



Universidad
Industrial de
Santander

REINGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN DE UN CIGÜEÑAL PARA MOTOR DE DOS TIEMPOS MONO-CILÍNDRICO DE PEQUEÑA CILINDRADA

DIEGO ARMANDO SÁNCHEZ REYES

AWDRI ANTONIO VELASCO PEÑA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

**REINGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN DE UN CIGÜEÑAL PARA MOTOR DE DOS
TIEMPOS MONO-CILÍNDRICO DE PEQUEÑA CILINDRADA**

DIEGO ARMANDO SÁNCHEZ REYES

AWDRI ANTONIO VELASCO PEÑA

Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

ALBERTO DAVID PERTUZ COMAS

Ingeniero Mecánico, Ph.D

Co-Director

JORGE LUIS CHACON VELASCO

Ingeniero Mecánico, Ph.D

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

A mis padres, Raquel & Arnulfo, por su amor y su incansable dedicación a este tanto.

A mis hermanos, Carlos & Jimmy, por su incondicional apoyo, enseñanzas y cariño.

A mi sobrina Manuela Valentina por regalarme tantos momentos de alegría.

A esa preciosa mujer de sonrisa sin igual y mi más bonita casualidad, Luisa.

A mis amigos y amigas, quienes perdonarán que no nombre pues de hacerlo esta lista sería demasiado extensa, por su colaboración, apoyo, tiempo y muy muy grata compañía.

Diego.

A Dios, padre, por ser el autor de mi vida y fortaleza espiritual.

A mis padres, Lucia y Rafael, por su amor y su colaboración incondicional.

A mis hermanos, Adriana, Ricardo, Harles y Diego, por su apoyo y aprecio.

A mi novia Adriana Patricia por gratos momentos de apoyo, cariño y paciencia.

A mis amigos y compañeros de la escuela de Ingeniería mecánica por su colaboración, apoyo y amistad que fue reflejada en mi formación académica.

Awdri.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen de manera especial y sincera a las personas que de forma desinteresada colaboraron con el desarrollo de este proyecto.

A David Alberto Pertuz Comas, Dr. Ing. Mecánico y director del proyecto, por su oportuna colaboración y apoyo en la planeación y desarrollo de este proyecto.

A Jorge Luis Chacón Velasco, Dr. Ing. Mecánico y codirector del proyecto, por el acompañamiento y orientación en el desarrollo del presente trabajo.

A Octavio Andrés González, Dr. Ing. Mecánico y de materiales, por su colaboración en el desarrollo del presente trabajo.

A Jaime Alberto Gonzales, Espc. Ing. Metalúrgico, por su colaboración en el desarrollo del presente trabajo.

A los profesores y personal de la Escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales por su colaboración profesional.

Agradecemos al Laboratorio de Microscopía de la Universidad Industrial de Santander – Parque Tecnológico de Guatiguará y su personal, por el servicio de microscopía suministrado para la adquisición de datos.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. EL CIGÜEÑAL	19
1.1 GENERALIDADES	19
1.2 DETALLES CONSTRUCTIVOS	22
1.2.1 Materiales para su construcción	23
1.2.2 Cigüeñales pequeña cilindrada	24
1.2.3 Cigüeñales de cilindrada grande	26
1.3 TRABAJO DEL CIGÜEÑAL	27
1.4 AMORTIGUADOR DE VIBRACIONES TORSIONALES	28
1.5 MANIVELAS O BRAZOS	30
1.6 BALANCE O EQUILIBRIO DINAMICO	32
2. CARACTERIZACIÓN DEL CIGÜEÑAL	35
2.1 METROLOGÍA	35
2.2 ENSAYO DE METALOGRAFÍA	35
2.3 MICRODUREZA	37
2.4 DETECCIÓN DE COMPOSICIÓN DE ELEMENTOS	38
3. DISEÑO DEL CIGÜEÑAL	39
3.1 GENERALIDADES DEL MECANISMO MANIVELA-BIELA-CORREDERA	39
3.2 CINEMÁTICA DEL MECANISMO MANIVELA-BIELA-CORREDERA	40
3.3 CINÉTICA DEL MECANISMO MANIVELA-BIELA-CORREDERA	42
3.3.1 Fuerza máxima del mecanismo manivela-biela-pistón	43
3.4 ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL MOTOR	45
3.5 ANÁLISIS ESTÁTICO	47

3.6 ANÁLISIS DE FATIGA	49
3.6.1 Factor acabado superficial	52
3.6.2 Factor de tamaño	53
3.6.3 Factor de confiabilidad	53
3.6.4 Factor de temperatura	54
3.6.5 Factor diverso	54
3.6.6 Factor de carga	54
3.6.7 Cálculo de esfuerzos	54
3.6.8 Factor de seguridad	55
4. MANUFACTURA DEL CIGUEÑAL	56
4.1 MATERIA PRIMA	56
4.2 GEOMETRIA	56
4.3 PROCESOS DE MANUFACTURA	56
4.3.1 Mecanizado	56
4.3.2 Tratamiento térmico	57
4.3.3 Rectificado y balanceo	59
5. PROTOCOLO DE FUNCIONAMIENTO	61
5.1 INSPECCIÓN VISUAL	61
5.2 TEMPERATURA FUNCIONAL COMPARATIVA	61
5.3 DIMENSIONES	61
5.4 CARGA FATIGA DINÁMICA	62
5.5 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO	62
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	63
6.1 METROLOGÍA	63
6.2 METALOGRAFÍA	65
6.3 MICRODUREZA	68
6.4 ANÁLISIS DE ELEMENTOS	69

6.5 CINEMÁTICA	72
6.6 CINÉTICA Y TERMODINÁMICA	74
6.7 ESTÁTICA	75
6.8 FATIGA	76
6.8.1 Cálculo de esfuerzos	77
6.8.2 Factor de seguridad	78
6.8.3 Análisis de esfuerzos para el AISI 4140	79
6.9 APLICACIÓN DEL PROTOCOLO DE FUNCIONAMIENTO	83
6.9.1 Inspección visual	83
6.9.2 Temperatura funcional comparativa.	83
6.9.3 Dimensiones	85
6.9.4 Carga fatiga dinámica	86
6.9.5 Parámetros de funcionamiento	86
7. ANÁLISIS ECONÓMICO	88
7.1.1 Costos directos	88
7.1.2 COSTOS INDIRECTOS	89
7.1.3 Costo unitario	90
7.1.4 Beneficios	91
7.1.5 Beneficio para el estudiante	91
7.1.6 Beneficio para la institución	92
8. CONCLUSIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	95
ANEXOS	95

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Mecanismo pistón, biela y cigüeñal	19
Figura 2. Componentes del Cigüeñal	21
Figura 3. Sección de cigüeñal y partes que la componen	21
Figura 4. Secuencia de forja de cigüeñal en martinete horizontal	25
Figura 5. Procedimiento de forja de cigüeñal en martinete vertical	25
Figura 6. El muñón de biela y las manivelas forman una sola pieza	27
Figura 7. Cigüeñal Calado	27
Figura 8. Esquema de amortiguador de vibraciones torsionales	28
Figura 9. Cigüeñal de 4 cilindros con tres apoyos de bancada	30
Figura 10. Curvatura de unión entre manivela y muñón	31
Figura 11. Probetas ensayo metalografía	36
Figura 12. Modelo de reingeniería del cigüeñal	39
Figura 13. Diagrama geométrico mecanismo Manivela-Biela-Pistón.	40
Figura 14. Fuerzas y momentos de inercia.	43
Figura 15. Ciclo termodinámico para motores de dos tiempos	45
Figura 16. Esquema del cigüeñal	48
Figura 17. Diagrama de cuerpo libre cigüeñal.	48
Figura 18. Vista isométrica del cigüeñal B450	63
Figura 19. Vista frontal del cigüeñal B450	63
Figura 20. Vista lateral izquierda del cigüeñal	64
Figura 21. Vista lateral derecha del cigüeñal	64
Figura 22. Muñón de biela borde a 100X	66
Figura 23. Muñón de biela Centro a 500X	66
Figura 24. Muñón de bancada Borde a 100X	67
Figura 25. Muñón de bancada centro a 1000X	67
Figura 26. Perfil de microdureza muñón de biela borde	68

Figura 27. Gráfica del promedio de microdureza en el perfil.	68
Figura 28. Resultados del analisis composicional	70
Figura 29. Propiedades químicas AISI 5120	71
Figura 30. Posición [cm] vs ángulo [grados]	72
Figura 31. Velocidad [cm/s] vs ángulo [grados]	73
Figura 32. Aceleración [cm/s ²] vs ángulo [grados]	73
Figura 33. Comparación de factores de seguridad para materiales propuestos	79
Figura 34. Malla adaptativa al sólido	81
Figura 35. Tabla y curva de convergencia	81
Figura 36. Localización del esfuerzo equivalente	82
Figura 37. Factor de seguridad	82
Figura 38. Ralentí sin carga (original izq vs prototipo der)	84
Figura 39. Máxima temperatura exterior (original izq vs prototipo der)	84
Figura 40. Medida del muñón de bancada	86
Figura 41. Medición de velocidad	87

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Datasheet motor Shindaiwa B450	43
Tabla 1. Datasheet motor Shindaiwa B450 (Continuación)	44
Tabla 2. Esfuerzos característicos de los materiales propuestos	52
Tabla 3. Tiempos aproximados de mecanizado (Minutos)	57
Tabla 4. Principales medidas del cigüeñal	65
Tabla 5. Resultados de ensayos de microdureza	69
Tabla 6. Comparación aceros	71
Tabla 7. Datos geométricos del motor B-450	72
Tabla 8. Comparación de aceros propuestos AISI 1045, 4140, contra 5120	78
Tabla 9. Inspección visual	83
Tabla 10. Temperatura exterior de trabajo	85
Tabla 11. Diámetro de muñones del prototipo	85
Tabla 12. Carga fatiga dinámica	86
Tabla 13. Velocidad del eje de salida	87
Tabla 14. Personal	88
Tabla 15. Remuneraciones a no profesional	88
Tabla 16. Misceláneos	88
Tabla 17. Honorarios profesionales	89
Tabla 18. Remuneraciones a estudiantes	89
Tabla 19. Costo de ensayos	89
Tabla 20. Otros costos indirectos	89
Tabla 21. Total	90
Tabla 22. Costo prototipo	90

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Facturas	95
Anexo B. Microdureza	98
Anexo C. Montaje y puesta en funcionamiento	99
Anexo D. Ensayo de rugosidad	101
Anexo E. Planos prototipo	102
Anexo F. Directorio de laboratorios UIS	108

RESUMEN

TITULO: REINGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN DE UN CIGÜEÑAL PARA MOTOR DE DOS TIEMPOS MONO-CILÍNDRICO DE PEQUEÑA CILINDRADA*

AUTOR: DIEGO ARMANDO SÁNCHEZ REYES, AWDRI ANTONIO VELASCO PEÑA**

PALABRAS CLAVES: Diseño, Reingeniería, Construcción, Cigüeñal, Shindaiwa, Motor, B450.

DESCRIPCIÓN: Este trabajo tiene por objetivo presentar un antecedente de investigación, análisis, diseño, construcción y ensayo de piezas para motores de dos tiempos, en este caso en específico uno de sus principales componentes el cigüeñal, hacia la potencial construcción de un laboratorio de pruebas para máquinas térmicas alternativas en el Parque Tecnológico de Guatiguará. Se presenta la ingeniería conceptual para la implementación del rediseño y construcción del mismo, utilizando normas internacionales ASTM para los ensayos y consideraciones técnicas, para la aplicación en un motor Shindaiwa modelo B450 de dos tiempos, utilizando la tecnología local.

Las partes de movimiento de un motor son aquellas unidades que convierten las fuerzas desarrolladas en los cilindros productos de la combustión del combustible, en energía mecánica que es llevada al cigüeñal, estas partes están distribuidas en forma tal que el movimiento lineal alternativo es transformado a movimiento circular uniforme. Dichas piezas están divididas en tres grupos principales que son las que tienen movimiento rotatorio (los cigüeñales y ejes de levas), las que tienen movimientos alternativos (los pistones, los pasadores del pistón y anillos) y las que tienen movimientos rotatorios y alternativos (las bielas). En el primer grupo se encuentran los elementos que a juicio de muchos expertos, son los que revisten una especial importancia para el buen funcionamiento de los motores, cualquiera sea su tipo, forma o tamaño. Es por este motivo que la presente memoria pretende profundizar el estudio de algunos de los aspectos relacionados con el cigüeñal.

* Trabajo de grado

ABSTRACT

TITLE: RE-ENGINEERING AND CONSTRUCTION OF A CRANKSHAFT FOR TWO-STROKE ENGINE MONO-CYLINDRICAL OF SMALL DISPLACEMENT*

AUTHOR: DIEGO ARMANDO SÁNCHEZ REYES, AWDRI ANTONIO VELASCO PEÑA**

KEY WORDS: Design, Re-engineering, Construction, Crankshaft, Shindaiwa, Engine, B450.

SUMMARY: This work aims to present an antecedent of research, analysis, design, construction and testing of parts for two-stroke engines, in this specific case one of its main components Crankshaft, for the potential construction of a testing lab of machines thermal alternatives in Guatiguará Technology Park. Conceptual engineering is presented to implement the redesign and construction thereof, using ASTM International standards for testing and technical considerations, for application in a two-stroke Shindaiwa engine model B450, using local technology.

The moving parts of an engine are those units that convert forces developed in cylinder fuel combustion product into mechanical energy which is carried to the crankshaft, these parts are distributed in such a way that the reciprocating linear movement is transformed to move uniform circular. These pieces are divided into three main groups are those with rotation movements (crankshafts and camshafts), those with alternative movements (pistons, pins rings and piston) and having rotating and reciprocating (the rods). In the first group are the elements which in the opinion of many experts, are particularly important for the proper functioning of the engines, whatever their type, shape or size. It is for this reason that herein is intended to deepen the study of some aspects related to the crankshaft.

* Degree Work

** Physic Mechanical Faculty of Engineering, School of Mechanical Engineering, Director: Mechanical Engineer David Alberto Pertuz Comas, Codirector: Mechanical Engineer Jorge Luis Chacon Velasco.

INTRODUCCIÓN

El ciclo Otto es el ciclo termodinámico que se aplica en los motores de combustión interna de encendido provocado (motores de gasolina). Inventado por Nicolaus Otto en 1872. Se caracteriza porque en una primera aproximación teórica, todo el calor se aporta a volumen constante.

Las partes de movimiento de un motor son aquellas unidades que convierten las fuerzas desarrolladas en los cilindros productos de la combustión del combustible, en energía mecánica que es llevada al cigüeñal, estas partes están distribuidas en forma tal que el movimiento lineal alternativo es transformado a movimiento circular uniforme. Dichas piezas están divididas en tres grupos principales que son las que tienen movimiento rotatorio (los cigüeñales y ejes de levas), las que tienen movimientos alternativos (los pistones, los pasadores del pistón y anillos) y las que tienen movimientos rotatorios y alternativos (las bielas). En el primer grupo se encuentran los elementos que a juicio de muchos expertos, son los que revisten una especial importancia para el buen funcionamiento de los motores, cualquiera sea su tipo, forma o tamaño. Es por este motivo que la presente memoria pretende profundizar el estudio de algunos de los aspectos relacionados con el cigüeñal en conjunto con el grupo de investigación adscrito a la escuela de ingeniería mecánica.

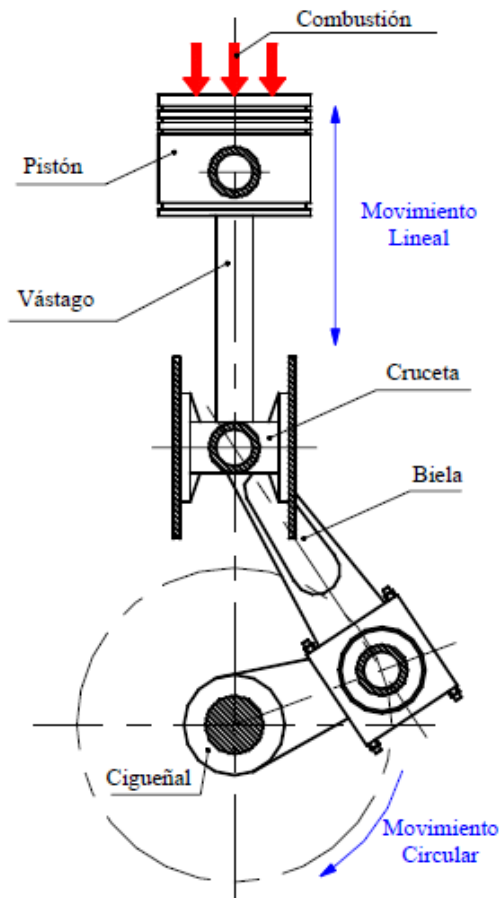
Los cigüeñales necesitan de un cuidado exclusivo ya que están sometidos a grandes esfuerzos flexotorsionales periódicos, por lo tanto, se debe evitar que exista la más mínima distorsión de su estructura ya que un pequeño descuido u omisión de una simple calibración puede traer graves consecuencias a la vida de una máquina, ocasionando hasta la paralización de la máquinas, lo que implica elevadísimos costos.

1. EL CIGÜEÑAL

1.1 GENERALIDADES

El cigüeñal es una de las piezas más importante de un motor de combustión interna, tiene la función de convertir el movimiento lineal alternativo del pistón, producido por la presión de los gases de combustión y por intermedio de la biela en movimiento circular uniforme, como se aprecia en la Figura 1.

Figura 1. Mecanismo pistón, biela y cigüeñal



Fuente: SÁNCHEZ MONTENEGRO, Rodrigo. El cigüeñal y su importancia en las naves mercantes.

El Cigüeñal también puede ser llamado en forma compuesta como Eje Cigüeñal, Árbol de Manivelas o Eje Motor. Los ejes están definidos como órganos de

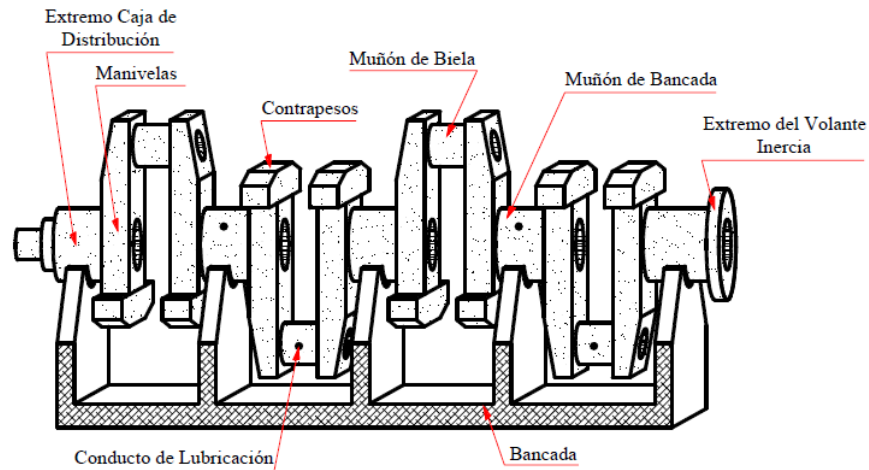
sustentación de las piezas de máquinas que están animadas por movimientos de rotación en V o de oscilación y han de permitir, por consiguiente, un movimiento de rotación completa o parcial a otros componentes (alrededor de su eje geométrico), como por ejemplo: ruedas, poleas, balancines y palancas. Los ejes destinados a servir de sostén a otros órganos se denominan con frecuencia “ejes de carga”, los cuales están sometidos únicamente a flexión bajo la acción de su propio peso, el de las piezas que han de sostener y de las fuerzas exteriores, pero nunca están sometidos a torsión por estas últimas. Sin embargo, estos ejes no dejan de sufrir un esfuerzo de torsión debido a la resistencia de rozamiento que se genera en la superficie de los muñones, pero su valor es tan insignificante que puede ser despreciado en el cálculo. Si el eje, además de servir de soporte, transmite momentos de rotación, entonces estos ejes están sometidos a esfuerzos de flexión y torsión a la vez.

El cigüeñal es sin duda el componente más caro, debido a los elevados costos de diseño y fabricación. En los primeros tiempos, el motor típico de combustión interna era mono cilíndrico y el cigüeñal, al tener una sola manivela, era completamente semejante al antiguo “berbiquí” de carpintero, denominado en francés “Vilebrequin”, cuyo término es aún hoy día el apelativo francés correspondiente al español cigüeñal. Los ingleses lo llaman “Crankshaft”, cuya traducción significa árbol-manivela.

El cigüeñal está compuesto por: (Ver Figura 2)

- Muñones, Puños o Alfileres de Bancada
- Muñones, Puños o Alfileres de Biela
- Manivela, Codo o Brazo de Cigüeñal
- Contrapesos
- Extremos de Caja del Distribución y del Amortiguador de Vibraciones
- Extremo del Volante de Inercia y Conductos de Lubricación

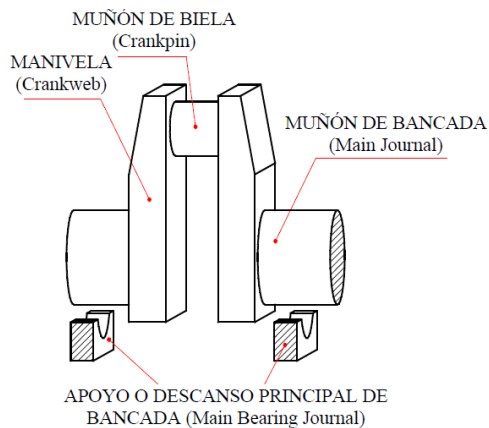
Figura 2. Componentes del Cigüeñal



Fuente: SÁNCHEZ MONTENEGRO, Rodrigo. El cigüeñal y su importancia en las naves mercantes.

Cada muñón de biela está formado por dos brazos llamados “manivela, brazo de cigüeñal o cigüeña” (Figura 3). Este muñón de biela y los muñones de bancada giran sobre los cojinetes principales de bancada, los cuales soportan al cigüeñal. La disposición de los apoyos de bancada obedece a razones de resistencia, repartición de fuerzas, ciclo de trabajo (según sea el motor de dos o de cuatro tiempos), y orden de encendido.

Figura 3. Sección de cigüeñal y partes que la componen



Fuente: SÁNCHEZ MONTENEGRO, Rodrigo. El cigüeñal y su importancia en las naves mercantes.

El número de descansos de bancada puede variar bastante, la elección depende de razones técnicas y económicas. La solución más económica es un cigüeñal con solo dos apoyos en los extremos o dos descansos principales de bancada, pero en este caso no puede pretenderse alcanzar potencias elevadas a altos regímenes de carga, de hecho, para evitar las flexiones y las consiguientes vibraciones del cigüeñal, es necesario que los muñones tengan el mayor diámetro posible y las manivelas una mayor sección. El cigüeñal y las cabezas de biela son pesados, por consiguiente las masas en rotación originan fuerzas considerables de flexión y torsión, por lo que el motor no puede operar a regímenes de carga muy elevados.

Las oscilaciones del cigüeñal son también la causa de ruidos y anomalías producidos por el golpeteo sobre los descansos de bancada. Por estos motivos, en los motores modernos y principalmente en los de mayor cilindrada, se prefiere la solución de emplear los cigüeñales con un número más de muñones de bancada con respecto al número de cilindros, o sea: N° muñones bancada = n° cilindros + 1

Esta solución es más costosa, pero permite alcanzar potencias específicas elevadas y al mismo tiempo, mayor ligereza del motor. Por esta misma razón, generalmente, los motores de 8 cilindros en línea tienen cigüeñales con 9 muñones de bancada, los de 8 cilindros en V poseen 5 muñones de bancada y los de 12 en V, 7 muñones de bancada, y así sucesivamente, todo en función del tipo de motor.

1.2 DETALLES CONSTRUCTIVOS

La misión del cigüeñal antes descrita no es otra que la de convertir, junto con la biela, el movimiento rectilíneo uniforme del pistón, en un movimiento circular. El cigüeñal es una pieza robusta, por lo que se ha de construir dándole las

dimensiones y espesores necesarios de manera que ofrezca una seguridad máxima en comparación con las otras piezas del motor, pues, los mayores esfuerzos a los que está sometido no solamente son producto de la transmisión de potencia y rozamientos, sino también por las vibraciones. La forma de construcción será enteriza, semi-armada o armada y dependerá del tamaño, número de cilindros, la disposición de estos, ya sea en línea o en V.

1.2.1 Materiales para su construcción. El material usado en la construcción de cigüeñales es muy variado, dependiendo principalmente del tamaño de éste y también de factores como velocidad y potencia del motor. Por lo anterior, las condiciones que debe reunir el material son las siguientes:

- Un límite elástico suficiente para transmitir el par motor y soportar los esfuerzos sin requerir dimensiones extraordinaria.
- Una gran resistencia a los golpes (combustión) para evitar agrietamientos
- Un límite de fatiga y coeficiente de amortiguamiento lo más elevados posibles para disminuir el efecto de las vibraciones.
- Un coeficiente de fricción lo más pequeño posible para evitar desgaste excesivo.
- Buenas condiciones de maquinado y forja.

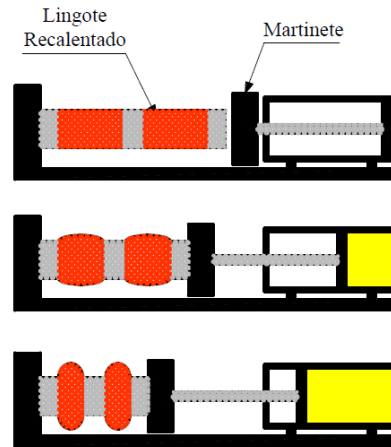
Estas características, de las cuales varias son contrapuestas, hace que sean muy diversos los materiales que se empleen en la construcción de cigüeñales. Ahora, independiente del material usado y el método de construcción, los cigüeñales son siempre provistos de un tratamiento térmico, esto con el objetivo de optimizar las características mecánicas de los materiales. Con esto se puede mejorar la dureza, la tenacidad, la resiliencia y la elasticidad, aumentando así la ductibilidad y capacidad para resistir impactos.

Algunos cigüeñales son endurecidos en la superficie de contacto de los muñones, ya sea de biela o de bancada, esto con el objeto de que un cojinete, cualquiera sea su aleación, pueda ser usado sin ocasionar desgaste indebido en el cigüeñal ya que, al tener una mayor dureza, se está ampliando su capacidad para oponerse a la penetración de otro cuerpo y a su vez, en forma proporcional se aumenta la resistencia al desgaste por rozamiento o por abrasión.

1.2.2 Cigüeñales pequeña cilindrada. En los motores pequeños y medianos, el cigüeñal es enterizo o de una sola pieza; este método de construcción es sin duda alguna el que proporciona un diseño de motor de mejores características, producto de su reducido peso y menor longitud entre centros de muñones y, además, es proporcional a su peso. Generalmente son construidos de acero dulce al carbono, con una carga de rotura de 44 a 70 Kg/mm², donde el contenido de carbono suele ser de 0,2 a 0,35%. Este material tiene buenas cualidades de forja y maquinado, presenta un coeficiente de amortiguamiento bastante bueno y es lo suficiente tenaz para soportar las fatigas moderadas para las que se calculan los cigüeñales.

En los motores de altas velocidades, los cigüeñales suelen ser de acero aleado de cromo-níquel o bien cromo-níquel-molibdeno, obteniéndose como resultado un material muy resistente a los choques, en que las cargas de rotura son a veces próximas a los 100 Kg/mm² y límite elástico del orden de 85 a 90 Kg/mm². La desventaja de este material es su difícil forja y maquinado.

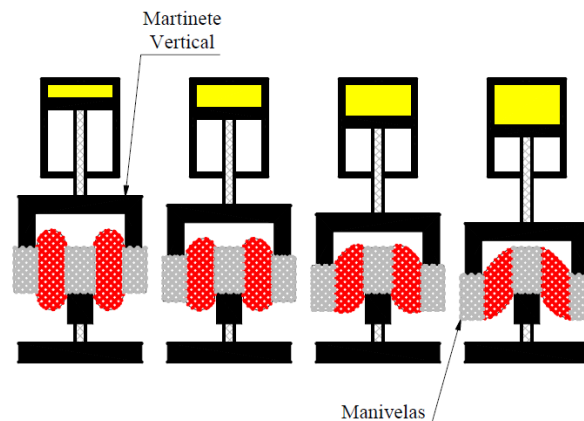
Figura 4. Secuencia de forja de cigüeñal en martinete horizontal



Fuente: SÁNCHEZ MONTENEGRO, Rodrigo. El cigüeñal y su importancia en las naves mercantes.

Los cigüeñales pequeños son forjados a martinete horizontal y vertical tal y como se aprecia en la secuencia de las Figuras 4 y 5. Estos son forjados a partir de un lingote con ciertas áreas en calientes, de donde se dará origen a las manivelas. El lingote se obtendrá por medio del procedimiento Siemens-Martín. Este método de obtención de acero es utilizado para conseguir el contenido de carbono deseado y además poder mantener alta la temperatura del horno (1550 a 1650°C) durante varias horas, como también reducir por oxidación la mayoría de los materiales que son denominados como impurezas silicio, fósforo, manganeso y azufre, que combinados con la caliza forman la escoria.

Figura 5. Procedimiento de forja de cigüeñal en martinete vertical



Fuente: SÁNCHEZ MONTENEGRO, Rodrigo. El cigüeñal y su importancia en las naves mercantes.

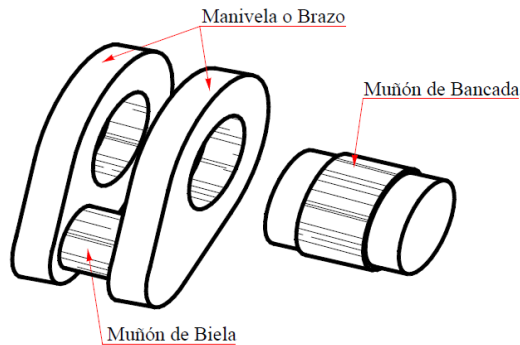
1.2.3 Cigüeñales de cilindrada grande. En los motores de mayor dimensión cuando por dificultad de forja no es posible emplear el método constructivo enterizo se utiliza el método semi-armado o armado, en cuyo caso el material de las manivelas puede ser de acero forjado dulce o acero fundido y el material de los muñones, ya sea bancada o biela, será de acero forjado, esto por las buenas cualidades de maquinado.

Cuando se da el caso que el cigüeñal es de gran longitud, este se divide en dos o más secciones, las que son unidas por medio de pletinas circulares y pernos de fijación, esto permite que sean intercambiables, obteniéndose mayor economía y simplicidad a la hora de realizar el mantenimiento

Como ya se mencionó, la construcción de cigüeñales de gran tamaño puede hacerse de dos formas; La primera de ellas es el método armado, consiste en que las manivelas o brazos, los muñones de biela y los muñones de bancada, se forjan por separado para ser ensamblados posteriormente en caliente. Esta construcción solo es aconsejable cuando la carrera del motor es mayor en relación con el diámetro de los muñones y permite que entre las periferias de los muñones, en la manivela, quede una distancia recomendada por los fabricantes de por lo menos $1/3$ del diámetro de dichos muñones.

Cuando esta disposición no es posible se recurre al método semi-armado, que tiene aplicación en motores de menor tamaño. En estos las manivelas y los muñones de biela son una sola pieza y sólo hay que calar los muñones de bancada, tal y como se aprecia en la Figura 6.

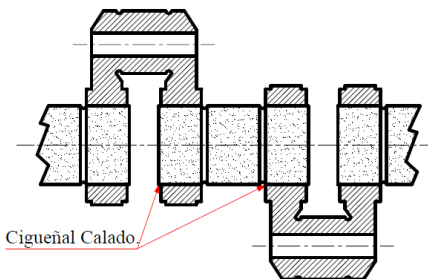
Figura 6. El muñón de biela y las manivelas forman una sola pieza



Fuente: SÁNCHEZ MONTENEGRO, Rodrigo. El cigüeñal y su importancia en las naves mercantes.

El calado en ambos métodos de construcción se efectúa calentando la manivela. Estas se introducen a un horno durante unas horas, exponiéndola a temperaturas que oscilan entre 200 y 400°C, obteniéndose así una dilatación aproximada a 1/200 del diámetro, lo cual permite la introducción de los muñones, formando así las secciones de cigüeñal, que una vez frías, quedan rígidamente unidas, como se aprecia en la Figura 7.

Figura 7. Cigüeñal Calado



Fuente: SÁNCHEZ MONTENEGRO, Rodrigo. El cigüeñal y su importancia en las naves mercantes.

1.3 TRABAJO DEL CIGÜEÑAL

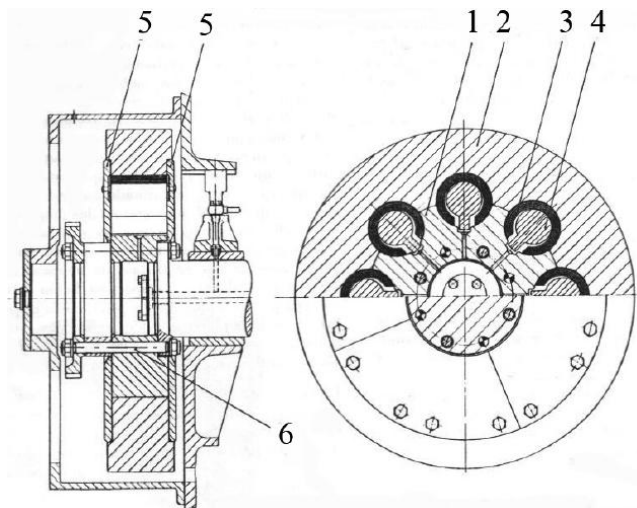
El cigüeñal es una pieza que se encarga de transmitir todo el esfuerzo útil producido por la combustión al exterior. Este recibe los embates de cada

combustión y por necesidad de funcionamiento trabaja intensivamente bajo todas las formas posibles de torsión, flexión, cortadura y vibración, por lo mismo y para evitar que los motores tengan tamaños exagerados, resulta con formas muy variadas y adaptables a la disposición de los apoyos de bancada.

1.4 AMORTIGUADOR DE VIBRACIONES TORSIONALES

El amortiguador de vibraciones torsionales tiene la función de contrarrestar las deflexiones excesivas en el cigüeñal, esto al pasar por las revoluciones que producen vibraciones las cuales son críticas para éste. Además de producir una operación más silenciosa, reduce esfuerzos y desgastes, provocando así una prolongación de la vida útil del cigüeñal.

Figura 8. Esquema de amortiguador de vibraciones torsionales



Fuente: SÁNCHEZ MONTENEGRO, Rodrigo. El cigüeñal y su importancia en las naves mercantes.

El amortiguador de vibraciones torsionales está colocado en la extremidad libre del cigüeñal, opuesta al acoplamiento y consta de una estrella arrastradora (1), la corona giratoria (2), los paquetes de casquillos elásticos (3), los tornillos limitadores de carrera (4) y las tapas laterales (5).

La estrella arrastradora esta rígidamente unida al árbol mediante tornillos calibradores (6), la cual soporta la corona giratoria. La unión elástica entre las dos partes integrantes se consigue mediante paquetes de casquillos elásticos, cuya elasticidad está adaptada a las condiciones de trabajo. Los paquetes de casquillos elásticos se colocan en huecos que se encuentran ubicados entre la estrella arrastradora y la corona giratoria. Para proteger los casquillos elásticos de las sobrecargas, ellos contienen, en modo de núcleo, tornillos limitadores de carrera, que a su vez están guiados en ranuras de tope en la estrella arrastradora; ellos aseguran además los casquillos elásticos contra las torsiones. Las tapas laterales sirven para sellar la cámara de aceite del amortiguador de vibraciones.

El amortiguador de vibraciones torsionales está conectado al sistema de aceite lubricante del motor y debe siempre estar con aceite.

La estrella arrastradora, debido a su unión rígida con el cigüeñal, sigue todos los movimientos de la extremidad del cigüeñal, mientras que la corona giratoria, colocada elásticamente mediante los paquetes de casquillos elásticos, puede ejecutar movimientos propios.

Mientras el cigüeñal gira uniformemente y sin vibraciones torsionales, también la corona giratoria exterior tiene la tendencia a moverse de manera uniforme. Cuando, sin embargo, el número de revoluciones se acercase a una velocidad crítica, de modo que la extremidad del cigüeñal junto con la estrella arrastradora del amortiguador ejecuta unas vibraciones, entonces la corona giratoria exterior, debido a su inercia junto a la unión elástica, y la fricción creada así entre las hojas de los ductos ejerce un efecto de amortiguador sobre el sistema de vibraciones torsionales.

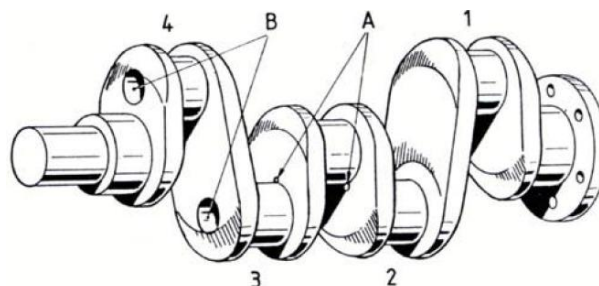
Para mantener un buen efecto amortiguador de los paquetes de casquillos elásticos es muy importante que estos durante la marcha del motor se encuentren bajo la presión permanente del aceite lubricante. El amortiguador de vibraciones se abastece con aceite lubricante desde el cigüeñal. Por lo tanto, es importante verificar durante las inspecciones que los conductos de aceite del cigüeñal estén limpios, como así los conductos de aceite en la estrella arrastradora del amortiguador.

1.5 MANIVELAS O BRAZOS

Las manivelas son de formas variadas, ello obedece precisamente a que para resolver las múltiples exigencias que tiene el cigüeñal, cada constructor sigue un diseño diferente. Es por eso que conviene conocer los puntos delicados en donde pueden romperse los cigüeñales.

Un cigüeñal muy rígido, es decir, con manivelas anchas, se rompe fácilmente porque concentra mucho esfuerzo en los puntos de unión interior "A" entre muñón y manivela, como se aprecia en la Figura 9, por eso, en general, las manivelas son anchas pero delgadas.

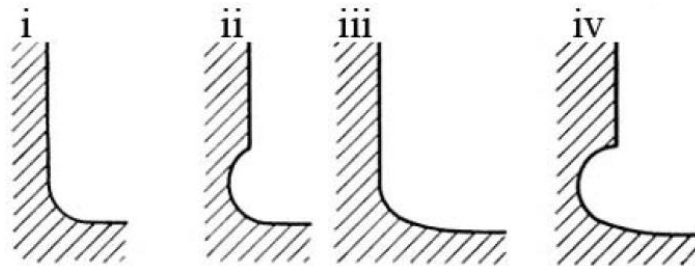
Figura 9. Cigüeñal de 4 cilindros con tres apoyos de bancada



Fuente: SÁNCHEZ MONTENEGRO, Rodrigo. El cigüeñal y su importancia en las naves mercantes.

Si en los puntos “A” donde hay siempre una unión redondeada con un radio pequeño, o sea, menos del 4% del diámetro de los muñones de bancada o de biela, no es conveniente que haya alguna señal o corte de herramienta, ya que es fácil que allí comience una fisura del cigüeñal, lo que puede provocar el colapso de éste.

Figura 10. Curvatura de unión entre manivela y muñón



Fuente: SÁNCHEZ MONTENEGRO, Rodrigo. El cigüeñal y su importancia en las naves mercantes.

La Figura 10, representa en forma aumentada el punto de empalme “A” entre la manivela y el muñón de la Figura 9. El primer diseño (i) es el normal, pero se pierde superficie de apoyo en los cojinetes ya sea de bancada o de biela, por ello es preferible el segundo (ii) que no concentra esfuerzos y permite aprovechar todo el apoyo. Los dos últimos (iii o iv) son teóricamente mejores, ya que al tener una forma más curva, disipan los esfuerzos.

Como el aceite que llega a los descansos de apoyo principales de bancada, debe ser conducido a los descansos de biela, el camino es a través de orificios hechos en las manivelas del cigüeñal y según la disposición de esos orificios es posible dar flexibilidad a la pieza, pero también, y es lo más corriente obligar a concentrar esfuerzos y crear nuevas posibilidades de rotura.

Por ello hay que saber que las piezas sometidas a esfuerzos alternativos son muy sensibles a las fallas, no ocurre lo mismo con las cargas estáticas, constantes o no constantes. Por fallas, se entenderá, cualquier falta de homogeneidad del material,

cualquier ángulo vivo o cambio brusco de sección o dirección, toda clase de cortes, raspaduras, barbas, señales de herramienta. No se debe dejar nunca de pulir, alisar e igualar superficies, de redondear cantos, separar barbas y virutas como también suavizar ángulos, a no ser, como en los servomecanismos que no tengan función resistente sino distribuidora de fluidos ya que este es el único caso en que los cantos han de ser vivos porque obedecen a la necesidad de marcar con precisión un tiempo de cierre o abertura.

1.6 BALANCE O EQUILIBRIO DINAMICO

El objetivo del equilibrio dinámico es reducir esencialmente dos factores que son nocivos para el funcionamiento normal del cigüeñal:

- Las vibraciones del motor causadas por las fuerzas y momentos generados por la presión de los gases en los cilindros y por las piezas en movimiento alternativo y giratorio (pistones, bielas y cigüeñal).
- Las cargas sobre los cojinetes de bancada.

No es posible equilibrar todas las fuerzas que producen vibraciones en el motor, sin embargo, las principales fuerzas pueden ser casi totalmente equilibradas por la acción de pesos, que son adicionados al cigüeñal.

El equilibrio por adición de pesos, que crea fuerzas iguales y opuestas a aquellas de la inercia, es conocido como compensación. Generalmente, después de la compensación todavía hay algunas pequeñas fuerzas remanentes que no han sido completamente equilibradas. Estas fuerzas remanentes son generadas por las piezas en movimiento alternativo, ya que es posible compensar completamente todas las principales fuerzas (centrifugas) que afectan el cigüeñal.

Todas las piezas en rotación están sujetas a dos clases de desequilibrios, ellas son llamadas desequilibrio estático y desequilibrio dinámico. La condición desequilibrada en ambos casos puede ser fácilmente determinada y corregida por compensación.

Una prueba estática se produce colocando los extremos de la pieza, en este caso el cigüeñal, en rotación sobre caballetes de soporte perfectamente paralelos, horizontales y lisos. Si está estáticamente desequilibrada, la pieza rodará sobre los caballetes hasta que su centro de gravedad alcance su posición más baja y entonces llegará a detenerse. Si su centro de gravedad descansa a lo largo de su eje geométrico, ésta permanecerá detenida cuando es colocada en cualquier posición y entonces se puede decir que la pieza está en equilibrio estático. Ocurre frecuentemente que el centro de gravedad de un cuerpo descansa en su eje de rotación, de manera que su forma irregular o composición genera una fuerza perturbadora cuando el cuerpo es rotado. En este caso, el cuerpo estaría en equilibrio estático y desequilibrio dinámico. En general, antes de ser equilibrado, la mayoría de las piezas de rotación se haya en desequilibrio estático y dinámico. En todos los casos, se puede obtener el completo equilibrio agregando pesos al cuerpo de rotación, si se conoce el grado y la posición del desequilibrio.

La experiencia ha demostrado que con los motores grandes y de alta velocidad, las máquinas de equilibrar dan buenos resultados, pero no aseguran que se produzcan las vibraciones excesivas en el servicio. Los motores en el servicio deben operar generalmente sobre una gran variedad de velocidades y por esta razón no son aceptados hasta después de haber sido probado en todas las velocidades a las cuales deben operar.

Los cigüeñales pueden ser finamente equilibrados después de que sean instalados en los motores, midiendo la amplitud y situación de la vibración con un vibrómetro para luego agregar o sacar pesos de compensación al cigüeñal. En

cualquier evento, todas las fuerzas de rotación del motor deben estar equilibradas tan exactamente como sea posible, de lo contrario las vibraciones resultantes producirán una falla que llevara al colapso del motor.

2. CATACTERIZACIÓN DEL CIGÜEÑAL

A continuación se presentan los ensayos que se realizan al cigüeñal original del motor Shindaiwa B-45, con la finalidad de poder caracterizar tanto sus principales propiedades físicas como químicas:

2.1 METROLOGÍA

Los principios y métodos de medición usados en ingeniería y en cualquier ciencia exacta son muchas veces el punto de partida y generalmente el de llegada para cualquier estudio, investigación o desarrollo que se pretenda realizar tanto a una pieza como a un fenómeno físico. “La metrología en ingeniería se define como la medición de dimensiones, entre ellas la longitud, espesor, diámetro, conicidad, ángulo, planicidad, perfil y otras.”*

En este caso de investigación el elemento mecánico cigüeñal del motor Shindaiwa B450 original de fabricación japonesa es medido con un calibrador pie de rey Mitutoyo ABSOLUTE Coolant Proof Series 500 with Dust/Water Protection Conforming to IP67 Level, micrómetro Coolant Proof Series 293-with Dust/Water Protection Conforming to IP65 Level y balanza digital OHAUS. Mediciones a realizar en el departamento de metrología del ICP seccional Piedecuesta.

2.2 ENSAYO DE METALOGRAFÍA

La metalografía consiste en el análisis de la estructura y constitución de los metales y las aleaciones. Con este ensayo se puede determinar tamaño de grano, forma, segregaciones o irregularidades, también éste puede revelar los

* KALPAKJIAN, Serope. Manufactura, ingeniería y tecnología. Traducido: Jaime Espinosa Limón. 5 ed. México D.F.: Pearson educación, 2008. p. 1085. ISBN 0-13-148965-8

tratamientos térmicos, la estructura interna e incluso la naturaleza del material usado para fabricar la pieza; para el cual se necesita de un desbaste y acabado muy fino de la muestra, del ataque de un ácido especial (como el Nital) y de un microscopio de grandes aumentos. El análisis metalográfico que se realiza a la muestra obtenida del cigüeñal del motor Shindaiwa B-450 de fabricación japonesa, según la norma ASTM E3, se describe a continuación:

Se realiza un corte transversal (F) a la muestra (Cigüeñal Shindaiwa B-450 en muñón de biela y bancada) con un disco abrasivo de carburo de SIC con refrigerante (emulsión - taladrina) en una maquina BOULHER U.S.A.

Figura 11. Probetas ensayo metalografía



Luego se pule la muestra para ser insertada en un contenedor de polímero (baquelita) con una máquina de prensado en caliente. A continuación se lija la probeta con una lija áspera hasta llegar a una lija fina cada 90°, en este ensayo se emplean lijas N° 180, 240, 320, 380, 400, 1200 y 1500 siendo esta ultima la más fina; después de este lijado se pule la probeta con pasta de diamante en una máquina pulidora modelo FORCIPOL 2V marca Metkon de 2 platos de 200/250

mm a una velocidad de giro de 246 rpm durante 5 minutos aproximadamente. Posteriormente se ataca la muestra con una solución de alcohol etílico y ácido nítrico (Nital, que la norma ASTM E407 identifica con el número 74 y cuya composición indica como: 1 ml - 5 ml de HNO₃ y 100 ml de etanol (95%) o metanol (95%.) y se procede a realizar la visualización en el microscopio Olympus con rango que varía desde 100X hasta 2000X

2.3 MICRODUREZA

Se entiende por dureza la propiedad de la capa superficial de un material de resistir la deformación elástica, plástica y destrucción, en presencia de esfuerzos de contacto locales inferidos por otro cuerpo, más duro, el cual no sufre deformaciones residuales (indentador ó penetrador), de determinada forma y dimensiones. La norma E384 de ASTM International, es el método de prueba para medir la dureza Vickers de una muestra. La norma está bajo la jurisdicción del Subcomité E04.05 de la ASTM International sobre pruebas de dureza por microindentación, que forma parte del Comité E04 de ASTM International sobre metalografía. En el pasado, las pruebas de dureza solían estar pensadas para realizar pruebas de microdureza (E384) o de macrodureza (E92). La principal diferencia entre las dos metodologías es que las fuerzas de prueba usadas con microdureza son de 1 kg o menos y con macrodureza 1 kg o más.

El ensayo de microdureza se realiza en el laboratorio 203 de microscopia, sede Guatiguará, con las especificaciones requeridas por el laboratorista en este caso pulida con pasta de diamante y que no contenga algún tipo de sustancia química, se coloca la muestra en el equipo Innovatest 400 TM series.y según la norma ASTM E-92 se realizan tres (3) pruebas con punta de diamante (Fuerza aplicada 0.1HV (0.9807N), objetivo a 20X con tiempo de identificación 10 segundos) en diferentes áreas como se muestra en la figura 26, con resultados en dureza Vickers.

2.4 DETECCIÓN DE COMPOSICIÓN DE ELEMENTOS

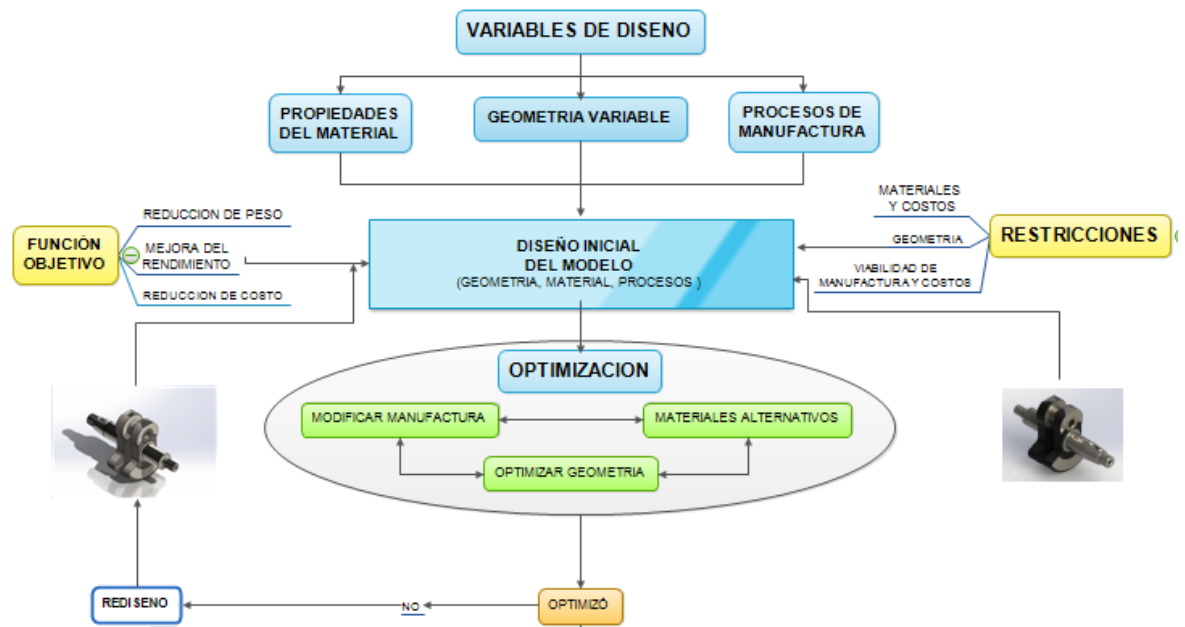
Q4 Tasman es un espectrómetro de emisión óptica basado en CCD con tecnología vanguardista destinado al análisis de metales: método de análisis: hierro Global (Fe100) el cual mediante la técnica de espectrometría por chispa utilizando un gas noble (en este caso Argón) crea un arco eléctrico entre dos electrodos, donde uno de los electrodos termina siendo la misma pieza a examinar (el muñón de biela y el muñón de bancada). Para este ensayo destructivo se empleó la norma ASTM E-1086-14 y con la colaboración del profesor Rafael Cabanzo de la Escuela de Física de la UIS y de los investigadores del Parque Tecnológico de Guatiguará pertenecientes al Grupo de Investigación en Corrosión (GIC).

Para llevar a cabo el ensayo de análisis de elementos, se posiciona la muestra en el equipo, se obtiene un haz de luz, que dependiendo de los elementos que componen el material con el que se fabricó la pieza, emite diferentes longitudes de onda consiguiendo de dicho fenómeno físico-químico las cantidades existentes de los mismos; esta huella de espectrometría termina por caracterizar el material en estudio, cuyos porcentajes pueden variar de una pieza a otra, incluso en el caso de dos piezas idénticas, en este caso en particular es una aleación de acero, y la composición química de la misma varía por factores como la temperatura, la atmósfera controlada, el tiempo, etc.

3. DISEÑO DEL CIGÜEÑAL

En este capítulo se pretende mostrar la metodología del diseño propuesto de reingeniería del cigüeñal en cuanto a la optimización geométrica y de material siguiendo el siguiente modelo de mejora:

Figura 12. Modelo de reingeniería del cigüeñal

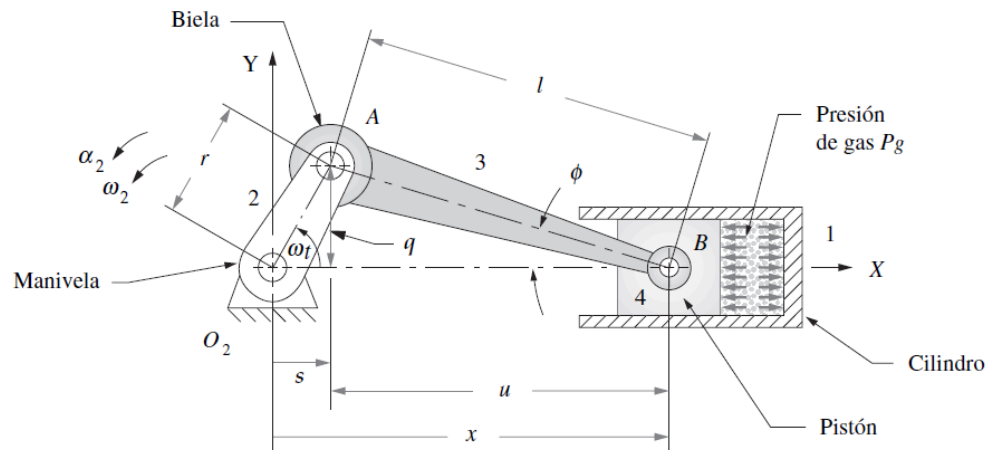


3.1 GENERALIDADES DEL MECANISMO MANIVELA-BIELA-CORREDERA

Uno de los mecanismos más conocidos y aplicados en la industria y en el mundo 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 y muchas otras aplicaciones. Por tanto el estudio, cinemático y cinético de dicho mecanismo es fundamental para la presente investigación y se presenta a continuación:

3.2 CINEMÁTICA DEL MECANISMO MANIVELA-BIELA-CORREDERA

Figura 13. Diagrama geométrico mecanismo Manivela-Biela-Pistón.



Fuente: NORTON, Robert L. Diseño de maquinaria, síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. Cuarta edición. McGraw-Hill. 2008. P. 576.

r = Radio de la manivela

l = Longitud de la biela

θ = Ángulo de la manivela

ϕ = El Ángulo q forma la biela con el eje X

ω = Velocidad Angular

Se construyen los triángulos rectángulos de la geometría rqs y lqu :

$$q = r \operatorname{sen}(\theta) = l \operatorname{sen}(\phi)$$

$$\theta = \omega t$$

$$r \operatorname{sen}(\omega t) = l \operatorname{sen}(\phi)$$

$$\frac{r}{l} \operatorname{sen}(\omega t) = \operatorname{sen}(\phi)$$

$$s = r \operatorname{cos}(\omega t)$$

$$u = l \operatorname{cos}(\phi)$$

$$x = s + u = r \operatorname{cos}(\omega t) + l \operatorname{cos}(\phi)$$

$$\cos(\varnothing) = \sqrt{1 - \text{sen}(\varnothing)^2}$$

$$\cos(\varnothing) = \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \text{sen}(\omega t)\right)^2}$$

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

Derivando y suponiendo ω constante se obtiene la ecuación de la velocidad:

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

Derivando nuevamente se obtiene la ecuación de la aceleración, aplicando el teorema binomial para expandir el radical de la expresión:

$$(a + b)^n = a^n + n a^{n-1} b + \frac{n(n-1)}{2!} a^{n-2} b^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!} a^{n-3} b^3 + \dots$$

$$\sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \text{sen}(\omega t)\right)^2}$$

$$a = 1$$

$$b = -\left(\frac{r}{l} \text{sen}(\omega t)\right)^2$$

$$n = 1/2$$

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

Lo útil de esa expresión es que cada término contiene la relación r/l a una cierta potencia:

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

Es posible eliminar todos los términos después del segundo término con un error mínimo:

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

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

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

Utilizando propiedades de ángulos dobles:

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

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

Derivando:

$$\dot{x} = -\omega r \text{sen}(\omega t) - \frac{r^2 \text{sen}(2\omega t) 2\omega}{4l}$$

Derivando nuevamente se obtiene la expresión aproximada para la aceleración:

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

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

3.3 CINÉTICA DEL MECANISMO MANIVELA-BIELA-CORREDERA

$$N = P \tan(\beta) \approx P \lambda \text{Sen}(\varphi - K) \text{ Dónde: } \omega t = \varphi$$

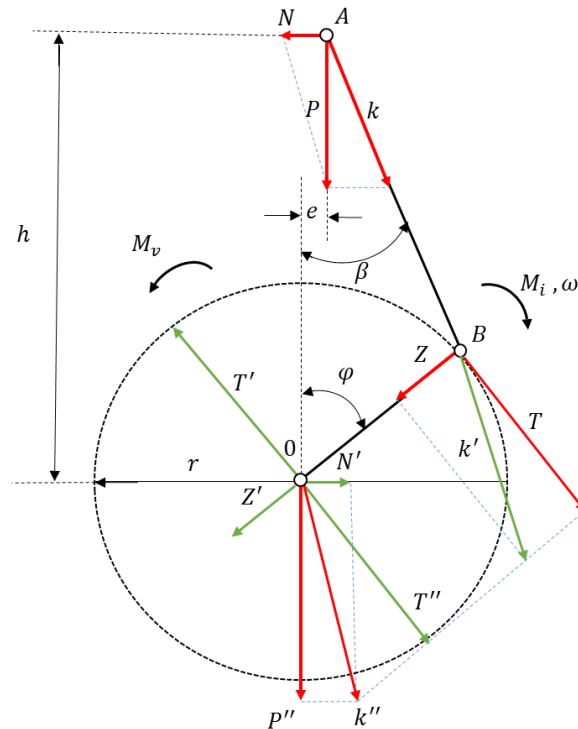
$$K = \frac{P}{\text{Cos}(\beta)} \approx P \left[1 + \frac{\lambda^2}{4} (1 - \text{Cos}(2\varphi)) \right]$$

$$Z = K \text{Cos}(\varphi + \beta) = P \frac{\text{Cos}(\varphi + \beta)}{\text{Cos}(\beta)} \approx P \left[\text{Cos}(\varphi) - \frac{\lambda}{2} (1 - \text{Cos}(2\varphi)) + k\lambda(\text{sen}(\varphi)) \right]$$

$$T = K \text{Sen}(\varphi + \beta) = P \frac{\text{Sen}(\varphi + \beta)}{\text{Cos}(\beta)} \approx P \left[\text{Sen}(\varphi) + \frac{\lambda}{2} (\text{Sen}(2\varphi)) - k\lambda(\text{Cos}(\varphi)) \right]$$

$$M_t = TR = PR \frac{\text{Sen}(\varphi + \beta)}{\text{Cos}(\beta)} \approx PR \left[\text{Sen}(\varphi) + \frac{\lambda}{2} (\text{Sen}(2\varphi)) - k\lambda(\text{Cos}(\varphi)) \right]$$

Figura 14. Fuerzas y momentos de inercia.



“La forma de la curva de fuerza de gas es idéntica a la curva de la presión de gas y solo difiere por un multiplicador constante” (Norton). “Su valor máximo es cuando φ es cero” (Jovaj).

3.3.1 Fuerza máxima del mecanismo manivela-biela-pistón. La fuerza máxima en el mecanismo manivela-biela-pistón del motor ubicada sobre el área superior del pistón es calculada con base es los datos suministrado por el fabricante del motor Shindaiwa B450 (Tabla 6):

Tabla 1. Datasheet motor Shindaiwa B450

Desmalezadora B450/ Brushcutter B450		
Motor / Engine	MCI	Enfriado por aire
Tipo / Type	2 strokes	
Marca / Trademark	Shindaiwa	
Modelo / Model	B450	

Tabla 1. Datasheet motor Shindaiwa B450 (Continuación)

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	MI
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®.

Cálculo de la cilindrada unitaria:

$$Vh = Z * \frac{\pi \phi^2 S}{4}$$

Vh= Cilindrada unitaria [cm³]

Z= 1 Número de cilindros [Adimensional]

Φ= Diámetro del pistón [cm]

S= Carrera del pistón [cm]

Volumen de la cámara:

$$Vc = \frac{Vh}{\epsilon - 1}$$

Vc = Volumen de la cámara [cm³]

ε= 8 Relación de Compresión [Adimensional]

Volumen total del cilindro:

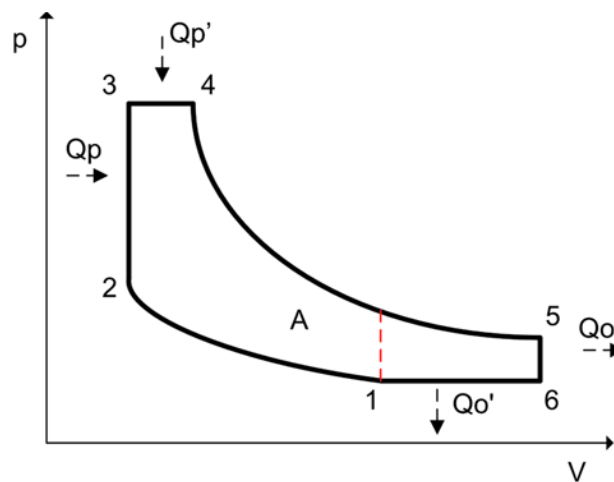
$$V_a = V_c + V_h$$

Área del pistón:

$$A = \frac{\pi \phi^2}{4}$$

3.4 ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL MOTOR

Figura 15. Ciclo termodinámico para motores de dos tiempos



Fuente: HEYWOOD, John. Internal combustion engine fundamentals. McGraw Hill: USA, 1998. P. 163

“Presión de admisión para motores de dos tiempos” (Jovaj):

$$P_a = 1,05 p_k$$

$$p_k = p_o$$

La presión a la entrada p_k es igual a la presión atmosférica p_o ya que no hay sobre alimentación y “su valor medio en Bucaramanga es 90659 [Pa]”*

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

Temperatura de admisión:

* PUERTO, Efrain. 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/>>

$$T_a = \frac{T_o + \Delta T + \varphi \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r}$$

T_a = Temperatura del ciclo de admisión [Kelvin]

T_o = Temperatura inicial [Kelvin]

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

T_r = Temperatura de los gases residuales

En donde:

- $T_o = "295,15 \text{ Kelvin}"$ *

- $\varphi = 1$ ya que se desprecia la relación entre los calores específicos de la carga fresca y los gases residuales $cp'' = \varphi cp$ (Jovaj p. 93)

- $\Delta T = 20$ (Jovaj p. 92)

- En motores diesel el coeficiente de presión de los gases residuales γ_r varía entre (0,03 y 0,06), se toma el valor que hace que la fuerza sea máxima:

$\gamma_r = 0.06$ [Adimensional]

- T_r para motores a gasolina varía entre (700K y 900K) tomamos el valor de temperatura máxima:

Presión de compresión:

$$P_c = P_a \epsilon^{n_1} \text{ (Jovaj p.112)}$$

En donde:

P_c = Presión en el ciclo de compresión [Mpa]

P_a = Presión en el ciclo de admisión [Mpa]

n_1 = Exponente poli trópico medio de compresión [Adimensional]

ϵ = Relación de compresión

* Clima de Bucaramanga [Citado el 30 de marzo de 2015] Disponible en internet: <<http://es.wikipedia.org/wiki/Bucaramanga>>

Temperatura de compresión:

$$T_c = T_a \epsilon^{n1-1} \text{ (Jovaj p.112)}$$

Temperatura de la explosión:

T_z = Temperatura del ciclo de la explosión [K]

U_z = Energía interna de los productos de combustión

Presión de explosión:

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

P_z = Presión en la explosión [Mpa]

μ_r = Coeficiente real de variación molecular [Adimensional]

μ_o = Coeficiente teórico de variación molecular

$\mu_o = 1.08$ [Adimensional]

$$\mu_r = \frac{\mu_o + Yr}{1 + Yr}$$

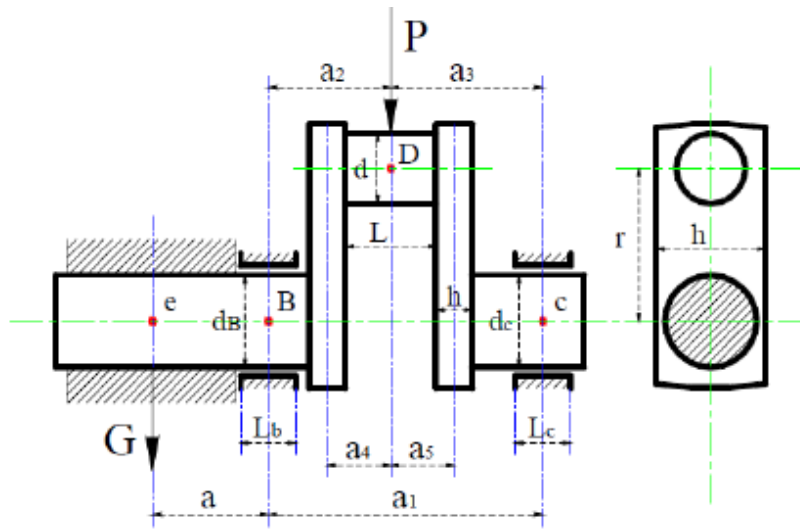
Fuerza máxima producida en la parte superior del pistón:

$$F_e = P_z * Area_{pistón}$$

3.5 ANÁLISIS ESTÁTICO

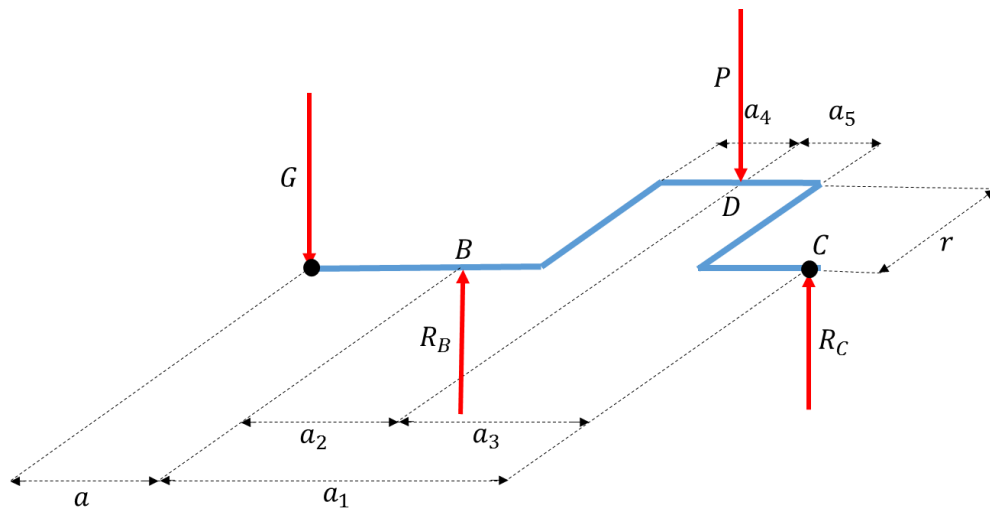
En la Figura 16, se aprecia una sección del cigüeñal que está bajo la acción de una fuerza "P" que actúa sobre el muñón de biela "D" y también "G" que pertenece al peso del volante que está sobre el punto "e". El cigüeñal apoyado en los soportes "B" y "c" está sometido a flexión y como la carga "P" no actúa directamente sobre el árbol, sino sobre el brazo de palanca "r", sufre también un esfuerzo de torsión. Por lo general, los extremos del cigüeñal son los más afectados, en especial las secciones más próximas al volante, ya que están sujetas al peso de éste.

Figura 16. Esquema del cigüeñal



Fuente: SÁNCHEZ MONTENEGRO, Rodrigo. El cigüeñal y su importancia en las naves mercantes. Valparaíso; Universidad austral de Chile, 2005. p. 26

Figura 17. Diagrama de cuerpo libre cigüeñal.



Para determinar las dimensiones del cigüeñal se han de conocer, en primer lugar, las reacciones en los soportes. Para el caso de la carrera descendente del embolo (ver Figura 17), y por consiguiente para la presión "P", aplicada sobre el muñón pero dirigida hacia abajo, se calcularán las reacciones en los apoyos en "B" y "C" en el muñón de biela y la presión producida por la expansión de la combustión,

mayor presión sobre el embolo, así por sumatoria de fuerzas se obtendrá el siguiente resultado:

$$\sum F(Y) = 0 \quad \text{Tomando fuerzas hacia arriba como positivo (Ec. 1)}$$

$$R_B + R_C - P - G = 0$$

Aplicando momentos en el punto (B):

$$\sum M(B) = 0 \quad \text{Tomando el sentido horario como positivo (Ec. 2)}$$

$$R_C = \frac{(P * a_2) - (G * a)}{a_1}$$

Con las ecuaciones 1 y 2 se pueden encontrar las reacciones en los puntos “B” y “C”. Una vez conocidas R_B , R_C , se hallarán las presiones máximas y mínimas en los apoyos. Pero si para estas dos posiciones de la manivela no pueden preverse con seguridad las cargas máximas, deberán hallarse las diferentes cargas (distribución de fuerzas) para diferentes posiciones de la manivela.

Si bien con un estudio dinámico se abarca todas las condiciones de trabajo del cigüeñal, cabe señalar que el esfuerzo máximo se produce en el punto más alto, o sea, en el PMS (Punto Muerto Superior) hasta la primera quinta parte de la carrera de expansión o a los 35° de giro del cigüeñal, es por esto que asumiendo la condición más desfavorable y simplificando los cálculos se recurre principalmente a un estudio estático.

3.6 ANÁLISIS DE FATIGA

Todos los elementos del motor experimentan carga y descarga, en especial la biela y el cigüeñal, por eso se hace indispensable analizar la resistencia a la fatiga que el cigüeñal pueda soportar; teniendo en cuenta la teoría clásica de diseño de elementos de máquinas, las posibilidades de simulación ofrecidas por el software CAD/CAE y la experiencia de los técnicos consultados en los diferentes talleres de la ciudad de Bucaramanga encargados de la reparación y del mantenimiento de guadañadoras.

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. Como 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.”*

Otro tema de importancia que afecta la resistencia y la vida útil de una pieza son los concentradores de esfuerzos que dicha pieza pueda tener en su diseño o en su proceso de manufactura, detalle importante del diseño del prototipo del cigüeñal propuesto debido al proceso de manufactura aplicado y a la solución

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

ingenieril escogida, P. Orlov ofrece una referencia para este tema: “La resistencia a la fatiga de las piezas cae intensamente en presencia de debilitamientos, transiciones bruscas, ángulos entrantes, etc. Que provocan la concentración local de tensiones. En los sectores de debilitamiento surgen cambios bruscos de tensiones, cuya máxima magnitud puede ser 2 a 3 y más veces que el nivel medio de las tensiones que actúan en esta sección de la pieza. Ya que la intensidad de los deterioros primarios por fatiga se determina por la velocidad de difusión de las lagunas, y esta última es proporcional a la magnitud de las tensiones efectivas, en los sectores de concentración de tensiones surge aceleradamente la porosidad del metal, precedente a la formación de grietas de fatiga. A consecuencia de esto los deterioros por fatiga en las zonas de concentración de tensiones adelantan los deterioros en los demás sectores de la pieza. El grado de elevación de la tensión depende, en primer lugar, del tipo y forma de debilitamiento. Cuanto mayor sea el salto de las secciones en el sector de transición y más brusco el paso, tanto más será la tensión local máxima. El fenómeno de concentración de tensiones provocado por el factor de la forma, en la práctica se acrecienta por la circunstancia de que los sectores de disposición de los concentradores de tensiones casi siempre suelen estar debilitados por causas tecnológicas. En las piezas que se someten al tratamiento mecánico, en los sectores de las transiciones, el debilitamiento comienza como resultado de cortar las fibras durante el anterior tratamiento de la pieza bruta por presión en caliente. En las piezas forjadas y estampadas, los sectores de las transiciones tienen baja resistencia mecánica, debido al estirado del metal en estos sectores.”*

Para el cálculo a la fatiga se efectúa utilizando la metodología expuesta en el libro de Diseño de Máquinas de Shigley[†] siendo los esfuerzos últimos a la fatiga y esfuerzo a la fluencia-limite elasticidad estudiados AISI 1045, 4140 y 5120 para la

* ORLOV, P. Ingeniería de diseño, tomo uno. 2da Edición, Editorial MIR, Moscú. 1985. P. 373.

† BUDYNAS, R y NISBETT, J. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. McGraw-Hill. México D.F. 2008. 1051 p.

materia prima empleada en la construcción del prototipo, el factor límite a la fatiga sin corregir se toma directamente del catálogo del material, el cual tiene un valor de:

Tabla 2. Esfuerzos característicos de los materiales propuestos

		1045	4140	5120
Esfuerzo Ultimo-resistencia a la traccion	S_{ut} [Mpa]	570	900	600
Esfuerzo fatiga sin Corregir	$S_{e'}$ [Mpa]	408	479	400
Esfuerzo a la Fluencia-limite elasticidad	S_Y [Mpa]	310	722	700

Se procede luego a calcular el factor límite a la fatiga real (corregido), así:

$$S_e = k_f k_s k_r k_t k_m k_l * S_e' \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

Kf= Factor acabado superficial

Ks=Factor de tamaño

Kr=Factor de confiabilidad

Kt= Factor de temperatura

Km= Factor diverso

Kl= Factor de carga

3.6.1 Factor acabado superficial. Las imperfecciones superficiales actúan como incrementadores de esfuerzos. Por lo general, no es práctico dar un acabado costoso como éste a una pieza real. Los acabados rugosos disminuyen la resistencia a la fatiga debido a la introducción de concentraciones de esfuerzos y/o por la alteración de las propiedades físicas de la capa superficial. Una superficie forjada es áspera y descarbonada, en tanto que los niveles de carbono bajos debilitan la superficie donde los esfuerzos suelen ser más altos. El factor de

superficie de reducción de la resistencia es necesario para tomar en cuenta tales diferencias.*

$$Kf = A(Sut)^b$$

Donde A y b son valores propios de un proceso de mecanizado en frío, el cual es nuestra propuesta en la fabricación de este prototipo:

$$A=4.51$$

$$b=-0.265$$

$$Kf(1045)= 0.8392$$

$$Kf(5120)= 0.8279$$

$$Kf(4140)= 0.7435$$

3.6.2 Factor de tamaño. Las muestras de prueba de las vigas giratoria y estática son pequeñas (cerca de 0.3 in de diámetro). Si la pieza es mayor que esa dimensión, se necesita aplicar un factor de tamaño de reducción de resistencia, para considerar el hecho de que piezas más grandes fallan con menores esfuerzos, debido a la probabilidad más alta de que se presente un defecto en el volumen más grande sometido al esfuerzo.

$$\text{Para } 0.3 < d < 10 \text{ [in]} \quad Ks = 0.869 d^{-0.097}$$

Donde:

$$d=13.5 \text{ [mm]} = 0.5315 \text{ [in]}$$

$$Ks= 0.9239$$

3.6.3 Factor de confiabilidad. Muchos de los datos de resistencia reportados son valores medios. Hay una gran dispersión en múltiples pruebas del mismo material bajo las mismas condiciones de prueba. Por lo anterior se propone un porcentaje de confiabilidad de 90% al cual corresponde un $Kr=0.897$

* NORTON, Robert L. Diseño de maquinaria, síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. Cuarta edición. McGraw-Hill. 2008.

3.6.4 Factor de temperatura. La dureza a la fractura disminuye a bajas temperaturas y se incrementa con temperaturas moderadamente altas (hasta 350 °C aproximadamente). Sin embargo, la articulación de rodilla del límite de resistencia a la fatiga, de la gráfica S-N, desaparece a altas temperaturas, lo cual hace que la resistencia a la fatiga continúe declinando con el número de ciclos, N. Asimismo, la resistencia a la fluencia declina continuamente con temperaturas por arriba de la temperatura ambiente y, en algunos casos, esto puede causar la fluencia antes que la falla por fatiga. Según Shigley para temperaturas de compresión y de gases residuales menores a 450°C, como se calcula para este caso de estudio en la sección (6.6), se tiene que:

$$\text{Para } T < 450 \text{ °C: } K_t = 1$$

3.6.5 Factor diverso. Aunque el factor Kf tiene el propósito de tener en cuenta la reducción del límite de resistencia a la fatiga debida a todos los otros efectos, en verdad significa un recordatorio que estos efectos se deben tomar en cuenta, porque los valores reales de Kf no siempre están disponibles, por lo anterior se selecciona un valor igual a 1

3.6.6 Factor de carga. Se define ahora un factor de carga de reducción de la resistencia como

$$\text{Para flexión: } K_l = 1$$

3.6.7 Cálculo de esfuerzos. A continuación se presenta la metodología para el cálculo de los diferentes esfuerzos a que se somete el cigüeñal:

$$\sigma_{normal} = \frac{32 M}{\pi \times d^3} \quad (\text{Ec.4})$$

Donde:

$$M = F \times R \left[\text{sen}(\omega t) + \frac{\lambda}{2} \text{sen}(2 \omega t) \right]$$

$$\sigma_{MAX} = \sigma_{normal} \times k_t \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\sigma_{alt} = \frac{\sigma_{Max} - \sigma_{Min}}{2} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_{Max} + \sigma_{Min}}{2} \quad (\text{Ec. 7})$$

3.6.8 Factor de seguridad. El factor de seguridad es el cociente entre el valor calculado de la capacidad máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real a que se verá sometido. Por este motivo es un número mayor que uno, que indica la capacidad en exceso que tiene el sistema por sobre sus requerimientos. A continuación se presentan diferentes teorías para el cálculo de factor de seguridad:

Factor de seguridad Soderberg:

$$N_{soderberg} = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y}}$$

Factor de seguridad Goodman modificado:

$$N_{Goodman \text{ modificado}} = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u}}$$

Factor de seguridad Gerber:

$$N_{Gerber} = \frac{-\frac{\sigma_a}{S_e} + \sqrt{\frac{\sigma_a^2}{S_e^2} + 4 * \frac{\sigma_m^2}{S_u^2}}}{2 * \frac{\sigma_m^2}{S_u^2}}$$

Factor de seguridad ASME elíptico:

$$N_{ASME} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\sigma_a^2}{S_e^2} + \frac{\sigma_m^2}{S_y^2}}}$$

4. MANUFACTURA DEL CIGUEÑAL

4.1 MATERIA PRIMA

La materia prima a utilizar es un redondo de acero AISI 4140 (Seleccionado en base a los cálculos de fatiga expuestos en el capítulo 6.8 del presente), de 15 cm de longitud y 3 pulgadas de diámetro, adquirido en Cia Compañía general de aceros S.A. con oficina en Bucaramanga, certificada con ISO 9001 y garantizando la entrega del material en calibrado homogéneo y libre de impurezas (Ver factura Anexo A).

4.2 GEOMETRIA

La geometría original del cigüeñal será la misma para el prototipo principalmente (ver metrología capítulo 6.1), excepto por algunos desbastes necesarios en la sección de contrapesos al momento de realizar el equilibrio estático del mismo.

4.3 PROCESOS DE MANUFACTURA

A continuación se exponen en orden de aplicación, los procesos de manufactura a efectuar en el prototipo fabricado:

4.3.1 Mecanizado. Se selecciona un proceso de manufactura por CNC (Control Numérico Computarizado), difiriendo del original que es por forja con mecanizado posterior, esto con el objetivo de incurrir en un mejor acabado superficial y evitar la alteración de las propiedades del material al realizar un trabajo en frío y no en caliente. El CNC empleado (Doosan LYNX 220LY de 3 ejes de la empresa Industrias Electromecánicas Acuña Ltda., calle 22 No. 11-61 Bucaramanga) acepta la sincronización con el software Solidworks, el cual a través de un software interno genera un archivo en formato .IGES, el cual es posprocesado y

recrea las hojas de ruta con el programa FANUC para que el portaherramientas se programe y realice los respectivos cortes de manufactura. A continuación se presentan los diferentes tiempos en la elaboración del prototipo:

Tabla 3. Tiempos aproximados de mecanizado (Minutos)

Operación	Pieza		
	A (Brazo con muñón)	B (Brazo con muñón lado del volante)	C (Muñón de biela)
Preparación posprocesamiento	60		
Desbaste	20	20	10
Acabado parte cilíndrica	5	5	5
Rosca	5 (M8X1,25)	5 (M10X1,25)	-
Agujero excéntrico	10	10	-
Agujero concéntrico	-	-	5
Contorno exterior	25	25	-
Cuñero	-	5	-
Total	65	65	20

4.3.2 Tratamiento térmico. El temple es un proceso aplicado para el mejoramiento de las propiedades superficiales del material, M. P. Groover lo define de la siguiente manera: “Las operaciones para la mejora de superficies se realizan con el fin de perfeccionar propiedades mecánicas o físicas del material de trabajo. Éstos no alteran la geometría de la pieza, al menos no de manera intencional. Las operaciones más importantes para la mejora de propiedades son los tratamientos térmicos. El tratamiento térmico involucra varios procesos de calentamiento y enfriamiento para efectuar cambios micro-estructurales en un material, los cuales modifican sus propiedades mecánicas. Se supone que el enfriamiento desde una temperatura alta ha sido lo suficientemente lento para permitir que la austenita se descomponga en una mezcla de ferrita y cementita (Fe_3C) a temperatura ambiente. Esta reacción de descomposición requiere de difusión y otros procesos que dependen del tiempo y la temperatura para

transformar el metal a su forma final preferida. Sin embargo, bajo condiciones de enfriamiento rápido, de manera que se evita el equilibrio de la reacción, la austenita se transforma en una fase de no equilibrio llamada martensita. La martensita es una fase dura y frágil que da al acero su capacidad única de endurecerse a valores muy altos. Si el enfriamiento ocurre a una velocidad suficientemente rápida, la austenita se transforma en martensita. La martensita es una fase única que consiste en una solución hierro-carbono cuya composición es igual a la de la austenita de donde se deriva. La estructura cúbica centrada en la cara de la austenita se transforma casi instantáneamente en la estructura tetragonal centrada en el cuerpo (BCT) de la martensita, sin que ocurra el proceso de difusión, el cual está en función del tiempo y es necesario para separar la ferrita y el carburo de hierro en las transformaciones precedentes.” *

El temple para que las superficies del cigüeñal alcancen ± 55 HRC (Valor de dureza en la sección de los rodamientos como se observará en el capítulo 6.3), se realizó en la empresa IMATT S.A.S., ubicada en el kilómetro seis vía a Girón-Palenque.

El proceso realizado consiste en introducir la pieza en un horno de baño de sales a 500 °C de diámetro 40 cm y 1 m de longitud, en un atmosfera de alto contenido de carbono,(controlada) luego llevarla hasta los 850 °C sosteniéndola durante un determinado tiempo dependiendo del espesor de las piezas a temprar, para este caso $D = 15$ mm de tres a cuatro horas, para después enfriarla rápidamente en aceite (Siguiendo las recomendaciones del proveedor de la materia prima) y por último una hora de revenido a 180°C. Para obtener la dureza deseada y aliviar tensiones.

* GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna. Prentice Hall, Tercera edición, 2007. p. 647-650.

Aunque el método más recomendable para darle dureza superficial a los diámetros de una pieza tan pequeña como el cigüeñal de un motor de dos tiempos de pequeña cilindrada (< 99 c.c.) que cuenta solamente con 41,50 c.c.; es la técnica de temple por inducción (el cual es un método de endurecimiento superficial selectivo^{*}), pero existe una novedosa técnica alternativa y segura, en cuanto a practicidad y costo se refiere para endurecimiento superficial de cualquier pieza (alcanzando la dureza y la profundidad requeridas según la aplicación lo requiera) conocida como Nitruración por Plasma, con este proceso la deformación es mínima, casi imperceptible (alrededor de 5 centésimas de mm) pero si se quiere disminuir el riesgo de deformación lo ideal es hacer la pieza con mecanizado de aproximación y hacer alivio de tensiones, proceso que dura de un día para otro (información entregada por la empresa TRATAR S.A.), posteriormente las piezas irían para mecanizado final y estarían a punto para el proceso de nitruración iónica.

4.3.3 Rectificado y balanceo. Sera necesario rebajar (rectificar) lo menos posible para que las superficies de apoyo de los cojinetes no bajen demasiado, pues a medida que se baja, sube la presión unitaria y, por eso, no debe pasarse una disminución de 1 mm al rectificar.

Una vez realizada esta verificación se debe proceder a comprobar el desgaste de las muñequillas de biela y apoyos del cigüeñal, para lo cual, tendrá que disponerse de las medidas originales de ellos brindadas por el fabricante. Este desgaste se verificara con un micrómetro, haciendo unas cuantas medidas en cada muñequilla y en cada apoyo.

Luego del rectificado deberá pasarse el control de alineación de los apoyos y muñequillas, para lo cual se colocara el cigüeñal sujeto por los extremos entre

^{*} Ibid. p. 656.

puntas y se usara un reloj comparador, La máxima tolerancia admisible es de 0,02 mm en general y de 5 centésimas de mm en la unión del muñón de biela con los brazos para que se haga un ajuste a prensa* en esta sección con 3000 libras de presión en prensa hidráulica, ajuste del tipo ISA agujero único H7-s6. Para el rodamiento de biela se tiene un rodamiento de jaula de agujas KZK 14X18X10 del catálogo EURO BEARING SPAIN y para los muñones de bancada rodamientos de bolas 6202 del mismo fabricante, los cuales dan un ajuste de entrada suave con las medidas establecidas allí. Una vez efectuada esta verificación deberá controlarse el equilibrado del cigüeñal con el volante de inercia colocado en él. Esta operación se realiza en una maquina (balanceadora) y se logra el equilibrio quitando material donde corresponda, por mediación de vaciados en los contrapesos, o aplicando una pasta especial llamada Mastic para sumar peso, también en los propios contrapesos.

* CASILLAS, A. Máquinas cálculos de taller. España, p. 266

5. PROTOCOLO DE FUNCIONAMIENTO

A continuación se propone una metodología para implementar un protocolo de pruebas de funcionamiento del prototipo propuesto con la finalidad de obtener una evidencia físico mecánica del funcionamiento del mismo. Para lo anterior se propone la instalación y puesta en funcionamiento del cigüeñal en el motor original, con un trabajo sin carga y también de corte normal, por un tiempo considerable de 3 horas, con inspección visual, térmica (cámara termografía FLUKE TIR125) y de velocidad mecánica (tacómetro digital EXTECH), el cual se encuentra y analiza en la sección de análisis de resultados (Ver capítulo 6).

5.1 INSPECCIÓN VISUAL

Se pretende observar la pieza antes y después de su puesta en funcionamiento, en búsqueda de cambios físicos apreciables a simple vista, tales como cambios de color, corrosión, efectos de lubricación, grietas, integridad de las roscas, ralladuras y daños generales.

5.2 TEMPERATURA FUNCIONAL COMPARATIVA

Se desea comparar las medidas de temperatura a tomar con la cámara termografía, donde se busca exponer la diferencia térmica exterior entre el funcionamiento de la maquina original y la maquina modificada, a mínima velocidad de funcionamiento (Ralenti) y a máxima sin carga de trabajo.

5.3 DIMENSIONES

Se toman mediciones de diámetro antes y después de la puesta en funcionamiento del prototipo con el fin de tener una referencia de la cantidad de desgaste que sufre la pieza en sus muñones.

5.4 CARGA FATIGA DINÁMICA

Se realiza una prueba de funcionamiento sin carga durante un tiempo de 3 horas, a una exigencia media de potencia, donde se busca que el prototipo cumpla con el ciclaje de vida infinita.

5.5 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO

Se pretende la medición de parámetros de funcionamiento tales como torque entregado, presión en la cámara de combustión, velocidad y temperatura interior sobre el cigüeñal; más sin embargo debido a la falta de un banco de pruebas para este tipo de motores de combustión interna en la presente universidad, se procede solo a la medición de uno de estos parámetros, velocidad del eje de salida.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Siguiendo las metodologías propuestas en los capítulos 2, 3, 4 y 5; a continuación se presentan los resultados y su respectivo análisis, empezando por la metrología del cigüeñal original del motor Shindaiwa B450 (medidas en milímetros):

6.1 METROLOGÍA

Figura 18. Vista isométrica del cigüeñal B450



Figura 19. Vista frontal del cigüeñal B450

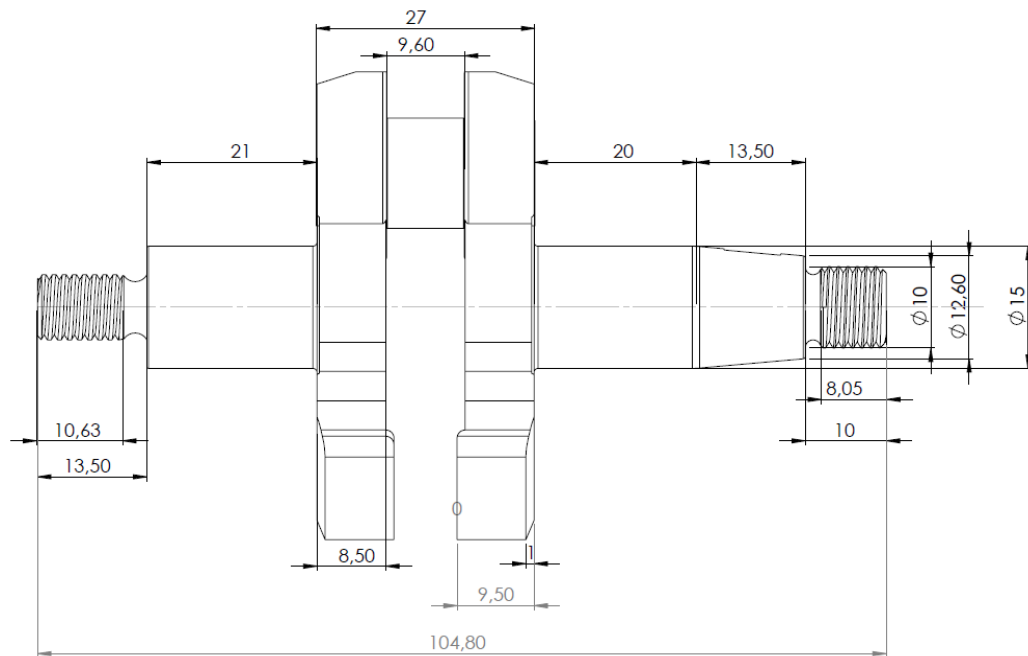


Figura 20. Vista lateral izquierda del cigüeñal

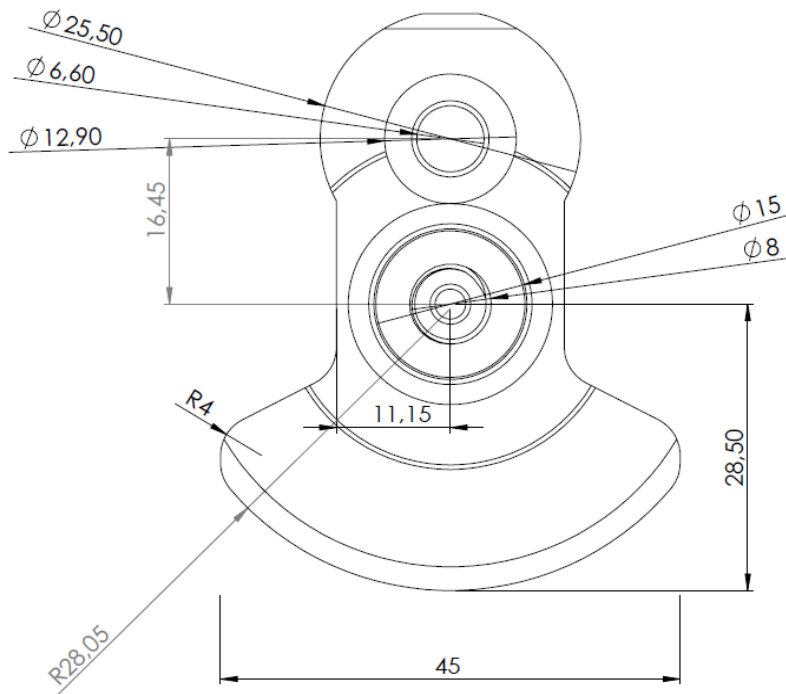


Figura 21. Vista lateral derecha del cigüeñal

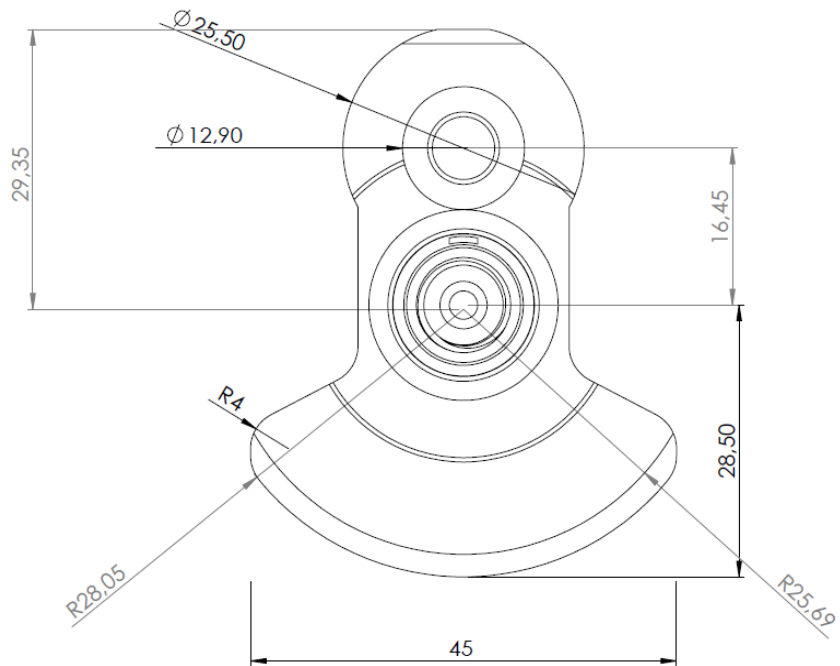


Tabla 4. Principales medidas del cigüeñal

Cigüeñal del motor Shindaiwa - B450	
Parte	Medida [mm]
Diámetro muñón de biela	13.50
Diámetro muñón de bancada	15
Longitud del muñón de biela	9.6
Longitud del muñón de bancada con chaveta	20
Longitud del muñón de bancada sin chaveta	21
Altura Total	57
Longitud del Total cigüeñal	104.8

La tuerca de lado del volante tiene una designación en el sistema métrico internacional como M10x1,25 y la tuerca del lado opuesto se designa como M8x1,25, y también posee una cuña de media luna de 3 mm de espesor por R6. El peso del cigüeñal en gramos es 231, medida tomada con la máquina; balanza digital OHAUS.

6.2 METALOGRAFÍA

En este ensayo se analizan dos tipos de muestra, el muñón de biela (Figura 22, 23) y muñón de bancada (Figura 24, 25), el cual se realiza en el laboratorio de Metalúrgica planta de aceros de la UIS.

En la Figura 22, se aprecia que el muñón de biela, posee martensita revenida acicular, en conjunto con un posible tratamiento térmico de acritud (capa endurecida) y un posterior revenido para alivio de tensiones residuales. La obtención de martensita revenida hace posible conseguir fuertes incrementos de resistencia a la tracción y fluencia, a costa de la disminución de la ductilidad.*

* RODRIGUEZ, Marcelo. EFECTO DE LA MARTENSITA REVENIDA EN EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE UN ACERO MICROALEADO. Cusco: Universidad Nacional de San Agustín, 2007.

Figura 22. Muñón de biela borde a 100X

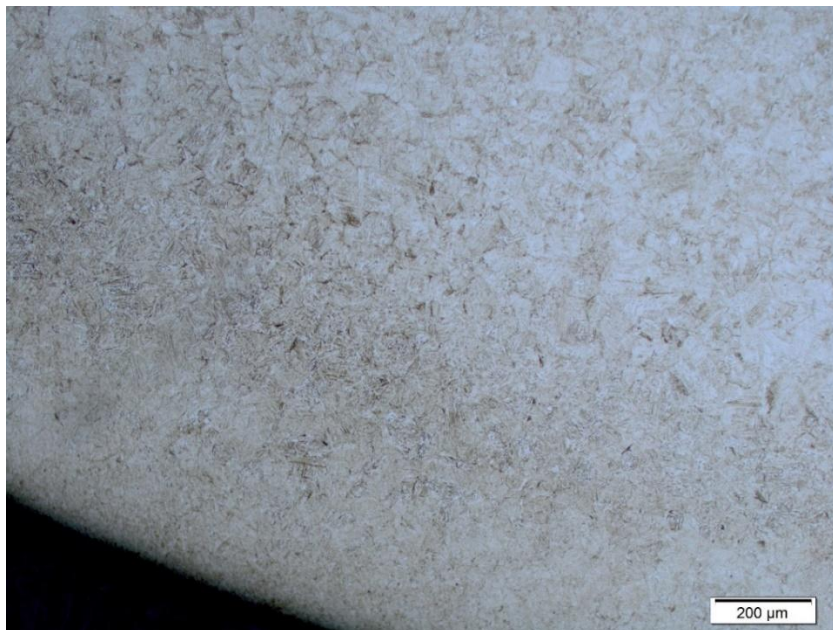
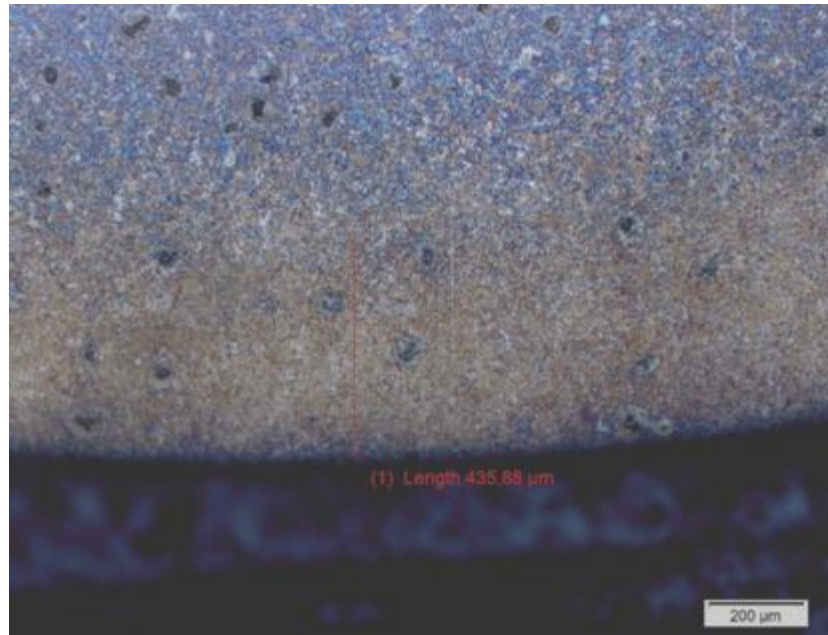


Figura 23. Muñón de biela Centro a 500X

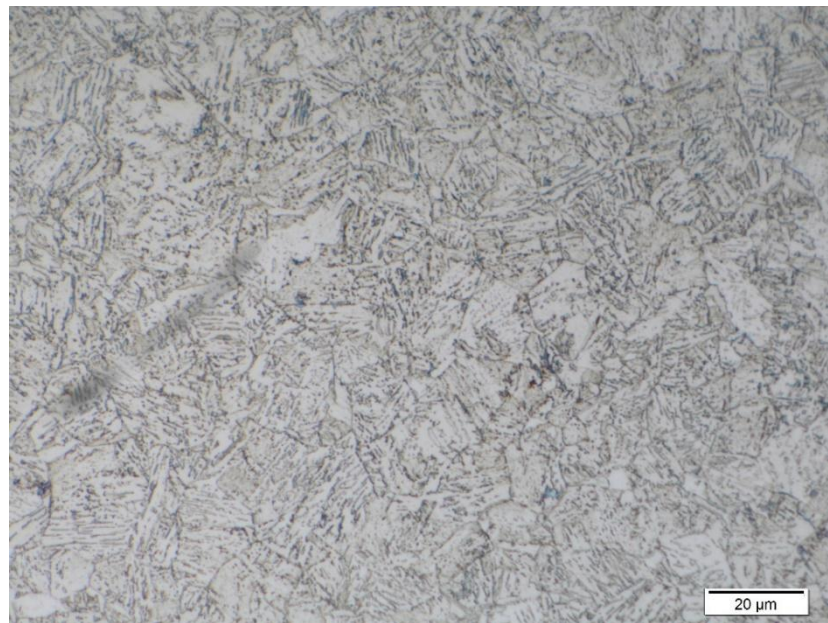


Figura 24. Muñón de bancada Borde a 100X



En la anterior figura, se aprecia una capa efectiva endurecida de aproximadamente 435 micras.

Figura 25. Muñón de bancada centro a 1000X



6.3 MICRODUREZA

A continuación se muestra el perfil de microdureza en la superficie perimetral y centro de las muestras:

Figura 26. Perfil de microdureza muñón de biela borde

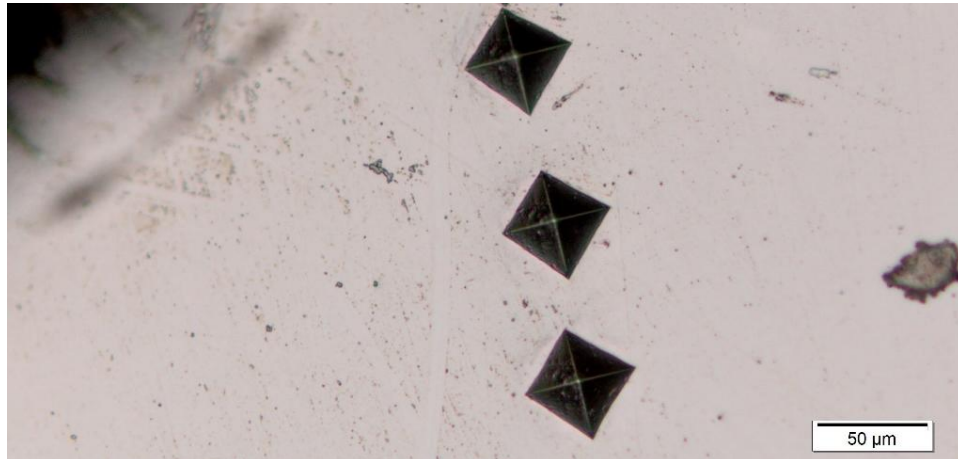


Figura 271. Gráfica del promedio de microdureza en el perfil.

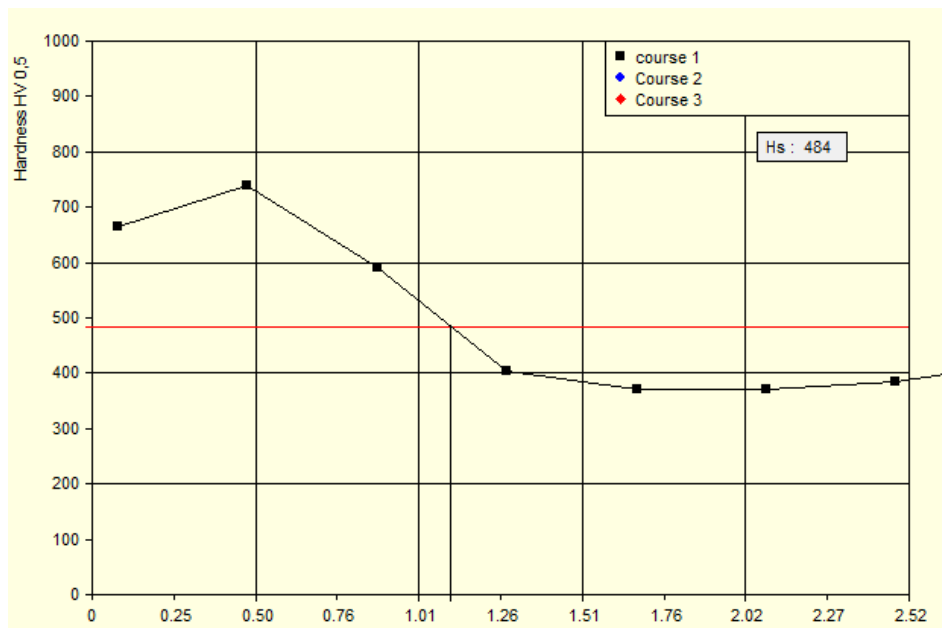


Tabla 5. Resultados de ensayos de microdureza

Dureza Vickers	Puntual en el centro		Perfil en el borde	
	Muñón de bancada	Muñón de biela	Muñón de bancada	Muñón de biela
1	290	305	685.8	684.9
2	306	362	623.6	611.9
3	315	262	412.3	415.7
PROMEDIO	304	310	573.9	570.83

Con lo anterior se puede corroborar lo propuesto en el análisis metalográfico con respecto al posible tratamiento térmico de acritud (capa endurecida), puesto que los valores de dureza en la superficie de las muestras del cigüeñal son mayores que en su centro.

6.4 ANÁLISIS DE ELEMENTOS

Con base en los resultados obtenidos (Ver figura 28), se presume que el material con el cuál es construido originalmente el cigüeñal; puede pertenecer a la familia de aceros ingenieriles bajos al carbono (%C<0.3 según normas SAE) junto con los otros elementos representativos como Mn (0.730%), P (0.005%), S (0.150%), Si (0.260%) y Cr (0.867%), y corroborando con el análisis metalográfico y la dureza obtenida, se puede llegar a proponer los siguientes aceros:

- AISI 1020 <http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy_home/show_alloy_found.cfm?ID=AISI_1020&show_prop=all&Page_Title=AISI%201020>
- AISI 1212 <http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy_home/show_alloy_found.cfm?ID=AISI_1212&show_prop=all&Page_Title=AISI%201212>
- AISI 5120 (Ver figura 29)

Figura 28. Resultados del analisis composicional

12/2/2014 5:03:54 PM

RESULTADOS DE ANALISIS

Sample Identification										
SampleNo										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.098	0.279	0.739	<0.0050	<0.150	0.873	0.134	0.122	0.139	0.034
2.	0.095	0.262	0.731	<0.0050	<0.150	0.869	0.132	0.114	0.134	0.033
3.	0.095	0.252	0.726	<0.0050	<0.150	0.863	0.129	0.110	0.129	0.030
4.	0.096	0.246	0.725	<0.0050	<0.150	0.864	0.131	0.107	0.128	0.030
Ø	0.096	0.260	0.730	<0.0050	<0.150	0.867	0.132	0.113	0.133	0.032
σ	0.0014	0.014	0.0064			0.0047	0.0022	0.0065	0.0051	0.0021
v	1.458	5.385	0.877			0.542	1.667	5.752	3.835	6.562
	As	B	Bi	Ca	Co	Mg	N	Nb	Pb	Sb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.015	<0.0010	<0.010	<0.0	0.0091	0.011	<0.020	<0.0010	0.025	>0.180
2.	0.014	<0.0010	<0.010	<0.0	0.0094	0.011	<0.020	<0.0010	0.020	>0.180
3.	0.013	<0.0010	<0.010	<0.0	0.0091	0.0093	<0.020	<0.0010	0.019	>0.180
4.	0.012	<0.0010	<0.010	<0.0	0.0092	0.010	<0.020	<0.0010	0.019	>0.180
Ø	0.013	<0.0010	<0.010	0.0	0.0092	0.010	<0.020	<0.0010	0.021	-0.180
σ	0.0014				0.00014	0.00091			0.0029	
v	10.77				1.522	9.100			13.81	
	Sn	Ta	Ti	V	W	Zn	Zr	Se	Fe	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
1.	0.021	<0.030	0.0023	<0.0050	0.030	0.0068	<0.0020	<0.0050	97.06	
2.	0.018	<0.030	0.0024	<0.0050	0.030	0.0073	<0.0020	<0.0050	97.12	
3.	0.016	<0.030	0.0022	<0.0050	0.030	0.0076	<0.0020	<0.0050	97.16	
4.	0.015	<0.030	0.0022	<0.0050	0.027	0.0074	<0.0020	<0.0050	97.17	
Ø	0.018	<0.030	0.0023	<0.0050	0.029	0.0073	<0.0020	<0.0050	97.13	
σ	0.0027		0.00010		0.0015	0.00034			0.050	
v	15.00		4.348		5.172	4.658			0.051	

Figura 29. Propiedades químicas AISI 5120

AISI 5120		Composition	
Category	Steel	Element	Weight %
Class	Alloy steel	C	0.17-0.22
Type	Standard	Mn	0.70-0.90
Common Names	Chromium steel	P	0.035 (max)
Designations	France: AFNOR 20 MC 5 Germany: DIN 1.7147 United States: ASTM A322 , ASTM A331 , ASTM A519 , SAE J404 , SAE J770 , UNS G51200	S	0.04 (max)
		Si	0.15-0.30
		Cr	0.70-0.90

Fuente: [Citado el 11 de marzo de 2015] Disponible en internet <http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy_home/show_alloy_found.cfm?ID=AISI_5120&show_prop=all&Page_Title=AISI%205120>

Tabla 6. Comparación aceros

ACERO	C %	Si %	Mn%	Cr %	P %	S %
5120	0,17-0,22	0,15-0,30	0,70-0,90	0,70-0,90	0,035	0,04
1212	0,0-0,13	0,15-0,30	0,70-1,0	-	0,07-0,12	0,16-0,23
1020	0,18-0,23	0,15-0,30	0,30-0,60	-	0,04	0,05
B-450	0,096	0,26	0,73	0,867	<0,005	<0,15

Por último, analizando los resultados de los porcentajes de elementos químicos encontrados y comparándolos con los mostrados en la tabla 6, compuesta por los aceros normalizados que se ajustan al análisis, parece indicar que el cigüeñal original está constituido por un acero al cromo de designación AISI 5120, el cual contiene la composición de cromo y el rango de las diferentes cantidades de aleación obtenidas en el análisis de elementos, teniendo como premisa que el porcentaje de carbono está en el límite inferior puesto que el método de obtención del mismo es la diferenciación de los elementos, y junto con la microdureza aproximada de 600 Vickers , la cual concuerda con el análisis metalográfico propia

de la martensita revenida endurecida por tratamiento térmico como se mencionó anteriormente.

6.5 CINEMÁTICA

Se grafica en Excel las aproximaciones para obtener las gráficas de posición, velocidad y desplazamiento siguientes las limitantes geométricas de diseño expuestas a continuación:

Tabla 7. Datos geométricos del motor B-450

Variable	Valor	Unidad
L	61,95	mm
R	16,5	mm
B	40	mm
S	33	mm

Fuente: Manual motor Shindaiwa®.

Figura 30. Posición [cm] vs ángulo [grados]

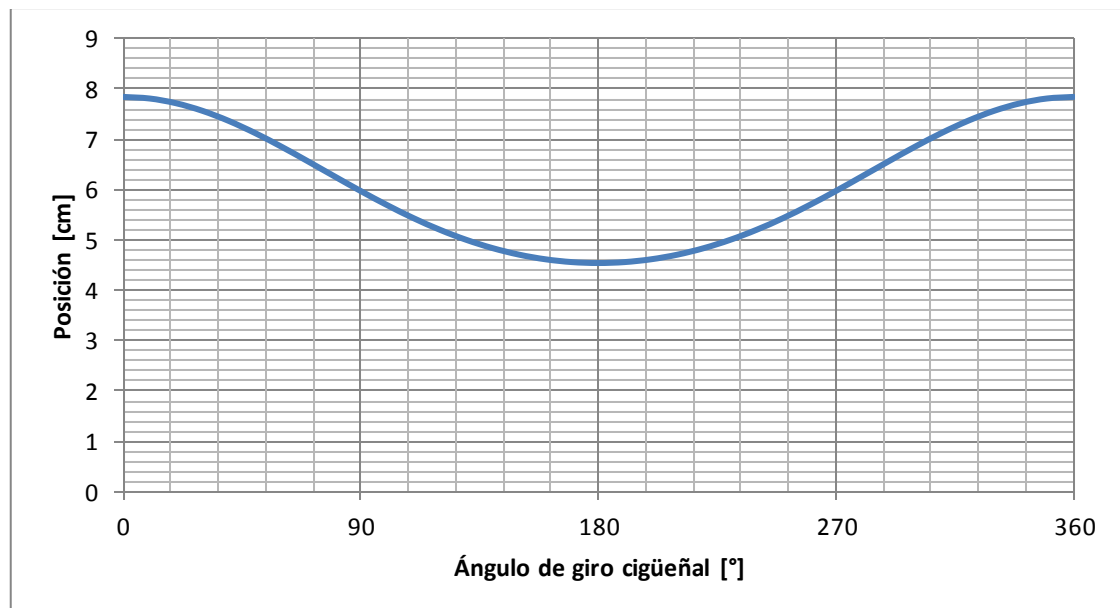


Figura 31. Velocidad [cm/s] vs ángulo [grados]

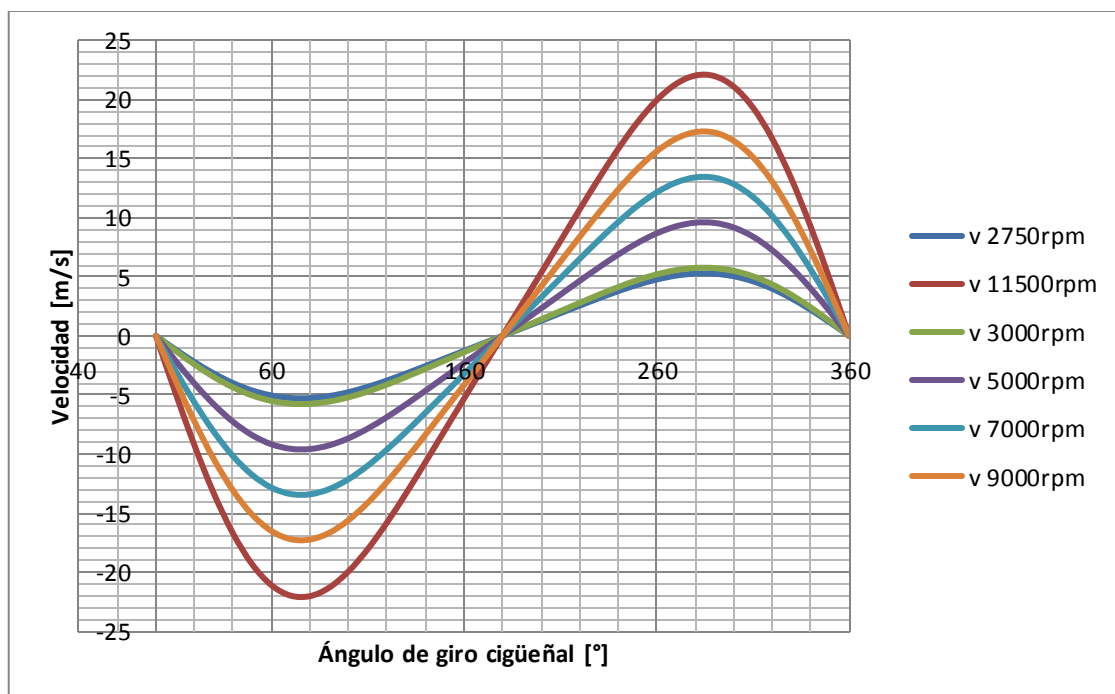
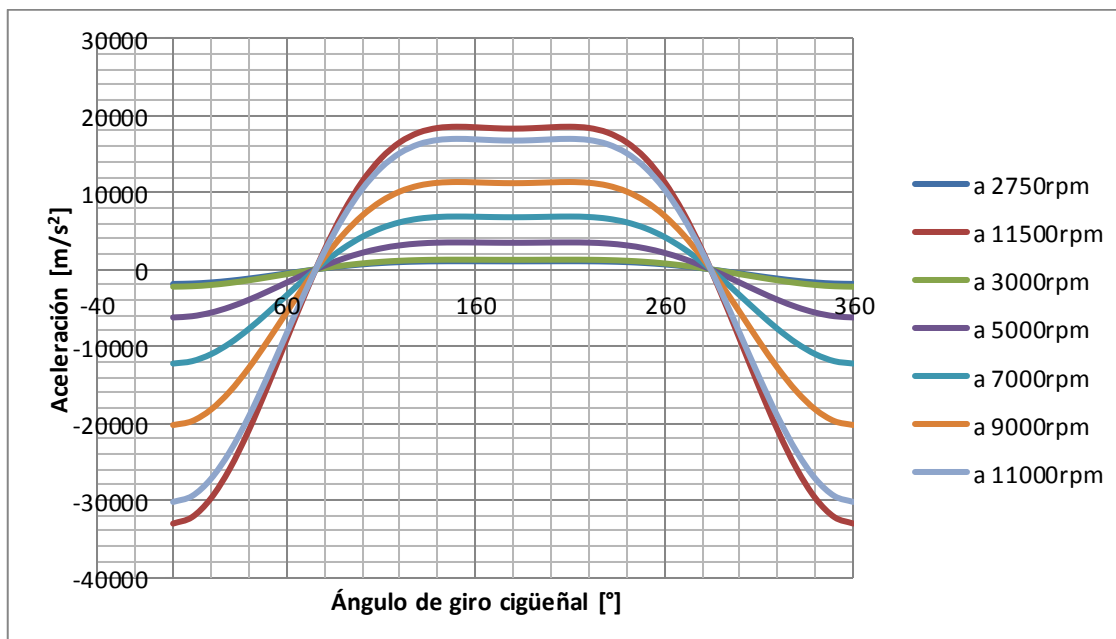


Figura 32. Aceleración [cm/s²] vs ángulo [grados]



6.6 CINÉTICA Y TERMODINÁMICA

Diámetro del pistón = $\emptyset = 40$ [mm]

Carrera = $S = 33$ [mm]

Cilindrada unitaria = 41,5 [cm³]

Relación de compresión = 8

Reemplazando los anteriores datos limitantes de diseño, correspondientes al motor original, en las ecuaciones correspondientes de la metodología de cinética expuesta en el capítulo 3.3, se obtiene:

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

$$V_c = 5,92 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$V_a = 47,38 \text{ cm}^3$$

$$A = 12,57 \text{ [cm}^2\text{]}$$

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

$$T_a = 348,24 \text{ [Kelvin]}$$

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

$$T_c = 736,19 \text{ [K]}$$

$T_z = 1700 \text{ [K]}$ Según Gordon P. Blair para temperatura crítica (con efectos de disociación) en motores de combustión interna de dos tiempos p. 301

$$\mu_r = 1,075$$

$$P_z = 3,99 \text{ [Mpa]}$$

$$F_e = P = 5015,4 \text{ [N]}$$

Donde finalmente se estima que la fuerza máxima a la que se somete el cigüeñal sobre su muñón de biela es de 5015,4 Newton ($\approx 1127,5$ [lbs]).

6.7 ESTÁTICA

El inicio del cálculo del cigüeñal parte de las dimensiones longitudinales, las cuales se dan en base a experiencia previas, para este caso se tienen las siguientes (cigüeñal original):

$$a = 0.02182 \text{ m}$$

$$a_1 = 0.03816 \text{ m}$$

$$a_2 = 0.01908 \text{ m}$$

$$a_3 = 0.01908 \text{ m}$$

Luego reemplazando en RC (Ec. 2), se tendrá:

$$R_C = \frac{(5015.4 * 0.01908) - (3.43 * 0.01908)}{0.03816}$$
$$R_C = 2506 \text{ N}$$

Por lo que:

$$R_B = 5015.4 + 3.43 - 2007.7 \text{ N}$$

$$R_B = 2513 \text{ N}$$

El muñón de biela esta solicitado por un momento de flexión

$$M_{Fle} = R_C * a_3$$

$$M_{Fle} = 47,8 \text{ N} * \text{m}$$

Y por otro de torsión:

$$M_{Tor} = R_B * r$$

$$M_{Tor} = 41,5 \text{ N} * \text{m}$$

La sección transversal en el punto "B" (Figura 16), del muñón de la izquierda, está solicitada por torsión con un momento $\mathbf{M}_t = \mathbf{P} * \mathbf{r}$, y por flexión con un momento $\mathbf{M}_f = \mathbf{G} * \mathbf{a}$.

Para la sección transversal del punto "C" (Figura 16), el diámetro se estima solo para resistir la presión de "Rc" pero generalmente recibe las mismas dimensiones

que el muñón de la izquierda o sea del punto “B”, sin embargo, su longitud “Lc”, ha de satisfacer la siguiente condición*:

$$L_c \geq R_c * \frac{n}{W}$$

Para “w”, el cual equivale a un coeficiente experimental, que es calculado en base al trabajo total de rozamiento y al coeficiente de rozamiento, su valor será:

w = 1500 a 4000 cigüeñales que operan sobre cojinetes de bronce

w = 3000 a 4500 cigüeñales que operan sobre cojinetes de metal blanco

De satisfacer la condición anterior, se darán las mismas dimensiones, o sea diámetro y longitud en el punto “B”. Estas longitudes y diámetros no serán modificados en este caso, puesto que el espacio de los rodamientos en el cárter y el cárter en sí condicionan el diseño del cigüeñal.

6.8 FATIGA

A continuación se presentan los cálculos realizados para los materiales propuestos, empleando la Ec. 3, donde se obtiene:

$$S_e(1045) = (0,8392)(0,9239)(0,897)(1)(1)(1) * 408 \text{ MPa}$$

$$S_e(1045) = 283.8 \text{ MPa}$$

$$S_e(5120) = (0,8279)(0,9239)(0,897)(1)(1)(1) * 400 \text{ MPa}$$

$$S_e(5120) = 274.4 \text{ MPa}$$

$$S_e(4140) = (0,7435)(0,9239)(0,897)(1)(1)(1) * 479 \text{ MPa}$$

$$S_e(4140) = 295.1 \text{ MPa}$$

* SÁNCHEZ MONTENEGRO, Rodrigo. El cigüeñal y su importancia en las naves mercantes. Valparaíso; Universidad austral de Chile, 2005. p. 45

El factor límite a la fatiga para bajo ciclaje es:

$$S'_l = 0,9 * S_u^*$$

$$S'_l(1045) = 0,9 * 570 \text{ MPa} = 513 \text{ Mpa}$$

$$S'_l(5120) = 0,9 * 600 \text{ MPa} = 540 \text{ Mpa}$$

$$S'_l(4140) = 0,9 * 900 \text{ MPa} = 810 \text{ Mpa}$$

6.8.1 Cálculo de esfuerzos

Empleando una hoja de cálculo de Excel con los siguientes datos de diseño:

$d = 0.015$ [m] Diámetro del bulón de bancada

$F = 5015.4$ [N] Fuerza máxima sobre el pistón

$R = 0.018$ [m] Longitud de la manivela

$\omega t =$ Angulo variable de la manivela Figura 14 ($0^\circ - 360^\circ$)

$\lambda = \frac{R}{L}$ Relación longitud biela y manivela

$L = 0.06195$ [m] Longitud de la biela

$D = 0.018$ [m] Diámetro mayor del bulón de bancada

$r = 0.00127$ [m] Radio de entalladura tipo iii

$k_t = 1.6$ Concentrador de esfuerzos normales según criterio figura G2 Norton

$\sigma_{Min} = 0$ Por el tipo de carga repetitiva a la que está sometida el cigüeñal

Resultando, al reemplazar en las ecuaciones 4, 5, 6 y 7;

$$\sigma_{normal} = 283 \text{ [MPa]} @ \omega t = 75^\circ$$

$$\sigma_{Max} = 452.7 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{alt} = 141.5 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{med} = 141.5 \text{ [MPa]}$$

* NORTON, Robert L. Diseño de maquinaria, síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. Cuarta edición. McGraw-Hill. 2008. P. 267.

6.8.2 Factor de seguridad

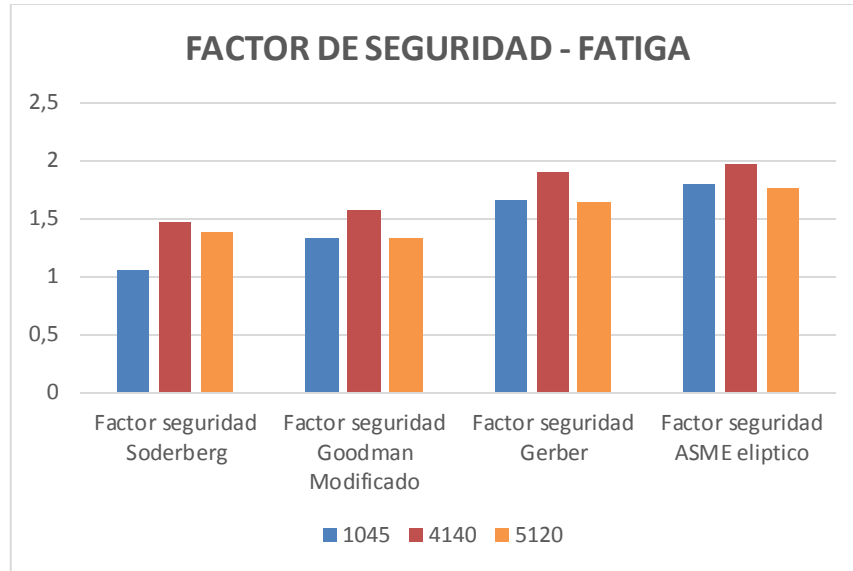
Usando los modelos propuestos de las teorías de falla expuestos en el capítulo 3.6.8, se obtiene:

Tabla 8. Comparación de aceros propuestos AISI 1045, 4140, contra 5120

Factor de seguridad	AISI 1045	AISI 4140	AISI 5120
Soderberg	1.05	1.48	1.39
Goodman modificado	1.34	1.57	1.33
Gerber	1.66	1.90	1.65
ASME elíptico	1.80	1.98	1.76

De la anterior tabla se observa que el acero AISI 5120, el cual se presume es el material constitutivo del cigüeñal original, presenta factores de seguridad concordantes con las teoría de fallas, seguido del acero propuesto AISI 1045, más sin embargo el acero AISI 4140, presenta los mejores valores de factor de seguridad tanto en la teoría de falla más conservadora (Soderberg), como en las demás.

Figura 33. Comparación de factores de seguridad para materiales propuestos



Con este diagrama comparativo se hace posible observar a través de esta metodología que el material de diseño propuesto para el prototipo en la presente investigación, el acero AISI 4140, puede soportar la falla por fatiga por un tiempo indefinido o para vida infinita y que cuenta con un factor de seguridad a la fatiga aproximadamente de 2.

6.8.3 Análisis de esfuerzos para el AISI 4140.

Esfuerzo efectivo para materiales dúctiles uniformes según Von Misses:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{normal}^2 + 4 \tau_{alt}^2}$$

Donde:

$$\tau_{alt} = \frac{\tau_{Max} - \tau_{Min}}{2}$$

$$\tau_{med} = \frac{\tau_{Max} + \tau_{Min}}{2}$$

$$\tau_{Max} = \frac{F}{\pi \left[\frac{d_1^2 - d_2^2}{4} \right]}$$

$$\tau_{Min} = 0$$

$$d_2 = 0.0066 [m] \text{ Diámetro interior del muñón de biela}$$

$$d_1 = 0.014 [m] \text{ Diametro exterior del muñón de biela}$$

Factor de seguridad según Misses-Goodman para materiales dúctiles sometidos a carga combinada:

$$\frac{1}{N} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{med}}{S_{ut}} + k_f \frac{\sigma_{alt}}{S_{e'}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{med}}{S_{ut}} + k_{f_s} \frac{\tau_{alt}}{S_{e'}}\right)^2}$$

$$k_f = 1 + q(k_t - 1) \text{ Concentrador de esfuerzos normales}$$

$$k_{f_s} = 1 + q(k_{t_s} - 1) \text{ Concentrador de esfuerzos cortantes}$$

$$k_{t_s} = 1.4 \text{ Concentrador de esfuerzos cortantes según criterio figura G3 Norton}$$

$$q = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{A}{r}}} \text{ Sensibilidad de la muesca de Kuhn-Hardrath}$$

$$A = 0.044 \text{ Constante Neuber para aceros con } S_{ut}=130000 [\text{psi}]$$

Factor de seguridad en materiales dúctiles bajo carga estática comparativo:

$$F_s = \frac{S_Y}{\sigma_{eq}}$$

Resultando:

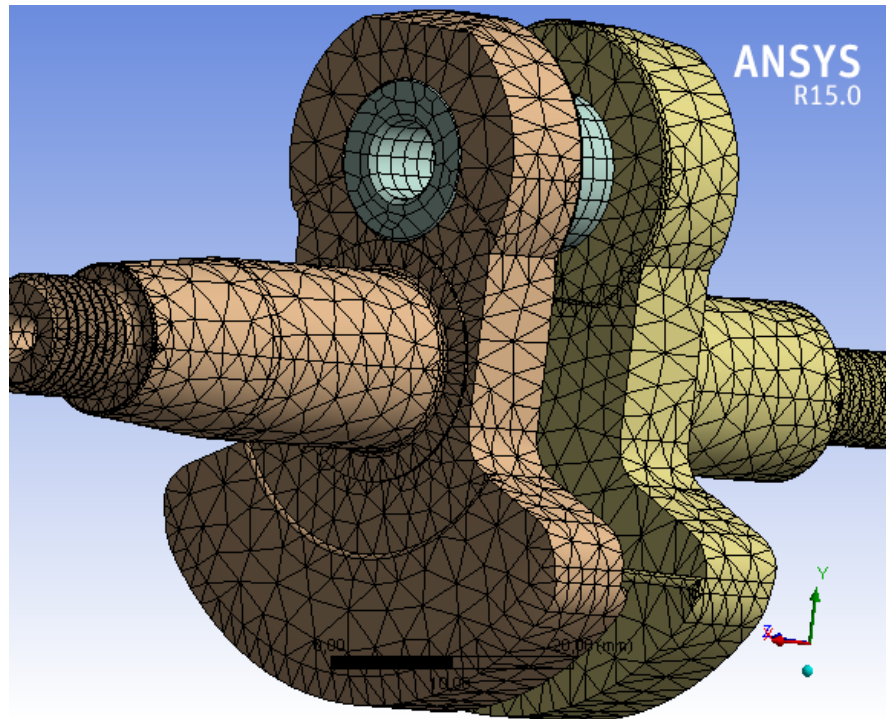
$$\sigma_{eq} = 286.1 [MPa]$$

$$F_{s_{\text{mínimo}}} = 2.5$$

$$N_{\text{mínimo}} = 1.2$$

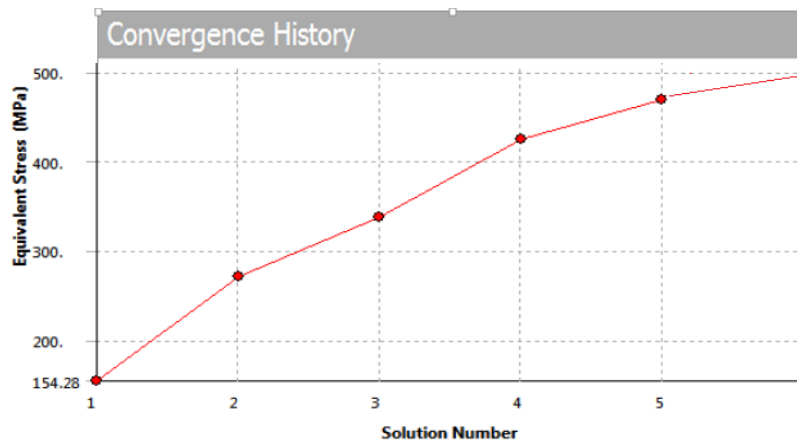
A continuación se muestran los resultados de la simulación de fatiga efectuada utilizando el software CAD/CAE ANSYS R15.0, aplicando una curva de convergencia que no sobrepasa el 5% de error estimado dentro del análisis estructural previo.

Figura 34. Malla adaptativa al sólido



En la figura 34, se aprecia el mallado adaptativo por curvatura implementando 810933 elementos y 878991 nodos, para lograr un porcentaje de error bajo.

Figura 35. Tabla y curva de convergencia



	Equivalent Stress (MPa)	Change (%)	Nodes	Elements
1	154.29	-	42892	22057
2	271.12	54.933	58973	34954
3	336.88	21.632	112830	70941
4	424.26	20.959	246704	164802
5	469.6	10.144	469288	421124

6	446.9	5.243	878991	810933
---	-------	-------	--------	--------

Figura 36. Localización del esfuerzo equivalente

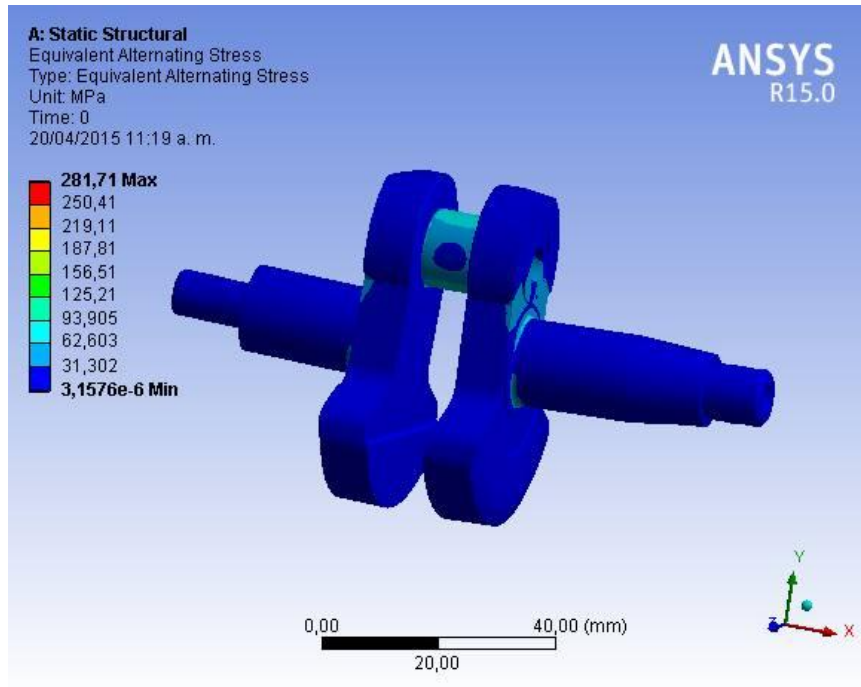
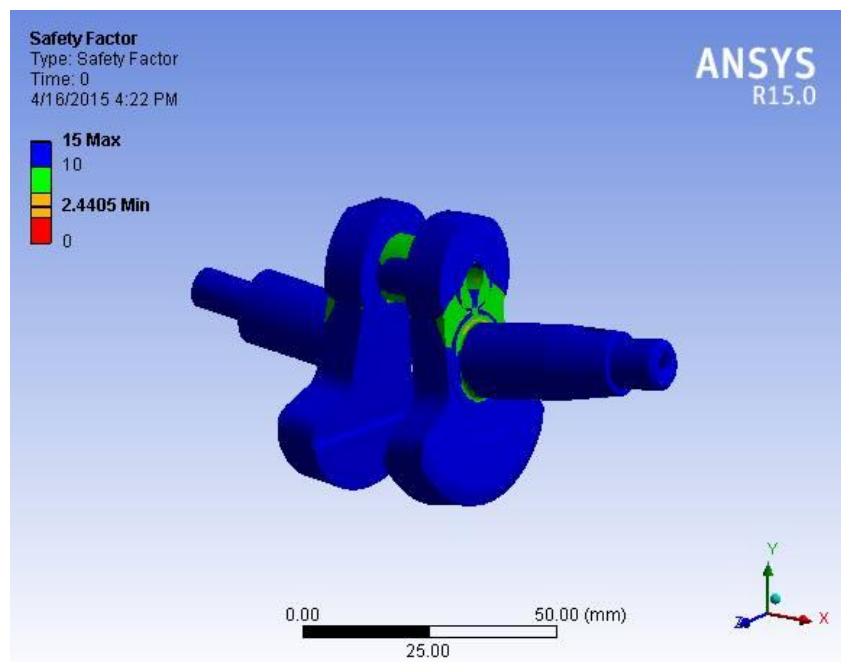


Figura 37. Factor de seguridad



Los anteriores cálculos analíticos nos llevan a corroborar la metodología aplicada, junto con la simulación, donde se encuentra que el factor de seguridad es similar y de igual manera el esfuerzo equivalente, los cuales difieren así:

$$\%error FS = \frac{2.50 - 2.44}{2.50} * 100 = 2.40\%$$

$$\%error \sigma_{eq} = \frac{286.10 - 281.71}{286.10} * 100 = 1.53\%$$

6.9 APLICACIÓN DEL PROTOCOLO DE FUNCIONAMIENTO

Se sigue la metodología planteada en el protocolo de funcionamiento del capítulo 5, y a continuación se presentan los resultados del mismo:

6.9.1 Inspección visual. Como se visualiza en la tabla 9, el color se mantiene constante a pesar de la adherencia de mezcla combustible aceite, donde además el cigüeñal se mantuvo funcional y en una sola pieza durante toda la prueba (Ver Anexo C).

Tabla 9. Inspección visual

INSPECCION VISUAL			
ANTES		DESPUES	
Observación	Sin grietas	Observación	Sin grietas
Daño general	-	Daño general	No
Roscas funcionales	Si	Roscas funcionales	Si
Corrosión	No	Corrosión	No
Ralladuras	No	Ralladuras	No
Color	Plateado	Color	Plateado

6.9.2 Temperatura funcional comparativa. Las siguientes figuras muestran la comparativa de las medidas de temperatura tomadas con la cámara termografía, donde se busca exponer la diferencia térmica exterior entre el funcionamiento de

la maquina original y la maquina modificada, a mínima velocidad de funcionamiento y a máxima sin carga de trabajo.

Figura 38. Ralentí sin carga (original izq vs prototipo der)

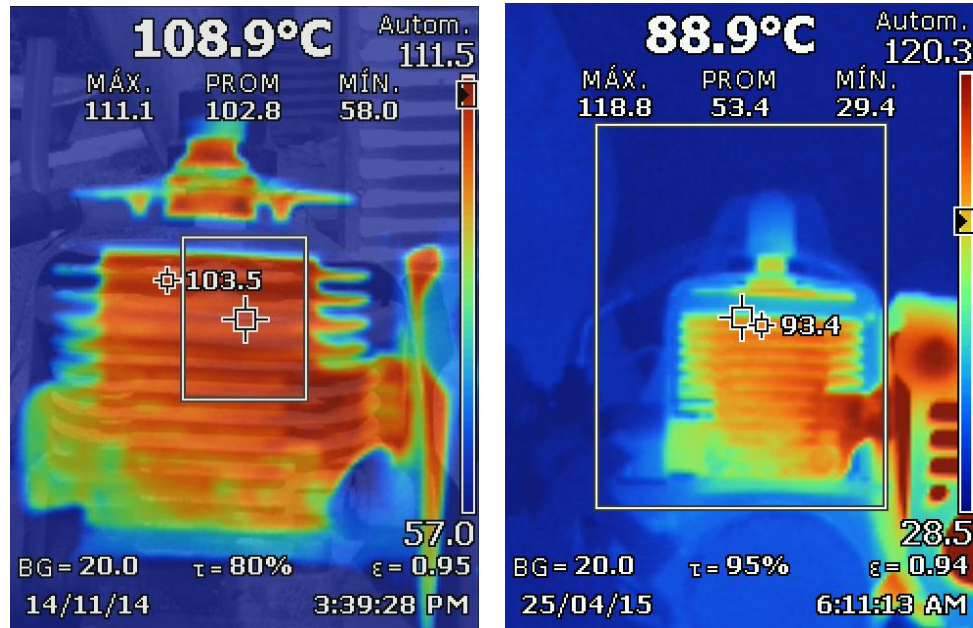


Figura 39. Máxima temperatura exterior (original izq vs prototipo der)

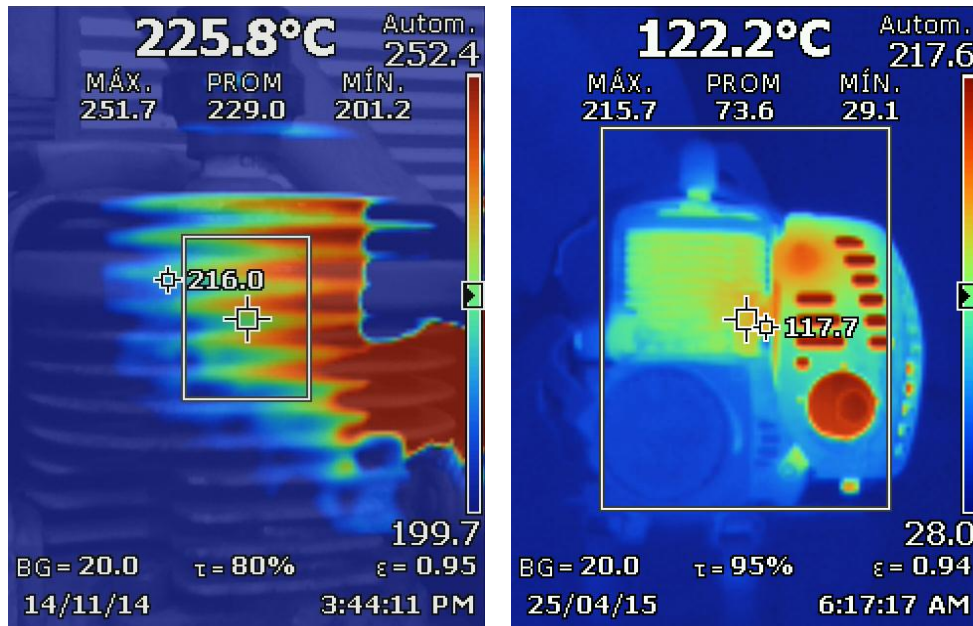


Tabla 10. Temperatura exterior de trabajo

TEMPERATURA		
ETAPA (sin carga)	Original [°C]	Prototipo [°C]
Ralentí	111.1 (Figura 38)	118.8 (Figura 38)
Máxima	251.7 (Figura 39)	215.7 (Figura 39)

De la tabla 10 se puede presumir que la similitud entre temperaturas es un buen indicador del comportamiento funcional del cigüeñal prototipo dentro de la máquina original.

6.9.3 Dimensiones. Se toman mediciones de diámetro antes y después de la puesta en funcionamiento del prototipo con el fin de tener una referencia de la cantidad de desgaste que sufre la pieza en sus muñones. En la tabla 11 se observa que para los muñones de bancada el desgaste no se hace evidente durante el tiempo de prueba al que fue sometido, más sin embargo en el muñón de biela, si se aprecia una reducción de 0.01 mm; se presume que esto se ocasiono por la influencia de los desajustes previos de la máquina de prueba, la cual tiene un uso de varias horas de trabajo y un mantenimiento mínimo.

Tabla 11. Diámetro de muñones del prototipo

DÍAMETRO DE MUÑONES DEL PROTOTIPO		
MUÑÓN	ANTES	DESPUES
Bancada	15 mm	15 mm (Figura 40)
Bancada lado volante	15 mm	15 mm
Biela	14 mm	13.99 mm

Figura 40. Medida del muñón de bancada



6.9.4 Carga fatiga dinámica. Se realiza una prueba de funcionamiento sin carga durante un tiempo de 3 horas, a una exigencia media de potencia, donde se busca que el prototipo cumpla con el ciclaje de vida infinita:

Tabla 12. Carga fatiga dinámica

FATIGA PROTOTIPO				
CONDICION	RPM	TIEMPO [h]	CICLOS	FALLA
Sin carga	7100	3	1,28E+06	NO

6.9.5 Parámetros de funcionamiento. Se pretende la medición de parámetros de funcionamiento tales como torque entregado, presión en la cámara de combustión, velocidad y temperatura interior sobre el cigüeñal; más sin embargo debido a la falta de un banco de pruebas para este tipo de motores de combustión interna en la presente universidad, se procede solo a la medición de uno de estos parámetros (Velocidad del eje de salida), la cual se evidencia a continuación:

Figura 41. Medición de velocidad



Tabla 13. Velocidad del eje de salida

Velocidad en RPM	
SIN CARGA	RPM
Original	7500 (Datasheet Tabla 1)
Prototipo	7100

De la anterior tabla se aprecia una disminución en la velocidad del prototipo con respecto al cigüeñal original, esto debido posiblemente a la influencia de los demás componente de la máquina, que han sido sometidos a horas de uso desconocidas; sin incluir la biela, los rodamientos de biela y bancada, los cuales fueron adquiridos nuevos (Ver Anexo A).

7. ANÁLISIS ECONÓMICO

Dentro del análisis de los costos se pueden encontrar costos directos, costos indirectos y algunas proyecciones de costos que a continuación se detallan:

7.1.1 Costos directos

Tabla 14. Personal

Cantidad	Operario	Horas/Mes	Meses	Valor/h	Valor/T
1	Técnico Gustavo Pazos CNC (Ver Anexo A)	6	1	\$25.000	\$ 150.000,00
TOTAL					\$ 150.000,00

Tabla 15. Remuneraciones a no profesional

Cantidad	No Profesional	Horas	Meses	Valor/h	Valor/T
1	Tratamiento Térmico (Ver Anexo A)	3	1	\$13.333,00	\$ 40.000,00
1	Acabado Superficiales (Ver Anexo A)	1	1	\$20.000,00	\$ 15.000,00
TOTAL					\$ 55.000,00

Tabla 16. Misceláneos

Materia prima AISI 4140 (Ver Anexo A)	\$ 26.000
Viáticos y subsistencias	\$ 100.000
Útiles de Oficina	\$ 50.000
Servicios básicos (electricidad, Internet, teléfono, otros)	\$ 250.000
Combustibles y Repuestos	\$ 120.000
Construcción y ensamble	\$ 150.000
TOTAL	\$ 696.000

7.1.2 COSTOS INDIRECTOS

Tabla 17. Honorarios profesionales

Cantidad	Profesional	Horas/M	Meses	Valor/h	Valor/T
1	Director Dr. Ing. Alberto Pertuz	6	8	\$150.000,00	\$ 7.200.000,00
1	Codirector Dr. Ing. Jorge Chacón	3	8	\$150.000,00	\$ 3.600.000,00
TOTAL					\$ 10.800.000,00

Según el acuerdo 1279 de junio 19 de 2002, por el cual se establece el régimen salarial y prestacional de los docentes de las universidades estatales aplicado en la UIS

Tabla 18. Remuneraciones a estudiantes

Cantidad	Estudiante	Horas/M	Meses	Valor/h	Valor/T
1	Diego A. Sánchez Reyes	80	8	\$15.400,00	\$ 9.856.000,00
1	Awdri A. Velasco Peña	80	8	\$15.400,00	\$ 9.856.000,00
TOTAL					\$ 19.712.000,00

Según el acuerdo 020 de junio 13 de 2014, por el cual se establece el pago a estudiantes investigadores UIS, contemplado en el artículo 2.

Tabla 19. Costo de ensayos

Metrología	\$ 30.000,00
Metalografía	\$ 300.000,00 (Proporcionados por la Universidad)
Microdureza	\$ 100.000,00 (Proporcionados por la Universidad)
Composición de elementos	\$ 80.000,00 (Proporcionados por la Universidad)
Total	\$ 510.000,00

Tabla 20. Otros costos indirectos

Adquisición Software CAD/CAE (Solidworks 2014)	\$ 77.000,00 (Proporcionados por la Universidad)
Adquisición Software (ANSYS 2011)	\$ 600.000,00 (Proporcionados por la Universidad)
Libros (Norton, Blair, Jovaj, Shigley)	\$ 300.000,00 (Proporcionados por la Universidad) (Estimado)
Otros directamente Imputables al proyecto	\$ 20.000,00
Total	\$ 997.000,00

Tabla 21. Total

TOTAL GENERAL	\$ 32.920.000,00
---------------	------------------

7.1.3 Costo unitario

Se presentan el costo del prototipo fabricado, el cual tuvo un valor de \$231.000 pesos colombianos (Tabla 22), sin incluir los costos de investigación y desarrollo, este valor comparado con el precio comercial unitario de producción masiva de \$149.000 pesos colombianos (Ver anexo A), refleja claramente que es mucho mayor su fabricación en Bucaramanga según la manufactura propuesta en este proyecto, más sin embargo esto es debido a que solo se fabricó una unidad en un proceso de manufactura único, no masivo, sumado a esto el cigüeñal original se fabrica en serie por forja y con una materia prima (5120), los cuales son de menor costo que el proceso aplicado en este proyecto, fabricación por control numérico computarizado con una materia prima adquirida por corte de redondo, con desplazamientos entre manufactura y tratamientos térmicos.

Tabla 22. Costo prototipo

ítem	Una pieza	Proyección futura de producción
Materia prima AISI 4140 (Ver Anexo A)	\$ 26.000	\$ 26.000
Técnico CNC (Ver Anexo A)	\$ 150.000	\$ 125.000
Tratamiento térmico (Ver Anexo A)	\$ 40.000	\$ 666.66
Acabado superficial / Torno	\$ 15.000	\$ 15.000
TOTAL	\$ 231.000	\$ 166.666

Más sin embargo, el horno para la aplicación del tratamiento térmico, se puede emplear para 60 prototipos, con lo cual el costo por unidad para producción masiva en cuanto a tratamiento térmico será de \$666.66 pesos colombianos. En cuanto al mecanizado, se disminuye el tiempo aproximadamente a 5 horas, debido

a que las tareas de programación, cambio de herramienta y reposicionamiento, se acortan en tiempo al realizarse una tarea repetitiva y continua.

7.1.4 Beneficios. En este subcapítulo se buscará la manera de cuantificar los beneficios que deja este proyecto tanto como para la institución y para los estudiantes. Para esto realizaremos una aproximación e intentaremos evaluar los principales puntos tangibles para así obtener una relación entre el beneficio y el costo. Esto nos permitirá determinar la importancia de este proyecto y el aporte a la sociedad. Para esto se empezará a analizar varios aspectos que influyen directamente en el proyecto, teniendo en cuenta que el proyecto está destinado hacia la potencial construcción de un laboratorio de pruebas para M. T. A. en el Parque Tecnológico de Guatiguará.

7.1.5 Beneficio para el estudiante. Entre los beneficios para el estudiante se podrá señalar los más importantes:

- Conocimiento de motores de combustión interna. Los estudiantes de la carrera tienen varios conocimientos sobre motores, por tanto para profundizar este tema se ha añadido el estudio del motor mono-cilíndrico de pequeña cilindrada como el caso de estudio. Con esto los estudiantes obtendrán una ventaja en los conocimientos sobre los mecanismos más utilizados en motores que más comúnmente se utilizan en el área agrícola.
- Aseguramiento de la capacidad del profesional mecánico. El haber diseñado y construido el cigüeñal para un motor de dos tiempos, ayudará a motivar a los nuevos estudiantes dándoles la confianza de saber que el programa profesional al cual pertenecen, les permitirá desarrollar cualquier proyecto que se planteen y que como profesionales estarán más preparados para afrontar la realidad de la cotidianidad.

7.1.6 Beneficio para la institución. Entre los beneficios para la institución se puede destacar:

- Como el proyecto está destinado hacia la potencial construcción de un laboratorio de pruebas para M. T. A. en el Parque Tecnológico de Guatiguará, prácticamente se complementa el estudio-practica sobre motores y permite a la institución ser pionera en el estudio de estos, demostrando que la misma está en total innovación de sus laboratorios y apoyo al avance tecnológico y científico de la región.
- Incentivo para nuevos alumnos. Esto mejorará la imagen de la institución y de la carrera al demostrar que la institución produce profesionales aptos para imponerse a cualquier tipo de retos, lo cual visto desde posibles prospectos para ingenieros les ayude a tener nuevos incentivos y puedan elegir a la UIS como su primera opción de estudio.

8. CONCLUSIONES

- Se logró identificar la estructura metalográfica, dureza y composición de elementos químicos constitutivos que caracterizan el cigüeñal de fabricación japonesa del motor Shindaiwa B450 y se asumió que el material constitutivo de este, es un acero de designación AISI/SAE 5120.
- Se evaluaron tres tipos de aceros (AISI 1045, 4140 y 5120), y se asumió el AISI/SAE 4140 como el material para construir el modelo dado sus características físico mecánicas y a la fatiga (factor clave en el trabajo funcional que desempeña el cigüeñal); por presentar este las mejores características y de fácil consecución en área metropolitana.
- Se encontró que la dureza superficial para el cigüeñal original (Shindaiwa B450), hallada en este trabajo, se asemeja a la reportada por el patrón de caracterización suministrado por la empresa que realiza el tratamiento térmico superficial.
- Se realizaron los cálculos analíticos siguiendo las ecuaciones de la cinemática, cinética, termodinámica, estática, resistencia de materiales y fatiga. Y Al comparar estas estimaciones con los paquetes computacionales que utilizan elementos finitos para la simulación realizada, se encuentra que los resultados son bastante similares.
- De las opciones de manufactura de cigüeñales estudiadas, se selecciona un proceso de manufactura por CNC (Control Numérico Computarizado), por su facilidad de consecución, costos y tiempo de entrega, sumado por ser la más económica para este tipo de propuesta de prototipo único.

- Se propuso una metodología propia como protocolo de funcionamiento y prueba del prototipo, basado en inspección visual, medición temperatura exterior, velocidad, dimensiones; con la finalidad de obtener una evidencia físico mecánica del funcionamiento del mismo, utilizando los equipos de medición al alcance, donde se encontró que el desempeño del prototipo según esa metodología, fue satisfactorio y no hubo fallas durante ese evento.
- Al realizar un análisis económico del proceso constructivo del cigüeñal en la localidad del área metropolitana de Bucaramanga, se concluye que si es factible fabricar el cigüeñal a un costo relativamente alto, si lo comparamos con un cigüeñal de importación. Sin embargo, comparando el valor proyectado de producción por unidad de prototipo (\$166.666,00 COP), el cual solo incluye el valor neto de manufactura, con el valor comercial del original (\$149.000,00 COP), que incluye impuestos, transporte y ganancias múltiples, difieren aproximadamente en \$18.000,00 COP. De incluir impuestos, transporte y ganancias, éste último valor aumentará y será muchos más notable el hecho de que el construir esta pieza en Bucaramanga es más costosa que la construcción en Japón (país donde se ubica la fábrica Shindaiwa).

Recomendaciones.

De ser posible no templar la pieza prototipo total, se recomienda un temple por inducción localizado.

Un banco de pruebas para caracterizar el motor Shindaiwa B450 y de esta manera obtener datos comparativos.

BIBLIOGRAFÍA

BUDYNAS, R y NISBETT, J. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México: McGraw-Hill, 2008. 1051 p.

FERNÁNDEZ, Mauricio. Eje cigüeñal, construcción, características y empleo en los buques mercantes. Memoria profesional para optar al título de ingeniero jefe de máquinas. Valparaíso, 2010. 171 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Trabajos escritos, Presentación y referencias bibliográficas. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2008. 110 p. ISBN 978-958-9383-81-0.

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

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

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

PAYRI, Francisco y DESANTES, José. Motores de combustión interna alternativos. Universidad politécnica de valencia. Valencia: Reverté, 2012. 1024 p.

SÁNCHEZ MONTENEGRO, Rodrigo. El cigüeñal y su importancia en las naves mercantes. Tesis para optar al grado de Licenciado en Ciencias de la Ingeniería. Valparaíso: Universidad austral de chile, 2005.

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.

FACTURA DE VENTA No. 90449656

OFICINA BUCARAMANGA
Módulo 19/203
Página 1 / 1

SGS
ISO 9001

Cia. General de Aceros S.A.

Nit: 860.069.182-1

Cliente: 23589 AWDRI ANTONIO VELASCO PENA Moneda: COP

Nit: 1099203912 Telefonos: 3214622827 Fax:

Dirección radicación factura: CL 9 A 25 68 BRR UNIVERSIDAD BUCARAMANGA

Dirección entrega material: CL 9 A 25 68 BRR UNIVERSIDAD BUCARAMANGA

Condición de pago: Pago anticipado Moneda: COP

Vencimiento: 19.03.2015

Orden de Compra: AWDRI

Nros. de Entrega: 430595

Numero de Pedido: 430595

-POR FAVOR REALIZAR EL PAGO A NOMBRE DE CIA GENERAL DE ACEROS SA EN LA CUENTA CORRIENTE DE: BANCO DE OCCIDENTE 290-02597-2, BANCO DE BOGOTA 020-00999-9, BANCOLOMBIA 046-06845987 Y ENVIAR SOPORTE DE PAGO AL CORREO illana.onofre@ega.com.co Y/O aceros@ega.com.co

FACTURA POR COMPUTADOR AUTORIZADA DESDE 903993000 SEGUN RESOLUCION 310000077887 DE 2014/05/02 COD. ICA INDUSTRIAL 2410 TAR 0.69% COD ICA COMERCIALIZACION 4662 TAR 1.104%

CODIGO	DESCRIPCION	DIMENSIONES			CANTIDAD			VALOR		
		Unidad	Kilos	Unitario	Desc.	Total	Unitario	Desc.	Total	
10062	CORTES REDONDO S-4140 CALIB/TORN	1	4,052	22.124	0 %	22.124			22.124	
									SUBTOTAL:	22.124
									VALOR FLETE:	0
									I.V.A.:	3.540
									VALOR NETO:	25.664

FAE BGA 80730

ESTA FACTURA DE VENTA SE ASIMILA EN TODOS SUS EFECTOS LEGALES A LA LETRA DE CAMBIO, CONFORME A LOS ARTICULOS 772/774 DEL CÓDIGO DE COMERCIO SE PACTAN INTERESES DEL MAXIMO LEGAL VIGENTE AL MOMENTO DE LA EXIGIBILIDAD POR MORA, SIENDO ESTOS EXIGIDOS Y EL TOTAL DEL CAPITAL POR EL SOLO INCUMPLIMIENTO O MORA EN EL PAGO O CONDICIONES DE CREDITO AQUI PACTADAS PARA LA ENTREGA DE MERCANCIAS ES REQUISITO INDISPENSABLE EL SELLO DE LA COMPAÑIA, FIRMA Y CEDULA DEL FUNCIONARIO QUE RETIRA.

SON: VEINTICINCO MIL SEISCIENTOS SESENTA Y CUATRO PESOS MCTE

No DE CHEQUE 1:	FECHA:	VALOR:	BANCO:
No DE CHEQUE 2:	FECHA:	VALOR:	ENTIDAD AVALADORA:
No DE CHEQUE 3:	FECHA:	VALOR:	No AUTORIZACION:

Condición Pago:

Observaciones:

ACEPTO LA PRESENTE Y DECLARO HABER RECIBIDO REAL Y MATERIALMENTE LOS ARTICULOS ARRIBA DESCRITOS

Firma / Sello Comprador/ fecha Recibido

ALVARO CRAMADOS MAURICIO
YENNY ELIZABETH

PEREZ ORTIZ ANGEL MAURICIO

EN CASO DE RECLAMO DEBIDAMENTE COMPROBADO SOBRE LA CALIDAD DEL MATERIAL Y/O SERVICIO SUMINISTRADO, COMPAÑIA GENERAL DE ACEROS S.A. ÚNICAMENTE RESPONDERA CON EL REEMPLAZO DEL MATERIAL Y/O SERVICIO DEFECCIOSO O HASTA EL VALOR DEL MISMO SEGUN SEA EL CASO.

De acuerdo a la ley 1231 de julio 17 de 2008, una vez cumplido el término de diez (10) días calendario siguientes a la recepción de la presente factura, si no reclamare en contra de su contenido, se entenderá que esta ha sido apropiada de forma tácita e irrevocable.

Principal Bogotá Av 68 No. 378 - 51 Sur PBX: (1) 770 0560 FAX: (1) 770 0550 770 0530

Medellin Calle 32 No. 41 - 139 Itagui PBX: 372 4500 Fax: 277 6088

Bucaramanga Cra. 14 No. 23 - 02 PBX: 633 7708 Fax: 633 2779

Barranquilla Cra. 14 No. 23 - 02 PBX: 633 7708 Fax: 633 2779

Carriagena Diag. 30 No. 54 - 206 Local 19 Centro Comercial Mamonal Plaza Tels: 667 3940 Fax: 677 0327

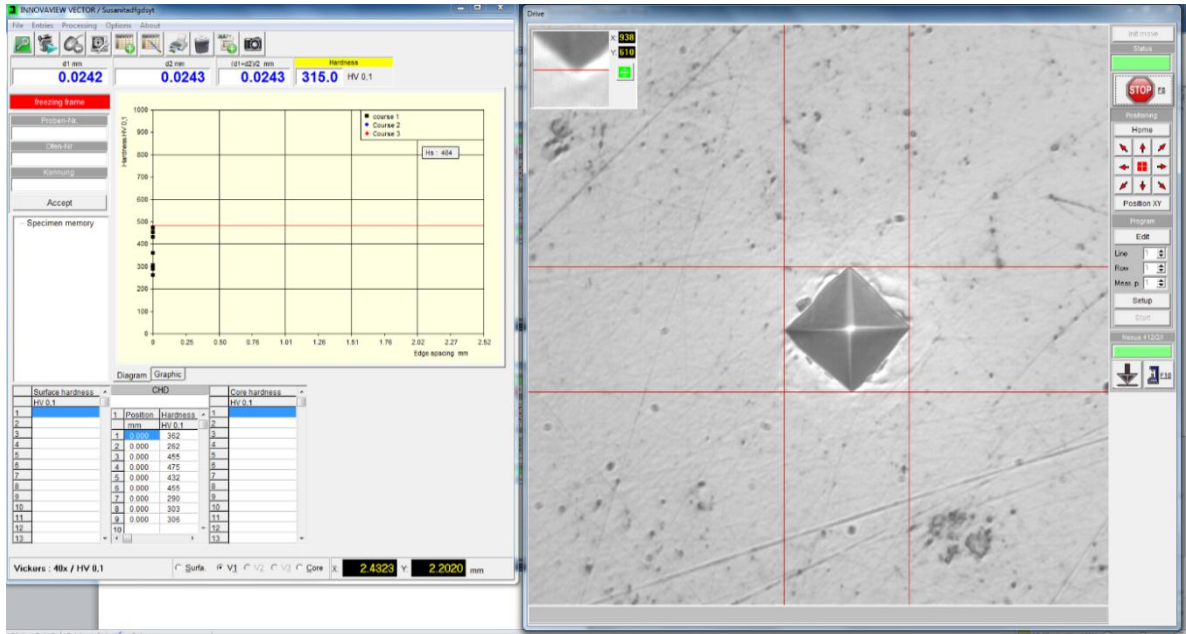
Registro Cámara de Comercio 119316. Régimen Común Radicación 03-3107-1. Código Actividad Económica Ppal. 2410. Somos grandes contribuyentes. Resolución 2030 Diciembre 2009. Somos autorentrados. Resolución 564 DIAN Abril 2006

www.ega.com.co **CIENETE**

Figura 3. Factura redondo AISI 4140

ANEXO B. Microdureza

Figura 1. Microdureza muñón de bancada centro aplicada al cigüeñal original



REPORTE DE CALIDAD

NUMERO 0007 130

COD. FRIT-04

FECHA: 23/04/15

REV. No. 02

PAG. 1 de 1

CLIENTE: MECANIZADO

LOTE No. 002964-353

FECHA: 23-04-15

CANT	UNIDAD INSPEC.	TIPO DE PIEZA	MATERIAL	TRATAMIENTO TERMICO REALIZADO	DUREZA FINAL
1	1	Pieza	00000	Tiempo Térmico Localizado	55-60 HRC

IMATT S.A.S.

[Handwritten Signature]

ANEXO C. Montaje y puesta en funcionamiento

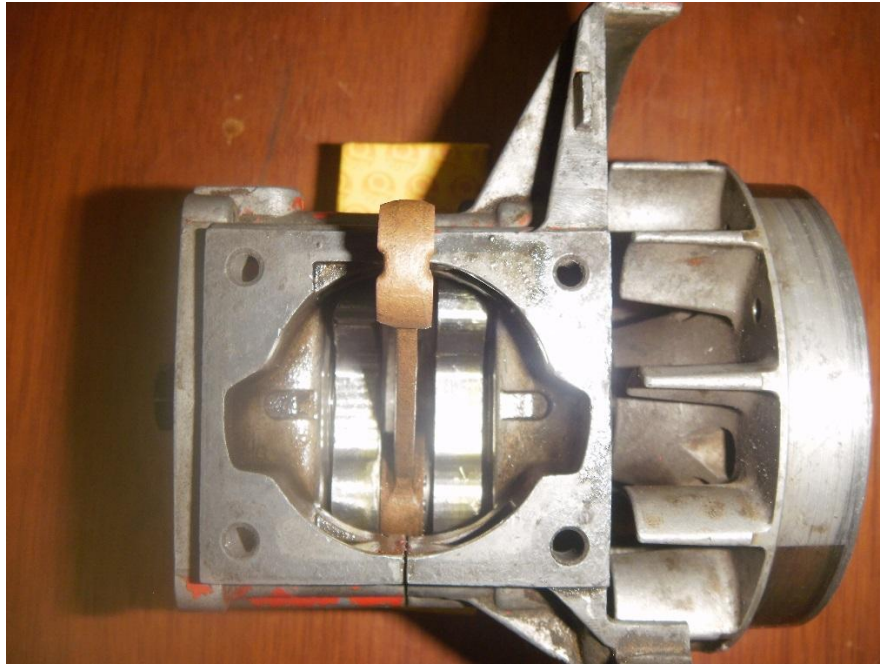
Figura 1. Prototipo



Figura 2. Montaje del prototipo



Figura 3. Prototipo instalado



ANEXO D. Ensayo de rugosidad

Figura 1. Ensayo rugosidad cigüeñal original ($30.105 \mu m$)

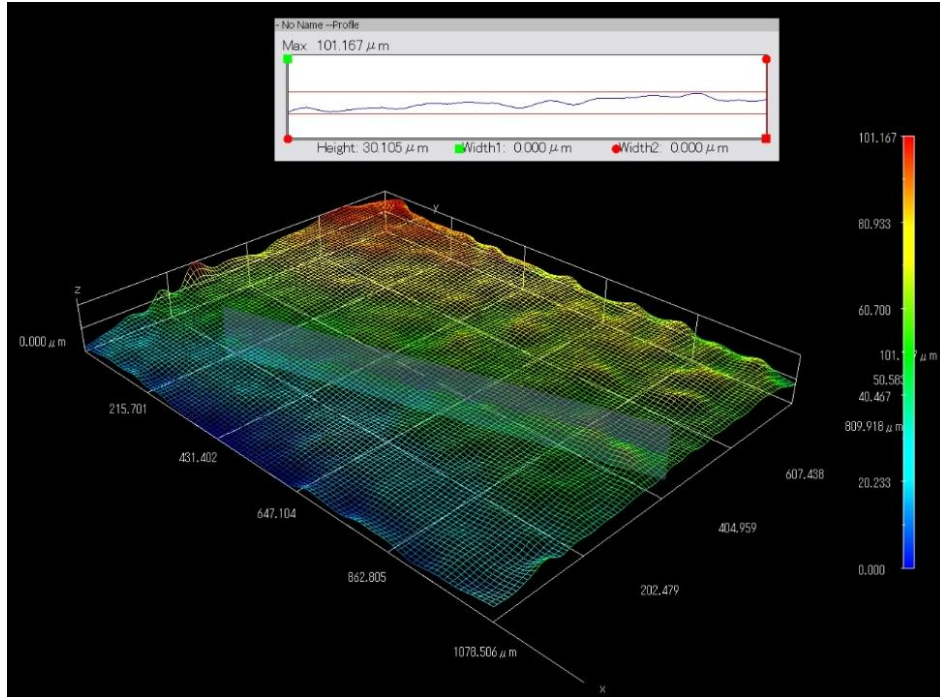
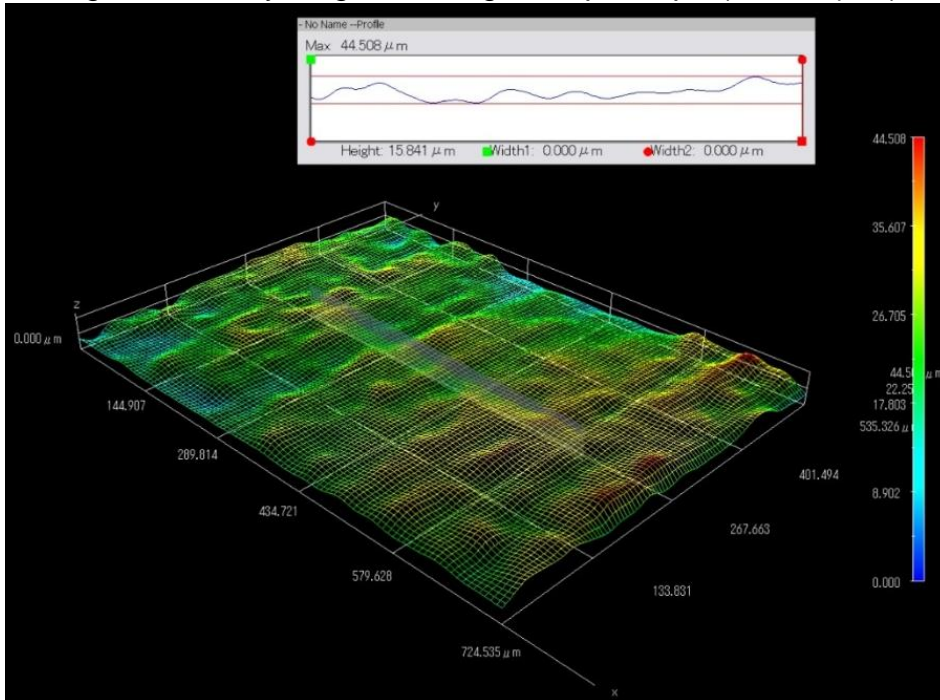


Figura 2. Ensayo rugosidad cigüeñal prototipo ($15.841 \mu m$)



ANEXO E. Planos prototipo

Figura 1. Planos cigüeñal.

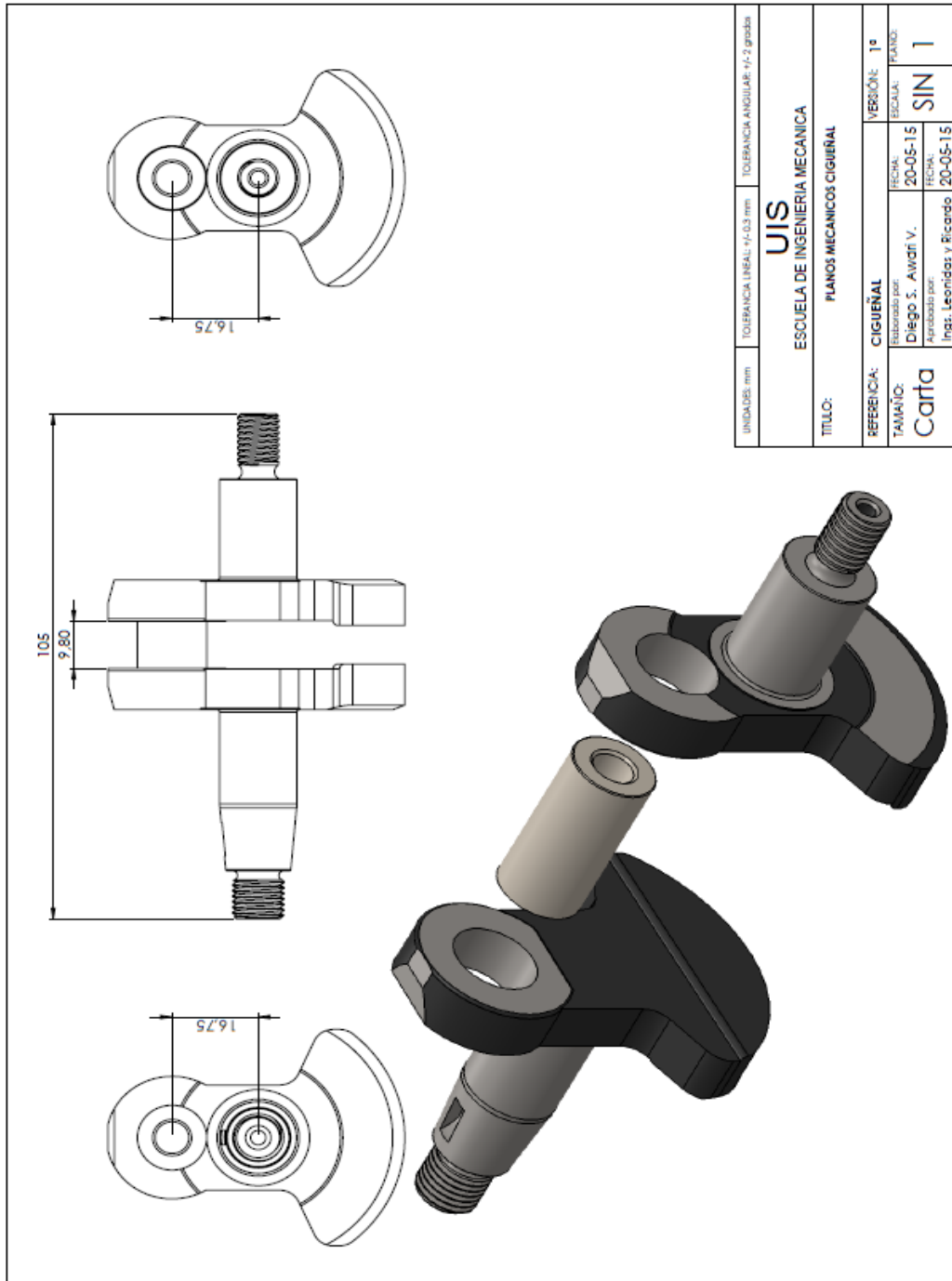


Figura 2. Planos cigüeñal.

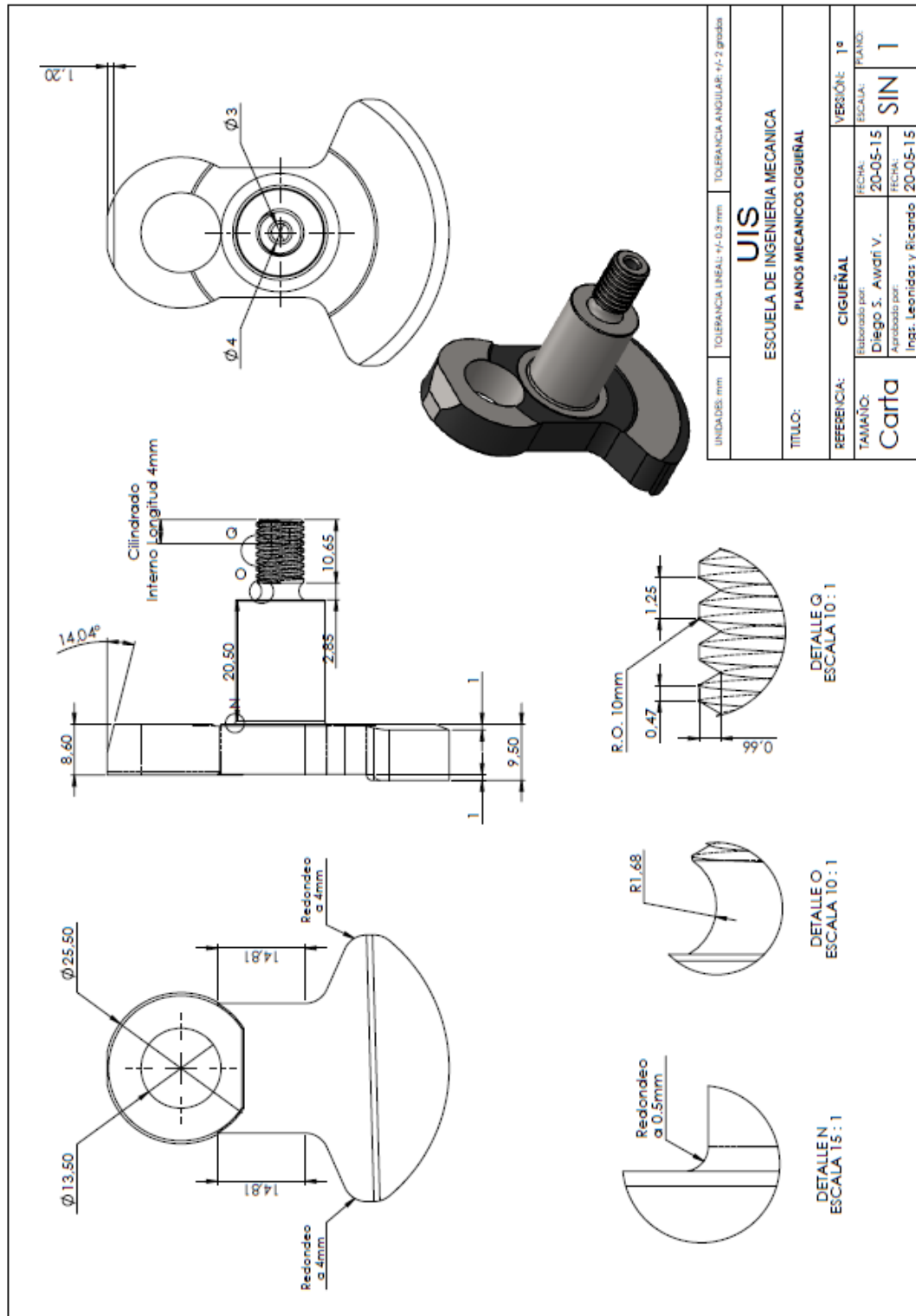


Figura 3. Planos cigüeñal lado volante.

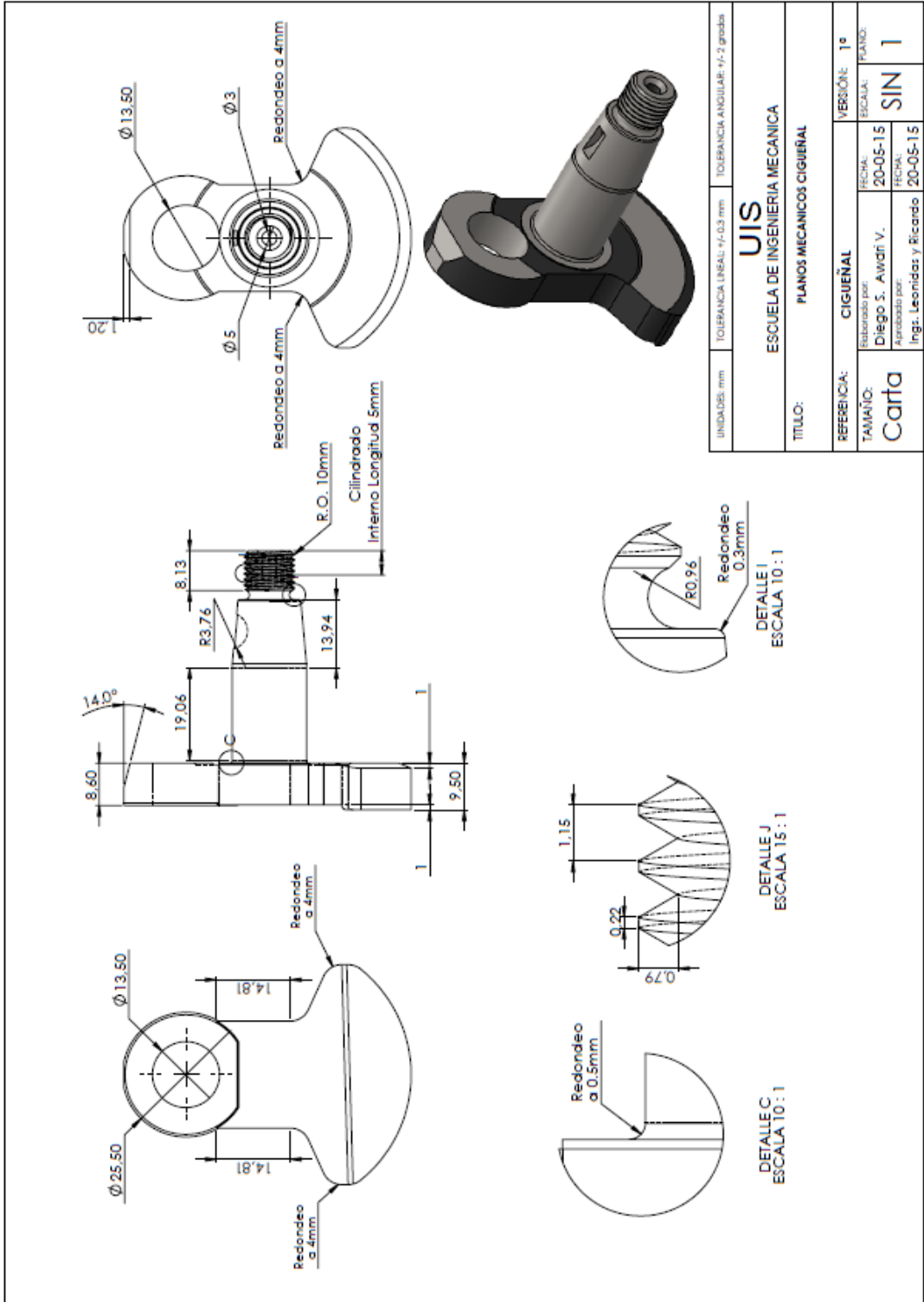
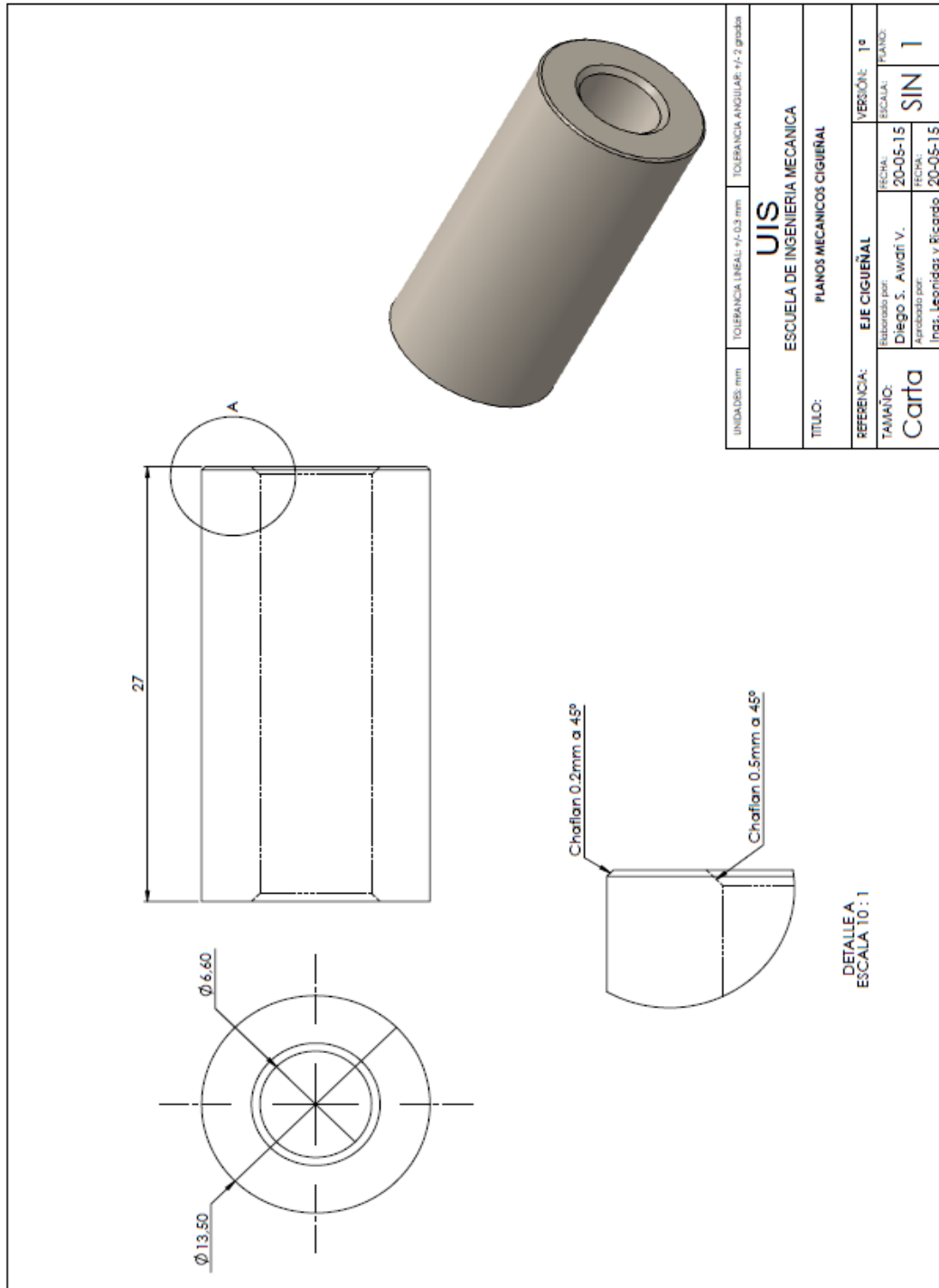


Figura 4. Planos pasador del cigüeñal.



ANEXO F. Directorio de los laboratorios UIS

Tabla 1. Directorio de los laboratorios

Laboratorio	Ext	Ensayo	Encargado
102	3514	Espectrometría	Dr. Carlos Rios
203	3508	Microdureza	Leslie Meléndez
304	3511	Prueba LLAMA	Profesor Rafael Cabanzo
Metalúrgica	2421	Metalografía	Domingo Carreño Laboratorista