

$$\text{TST} = 1,68 * \left(\frac{30,62}{1401} \right)^2 = 0,000802[\text{min}] = 0,04838[\text{s}]$$

TST = 0,04838[s] tardará en solidificarse la fundición después del vaciado.

Cálculo de mazarota

Ahora calcularemos las dimensiones y forma de la mazarota, analizaremos también la viabilidad de agregarla en la zona de alimentación del molde en arena. La aleación en la mazarota debe permanecer en fase líquida más tiempo que el de la fundición; por tanto $\text{TST}_{\text{mazarota}} > 0.04838$ [s]. La aleación que quede en la mazarota es material de desperdicio, así que debe extraerse, refundirse y utilizarse en otras fundiciones, por tanto la forma geométrica de la mazarota debe maximizar la relación entre el volumen y área, lo que va a tender a reducir el volumen de la mazarota al máximo posible.

El tiempo de solidificación en la mazarota ($\text{TST}_{\text{mazarota}}$) lo tomaremos 20% mayor que el del molde de arena, entonces:

$$\text{TST}_{\text{mazarota}} = 1,2 * \text{TST}$$

Supondremos como es habitual que la mazarota es un cilindro, por tanto su volumen (V_{mazarota}) y área superficial (A_{mazarota}) son

$$V_{\text{mazarota}} = (\pi * r_{\text{mazarota}}^2) * h_{\text{mazarota}}$$

$$A_{\text{mazarota}} = (2 * \pi * r_{\text{mazarota}}^2) + 2 * \pi * r_{\text{mazarota}} * h_{\text{mazarota}}$$

Donde r_{mazarota} y h_{mazarota} , son el radio y la altura de la mazarota respectivamente, entonces

$$TST_{\text{mazarota}} = B * \left(\frac{V_{\text{mazarota}}}{A_{\text{mazarota}}}\right)^2$$

Como se mencionó anteriormente, se debe tratar de construir la mazarota con el máximo mínimo de superficie, por tanto

$$d_{\text{mazarota}} = h_{\text{mazarota}}$$

Y sabiendo que

$$d_{\text{mazarota}} = 2 * r_{\text{mazarota}}$$

Como son 6 ecuaciones con seis incógnitas, resolviendo simultáneamente obtenemos los siguientes resultados:

$$TST_{\text{mazarota}} = 0,0009677[\text{min}], V_{\text{mazarota}} = 0,002326[\text{cm}^3]$$

$$A_{\text{mazarota}} = 0,09719[\text{cm}^2], d_{\text{mazarota}} = h_{\text{mazarota}} = 0,1436[\text{cm}]$$

$$r_{\text{mazarota}} = 0,07181[\text{cm}]$$

Como se puede observar el volumen de la mazarota que se halla a partir de los cálculos es extremadamente pequeño debido a que el volumen del émbolo también lo es y no justifica su construcción, es por esto que lo marginamos en el desarrollo del molde de arena del émbolo.

ANEXO O. Operación de fundición del aluminio

Ilustración 48. Ensamblaje del sistema de alimentación y el molde externo

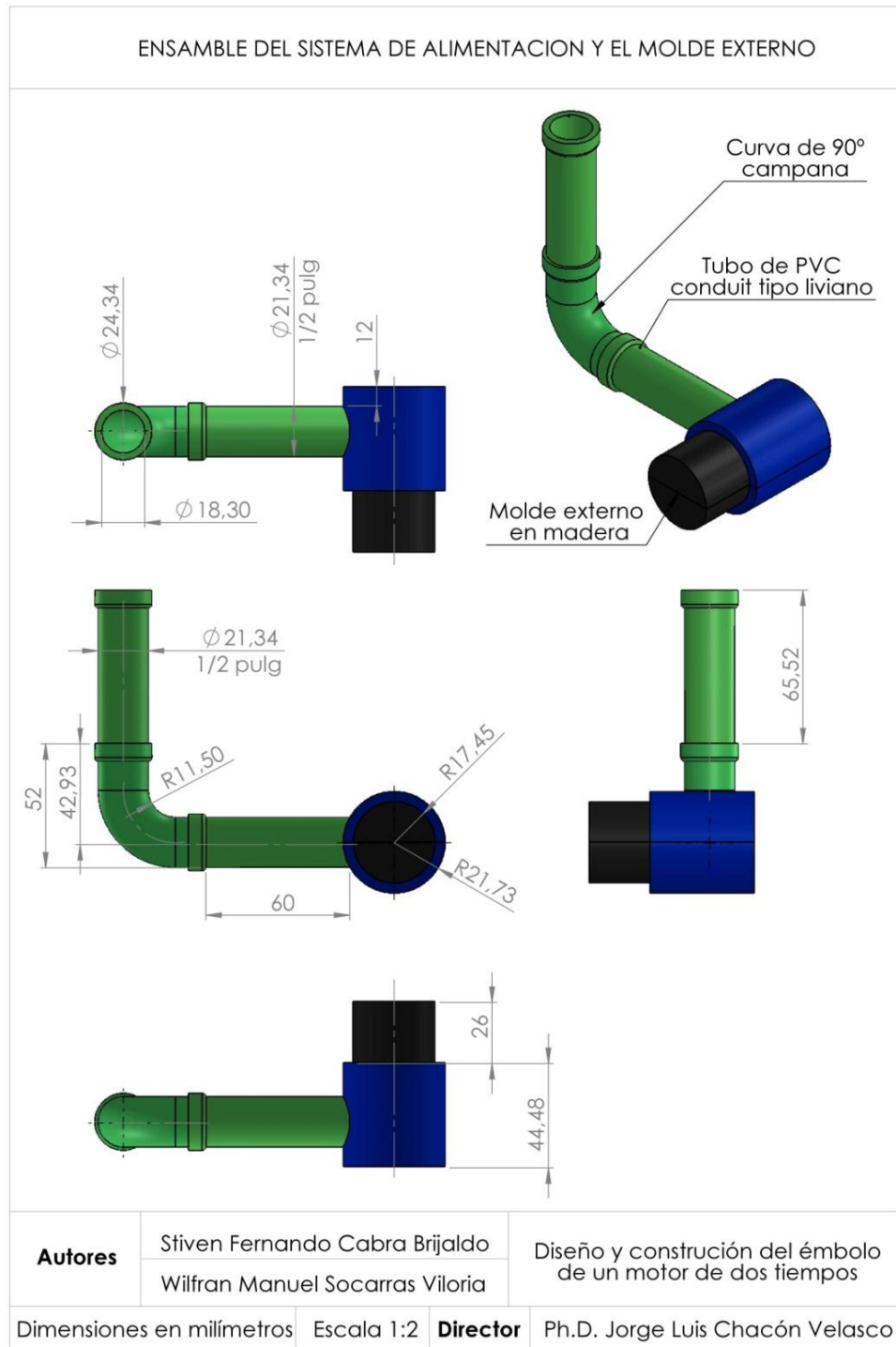


Ilustración 49. Descripción de la elaboración del molde de arena (parte 1)

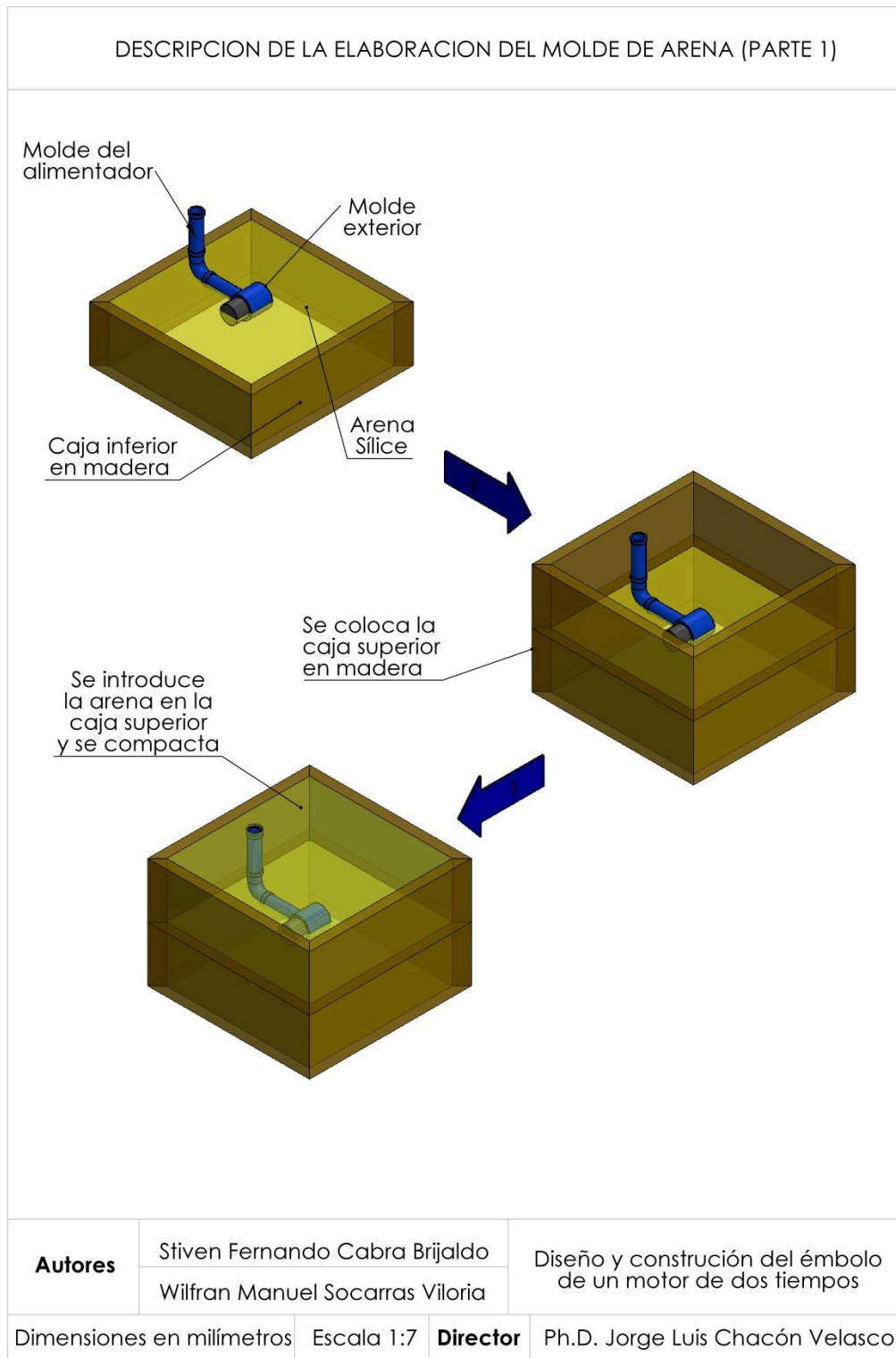


Ilustración 50. Descripción de la elaboración del molde de arena (parte 2)

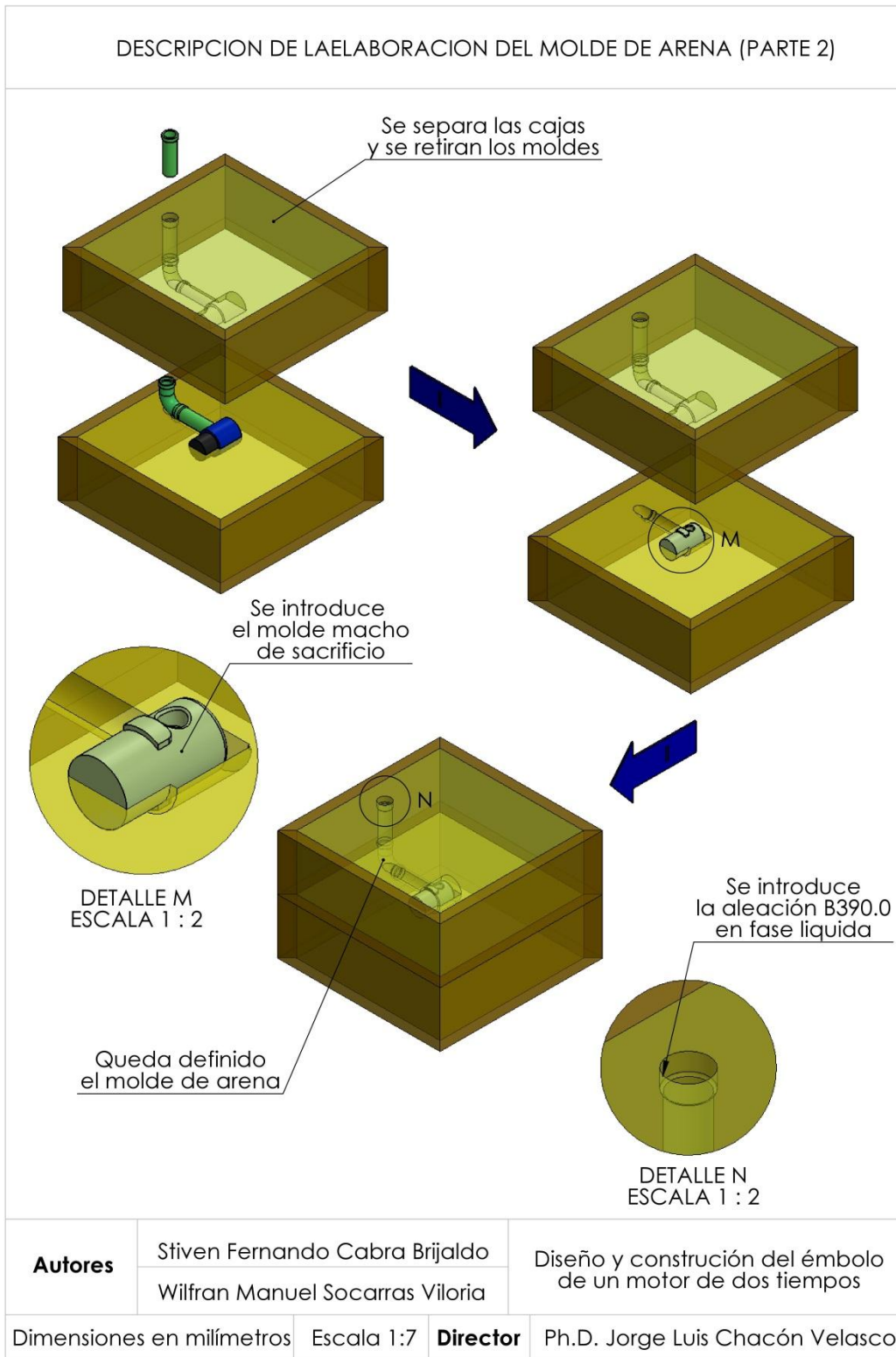
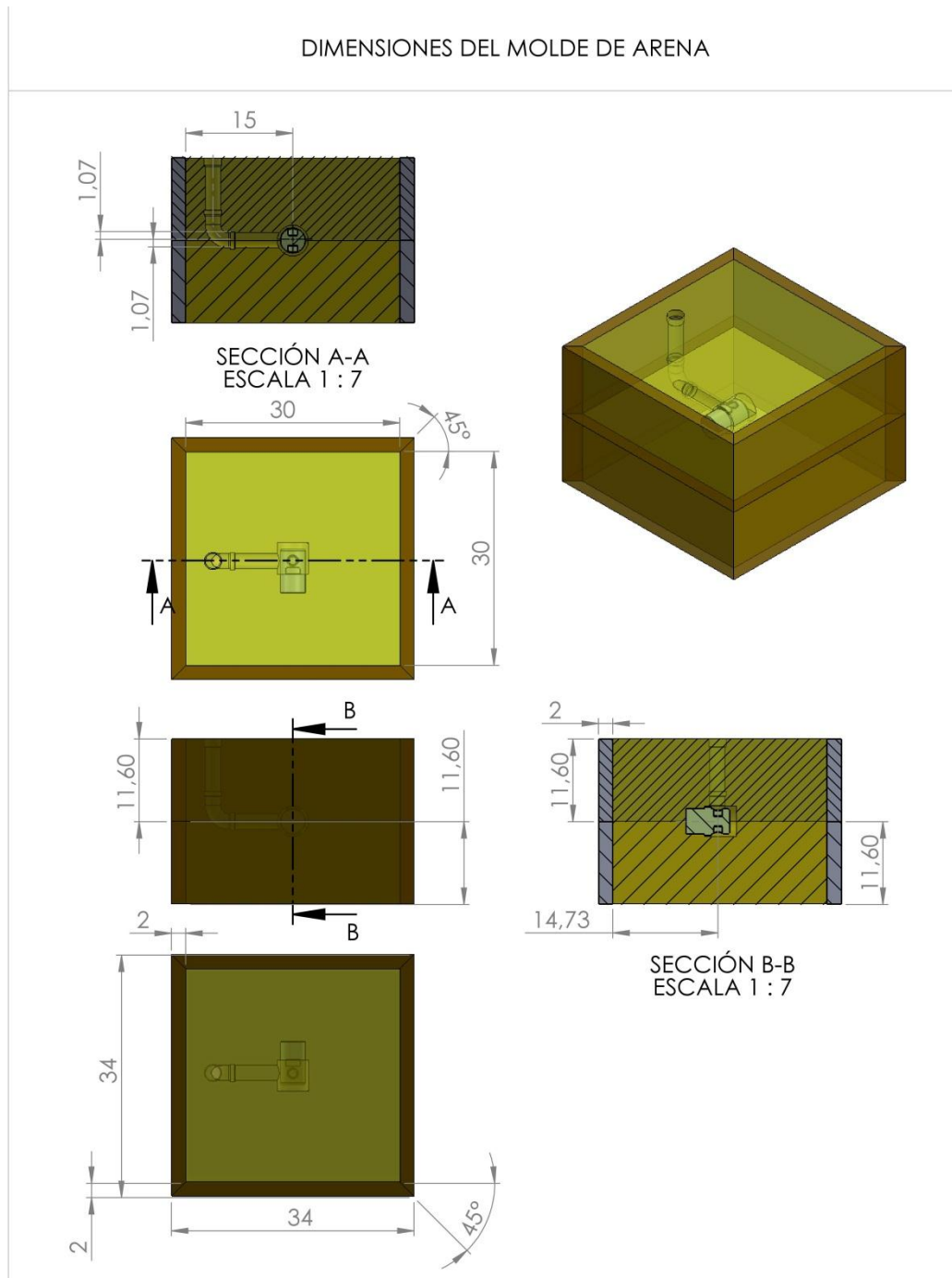
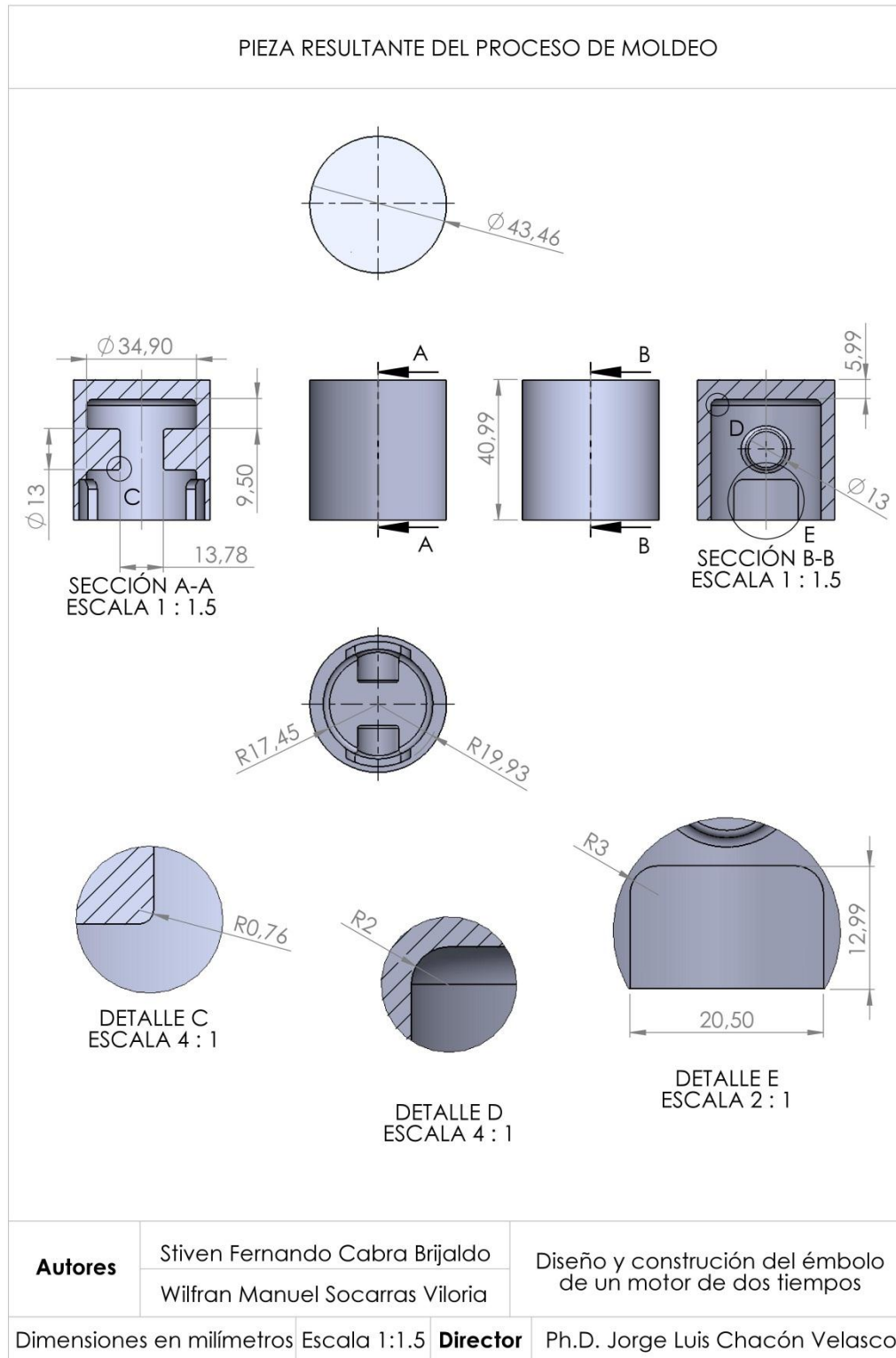


Ilustración 51. Dimensiones del molde de arena



Autores	Stiven Fernando Cabra Brijaldo	Diseño y construcción del émbolo de un motor de dos tiempos
	Wilfran Manuel Socarras Viloría	
Dimensiones en centímetros	Escala 1:7	Director Ph.D. Jorge Luis Chacón Velasco

Ilustración 52. Pieza resultante del proceso de moldeo



ANEXO P. Cilindrado superficial del émbolo

Ilustración 53. Descripción cilindrada superficial (parte a)

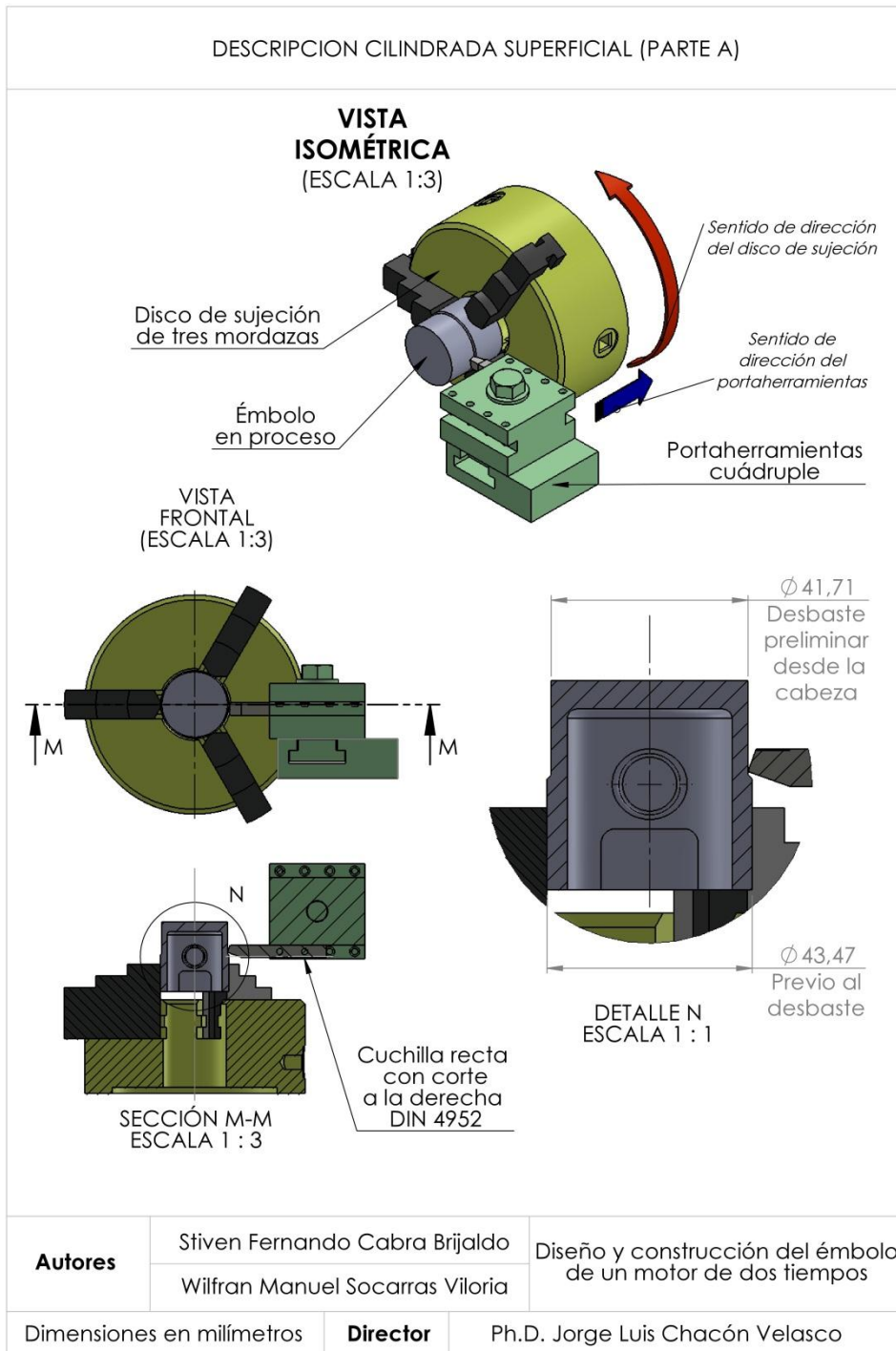
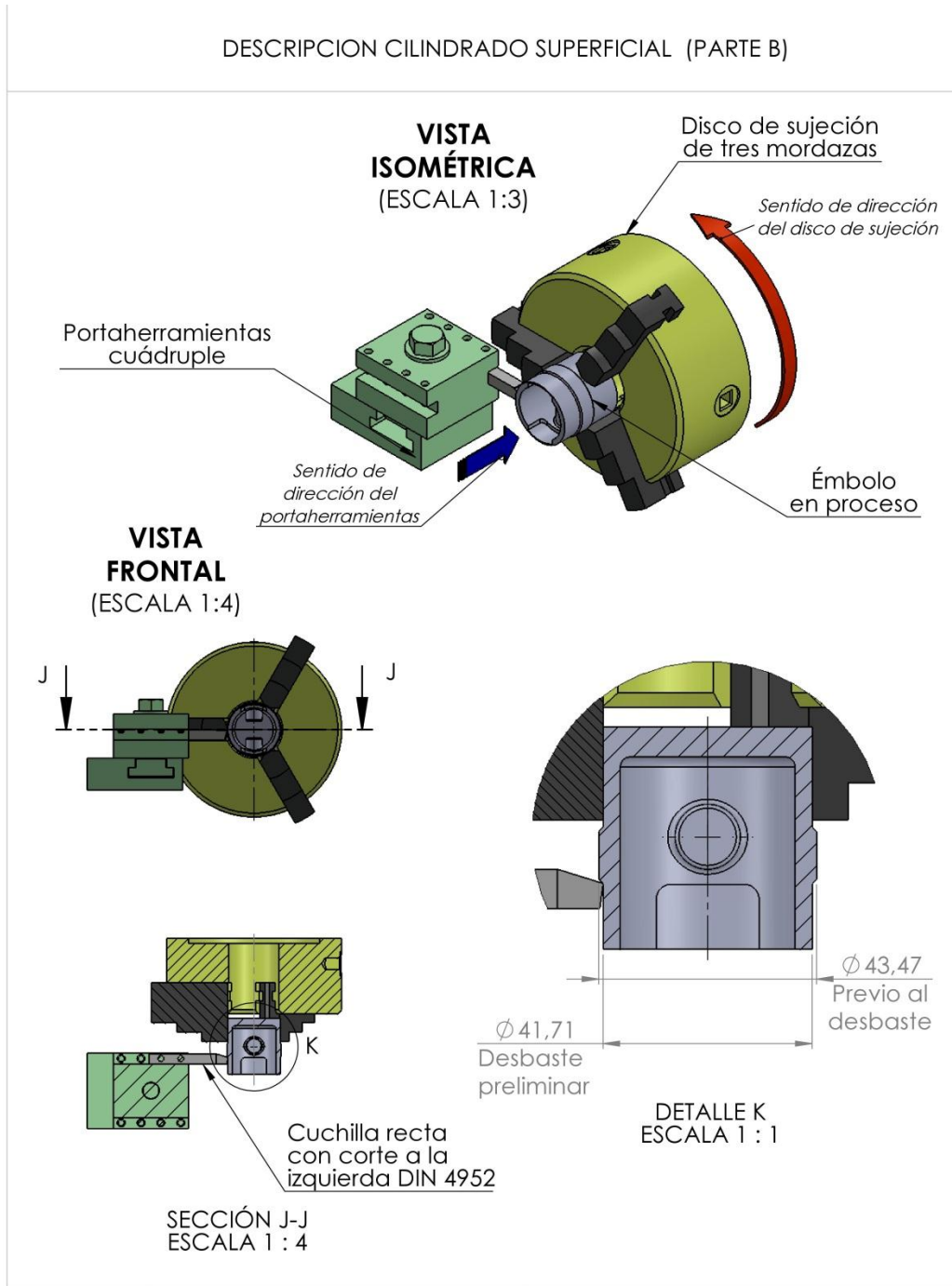


Ilustración 54. Descripción cilindrada superficial (parte B)



Autores	Stiven Fernando Cabra Brijaldo	Diseño y construcción del émbolo de un motor de dos tiempos
	Wilfran Manuel Socarras Viloría	
Dimensiones en milímetros	Director	Ph.D. Jorge Luis Chacón Velasco

Ilustración 55. Descripción cilindrada superficial (parte C)

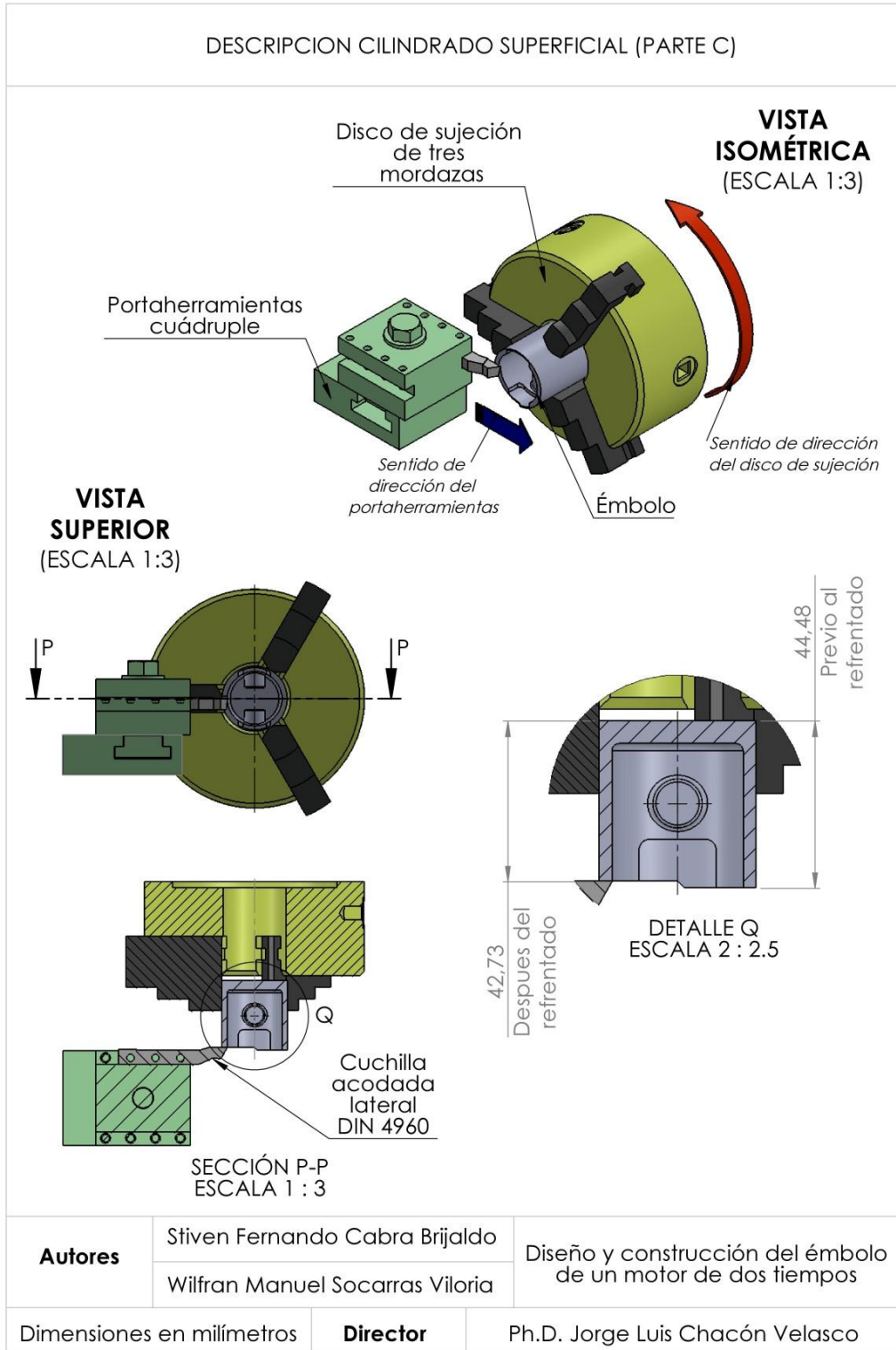
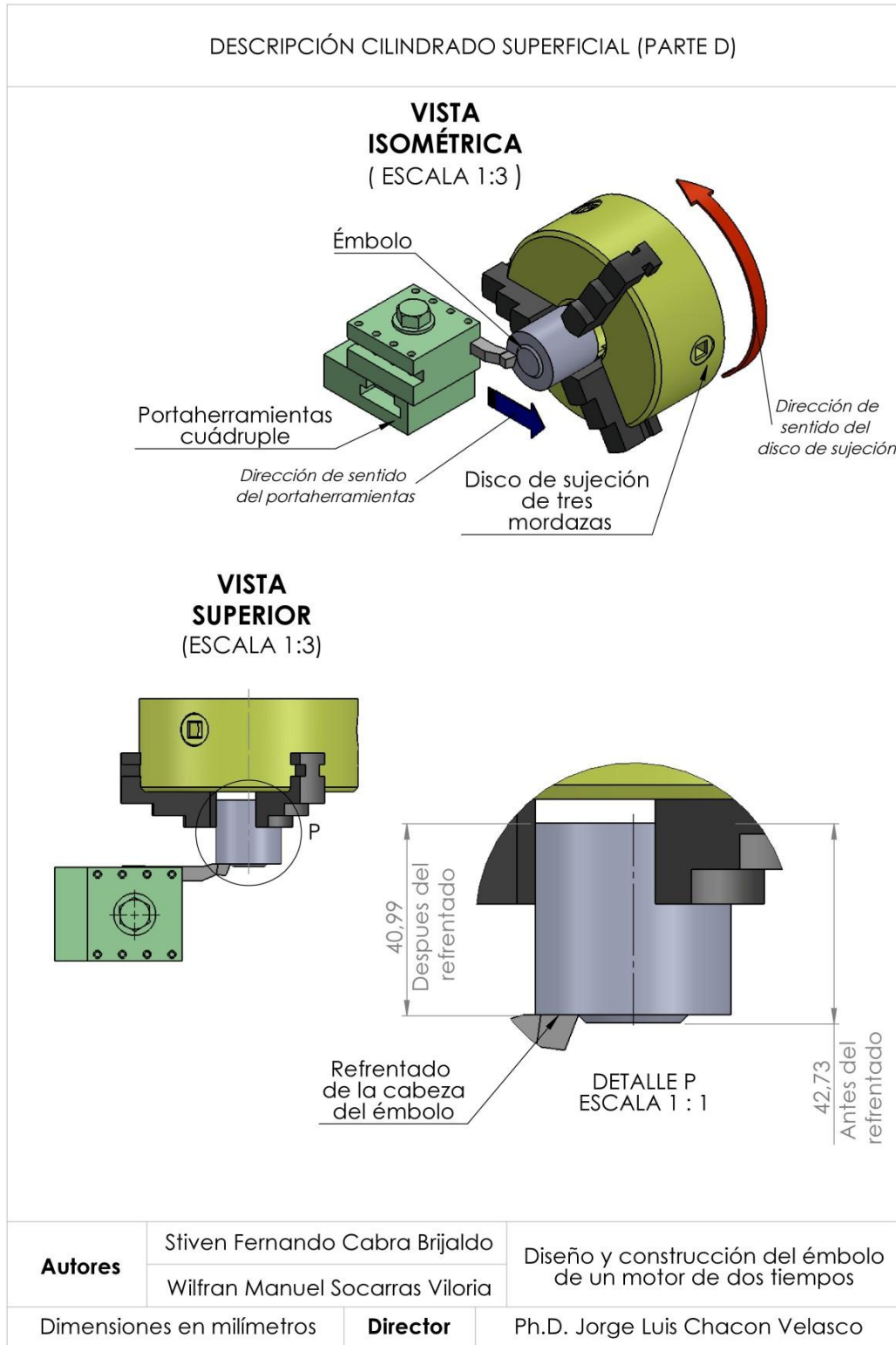
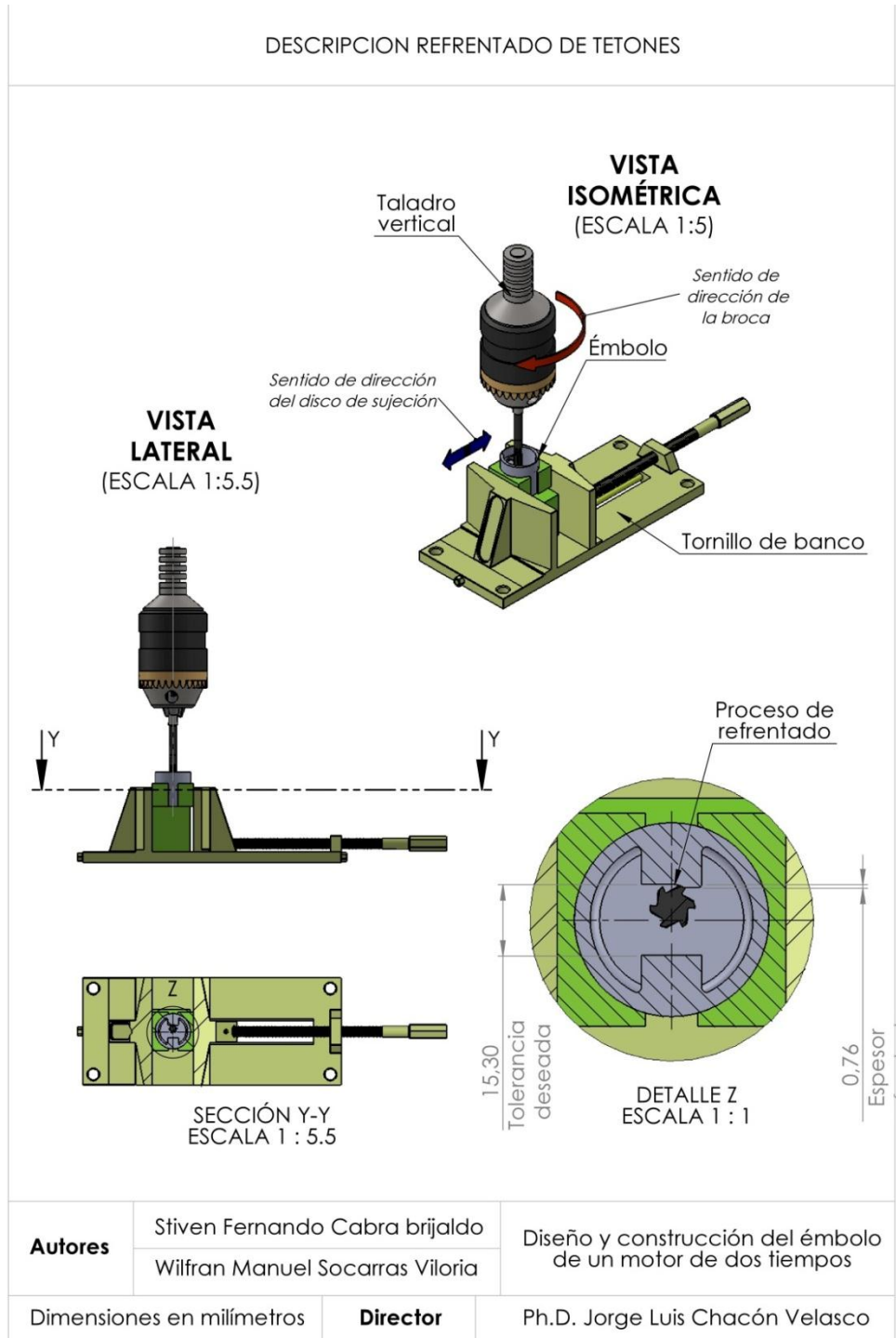


Ilustración 56. Descripción cilindrada superficial (parte D)



ANEXO Q. Refrentado de tetones

Ilustración 57. Descripción refrentado de tetones



ANEXO R. Barrenado de alojamientos del bulón y construcción de chaveteros

Ilustración 58. Taladrado del alojamiento del bulón

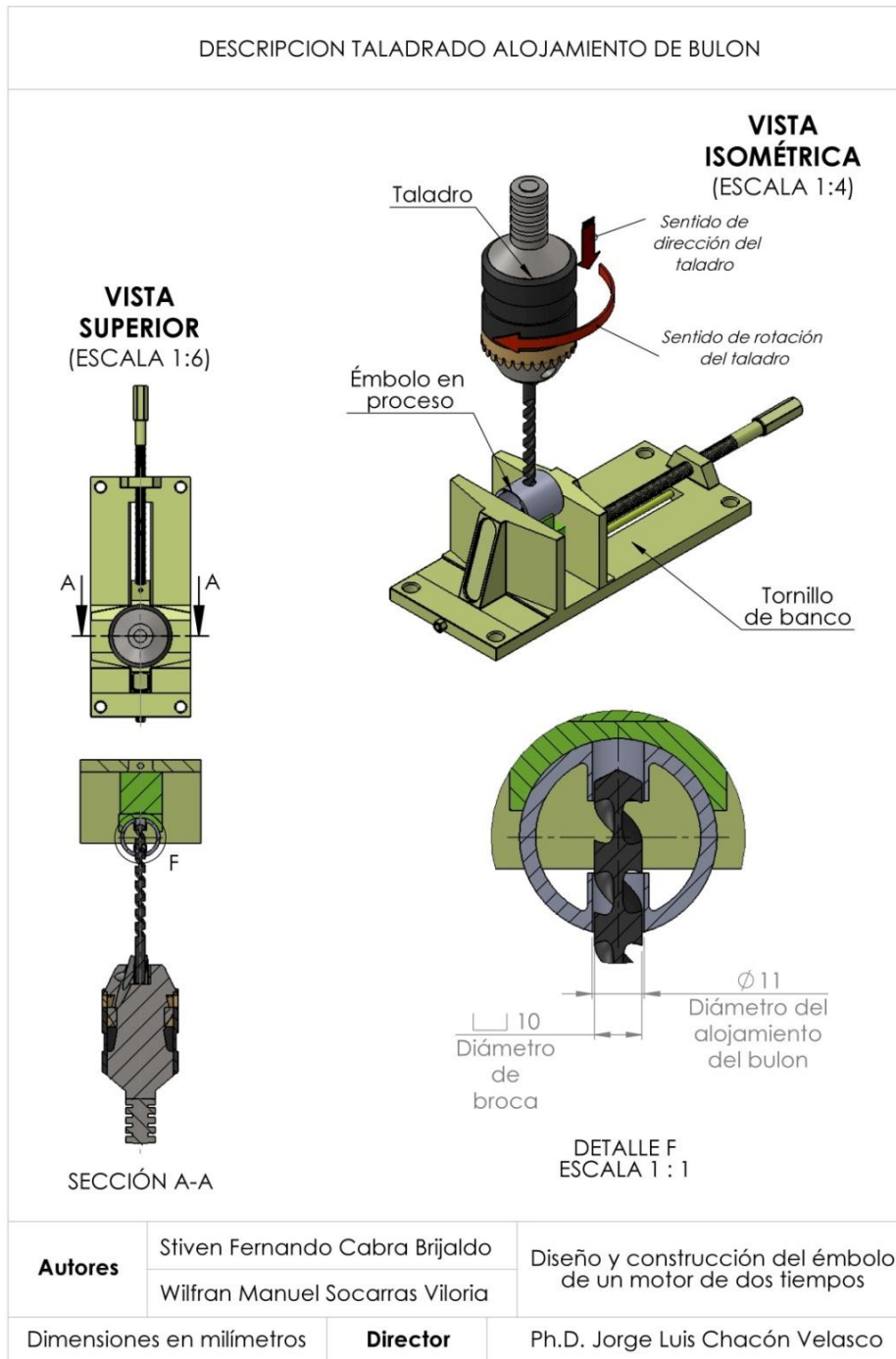
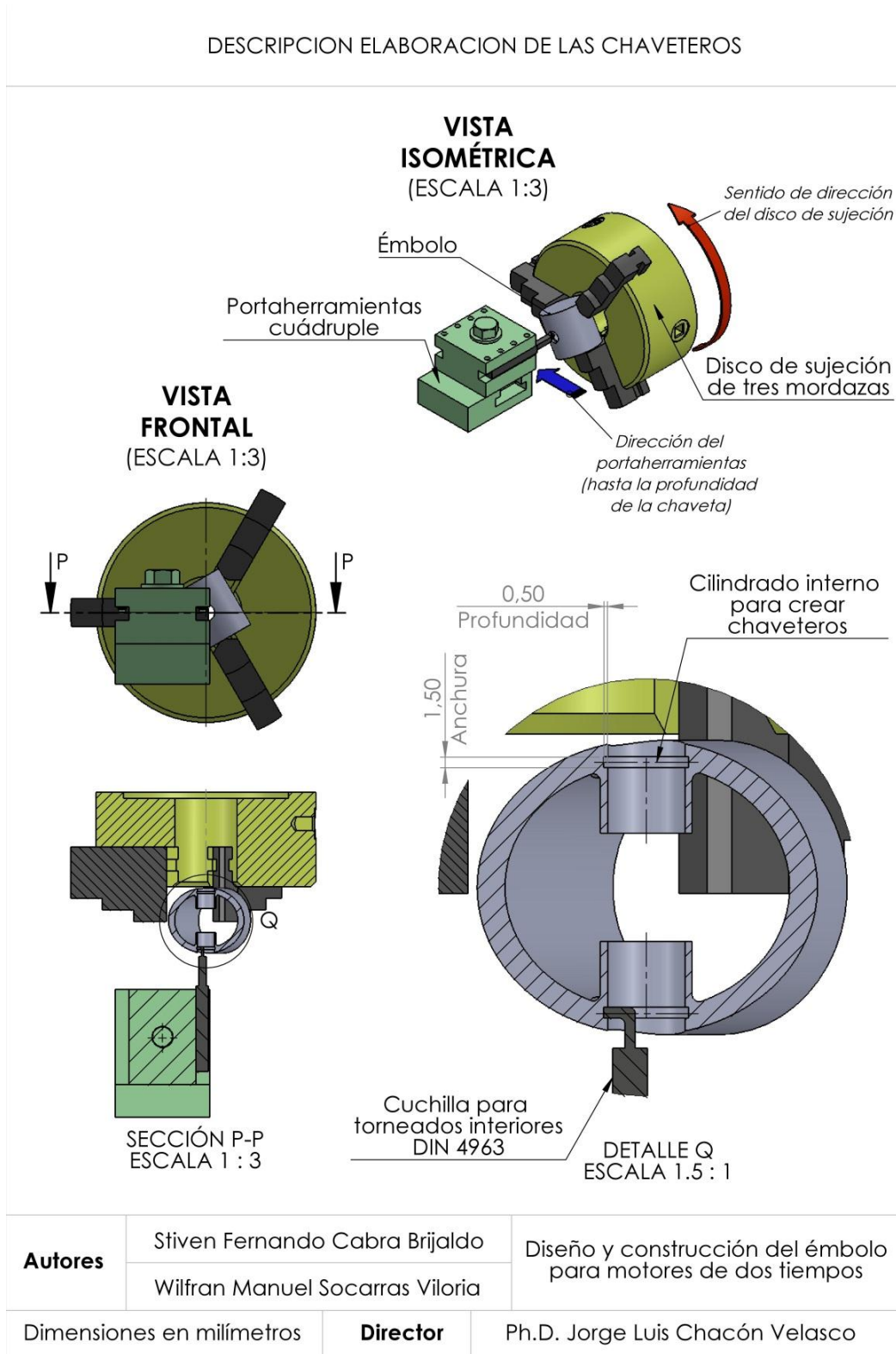


Ilustración 59. Descripción elaboración de chaveteros



ANEXO S. Construcción de alojamientos de segmentos y acabado superficial

Ilustración 60. Construcción de alojamientos de segmentos

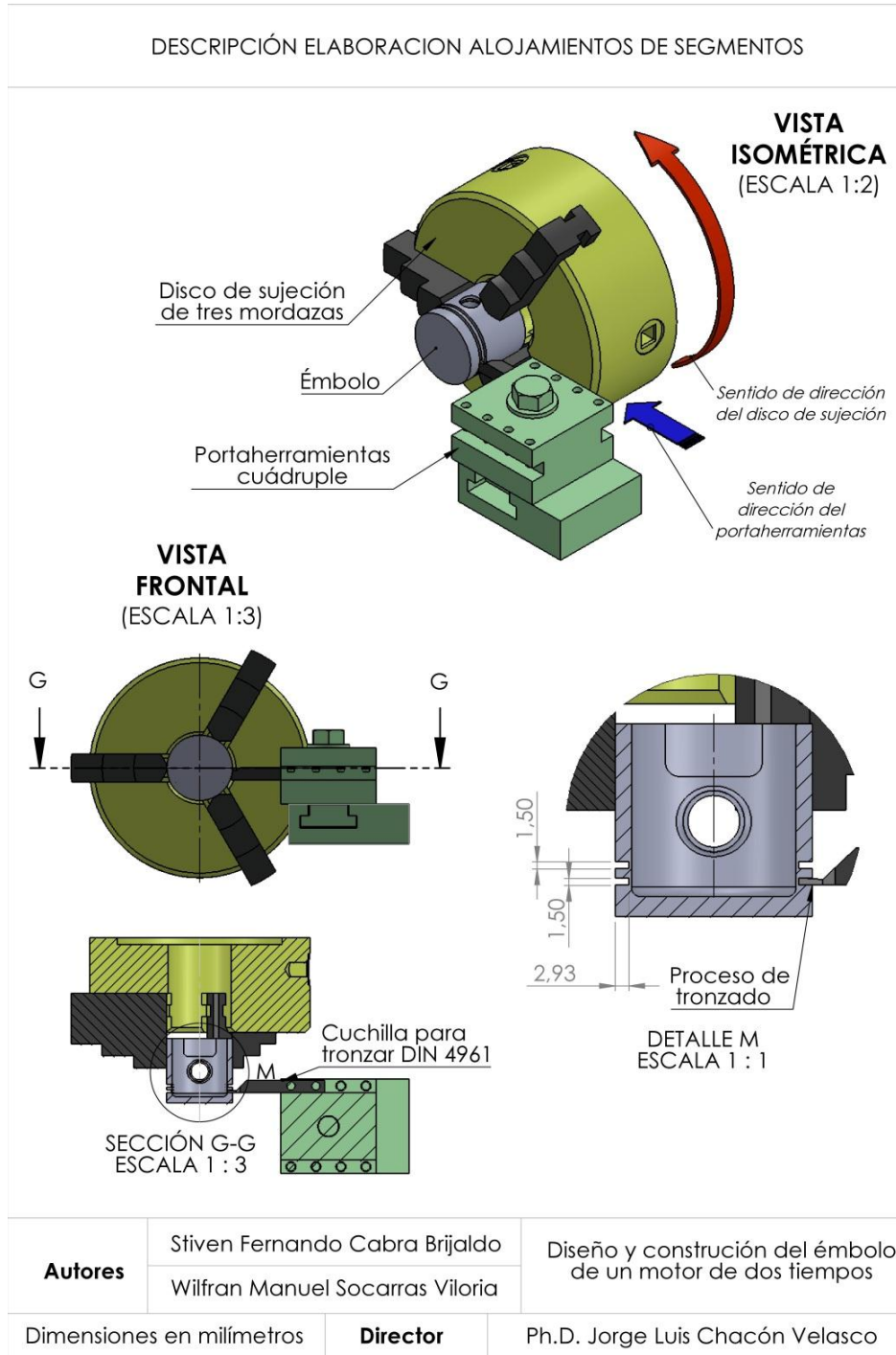


Ilustración 61. Acabado superficial (torneado cónico parte 1)

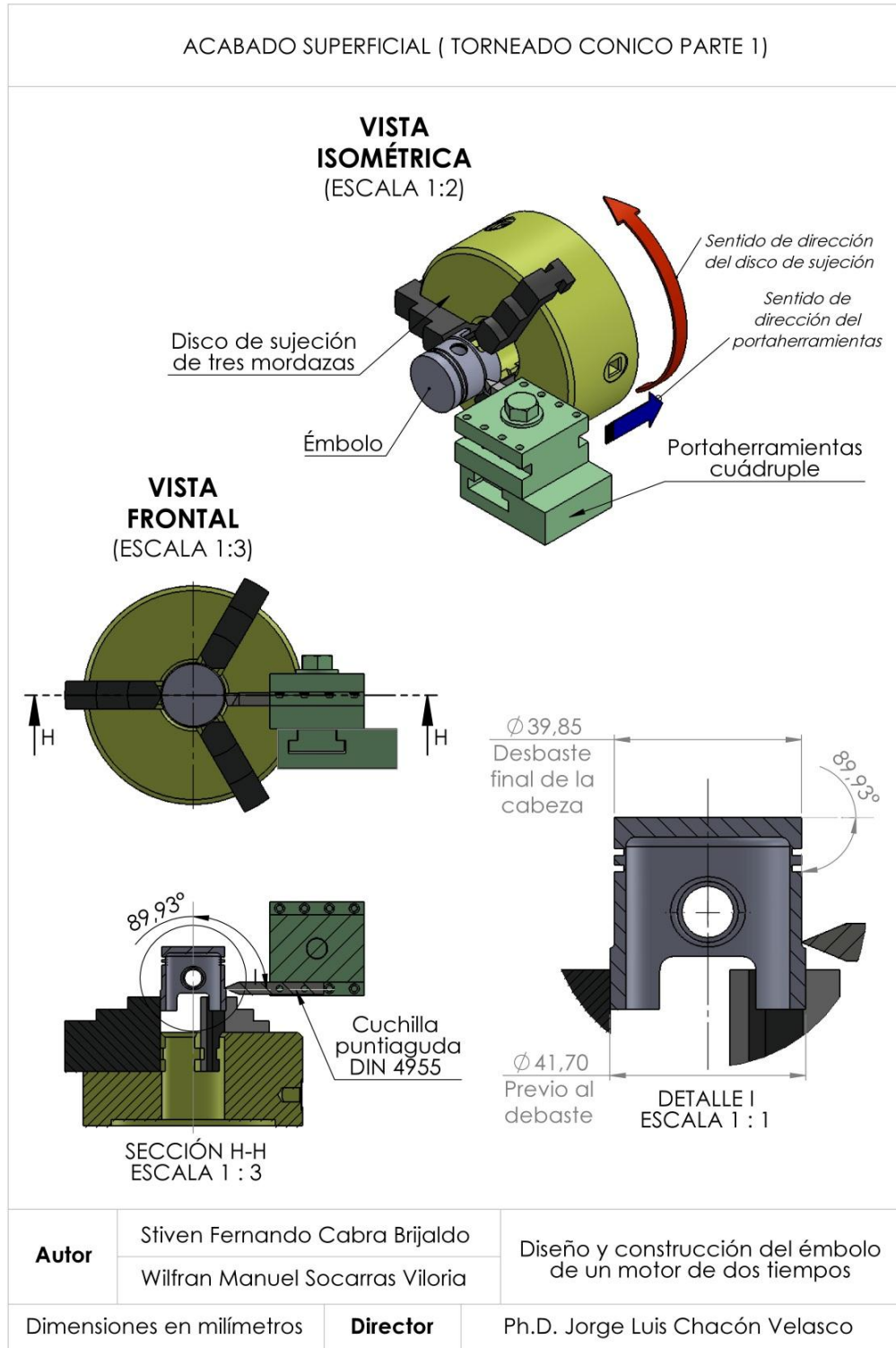


Ilustración 62. Acabado superficial (torneado cónico parte 2)

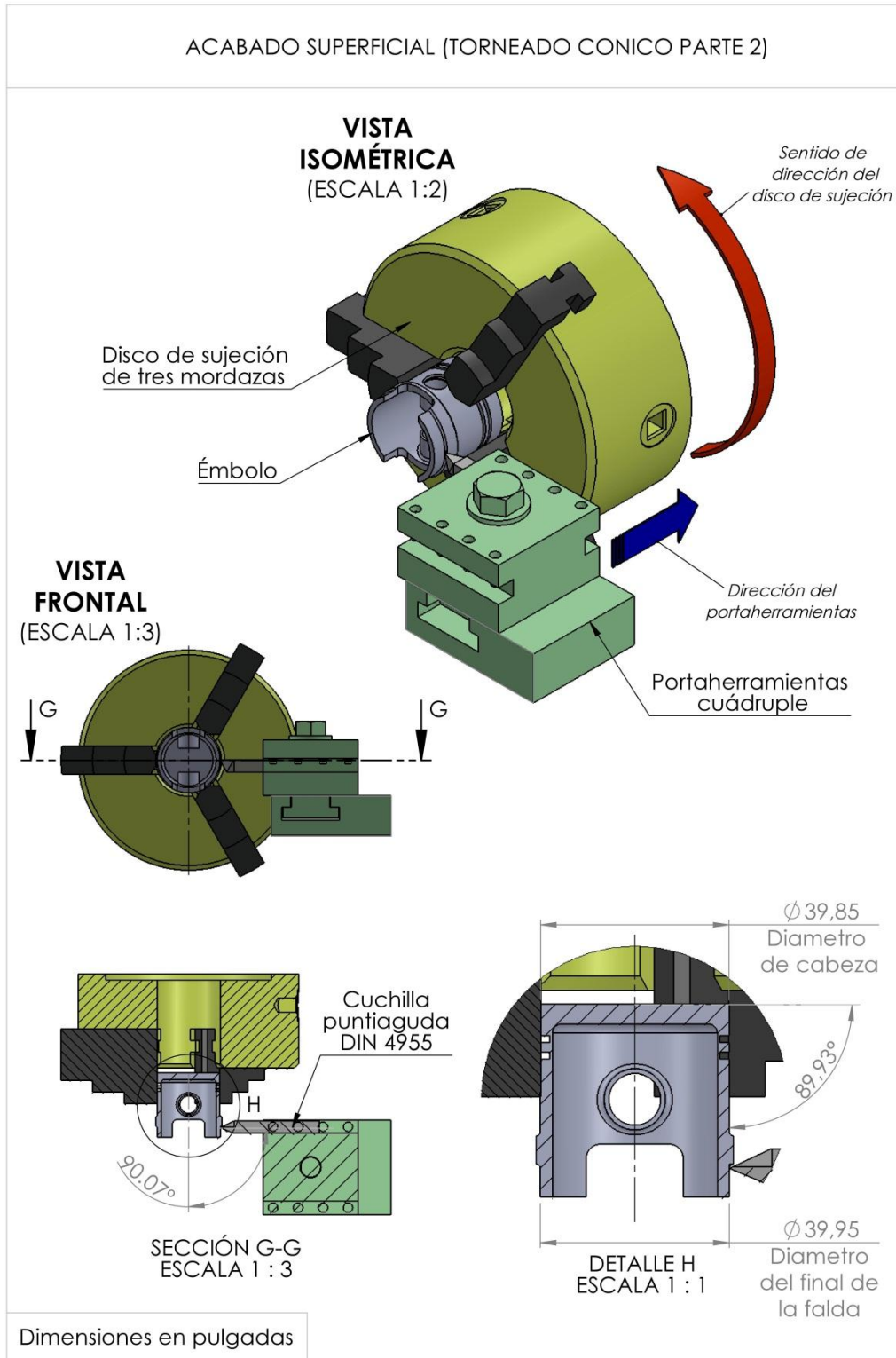


Ilustración 63. Acabado superficial (parte 3)

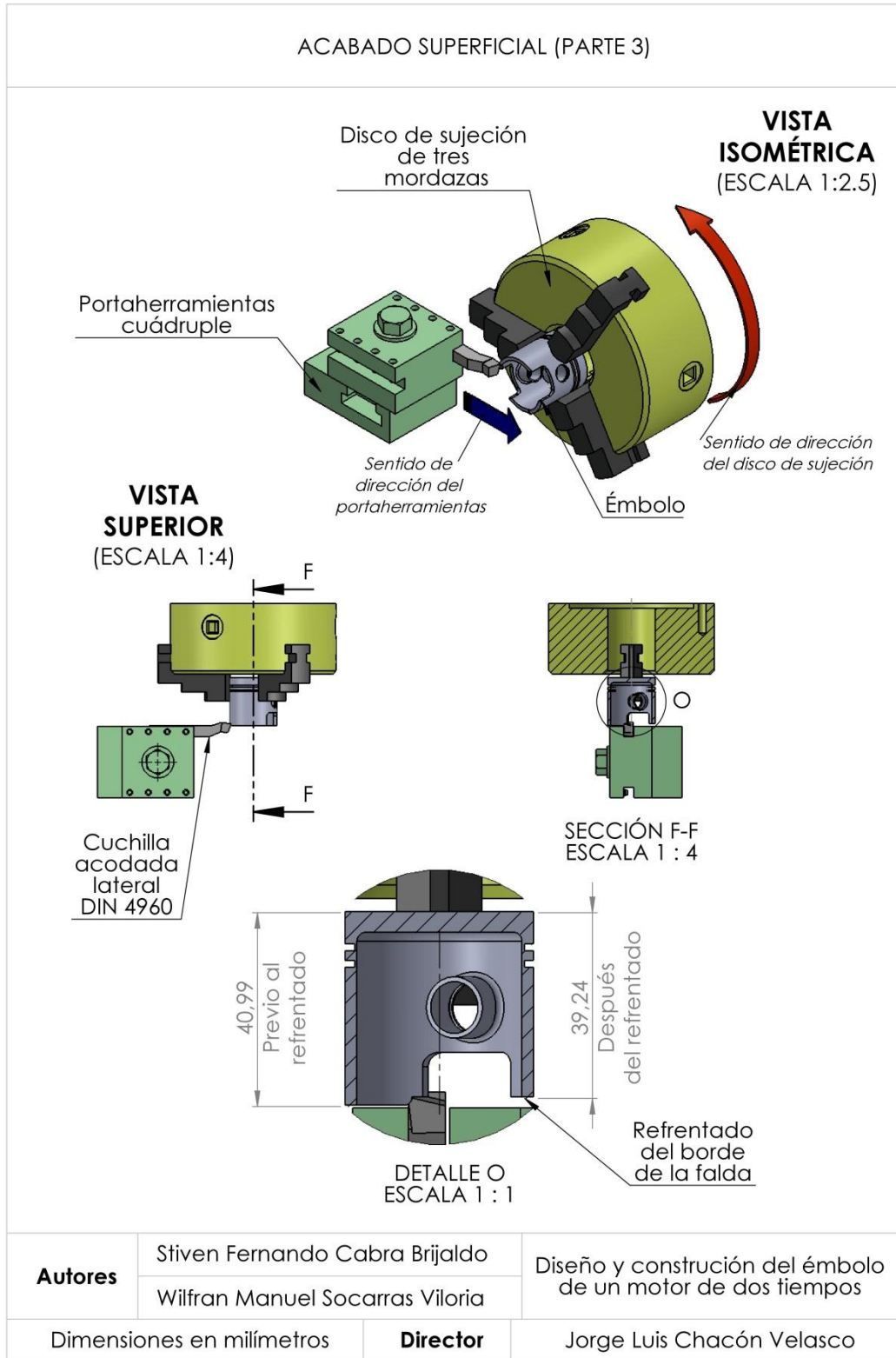


Ilustración 64. Acabado superficial (parte 4)

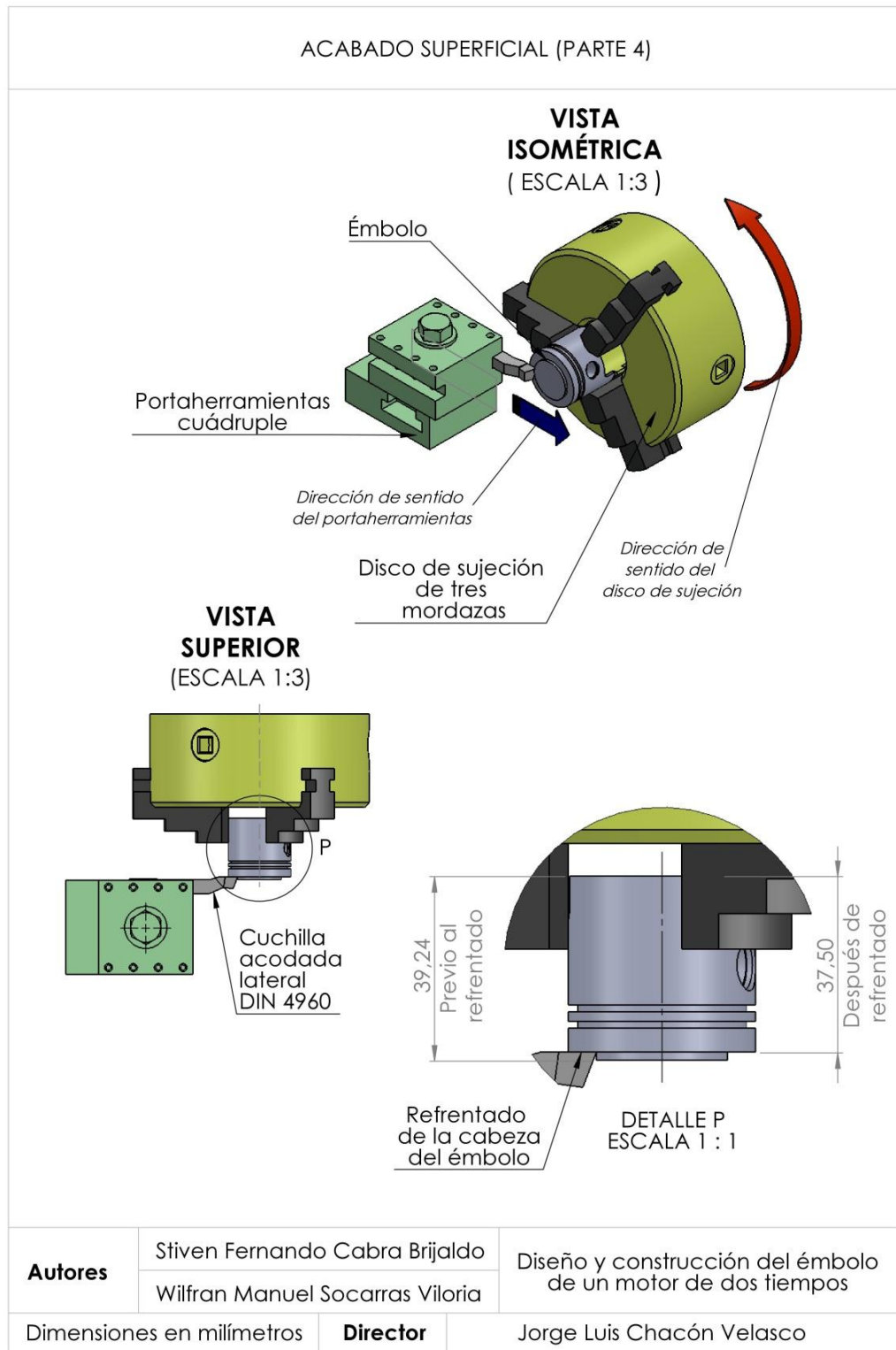


Ilustración 65. Acabado superficial (parte 5)

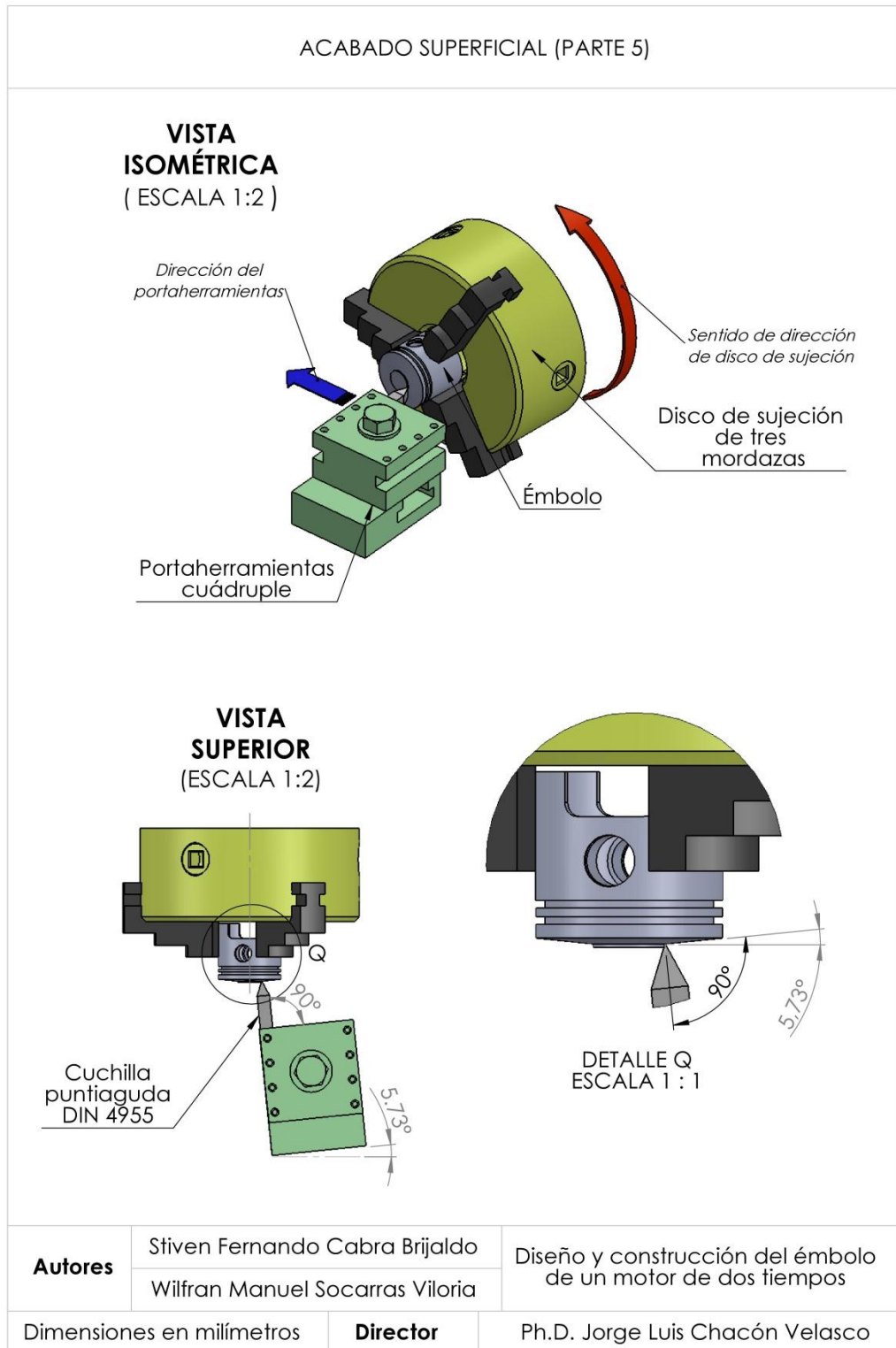


Ilustración 66. Acabado superficial (parte 6)

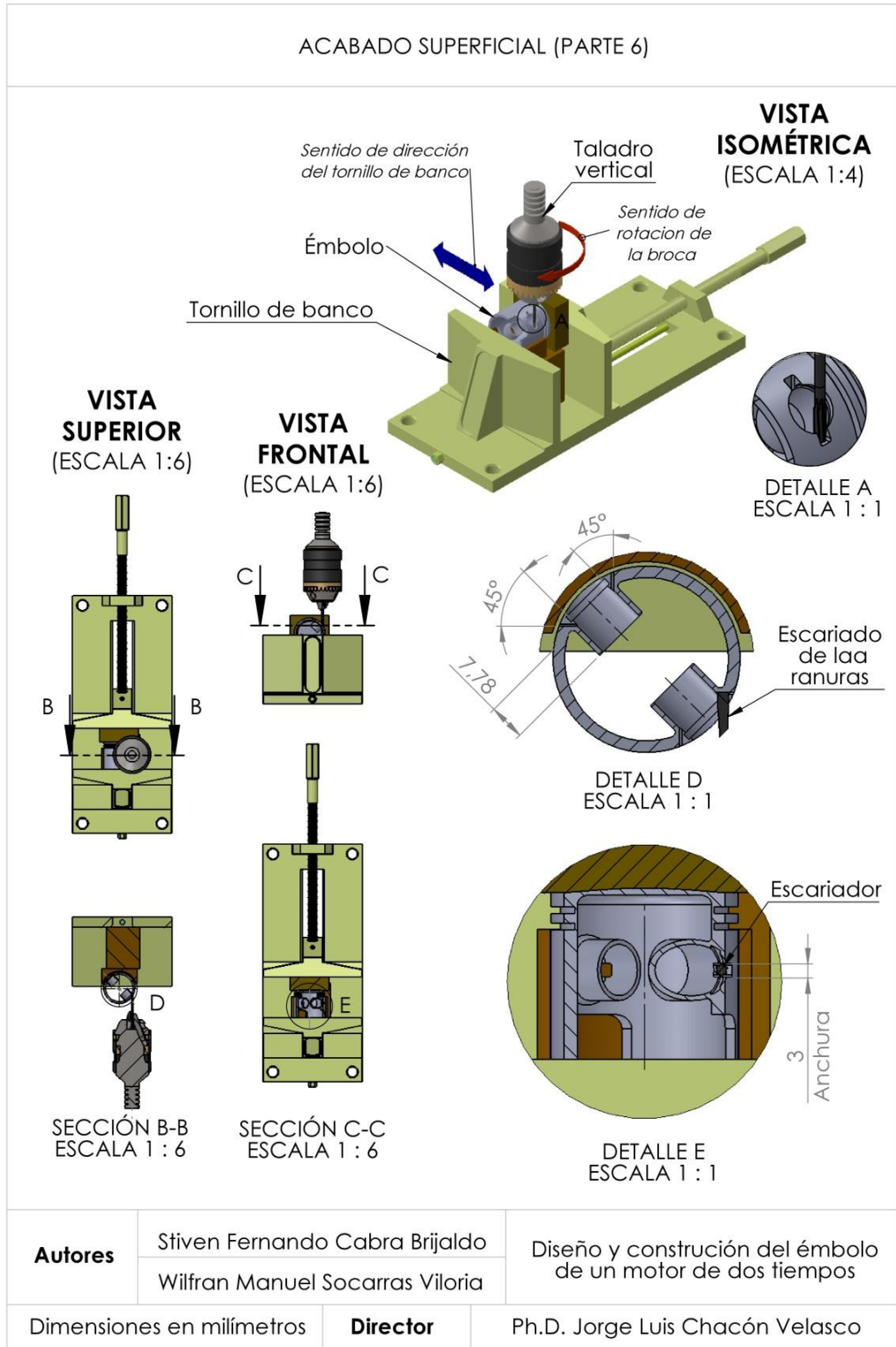
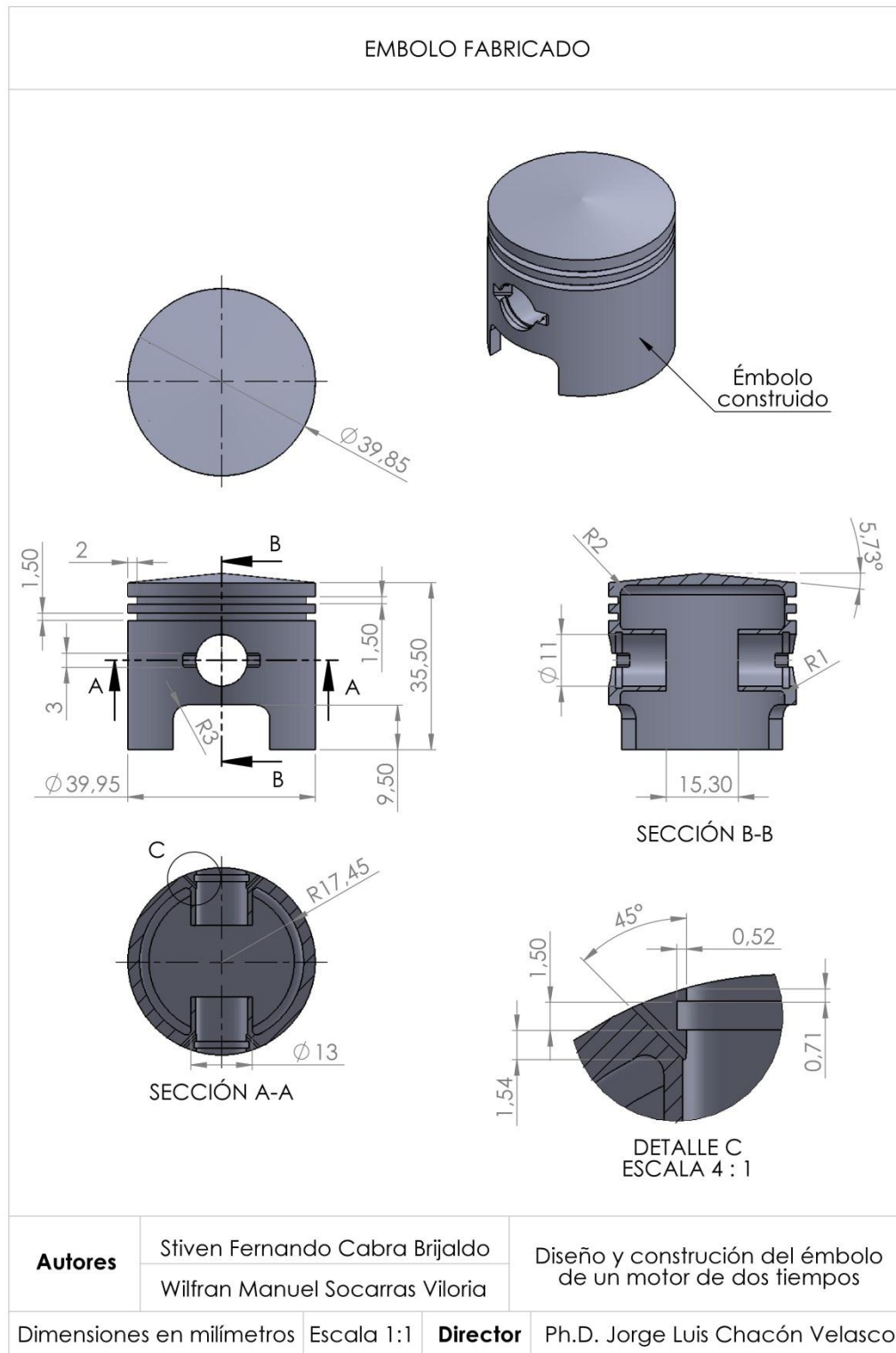


Ilustración 67. Émbolo fabricado



ANEXO T. Revoluciones por minuto en el proceso de mecanizado

Velocidades de corte y revoluciones para la operación del torno

Las velocidades de corte se designa con v_{corte} , el diámetro “d” de la pieza en milímetros y las revoluciones de la pieza por minuto con “n”, formando la siguiente ecuación:

$$v_{\text{corte}} = \frac{\pi * d * n}{1000} \left[\frac{\text{m}}{\text{min}} \right]$$

Las velocidades de corte más apropiadas para el mecanizado han sido determinadas por medio de ensayos, estos valores prácticos se han elegido utilizando la herramientas de acero rápido 18-20 % W (porcentaje de tungsteno), de acuerdo al cuadro 25, estos valores son muy importantes pues no se puede trabajar a una velocidad de corte cualquiera, si es demasiado pequeña el tiempo de trabajo es muy largo y si la velocidad es demasiado grande, la cuchilla de corte pierde dureza por recalentamiento lo que ocasiona desgaste que obliga a la cuchilla a un proceso de afilado frecuente.

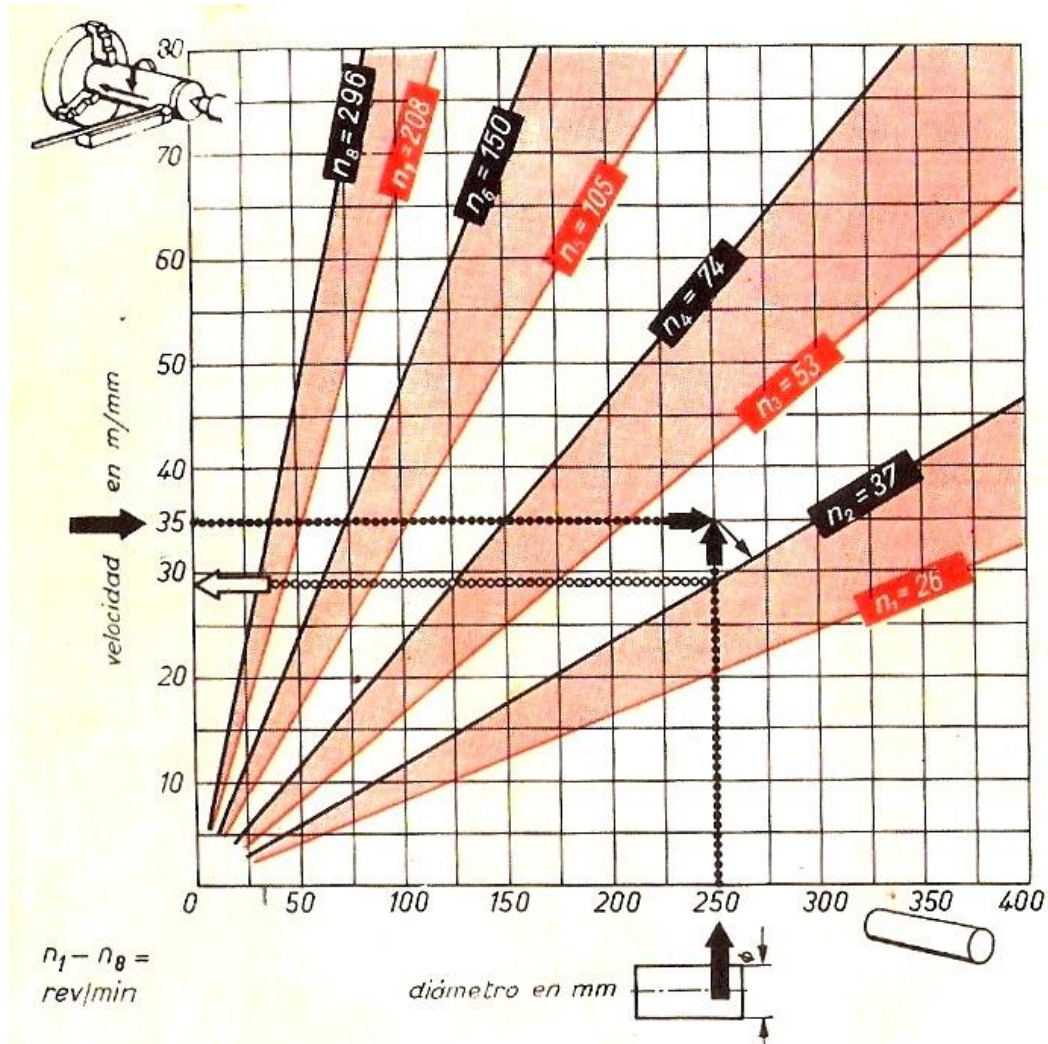
Cuadro 24. Velocidades de corte – valores medios utilizando herramientas de acero rápido 18-10 %W

Material a trabajar	Clase de trabajo					
	Tornear	Taladrar	Fresar	Acepillar**	Escariar	Brochar
Aleaciones de aluminio	D 90	80	D 70	60	44	Máximo de la maquina
	A 120		A 98			
D=Desbaste. A=Afinar. Numeración de velocidad de corte en [m/min]. **En limadoras y acepilladoras.						

Fuente: CASILLAS, A. L. Maquinas cálculos de taller. España: Paideia ediciones. 1958. p.591.

Para determinar el número de revoluciones se obtiene mediante tablas o gráficos, en los talleres lo más común y que ahorra mucho tiempo es leer el número de revoluciones mediante gráficos como el de la ilustración 68.

Ilustración 68. Grafico velocidad de corte – diámetro – revolución



Fuente: GERLING, H. Alrededor de las máquinas-herramientas. Caracas: Ed. Reverte. 1974. p.36.

De acuerdo a la cuadro 25 y la ilustración 95 obtenemos las revoluciones para cada proceso de mecanizado:

Cuadro 25. Resultados de las revoluciones para el mecanizado del émbolo

Proceso	Detallado en la ilustración	Diámetro [mm]	Velocidad de corte [m/min]	Revoluciones [rpm]
Cilindrada superficial	53, 54, 55 y 56	43,47 aprox.	90 (cuadro 25)	298 (hallada por ilustración 68)
Refrentado de tetones	57	---	----	1325 (asumida)
Barrenado	58	---	---	1800 (asumida)
Elaboración de chaveteros	59	---	---	1800 (asumida)
Alojamientos de segmentos	60	40,27 aprox.	90 (cuadro 25)	298 (hallada por ilustración 68)
Acabado superficial	61, 62, 63, 64, 65 y 66	39,95 aprox.	120 (cuadro 25)	298 (hallada por ilustración 68)

ANEXO U. Fichas técnicas del torno y del taladro usados en el mecanizado

Ilustración 69. Ficha técnica del taladro vertical

FICHA TECNICA DE TALADRO VERTICAL				CÓD.: A1-TV-01																																								
				F.A.: 05-06-2008																																								
				VERSIÓN 1																																								
DATOS DEL EQUIPO																																												
NOMBRE: TALADRO VERTICAL																																												
CODIGO: A1-TV-01																																												
UBICACIÓN: TALLER MANTENIMIENTO																																												
AREA: MECANIZADO																																												
FECHA DE COMPRA: 2010																																												
DATOS DEL FABRICANTE																																												
MODELO: ZJ4116																																												
SERIE: 705828																																												
MARCA: HYUNDAI																																												
DIMENSIONES	Ancho[m] 0.2	Alto[m] 1,2	Profundo[m] 0,8																																									
CARACTERISTICAS TECNICAS																																												
Motor Eléctrico			Dimensiones Características																																									
<ul style="list-style-type: none"> Voltaje de trabajo: 110/220 V Potencia : 0,55 KW Conexión monofasica Velocidad nominal: 1800 rpm Frecuencia: 60 Hz Máximo consumo: 5A 			<ul style="list-style-type: none"> Dimensiones de la mesa : ϕ 290 mm Distancia de brocal a la mesa: 0 - 750 mm Recorrido del cabezal: 360° 																																									
Brocal			Mesa																																									
<ul style="list-style-type: none"> Tipo: MT #2 Diámetro de broca : 16 mm máximo Carrera del brocal : 100mm Velocidad de 16 variaciones según sea requerido 			<ul style="list-style-type: none"> Rotación: 360° Desplazamiento longitudinal: 50 mm Desplazamiento transversal: 70 mm Desplazamiento vertical: 300 mm Grados de inclinación con la horizontal: 0 – 25° 																																									
																																												
<table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">A-4</td> <td style="padding: 2px;">A-3</td> <td style="padding: 2px;">B-4</td> <td style="padding: 2px;">A-2</td> <td style="padding: 2px;">C-4</td> <td style="padding: 2px;">B-3</td> <td style="padding: 2px;">D-4</td> <td style="padding: 2px;">A-1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">180</td> <td style="padding: 2px;">270</td> <td style="padding: 2px;">310</td> <td style="padding: 2px;">420</td> <td style="padding: 2px;">430</td> <td style="padding: 2px;">470</td> <td style="padding: 2px;">580</td> <td style="padding: 2px;">630</td> </tr> <tr> <td colspan="8" style="text-align: center;"> </td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">C-3</td> <td style="padding: 2px;">B-2</td> <td style="padding: 2px;">E-3</td> <td style="padding: 2px;">D-2</td> <td style="padding: 2px;">C-1</td> <td style="padding: 2px;">E-2</td> <td style="padding: 2px;">D-1</td> <td style="padding: 2px;">E-1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">650</td> <td style="padding: 2px;">720</td> <td style="padding: 2px;">1230</td> <td style="padding: 2px;">1320</td> <td style="padding: 2px;">1460</td> <td style="padding: 2px;">1880</td> <td style="padding: 2px;">1950</td> <td style="padding: 2px;">2770</td> </tr> </table>					A-4	A-3	B-4	A-2	C-4	B-3	D-4	A-1	180	270	310	420	430	470	580	630									C-3	B-2	E-3	D-2	C-1	E-2	D-1	E-1	650	720	1230	1320	1460	1880	1950	2770
A-4	A-3	B-4	A-2	C-4	B-3	D-4	A-1																																					
180	270	310	420	430	470	580	630																																					
C-3	B-2	E-3	D-2	C-1	E-2	D-1	E-1																																					
650	720	1230	1320	1460	1880	1950	2770																																					

Ilustración 70. Ficha técnica del torno

		FICHA TECNICA DE TORNO PARALELO		CÓD.: A1-TP-01	
				F.A.: 04-04-2007	
				VERSIÓN 1	

DATOS DEL EQUIPO																							
NOMBRE: TORNO PARALELO																							
CODIGO: A1-TP-01																							
UBICACIÓN: TALLER MANTENIMIENTO																							
AREA: MECANIZADO																							
FECHA DE COMPRA: 2001																							
DATOS DEL FABRICANTE																							
MODELO: LAM 350 RH																							
SERIE: 705828																							
MARCA: LANTAIN MACHINERY																							
DIMENSIONES	Ancho[m] 1,8	Alto[m] 1,2	Profundo[m] 0,6																				
CARACTERISTICAS TECNICAS																							
Motor Eléctrico		Dimensiones Características																					
<ul style="list-style-type: none"> Voltaje de trabajo: 220 V Potencia : 1,5 KW Conexión trifásica Velocidad nominal: 1700 rpm Frecuencia: 60 Hz Máximo consumo: 7A 		<ul style="list-style-type: none"> Ancho de la bancada: 188 mm Distancia de mordaza al contra punto: 0 - 1500 mm Distancia de centro mordaza a herramienta de corte : 0 - 120 mm Recorrido del carro <ul style="list-style-type: none"> Longitudinal : 0 – 750 mm Transversal : 0 – 160 mm 																					
Husillo		Roscas y Avance																					
<ul style="list-style-type: none"> Diámetro: 38 mm Velocidad de 9 variaciones según sea requerido <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td></td> <td style="background-color: yellow;">60</td> <td style="background-color: green;">95</td> <td style="background-color: orange;">145</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">I</td> <td style="text-align: center;">60</td> <td style="text-align: center;">95</td> <td style="text-align: center;">145</td> <td style="text-align: center;">A</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">II</td> <td style="text-align: center;">225</td> <td style="text-align: center;">355</td> <td style="text-align: center;">535</td> <td style="text-align: center;">B</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">III</td> <td style="text-align: center;">835</td> <td style="text-align: center;">1320</td> <td style="text-align: center;">2000</td> <td style="text-align: center;">C</td> </tr> </table>			60	95	145		I	60	95	145	A	II	225	355	535	B	III	835	1320	2000	C	<ul style="list-style-type: none"> Rangos de roscas métricas: 0,4 – 7 mm Roscas en pulgadas : 4 – 56 T.P.I Gama de avances longitudinales: 0,052 – 1,392 mm/rev 	
	60	95	145																				
I	60	95	145	A																			
II	225	355	535	B																			
III	835	1320	2000	C																			
Torreta		Contrapunta																					
<ul style="list-style-type: none"> Tipo convencional Tamaño: 16*16 mm 		<ul style="list-style-type: none"> Tipo de cono: morse 2 Diámetro de la camisa: 32 mm Avance de la contrapunta: 85 mm 																					
ACCESORIOS ADICIONALES																							
<ul style="list-style-type: none"> Mandril de 6" autocentrante de 3 mordazas Mandril de 8" independiente de 4 mordazas Indicador de caratula para roscas Lámpara de luz halógena. 																							



ANEXO V. Protocolo de pruebas

A continuación se presentara el proceso de prueba del émbolo fabricado cuando está sometido a trabajo como parte constitutiva del motor de la guadañadora.

Prueba de funcionamiento

Finalizada la fabricación del émbolo, se realizó las pruebas de funcionamiento, para esto se reemplazó la pieza original en el motor Shindaiwa S450EC1 por la fabricada durante la elaboración del proyecto. Este procedimiento se realizó en un taller de reparación de motocicletas, el montaje se puede ver en la ilustración 98.

Ilustración 71. Montaje del émbolo fabricado en el motor Shindaiwa



a.) Retiro del émbolo original del motor



b.) Cambio por el émbolo prototipo conectado a la biela en el motor



c.) Cierre del motor con el émbolo prototipo



d.) Motor operando con el émbolo prototipo

Las pruebas de funcionamiento del émbolo mientras opera en el motor se resumen en el cuadro 27.

Cuadro 26. Pruebas de funcionamiento del émbolo en el motor

Operación del motor [rpm]	Tiempo [minutos]	Resultado	Descripción
2750	20	Opera normalmente	Operación realizada en el motor sin operarlo para corte en la guadañadora
6900	20	Opera normalmente	
11200	20	Opera normalmente	Operación realizada en el motor a su máximo de revoluciones

Después de someter al émbolo a las pruebas de funcionamiento en el motor, se desmonto la pieza la cual se sometió a una inspección visual para detectar posibles daños producto de su interacción con el cilindro y el bulón. La inspección no mostro ninguna marca visible en su falda o alojamiento y su operatividad en el motor fue en general satisfactoria.

Prueba térmica

Aprovechando la instalación y puesta en funcionamiento del émbolo en el motor original, se realizó una inspección visual, térmica mediante la cámara termografía, en el cuadro 28 se muestran las temperaturas superficiales en la zona del cilindro

del motor, aunque es de suponer que el émbolo experimenta temperaturas superiores pues está dentro de la cámara de combustión.

Se puede apreciar que las temperaturas superficiales cuando se coloca el émbolo prototipo son mayores en comparación al émbolo original, esto se debe a que el prototipo no tiene la misma calidad en el acabado superficial que tiene el original como se estableció en las pruebas de rugosidad, esto genera que su interacción con el cilindro de motor sea más forzado aumentando su fricción, también se debe a que es muy probable que en el proceso de fundición se haya perdido ciertas propiedades físicas y térmicas de la aleación B390.0 al ser esta obtenida a partir de émbolos reciclados.

Cuadro 27. Temperatura exterior de trabajo

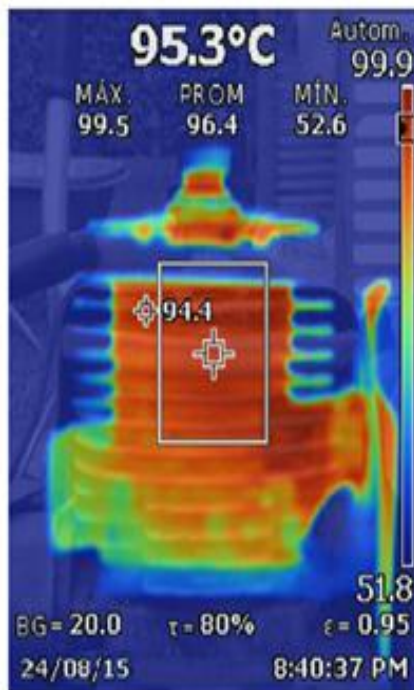
Temperatura		
Etapa (sin carga)	Original [°C]	Prototipo [°C]
Ralentí	94.4 (Figura 106 a)	105.4 (Figura 106 b)
Máxima	145.5 (Figura 107 a)	185.9 (Figura 107 b)

En las ilustraciones 99 y 100 se muestra la distribución de temperaturas en las superficies exteriores del sistema del motor tanto con el émbolo original como con el prototipo.

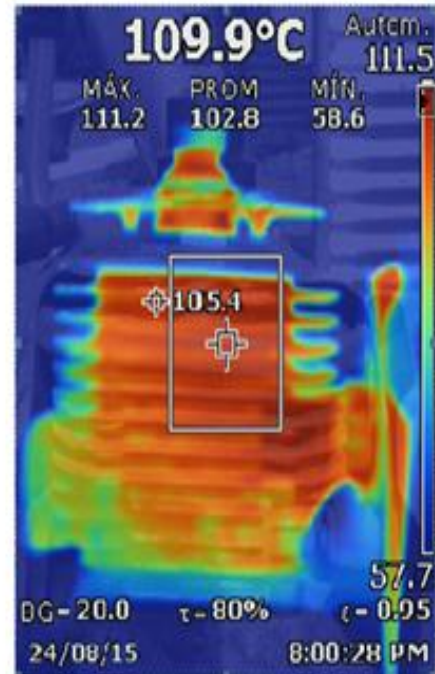
Como se puede apreciar existe un aumento de la temperatura exterior en el motor cuando se cambia el émbolo original por el prototipo debido a la diferencias en la rugosidad superficial de la falda del émbolo que generan un aumento de la fricción entre el émbolo y el cilindro, lo cual genera un aumento en la transferencia de calor.

Para determinar el desgaste de la falda del émbolo prototipo durante las pruebas de funcionamiento en el motor, se llevó a cabo nuevamente un proceso de metrología mediante un micrómetro digital que denoto que el diámetro de la cabeza del émbolo mantuvo sus dimensiones (39.85 mm) y en la parte hueca inferior donde termina la falda también mantuvo sus condiciones dimensionales (39.95 mm), además con el fin de corroborar si el émbolo prototipo cumple con la velocidad optima de trabajo, se midió su velocidad promedio con un tacómetro original y se comparó con la obtenida con el émbolo original cuando está en funcionamiento en el motor Shindaiwa, como se puede ver en el cuadro 29, la disminución en su velocidad se deriva al hecho de que la rugosidad de la falda del émbolo prototipo al ser mayor que la del émbolo original genera una fuerza de fricción un poco mayor.

Ilustración 72. Ralentí sin carga

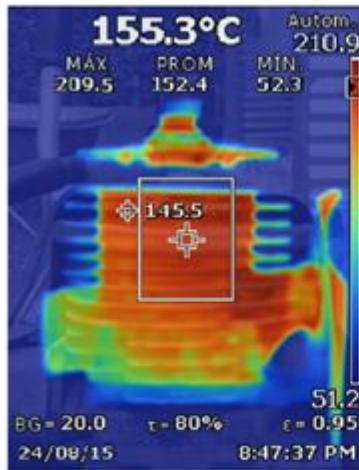


a.) Ralentí con el émbolo original

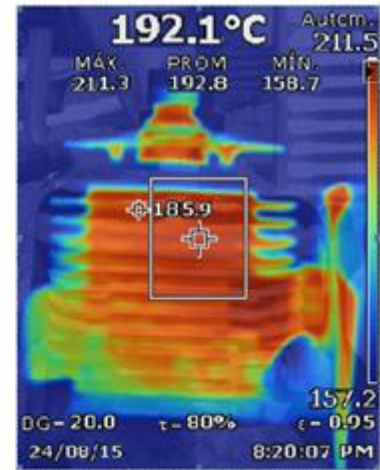


b.) Ralentí con el émbolo prototipo

Ilustración 73. Máxima temperatura exterior



a.) Máxima temperatura exterior del motor con el émbolo original



b.) Máxima temperatura exterior del motor con el émbolo prototipo

Cuadro 28. Velocidad promedio del motor Shindaiwa S450EC1

Velocidad en rpm (sin carga)	
Motor en funcionamiento	RPM
Con el émbolo original	7300
Con el émbolo prototipo	6900

ANEXO W. Análisis nodal de fallos

Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE), es una herramienta muy útil que permite de manera sistemática asegurar que han analizado y tenidos en cuenta todos los fallos potenciales en un proceso o producto, pues permite identificar sus variables significativas con el fin de determinar y establecer las acciones correctivas necesarias para la prevención del fallo, o la detección del mismo si es que este se produce, evitando en lo posible que productos defectuosos o inadecuados lleguen a manos del cliente.

El AMFE está dirigido a lograr un óptimo nivel de la calidad mediante análisis sistemáticos que contribuyen a identificar y prevenir los modos de fallo calculando el número de prioridad de riesgo (NPR) cuyos parámetros son la gravedad, ocurrencia y detección, mediante los cuales se priorizara las causas sobre las cuales habrá que actuar para evitar que se presenten dichos fallos.

Matemáticamente se calcula de la siguiente manera:

$$NPR = S * O * D$$

Dónde:

S: Gravedad de fallo

O: Probabilidad de ocurrencia

D: Probabilidad de no detección.

El AMFE se debería comenzar cuando exista cualquiera de los siguientes criterios:

- Cuando se desarrollen nuevos procesos o diseños.

- Cuando cambien diseños o procesos actuales sin importar cuál sea la razón.
- Cuando se encuentren nuevas aplicaciones para los productos o procesos actuales.
- Cuando se busquen mejoras a los diseños o procesos actuales.

Como regla general los archivos del AMFE se conservan durante el ciclo completo de vida del producto (AMFE de diseño) o mientras el proceso se siga haciendo (AMFE de proceso).

Amfe de diseño

El AMFE de diseño básicamente es un análisis preventivo que se le hace al diseño del émbolo, con el objetivo de anticiparse a los problemas y buscar posibles mejoras que eviten fallos durante el proceso de producción. Se analiza la elección del material, la configuración física, las dimensiones, los tipos de tratamiento que se han de aplicar y los posibles problemas de realización.

El NPR prioriza la causa potencial del fallo y las posibles acciones correctoras. El NPR también denominado como IPR (Índice de prioridad de riesgo), debe ser considerado solo si es mayor a 100 y se compara con el NPR futuro el cual debe ser menor con el fin de asegurar que se está haciendo una acción correctiva y una mejora de este fallo. Para ello se debe tener en cuenta los criterios que se presentan a continuación tanto para el producto como para el proceso:

El índice de gravedad de fallo (S): valora el nivel de percepción del cliente con respecto al posible fallo del producto (cuadro 30).

Cuadro 29. Gravedad de fallo

Criterio	Valor de S
INFIMA. El defecto es imperceptible por el usuario	1
ESCASA. El cliente puede notar un fallo menor, pero solo provoca una ligera molestia	2-3
BAJA. El cliente nota el fallo y le produce cierto enojo.	4-5
MODERADA. El fallo produce disgusto e insatisfacción al cliente.	6-7
ELEVADA. El fallo es crítico, originando un alto grado de insatisfacción en el cliente.	8-9
MUY ELEVADA. El fallo implica problemas de seguridad o de no conformidad.	10

Fuente: MERCADER, P. Elaboración de un análisis modal de fallos y efectos de un cigüeñal de fundición nodular para automoción. Cartagena: Universidad politécnica de Cartagena, 2008. p.27.

Probabilidad de ocurrencia (O): "Ocurrencia se define como la probabilidad de que una causa específica se produzca y dé lugar al modo de fallo.

El índice de la ocurrencia representa más bien un valor intuitivo más que un dato estadístico matemático, a no ser que se dispongan de datos históricos de fiabilidad o se haya modelizado y previsto éstos."³²

Los criterios a tener en cuenta en la probabilidad de ocurrencia se muestran en el cuadro 31.

³² MERCADER, P. Elaboración de un análisis modal de fallos y efectos de un cigüeñal de fundición nodular para automoción. Cartagena: Universidad politécnica de Cartagena, 2008. p.28.

Cuadro 30. Probabilidad de ocurrencia

Criterio	Valor de O
MUY ESCASA probabilidad de ocurrencia. Defecto inexistente en el pasado.	1
ESCASA probabilidad de ocurrencia. Muy pocos fallos en circunstancias.	2-3
FRECUENTE probabilidad de ocurrencia. En circunstancias similares anteriores el fallo se ha presentado con cierta frecuencia.	4-5
MODERADA probabilidad de ocurrencia. En circunstancias similares anteriores el fallo se ha presentado con cierta frecuencia.	6-7
ELEVADA probabilidad de ocurrencia. El fallo se ha presentado frecuentemente en el pasado.	8-9
MUY ELEVADA probabilidad de fallo. Es seguro que el fallo se producirá frecuentemente.	10

Fuente: MERCADER, P. Elaboración de un análisis modal de fallos y efectos de un cigüeñal de fundición nodular para automoción. Cartagena: Universidad politécnica de Cartagena, 2008. p.28.

Probabilidad de no detención (D): Este criterio indica la probabilidad de que el producto con el fallo, que supuestamente apareció, llegue al cliente. Este índice está íntimamente relacionado con los controles de detección de fallas y las causas por las cuales estos no son tan efectivos (cuadro 32). Teniendo en cuenta los parámetros anteriormente mencionados en las tablas 57 y 58 se presenta el AMFE de diseño del émbolo prototipo.

Amfe del proceso

El AMFE de proceso de fabricación se utiliza para asegurar la calidad de funcionamiento del émbolo según la fiabilidad del producto exigido por el cliente.

En el AMFE de proceso se analizan los fallos derivados del proceso de fabricación que se generaron antes de la entrega del producto al cliente. En este análisis se emplea la misma clasificación y criterios que en el AMFE de diseño los cuales están consignados para el AMFE de diseño.


Cuadro 31. Probabilidad detención

Criterio	Valor de D
MUY ESCASA. El defecto es obvio. Resulta muy improbable que no sea detectado por los controles existentes.	1
ESCASA. El defecto, aunque es obvio y fácilmente detectable, podría raramente escapar a algún control primario, pero sería posteriormente detectado.	2-3
MODERADA. El defecto es una característica de bastante difícil detección.	4-5
FRECUENTE. Defectos de difícil detección que con relativa frecuencia llegan al cliente.	6-7
ELEVADA. El defecto es de naturaleza tal, que su detección es relativamente improbable mediante los procedimientos convencionales de control y ensayo.	8-9
MUY ELEVADA. El defecto con mucha probabilidad llegará al cliente, por ser muy difícil detectable.	10


Fuente: MERCADER, P. Elaboración de un análisis modal de fallos y efectos de un cigüeñal de fundición nodular para automoción. Cartagena: Universidad politécnica de Cartagena, 2008. p.28.

En los siguientes cuadros se mostrara el AMFE del proceso concerniente al mecanizado del émbolo.

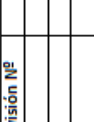
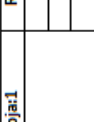
Cuadro 32. AMFE del diseño del émbolo (Hoja 1)

		ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (DE DISEÑO)										Hoja:1	Revisión Nº	Fecha	Por		
PRODUCTO: Émbolo fundido		PROCESO:										RESPONSABLE (S): Steven Cabra Brijalido Wilfran Socarras Vitoria					
ESPECIFICACION:		OPERACIÓN:										FECHA:					
FECHA DE EDICIÓN:		ACTUAR SOBRE NPR >= 100										REVISADO:					
Nombre producto /pieza/	Operación o función	Modo de fallo	Efectos de fallo	S	O	Controles actuales	D	NPR	Acción correctora	Responsables	Acciones implantadas	Vibración			NPR		
												S	O	D			
Émbolo	Transmitir la energía generada por la explosión en la cámara de combustión de la mezcla hacia el cigüeñal por medio de la biela.	Desgaste del émbolo.	Hojuras, ruidos y vibraciones	7	Reacción química entre el émbolo y aceite lubricante	1	Ninguno	8	56								
				7	Dureza superficial inapropiada	3	Ensayo mecánicos en muestreo	2	42								
			Vibraciones en el émbolo por transmisión de vibraciones desde fluidos	5	Inadecuado equilibrado por geometría de los contrapesos incorrecto	4		3	60								
			Rotura de una parte del elemento.	10	Presencia de cavidades internas por llenado incompleto del molde	3	Visual	2	60								
				10	Solidificación no direccional	3	Visual	2	60								
			Presión de ajuste excesiva	9	Dimensionado inapropiado del material	2	Visual	2	36								


Cuadro 33. AMFE del diseño del émbolo (Hoja 2)

		ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (DE DISEÑO)										Hoja:2	Revisión N°	Fecha	Por			
		PRODUCTO: Émbolo fundido					PROCESO:					RESPONSABLE (S):	Stiven Cabra Brijaldo	Wlfran Socarras Viloria				
ESPECIFICACION:		OPERACIÓN:										FECHA:						
FECHA DE EDICIÓN:		ACTUAR SOBRE NPR >= 100										REVISADO:						
Nombre producto /pieza/	Operación o función	Modo de fallo	Efectos de fallo	S	Causas del fallo	O	Controles actuales	D	NPR	NPR	Acciones implantadas	Responsables	Valoración			NPR		
													S	O	D			
Émbolo	Transmitir la energía generada por la explosión en la cámara de combustión de la mezcla hacia el cigüeñal por medio de la biela.	Rajado superficial de la pieza	Presencia de ralladuras en la pieza.	7	Presencia de suciedad proveniente del desprendimiento de partículas del molde.	6	Visual	3	126	126	Aplicar un proceso de desarenado con perdigones metálicos que elimine dicha suciedad de la superficie	Ingeniería	7	1	3	18		
		Deformaciones	Montado imposible del émbolo en el cilindro del motor	10	Enfriamiento discontinuo en las distintas partes del molde	2	Visual	1	20	20								
		Fisuras en la superficie del émbolo	Figurado de la superficie del cigüeñal	7	Concentración de esfuerzos en los cambios de sección	5	Visual	8	280	280								
		Porosidad del material	Deformación de la pieza y resistencia mecánica reducida.	7	Solubilidad elevada de los gases por temperatura de colada excesiva	8	Ninguno	3	168	168	Variación del sistema de colada	Ingeniería	7	2	3	42		
				6	Velocidad de colada excesiva, lo que facilita el atrapamiento de gases.													
				6	Microrechupado o por contracción del material													
		Pieza incompleta	Pieza incompleta	10	Llenado incompleto del molde por falta de fluidez.	2	Visual	1	20	20								
		Equilibrado inadecuado	Aumento de los esfuerzos a fatiga	3	Defecto de dimensionado del molde	3	Muestreo	5	45	45								


Cuadro 34. AMFE del diseño de proceso (Hoja 1)

		ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (DE PROCESO)										Revisión Nº		Fecha		Por		
		PROCESO:										Hojas:1						
PRODUCTO: Émbolo fundido		OPERACIÓN: ACTUAR SOBRE NPR: = 100										RESPONSABLE(S):						
ESPECIFICACION:		FECHA DE EDICIÓN:										FECHA:						
Nombre producto /pieza/	Operación o función	Modo de fallo	Efectos de fallo	S	Causas del fallo	O	Controles actuales	D	NPR	Acción correctora	Responsables	Acciones implantadas		Valoración		NPR		
												S	O	D				
Émbolo	Colada	Desgarramiento	Pieza inservible de difícil mecanizado posterior.	9	Separación del metal por una alta concentración de esfuerzos debido a indisponibilidad del metal para contraerse naturalmente.	2	Visual	5	90									
		Rechupado	Pieza inservible	10	Aporte del material fundido desde la mazorota incorrecto	3	Visual	3	90									
		Desgaste de incidencia	Deficiente acabado superficial	3	Velocidad de corte demasiado elevada	4	Visual	6	72									
		Desgaste por entalladura	Acabado deficiente	3	Resistencia al desgaste insuficiente	4	Visual	6	72									
		Caracterización	Acabado superficial deficiente	4	Fricción	2	Visual	5	30									
			Control de viruta y acabado superficial deficiente	3	Temperaturas de corte demasiado elevadas en el ángulo de desprendimiento de la falda del émbolo.	3	Visual	6	72									
		Deformación plástica por depresión en el filo	Control de viruta y acabado superficial deficiente	3	Temperatura de corte demasiado elevada junto a una alta presión	5	visual	7	105									
		Fiuras térmicas	Astillamiento y acabado superficial deficiente	5	Mecanizado discontinuo	1	Visual	5	25									

Cuadro 35. AMFE del diseño de proceso (Hoja 2)

		ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (DE PROCESO)										Revisión Nº		Fecha		Por	
PRODUCTO: Émbolo fundido		PROCESO:										RESPONSABLE(S):					
ESPECIFICACIÓN:		OPERACIÓN:										FECHA:					
FECHA DE EDICIÓN:		ACTUAR SOBRE NPRs=100										REVISADO:					
Nombre producto /pieza/	Operación o función	Modo de fallo	Efectos de fallo	S	Causas del fallo	O	Controles actuales	D	NPR	Acción correctora	Responsables implantadas	Valoración			NPR		
												S	O	D			
Émbolo	Cilindrada superficial (Torneado)	Astillamiento del filo de corte	Acabado superficial deficiente y desgaste de incidencia excesivo	4	Filo de aportación	7	Visual	4	112	Aumentar la velocidad de corte	Operaciones	4	3	4	48		
	Refrentado de tetones del émbolo (Taladrado)	Perfil del escariador incorrecto	Ajuste del alojamiento con el bulón imposible	7	Perfil de escariador, inadecuado con respecto a la sujeción de las mordazas	2	Visual	2	28								
	Barrenado alojamientos del bulón y construcción de chaveteros (Corte por torneado)	Desgaste de incidencia	Desdoblamiento de los alojamientos y chaveteros, lo que produce fricción y desgaste de los alojamientos	3	Escariador no está paralelo a los tetones	4	Visual	2	56								
		Desgaste por entalladura		3	Velocidad de corte demasiado elevada	4	Visual	6	72								
		Caracterización		3	Resistencia al desgaste insuficiente	4	Visual	6	72								
				3	Fricción	2	Visual	5	30								
				4	Temperaturas de corte demasiado elevadas en el ángulo de desprendimiento en el alojamiento del bulón	3	Visual	6	72								
		Deformación plástica por depresión en el filo		3	Temperatura de corte demasiado elevada junto a una alta presión	4	visual	7	84								
	Frías térmicas			5	Mecanizado discontinuo	1	Visual	5	25								

Cuadro 36. AMFE del diseño de proceso (Hoja 3)

 Universidad Industrial de Santander		ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y EFECTOS (DE PROCESO)										Hojas: 3	Revisión N°	Fecha	Por	
PRODUCTO: Émbolo fundido		PROCESO:										RESPONSABLE(S):	Stiven Cabra Brizaido Wilfran Socarras Vilorja			
ESPECIFICACION:		OPERACIÓN:										FECHA:				
FECHA DE EDICIÓN:		ACTUAR SOBRE NPRs=100										REVISADO:				
Nombre producto /pieza/	Operación o función	Modo de fallo	Efectos de fallo	S	Causas del fallo	O	Controles actuales	D	NPR	Acción correctora	Responsables	Acciones implantadas	Valoración			NPR
													S	O	D	
Émbolo	Acabado superficial y alojamientos de segmentos (Torneado)	Desgaste de incidencia	Desajustes entre los anillos y sus alojamientos que derivan a aumentos de fricción y filtraciones	3	Velocidad de corte del buril demasiado elevada	4	Visual	6	72							
				3	Resistencia al desgaste insuficiente	4	Visual	6	72							
				3	Fricción	2	Visual	5	30							
	Caracterización			4	Temperaturas de corte demasiado elevadas en el ángulo de desprendimiento de la falda del émbolo.	3	Visual	6	72							
				3	Temperatura de corte demasiado elevada junto a una alta presión	5	visual	7	105							
	Deformación plástica por depresión en el filo			5	Mecanizado discontinuo	1	Visual	5	25							
				4	Fil de aportación	3	Visual	4	48							