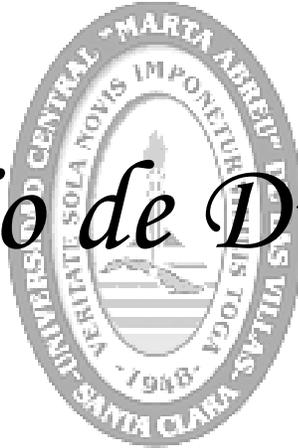


Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas

Facultad de Ingeniería Mecánica

Centro de Investigaciones de soldadura (CIS)

Trabajo de Diploma



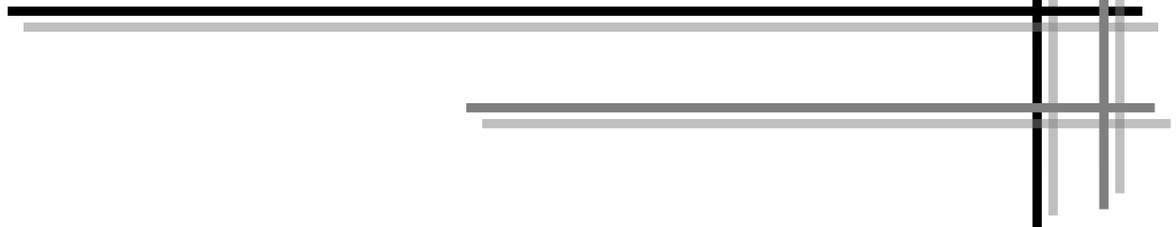
*Recuperación de los cojinetes de deslizamiento del
árbol de levas del motor YUCHAI*

Autor: Alexis Roberto Guevara Leiva

Tutor: Dr. Ing. Arnaldo Herrera Artiles

Julio 2016

“Año 58 de la Revolución”



PENSAMIENTO

La inteligencia consiste no sólo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica.

Aristóteles

DEDICATORIA

A toda mi familia que me ha brindado todo su apoyo incondicional, principalmente a mis padres Mirelys y Alberto que son un vivo ejemplo de superación a base de esfuerzo, sacrificio y honestidad, quienes me han otorgado la fuerza y sabiduría para seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, abuelos, tíos, hermano, padrastro y a mi novia por su apoyo incondicional que me han dado en todo momento.

A mi tutor Arnaldo Herrera Artiles y a todos los profesores que de una forma u otra me brindaron su ayuda en la realización de la tesis.

Al personal de la Empresa Militar Industrial de Sancti Espíritus “Coronel Francisco Aguiar Rodríguez” que me dieron su ayuda para la realización de la tesis.

A todos los profesores que me brindaron su apoyo en el transcurso de estos cinco años de carrera.

A todos mis amigos, en especial a aquellos que siempre me dieron su apoyo en todo momento.

RESUMEN

En el presente trabajo se presenta una revisión general sobre los cojinetes de deslizamiento de los árboles de levas de los motores de combustión interna, los materiales, fallas típicas y sus causas, y los métodos de recuperación. Se hace una caracterización de laboratorio de dimensiones, composición química, microestructura y microdureza de los materiales que componen los cojinetes del motor YUCHAI. Se analizan los métodos de recuperación y se selecciona el de fundición centrifugada para la reposición por aporte de la capa de babbitt desgastada del cojinete y se valora entre otras, la aleación antifricción Babbitt B83 como posible sustituta de la aleación original. Se establece el proceso tecnológico y los requisitos técnicos y parámetros a considerar en el proceso de recuperación. Se presenta el cálculo y diseño de los elementos constructivos fundamentales para una máquina de fundición por centrifugación, así como la selección de los componentes estandarizados y se precisan los parámetros de trabajo que son invariantes. Se hacen recomendaciones para la evaluación y selección de la posible aleación antifricción a utilizar y la construcción final de la máquina de fundición centrífuga.

ABSTRACT

In this paper a general review of the plain bearings of camshafts of internal combustion engines, materials, typical failures and their causes, and recovery methods is presented. a characterization laboratory size, chemical composition, microstructure and microhardness of the materials composing the motor bearings is YUCHAI. Recovery methods are analyzed and centrifugally cast for replacement is selected by input from the layer bearing babbitt worn and titrated among others, antifriction Babbitt alloy B83 as possible replacement of the original alloy. The technological process and technical and parameters to consider in the recovery process requirements set. The calculation and design of the fundamental building blocks for a centrifugal casting machine, as well as the selection of standardized components is presented and the working parameters that are invariant required. Recommendations for the evaluation and selection of possible anti-friction alloy used and the final construction of the centrifugal casting machine are made.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo I.....	4
Fundamentos teóricos sobre los cojinetes de deslizamiento y su recuperación	4
1.1. Generalidades sobre los cojinetes de deslizamiento.....	4
1.2. Características generales de los cojinetes de fricción (buje) de los motores de combustión interna	6
1.3. Materiales de los cojinetes de deslizamiento de los árboles de levas.....	8
1.3.1. Aleaciones de metal babbitt.....	9
1.3.2. Propiedades tribológicas de los materiales babbitt.....	12
1.4. Lubricación de los cojinetes de deslizamiento	13
1.5. Causas de fallas de los cojinetes de deslizamiento.....	14
1.6. Métodos de recuperación de los cojinetes de deslizamiento	16
1.6.1. Introducción.....	16
1.6.2. Métodos para el revestimiento de los cojinetes con babbitt	16
1.6.3. Particularidades de revestimiento de los casquillos con metal babbitt.....	18
1.7. Equipos para la recuperación de los cojinetes	18
Capítulo II.....	21
Caracterización de los cojinetes de fricción del árbol de levas del motor YUCHAI y proceso tecnológico para la recuperación	21
2.1. Características generales del motor YUCHAI.....	21
2.2. Características constructivas generales de los cojinetes del árbol de levas de los motores YUCHAI.....	21
2.3. Caracterización en laboratorio de los cojinetes del árbol de levas de los motores YUCHAI	23
2.3.1. Composición química de los materiales de los cojinetes bimetálicos	23
2.3.2. Caracterización metalográfica de los materiales del cojinete.....	25
2.3.3. Microestructura del material antifricción (babbitt)	29
2.3.4. Microdureza de la capa antifricción babbitt	30
2.4. Proceso tecnológico del revestimiento de los casquillos con metal babbitt	31
2.4.1. Preparación de los casquillos para el revestimiento	31

2.4.2. Fundición del babbitt y relleno de los casquillos.....	32
2.4.3. Elaboración mecánica de los casquillos	34
2.5. Criterios a seguir para la obtención de aleación Babbitt B83.....	35
Capítulo III	38
Diseño de una máquina de fundición centrífuga	38
3.1. Principio físico de la fundición centrífuga	38
3.2. Diseño y cálculo de los elementos constructivos fundamentales de la máquina.....	40
3.2.1. Diseño y cálculo del cuerpo porta buje	41
3.2.2. Cálculo del sistema de transmisión	49
3.2.3. Selección del motor eléctrico	51
3.2.4 Transmisión flexible (Correa)	52
3.2.5. Cálculo y dimensionamiento del árbol de transmisión.....	58
3.2.6. Dispositivo de alimentación del babbitt fundido	66
3.2.7. Estructura de bastidor	67
3.3 Consideraciones económicas.....	68
Conclusiones.....	69
Recomendaciones	70
Bibliografía.....	71
Anexos	75

Introducción

La necesidad de alargar la vida útil de partes y piezas es cada vez mayor. La práctica de desechar una pieza una vez desgastada, reemplazándola por una pieza nueva (repuesto), ha sido gradualmente eliminada y se tiende a instalar piezas con recubrimiento protectores, los cuales una vez desgastados (y habiendo generalmente sobrepasado en varias veces la vida útil de la pieza sin protección) son nuevamente recubiertos, mecanizados por uno u otro proceso y vueltas a montar. Las economías generalmente por este concepto en mantenimiento son enormes (Streeter, 1983). Estos procesos son comúnmente conocidos como recuperación o reacondicionamiento de las piezas.

En los tiempos actuales el régimen de calidad en los distintos procesos de producción trae consigo el manejo adecuado de indicadores de gestión tales como; confiabilidad y disponibilidad de los equipos, estos garantizan un menor tiempo perdido en la elaboración de un producto determinado. Bajo estas premisas se hace indispensable alargar la vida útil de las diferentes partes y elementos que constituyen una máquina, optimizando su ciclo de vida para lo cual se utilizan técnicas de recuperación (Andrade S. y Salazar P., 2012).

La recuperación de piezas, como parte de los procesos de mantenimientos correctivos y reparaciones complejas de máquinas, equipos e instalaciones industriales, reviste gran importancia para alargar el plazo de vida útil de las piezas, aprovechando además su vida remanente que se pierde al convertirla en chatarra, permitiendo alcanzar resultados económicos positivos y preservar el medio ambiente (Herrera, 2005c y Daquinta et al., 2010).

La recuperación de piezas con la aportación de material es un proceso que permite, mediante el recargue de un material, devolver los parámetros nominales o permisibles a las superficies de trabajo defectuosas de las piezas para continuar su nuevo ciclo de explotación (Colectivo de autores, 1993).

En Cuba desde los inicios de la revolución se ha tenido un trabajo mantenido en la implantación de diferentes métodos para la recuperación de piezas desgastadas que permitan mantener las máquinas y equipos activos y disminuir el costo de la reparación general de las mismas y de esta forma dar respuesta a las demandas de piezas de repuesto.

En los diferentes talleres de reparación del país se aplican algunos métodos de restauración de piezas desgastadas como es el recargue con procesos de soldadura manual y mecanizada, los

procesos de recubrimientos electrolíticos, los procesos de proyección térmica, entre otros procesos con y sin aporte de metal (Daquinta et al., 2010).

La Empresa Militar Industrial de Sancti Espíritus “Coronel Francisco Aguiar Rodríguez” desarrolla entre otras actividades la reconstrucción y reparaciones generales de diferentes medios de transporte y de sus agregados para el país.

Actualmente la empresa se encuentra enfrascada en desarrollar la reparación general de los motores YUCHAI de procedencia China que constituyen la fuente motriz de miles de equipos en explotación, tanto de la técnica militar como de la economía del país. Como vía de disminuir los costos de la reparación y de sustituir importaciones, esta empresa prioriza los estudios y desarrollo de tecnologías para la recuperación de diferentes piezas, entre las que se encuentran los cojinetes de fricción (cojinetes de deslizamiento) del árbol de levas de dicho motor, los que en la actualidad son desechados por desgaste al llegar a las dimensiones límites permisibles y sustituidos por nuevos importados desde China.

Los cojinetes de deslizamiento del árbol de levas del motor YUCHAI son bimetálicos, para su recuperación se hace necesario reponer la capa de trabajo que ha sufrido desgaste mediante un proceso de aportación del metal.

Problema técnico a resolver

Definir las características constructivas y técnicas de los cojinetes de deslizamiento, así como del material antifricción que sufre el desgaste y los posibles métodos de recuperación.

Hipótesis

Conociendo las características constructivas y técnicas y tipo de fallas de los cojinetes de deslizamiento del árbol de levas es posible definir el método de recuperación, su proceso tecnológico general y desarrollar el diseño preliminar del equipo para tales fines.

Objetivo general

Definir el método y proceso tecnológico general para la recuperación de los cojinetes del árbol de levas del motor YUCHAI y el diseño preliminar de una máquina o equipo para llevar a cabo el proceso.

Objetivos específicos:

1. Desarrollar, a partir de la bibliografía, una caracterización general de los cojinetes de deslizamiento de los árboles de levas de motores de combustión interna, los posibles métodos de recuperación y equipamiento típico utilizado en el proceso.
2. Realizar la caracterización técnica y constructiva de los cojinetes mediante la recopilación y estudio de la información técnica disponible del fabricante y la investigación y análisis de laboratorio.
3. Precisar los métodos o procesos típicos de recuperación a aplicar en los cojinetes para la restauración de los defectos y seleccionar el más adecuado para las condiciones de la empresa.
4. Establecer el proceso tecnológico general para la recuperación de los cojinetes.
5. Realizar el diseño preliminar de una máquina o equipo para la recuperación de los cojinetes, garantizando los cálculos de los parámetros y dimensionamiento de los elementos constructivos fundamentales.

Tareas fundamentales a desarrollar

1. Recopilación y revisión bibliográfica sobre los cojinetes de deslizamiento de los árboles de levas de motores de combustión interna y los materiales de su construcción.
2. Análisis de los posibles métodos de recuperación y particularidades de los procesos tecnológicos.
3. Investigación y análisis de laboratorio en cuanto a composición química, microestructuras, durezas y otros aspectos técnicos y constructivos de los cojinetes.
4. Cálculo y diseño de los elementos constructivos fundamentales y selección de componentes estandarizados para el diseño preliminar de un equipo para la recuperación de los cojinetes.

Capítulo I

Fundamentos teóricos sobre los cojinetes de deslizamiento y su recuperación

1.1. Generalidades sobre los cojinetes de deslizamiento

Según se describe en MOTORGIGA (2010), los cojinetes de fricción son identificados como cojinete liso o cojinetes de deslizamiento, se le denomina así al elemento mecánico capaz de soportar los gorriones (muñones o apoyos) deslizantes de los ejes giratorios, se caracteriza por un reducido coeficiente de fricción y por la posibilidad de ser lubricado constantemente o estar dotado de poder autolubricante.

Otra particularidad importante reside en el hecho de que el material del cojinete debe ser más blando que el eje, para evitar el deterioro de éste en el caso de una lubricación defectuosa. En la zona de acoplamiento entre el muñón y el cojinete existe un rozamiento (por deslizamiento), cuya magnitud puede medirse por medio de un coeficiente, que es función de la velocidad periférica del muñón, estado de las superficies, la temperatura y de la naturaleza de los dos cuerpos en contacto.

Normalmente el cojinete va revestido con un material de una aleación antifricción, que sirve para guiar y sostener los órganos giratorios, comúnmente con velocidades y cargas más bien elevadas. Su función es disminuir los roces evitando el desgaste.

En reposo el peso empuja el muñón contra el cojinete, si bien la untuosidad del aceite evita el contacto directo, en el arranque la excentricidad hace aumentar gradualmente la presión, hasta alcanzar el régimen, en que bajo el efecto de la velocidad, el muñón flota sobre la capa aceite (sustentación hidrodinámica).

En varias ocasiones los cojinetes de fricción están divididos en dos mitades, llamados semicojinetes. En otros casos constan de una sola pieza, y entonces se usa más propiamente el término de casquillo, especialmente si se trata de cojinetes de dimensiones relativamente pequeñas.

Los semicojinetes se montan generalmente en correspondencia con los soportes de bancada y en las muñequillas del cigüeñal, en los soportes del árbol de levas, en ciertos ejes del cambio, etc.

La lubricación en los primeros se realizaba por caída (gravedad) o por barboteo; sucesivamente se ha ido pasando a la lubricación forzada, sobre todo para los cojinetes sometidos a cargas muy fuertes, como las del cigüeñal y los arboles de levas.

Los cojinetes de fricción se montan con interferencia en sus correspondientes soportes (partes fijas), mientras que es preciso dejar entre el gorrón y el cojinete un juego o huelgo del orden de 0,03-0,06 mm, para permitir la formación de la película necesaria para la lubricación hidrodinámica.

Al inicio del automovilismo los semicojinetes estaban constituidos por bronce fundido y mecanizado bastamente, sobre el cual se depositaba por colada el material de antifricción, que luego era elaborado y pulido a máquina. A veces, con ocasión de reparaciones, los cojinetes eran usados a mano.

Según lo planteado en la Wikipedia (2016), la resistencia al deslizamiento de estos provoca la conversión de parte de la energía cinética en calor, que desemboca en las partes que sostienen los casquillos del cojinete.

Hay que distinguir entre los cojinetes simples (lubricados con grasa), cojinetes hidrodinámicos y cojinetes hidrostáticos. La resistencia al deslizamiento es fricción seca, fricción mixta o fricción líquida.

Cojinetes de fricción seca

En los rodamientos con fricción seca se utilizan materiales de baja fricción y combinaciones. A veces también los hay autolubricante (tal como con una aleación de plomo u hojalata, un plástico como el PTFE o cerámicos). La otra opción de fricción seca es con rodamientos de acero.

Cojinetes de fricción líquida

En cojinetes de fricción, cuando se requiere baja pérdida de energía y durabilidad (por ejemplo, para la conversión de energía en una turbina, o en generadores), aplica la lubricación completa (fricción fluida). La película lubricante debe estar a presión para separar las superficies de contacto, para lograr la resistencia al apoyo de uno sobre el otro. En cojinetes hidrostáticos se dispone de alguna bomba de aceite (en motores de combustión), en cojinetes hidrodinámicos la presión de la película del aceite de lubricación entre las dos superficies en contacto entre sí, se

autogenera por su movimiento, esto significa que al iniciarse y detenerse el movimiento no hay presión lo que existe es fricción mixta.

Cojinetes de fricción mixta

En los rodamientos lubricados se produce fricción mixta. El lubricante, grasas o aceites (de petróleo), al menos en algún punto de las superficies de contacto, y tocando sólo las puntas, que establece una reducida resistencia al deslizamiento.

1.2. Características generales de los cojinetes de fricción (buje) de los motores de combustión interna

Tanto Herrera (2005a), como Daquinta et al. (2010), plantean que en los motores de combustión interna el árbol cigüeñal y el árbol de levas se encuentran montados sobre cojinetes de deslizamiento cuya función es reducir la fricción entre una pieza giratoria (árbol de levas o cigüeñal) y una pieza estacionaria (bancadas de bloque). Estos cojinetes deben resistir el calentamiento, pues si la temperatura de funcionamiento es excesiva, la viscosidad del aceite se reduce y, por consiguiente, el lubricante deja de ejercer su acción soportante. Esto conduce a un contacto directo entre cojinete y muñón y, en consecuencia, a un mayor calentamiento provocando el gripado y la fusión. El calentamiento es función del coeficiente de rozamiento característico del material componente del cojinete, de la velocidad de rotación, de las características del acoplamiento, de las posibilidades de refrigeración y de la cantidad de aceite circulante.

Como se plantea en MOTORGIGA (2010), los cojinetes deben tener algunas propiedades características. La primera y la más obvia es que exista compatibilidad entre los materiales del cojinete y el órgano en movimiento (muñón); en la práctica, esta condición se cumple normalmente, pues basta que los materiales en contacto no sean afines entre sí (por ejemplo, acero con acero). Además, deben permitir que las partículas de suciedad transportadas por el aceite de lubricación sean completamente incorporadas por el metal de antifricción, pues si permanecieran en el exterior dañarían rápidamente el muñón.

La capacidad reductora de fricción de un cojinete de motor, se basa en el fenómeno de que los materiales diferentes se deslizan uno contra otro con menor desgaste y menos fricción que los

materiales similares. Por la anterior razón las aleaciones de metales como cobre, estaño o plomo sostienen una pieza de acero móvil mejor que una cubierta accesoria de acero o hasta de hierro fundido. Cuando un cojinete de motor puede realizar parte de ésta función reductora de fricción por sí solo, su rendimiento mejora grandemente con la adición de un lubricante entre la parte móvil y las superficies de rozamiento (Melo et al., 1983).

Los pares de deslizamiento muñón-cojinete en el árbol de levas, por sus características y durezas relativas entre ambos materiales, se clasifican como un par duro-blando (liso rugoso) según Herrera (2005b). Trabajan todo el tiempo bajo condiciones de lubricación hidrodinámica, favorecida por un efecto hidrostático, como describen Jívaj (1987), Baranov (1999) y Herrera (2005b). Tales condiciones sufren cambios en el proceso de explotación con los cambios del régimen de trabajo del motor, dando lugar en diferentes momentos a otros regímenes de lubricación básicos como la lubricación parcialmente hidrodinámica o mixta y lubricación fronteriza o límite y con ello la modificación del coeficiente de fricción entre las superficies, aspectos abordados por Albarracín (1996).

Por tal motivo, uno de los principales objetivos en el diseño de cojinete es establecer y mantener una película de aceite entre el cojinete y el muñón que generalmente trabajan bajo cargas variables.

Según lo planteado por Melo et al. (1983), la gran mayoría de los cojinetes son de tipo “inserto” este nombre proviene del hecho de que el cojinete se hace como una pieza independiente y luego se inserta en la cubierta. Este tipo de cojinete tiene muchas ventajas:

- Reemplaza relativamente fácil.
- Mayor variedad de materiales para cojinetes.
- Espesor de Babbitt controlado.
- Estructura mejorada.

Hay dos tipos de cojinete de inserto:

1. De precisión.
2. Rectificable

El de precisión se fabrica a tolerancias preestablecidas, por lo tanto no requiere maquinado adicional en el momento de instalarse en el motor.

El cojinete de inserto rectificable se fabrica con un recubrimiento extra grueso de material de cojinete en el diámetro interior, lo que permite que el cojinete se machine a cualquier tamaño deseado, incluyendo el estándar, en el momento de su instalación.

Los cojinetes de inserto según la configuración son:

- Enteramente redondo (una sola pieza).
- Seccional (dos mitades).

Los *cojinetes enteramente redondos* son del tipo circular y están contruidos de una cinta enrollada (figura 1.1). Se utiliza donde es posible montar el muñón en su sitio en el cojinete, como es el caso del árbol de levas y proporcionan puntos de apoyo para mantener el eje o árbol girando en ese lugar.

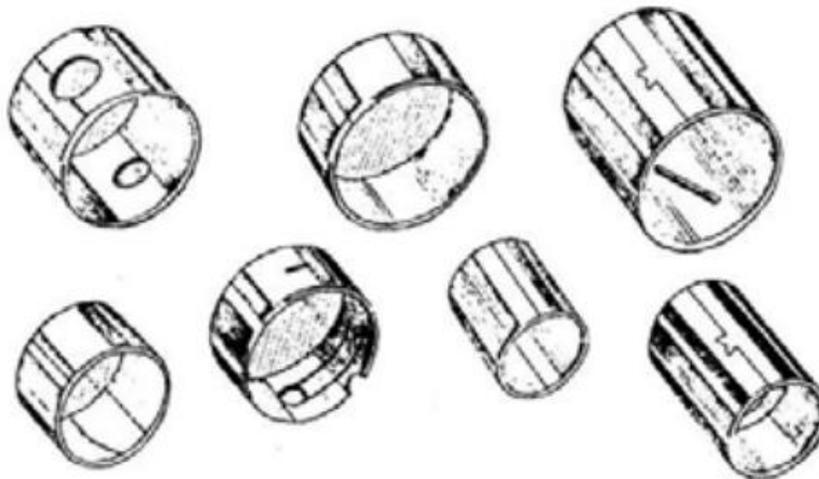


Figura 1.1. Cojinetes típicos del árbol de levas. (Melo et al., 1983)

El *cojinete seccional* se emplea donde el cojinete debe montarse alrededor del muñón con la cubierta del cojinete que también es de dos partes, incluyendo una tapa que sujeta el conjunto. Ejemplo: los cojinetes de bielas de los motores de combustión interna.

1.3. Materiales de los cojinetes de deslizamiento de los árboles de levas

Habitualmente, la estructura del cojinete está contruida de acero, fundición o bronce, y la parte donde existe fricción por deslizamiento se recubre con el metal antifricción más apropiado para cada aplicación, en consonancia con el metal base del cojinete. El elemento rotatorio está

separado del cojinete por una película de aceite, que lo mantiene flotando en él, impidiendo el contacto metal-metal. El metal blanco tiene elevada resistencia a la fricción con el aceite a presión, y en caso de que, debido a una mala manipulación de la máquina, se rompa la película y el eje caiga sobre el metal antifricción, el eje no se daña y la capa de metal blanco es fácil de reparar (Comas, 2011).

Los cojinetes de los árboles de levas generalmente son del tipo bimetálico. Compuesto por una cinta enrollada de acero o bronce, en la parte exterior y la otra (interior) es un recubrimiento de metal antifricción típicamente identificado como metal babbitt (Jóvaj, 1987; citado en Herrera, 2005a).

1.3.1. Aleaciones de metal babbitt

El criterio para la utilización de un cojinete antifricción es conseguir la mínima fricción entre los dos componentes, combinado con la ausencia de problemas por gripado, por fallo mecánico o por distorsión y/o fatiga. Según la geometría del sistema, las condiciones de carga y velocidad, y la atmósfera de trabajo del equipo, se debe escoger el tipo de metal blanco y la lubricación más adecuados.

Se plantea por Herrera (2005a) y Comas (2011), que una aleación de metal blanco debe asegurar una baja fricción y capacidad para soportar la carga sin gripar, distorsionarse, fallar mecánicamente o sufrir corrosión. Las propiedades requeridas que deben poseer son las siguientes:

- La aleación de metal antifricción debe tener bajo punto de fusión y buenas propiedades de fusión y colada, para que su composición permanezca sin modificaciones después de variaciones de temperatura, y no se oxide térmicamente. Además debe adherirse fácilmente a su soporte de metal, y no debe haber una contracción destacable durante el enfriamiento, ni modificar sus propiedades o dimensiones por envejecimiento.
- El metal debe presentar una estructura de dos fases, consistente en partículas duras en una matriz dúctil. Las partículas duras, evidentemente, dan dureza a la aleación, soportando la carga, mientras que la base dúctil aporta buenas propiedades de conformabilidad. Además, la matriz se desgasta de forma homogénea hasta un nivel ligeramente inferior a la fase más dura, permitiendo la formación de pequeños canales de irrigación para la lubricación.

- Las variaciones de temperatura durante el servicio no deben producir desvíos significativos en la dureza del material o en la resistencia a la fatiga, ni en cualquiera de sus otras propiedades mecánicas.
- La aleación debe presentar buena resistencia al desgaste en las condiciones de trabajo impuestas al cojinete. Cabe destacar que la resistencia al desgaste no es una propiedad determinada por un solo metal o varios metales, sino por el conjunto de la aleación y por otros factores como la temperatura, el tipo de lubricante, la presencia de impurezas abrasivas en éste, y la forma geométrica de la superficie.
- El metal blanco debe tener resistencia a la corrosión que pueda provocar el lubricante, pues ésta haría que la superficie del cojinete adquiriera demasiada rugosidad. Si una sola de las fases de la aleación es atacada por la corrosión, existirá una debilitación de la estructura, que puede conllevar efectos desastrosos. Los agentes corrosivos más habituales son los productos ácidos que pueden aparecer por la oxidación de los aceites empleados, o incluso el agua marina.

Se puede considerar que una aleación para cojinetes debe tener un límite elástico suficiente para evitar una deformación general, pero lo bastante bajo para permitir deformaciones locales, combinado con propiedades de resistencia a la fatiga tan elevadas como sea posible.

Las aleaciones babbitt pueden ser base estaño o base plomo. Las primeras disipan mejor el calor, y las segundas tienen mejor resistencia a la corrosión por ácidos, soluciones amoniacales y otros productos químicos, aunque debido a su composición cada vez son menos utilizadas. Además, ambas contienen generalmente antimonio y cobre, que dan dureza a la aleación. El resto de elementos de aleación puede variar según el material utilizado, provocando variaciones en sus propiedades, pero todas las aleaciones antifricción conservan las propiedades comunes de elevada ductilidad, colabilidad y resistencia a la corrosión. En la tabla 1.1 se expone la composición química de algunas de estas aleaciones de babbitt que se rigen por la norma ASTM B23.

Tabla 1.1. Aleaciones babbitt base estaño y base plomo (Comas, 2011)

Aleación	Base	Composición química (%)				Limite elástico (Mpa) a 20 °C	Dureza (HB)	
		Sn	Sb	Pb	Cu		20 °C	100 °C
Tecnofric 101	Sn	90-92	4-5	0,35	4-5	16,9	17,0	8,0
Tecnofric 102	Sn	88-90	7-8	0,35	3-4	23,1	24,5	12,0
Tecnofric 103	Sn	83-85	7,5-8,5	0,35	7,5-8,5	36,9	27,0	14,5
Tecnofric 107	Pb	9,3-10,7	14-16	72-75,5	0,50	17,2	22,5	10,5
Tecnofric 108	Pb	4,5-5,5	14-16	77-80	0,50	18,3	20,0	9,5

Los cojinetes con un menor contenido de metales aleados son menos resistentes a la compresión, y los que tienen mayor contenido de metales aleados son más susceptibles de sufrir fisuración; es necesario conseguir un compromiso entre los dos casos para tener una aleación antifricción adecuada (Comas, 2011).

Una de las aleaciones babbitt más utilizadas es la constituida por una aleación blanda compuesta por 83 % de plomo, 15 % de antimonio, 1 % de estaño y 1 % de arsénico. Esta aleación toma el nombre en honor a su inventor Isaac Babbitt (Melo, 1983; citado en Herrera, 2005a).

Entre las aleaciones babbitt más utilizadas se encuentran los Babbitt B-83 y B-88 que se utiliza en el proceso de fabricación y la recuperación del cuerpo de los cojinetes con composición química según normas GOST 1320-41 (Rusia) (Herrera, 2005a). En la tabla 1.2 se muestra las composiciones de estas aleaciones (Efremov, 1976) y en la figura 1.2, se muestra la estructura cristalina típica del metal Babbitt B 83.

Tabla 1.2. Composición de las marcas más empleadas de babbitt (GOST 1320-41)

Tipo del Babbitt	Componentes en %			No más de (%)
	Estaño	Antimonio	Cobre	
B – 83	83 ± 1	11 ± 1	6 ± 0,5	0,55
B – 88	88 ± 1	8,5 ± 0,5	3.5 ± 0,5	0,51



Figura 1.2. Estructura cristalina del Babbitt B 83. (Efremov, 1976)

Según plantea Melo et al. (1983), la mayoría de los ingenieros considera al babbitt como una superficie de cojinete liso “casi ideal” porque proporciona:

1. El deslizamiento requerido para superar la fricción.
2. La blandura que se requiere para que una cantidad razonable de materias extrañas, se incrusten por sí mismas.
3. El flujo necesario para que el eje y el cojinete se conformen entre sí.

1.3.2. Propiedades tribológicas de los materiales babbitt

De acuerdo con lo planteado en Electroverk Steel (2016), los materiales babbitt tienen bajo punto de fusión, muy buenas propiedades antifricción que dan una estructura heterogénea formada por partículas sólidas que sirven como soporte de apoyo, encerradas en un paño suave, a base de plástico de aleación, que conforman el estaño o el plomo. Los materiales babbitt se pueden adquirir en el mercado en forma de lingotes, pueden ser de grados B-83 y B-88.

El más utilizado y comercializado en el mundo es el Babbitt B83 cuya composición química ya fue mostrada en la tabla 1.2 y entre sus propiedades más importantes se encuentran: (Electroverk steel, 2016)

- coeficiente de fricción sin lubricación de 0,28
- coeficiente de fricción con lubricante de 0,005
- capacidad de carga estática de 400 kg / cm²
- capacidad de carga dinámica de 1000 kg / cm²
- velocidad de rotación máxima de 60 m / seg
- calentamiento admisible hasta +110 °C
- temperatura de vertido de 440 – 660 °C
- alta resistencia al desgaste

1.4. Lubricación de los cojinetes de deslizamiento

La lubricación de los cojinetes se produce por la formación de una capa de lubricante entre la superficie del cojinete y el eje. La presión que se desarrolla en esta capa, tiene que hacer flotar el eje sobre el cojinete. Si el cojinete se ha fabricado correctamente, y si funciona en condiciones ideales, la película continua de aceite separa siempre las dos superficies metálicas, evitando el contacto.

Cuando el cojinete no trabaja en las condiciones óptimas, la película de aceite lubricante se rompe localmente o completamente, y da como resultado zonas de fricción metal-metal, afectando a las superficies de los dos componentes en contacto y provocando gripaje. Si las condiciones de carga, velocidad y lubricación son normales, el fallo de la película puede venir por un reglaje incorrecto de la alineación, que provoca presiones excesivas en determinados puntos, o por la presencia de partículas abrasivas en el agente lubricante.

Aunque el conjunto se mantenga bien alineado, y con la lubricación correcta con un aceite limpio de impurezas, en cualquier arranque o parada del equipo la película de aceite se rompe, debido a que la velocidad de rotación del eje es demasiado baja y no puede garantizar una presión hidrodinámica suficiente. La utilización de una capa de metal blanco como recubrimiento interior de un cojinete, atenúa el efecto de dichas condiciones desfavorables: el efecto de una mala alineación se reduce por la deformabilidad plástica del metal, y las impurezas pueden incrustarse en la capa de metal blando.

Si el cojinete trabaja en régimen hidrodinámico con lubricación perfecta, la fricción aumenta ligeramente al aumentar la velocidad de rotación del conjunto; en los momentos de arranque y parada, es inevitable la fricción metal-metal o en un estado de funcionamiento en el que el régimen hidrodinámico no es el adecuado. Sin embargo, esta fricción se puede reducir al mínimo gracias a la baja dureza de las aleaciones empleadas, pues la avería se limita a la superficie más blanda. Además, en estas aleaciones por su bajo punto de fusión, se evita la combustión del lubricante en zonas de fuerte presión instantánea, en las que la temperatura puede subir repentinamente y provocar fusiones de material blanco localizadas. Por la alta conductividad térmica, disipan las altas temperaturas y permiten que el lubricante conserve su viscosidad.

La conformabilidad de las aleaciones babbitt permite a la carga distribuirse de manera uniforme en toda la superficie del cojinete, y así establecer con más rapidez el régimen hidrodinámico necesario, pues tienen capacidad para adaptarse con gran exactitud a la superficie más dura con la que están en contacto (Comas, 2011).

1.5. Causas de fallas de los cojinetes de deslizamiento

Aunque la falla fundamental que deja fuera de servicio los cojinetes de deslizamiento es el desgaste, existen diversas causas que producen averías en los mismos.

Los resultados obtenidos por MOTORGIGA (2010), a partir de las investigaciones estadísticas sobre las averías de los cojinetes de fricción, muestran las causas de fallas de mayor incidencia que provocan averías en los cojinetes, las que se resumen a continuación.

En la tabla 1.3, se refleja la incidencia estadística en por ciento de las diferentes causas y a continuación los efectos fundamentales de cada una de ellas.

Tabla 1.3. Incidencia estadística de las causas de fallas en los cojinetes de fricción

Causa de la falla	Por ciento
Presencia de impurezas	42,9
Lubricación insuficiente	15,3
Montaje inadecuado	13,4
Alineación defectuosa	9,8
Sobrecargas	8,7
Corrosión	4,5
Causas indeterminadas	5,4

Las *impurezas metálicas* presentes en el aceite provocan un rayado en los cojinetes y en los ejes o fusiones parciales a causa de las variaciones de carga en las distintas zonas del cojinete. La suciedad puede ser debido a una mala limpieza de los órganos mecánicos en el momento de su montaje, o a las partículas metálicas que se desprenden durante la fase de rodaje de los engranajes de la distribución o de la bomba de aceite, de los distintos órganos en movimiento alternativo y en el caso de la caja de cambio junto con el motor, también de las rebabas de los engranajes del cambio. Esto explica la necesidad de la substitución del aceite después de algunos centenares de kilómetros de rodaje.

La **falta de lubricación** o una **lubricación insuficiente** pueden atribuirse a varias causas, entre las cuales las más importantes son:

- Falta de aceite en el cárter.
- Impulsión de la bomba de lubricación insuficiente, porque está deteriorada o rota.
- Funcionamiento defectuoso de la válvula de alta presión, que pone en corto circuito el sistema de lubricación.
- Aceite demasiado antiguo o diluido y, por consiguiente, con menor viscosidad.
- Arranques invernales con aceleraciones bruscas en frío; en este caso el aceite, poco fluido, provoca fenómenos de cavitación y no es aspirado por la bomba.

Un **montaje inadecuado** lleva a los mismos inconvenientes o defectos de una mala lubricación; como ejemplo se pueden señalar:

- Juego insuficiente entre cojinete y muñón, que hace que exista una menor cantidad de aceite y, por consiguiente, provoca sobrecalentamiento.
- Montaje en posición invertida con oclusión de los canales de lubricación.
- Acoplamiento defectuoso: el cojinete se mueve en su apoyo hasta romperse por fatiga.

Las **sobrecargas** se pueden atribuir generalmente a un mal uso del vehículo, como por ejemplo:

- Excesivo funcionamiento al mínimo, pues a baja velocidad el espesor de la capa de aceite es insuficiente y el golpeteo debido a las fuerzas de explosión muy elevado; el perjuicio se manifiesta como fenómeno de separación y desgaste del material de antifricción; el aspecto de los cojinetes es similar al de los corroídos por la acidez del aceite.
- Funcionamiento del motor con esfuerzo a plena admisión y bajo número de revoluciones; las fuerzas de explosión son muy elevadas, pero la impulsión de la bomba es insuficiente; sobre el fondo de los cojinetes se manifiesta un arrastre de material e incluso algunas señales de rotura.
- Velocidad de rotación excesiva, en este caso son demasiado intensas las cargas de inercia, el fenómeno se manifiesta con rotura y erosión.

La **corrosión** se presenta como una especie de desgaste en determinadas zonas del cojinete. Fundamentalmente está ocasionada por la formación de ácidos orgánicos en el aceite, que atacan los materiales constituyentes de la antifricción. Esto sucede cuando la ventilación es

insuficiente en el cárter, cuando existen fugas a través de los pistones, cuando el aceite no es cambiado periódicamente, etc., (MOTORGIGA, 2010).

1.6. Métodos de recuperación de los cojinetes de deslizamiento

1.6.1. Introducción

Como ya se abordó en epígrafe anterior los diferentes defectos en los cojinetes de deslizamiento bimetálicos siempre conducen al desgaste y deterioro del metal antifricción (babbitt).

Cuando se desgasta el revestimiento de metal babbitt, los cojinetes se pueden recuperar o reparar mediante otra aplicación de babbitt y elaboración mecánica, hasta la dimensión nominal u otra dimensión de reparación si está prevista por el fabricante o si se ha establecido por la empresa reparadora (Herrera, 2005a).

En materiales especializados sobre la reparación de motores Efremov (1976) y Herrera (2005a), se abordan procedimientos y métodos para la recuperación de cojinetes de deslizamiento que se ajustan a los propósitos del presente trabajo, dirigido a seleccionar el o los métodos o procedimientos para la recuperación de los cojinetes del árbol de levas del motor YUCHAI, ambos autores coinciden en que para cualquiera de los métodos, los casquillos destinados a ser revestidos con baño de babbitt deben encontrarse en buen estado, por lo que el defectado y clasificación previa es obligatorio. Hay que comprobar si hay rasguños en su superficie exterior, estado de las juntas, planos de unión, altura de los casquillos y su coincidencia con el calibre, etc.

1.6.2. Métodos para el revestimiento de los cojinetes con babbitt

Según lo planteado por Efremov (1976) y Herrera (2005a), el revestimiento de los cojinetes con babbitt se hace por uno de los siguientes métodos: *en moldes, centrífugo y por inyección*.

Revestimiento en moldes

Es un método simple, se toma un molde y se introducen en él los casquillos, se pone el mandril y se vacía el babbitt. La calidad del revestimiento no es muy alta, puesto que no puede obtener la presión necesaria sobre el babbitt.

Revestimiento por fundición centrífuga

Consiste en que los casquillos se ponen en un accesorio giratorio. Con una velocidad determinada de giro se hace el vaciado del babbitt líquido. Se pueden obtener fundiciones de muy buena calidad.

La fundición centrífuga tiene sus orígenes formales en Inglaterra en 1809, año en que se obtuvo la primera patente por parte de A.G. Eckhardt. Posteriormente el primer uso industrial fue para producir tubos de hierro fundido en la ciudad de Baltimore en el año 1848, aunque las bases de la fundición centrífuga empezaron a desarrollarse en el año 1901 (Pérez et al., 2012).

Revestimiento por inyección

Consiste en que al interior de un molde especial, se inyecta el babbitt bajo presión. En este caso, se pueden obtener cojinetes de muy buena calidad pero es muy difícil mantener la hermeticidad entre el molde y los casquillos, lo que conduce a altas pérdidas del babbitt que es un metal costoso.

En las plantas de reparación de automóviles se recomienda para la recuperación, el revestimiento con babbitt de los casquillos en máquinas centrífugas.

Las ventajas principales de la aplicación centrífuga del babbitt a los casquillos son las siguientes:

1. Alta calidad del babbitt vaciado, por su estructura y densidad.
2. Consumo mínimo de babbitt.
3. Alto refinamiento.

Durante el revestimiento centrífugo se pueden encontrar los siguientes defectos:

1. Bucles y burbujas.
2. Excentricidad del casquillo.
3. Paredes desiguales.

Los bucles y burbujas se producen al parar la máquina antes de tiempo; desbalance de sus partes giratorias y baja temperatura del babbitt.

El espesor desigual del babbitt por excentricidad del casquillo suele producirse debido al cabeceo del árbol de la máquina.

Las paredes desiguales se producen debido al mal centraje de los casquillos con relación al eje de rotación del árbol. El centraje se debe hacer con precisión.

En los talleres o empresas de reparación se aplica en algunos casos también la deposición de babbitt en los casquillos mediante llama y una varilla obtenida con la aleación del babbitt. Sin embargo este método introduce diferentes defectos y no garantiza una buena calidad del depósito. Además en este caso tampoco se puede lograr que no ocurra deformación del casquillo producto del calentamiento incontrolado y no uniforme del mismo (Efremov, 1976).

1.6.3. Particularidades de revestimiento de los casquillos con metal babbitt

Diferentes autores entre ellos Efremov (1976), Herrera (2005a) y Zabala (2014) abordan aspectos relacionados con el proceso tecnológico para el revestimiento de cojinetes con metal babbitt y todos coinciden en que hay tres etapas fundamentales en el proceso:

1. Preparación de los casquillos para el revestimiento.
2. Fusión del babbitt y revestimiento del casquillo.
3. Elaboración mecánica de los casquillos.

Los mismos autores destacan que en cada una de esas etapas u operaciones generales, debe asegurarse la rigurosidad tecnológica para obtener la calidad necesaria del revestimiento

1.7. Equipos para la recuperación de los cojinetes

En las plantas de reparación de automóviles se recomienda el revestimiento con babbitt de los casquillos en máquinas centrífugas. Estas pueden ser de eje vertical u horizontal.

Para bujes de diámetro grande normalmente se prefiere la fundición con eje vertical. En este caso el metal puede ser introducido por un canalón que descarga tangencialmente dentro de la cavidad de molde (figura 1.3), o puede ser vertido directamente.

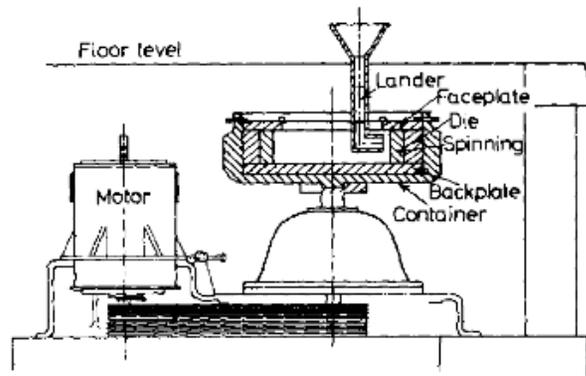


Figura 1.3. Máquina de fundición centrífuga vertical. (Rodríguez, 2008)

En la figura 1.4 se muestra una máquina horizontal para el revestimiento centrífugo de los casquillos. Esta máquina posee las siguientes características: número de revoluciones por minuto 800 a 1000; potencia del motor eléctrico 0,8 kW. Esta máquina se caracteriza, por el enfriamiento por agua a los casquillos, para obtener una estructura del babbitt de grano fino (Efremov, 1976).

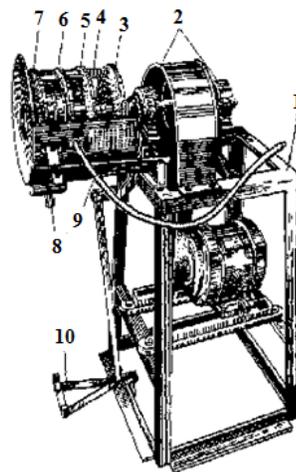


Figura 1.4. Máquina para la fundición centrífuga, con enfriamiento de los casquillos con agua. (Efremov, 1976)

1. cuerpo; 2. cuerpos de los cojinetes de bolas; 3 y 7. discos delantero y trasero; 4. resorte; 5. disco intermediario fijo; 6. disco intermediario móvil; 8. tubo para la salida del agua; 10. pedal.

En la figura 1.5 se muestra otra máquina centrífuga horizontal aún más simple. La máquina consta de la bancada 1, árbol 5 y soporte.

El árbol gira sobre cojinetes de bolas.

El mando se realiza mediante una transmisión por correa y una polea escalonada 6. La polea escalonada permite cambiar las revoluciones de la máquina, de acuerdo con el diámetro de los casquillos que se han de revestir.

En uno de los extremos del árbol, se fija el soporte de la máquina, que consta de la capa 2 y de los discos de aprieto con cortes para la instalación de los casquillos. El disco 3 puede moverse libremente dentro de la capa. El disco 6 se fija a la capa. Entre los discos se pone y se aprieta con los muelles 7 el casquillo que se quiere revestir con babbitt.

El vástago 8, sirve para extraer el casquillo ya revestido.

Los casquillos preparados para ser revestidos se colocan entre los discos de la máquina centrífuga. Previamente, los discos se calientan con el fin de obtener la mejor estructura del babbitt (las dimensiones de los cristales SnSb, igual a 0,025-0,035 mm).

Después de esto la máquina se pone en movimiento y por el hueco 9 en el disco exterior con una cucharita se va echando el babbitt a los casquillos. Debido a la fuerza centrífuga, el babbitt se esparce uniformemente por toda la superficie interior de los casquillos (Efremov, 1976).

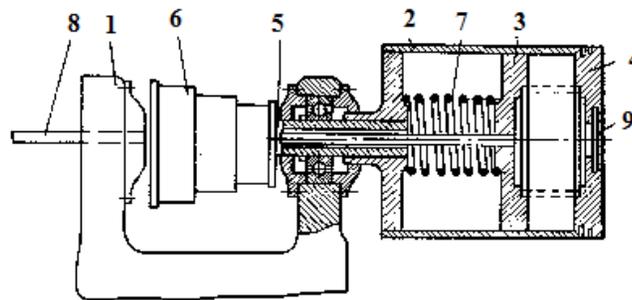


Figura 1.5. Máquina para la fundición centrífuga de los casquillos con polea escalonada.

(Efremov, 1976)

Capítulo II

Caracterización de los cojinetes de fricción del árbol de levas del motor YUCHAI y proceso tecnológico para la recuperación

2.1. Características generales del motor YUCHAI

Los motores diesel de la serie YC4D y la serie YC6J son un producto desarrollado por YUCHAI (China) a partir de la adquisición y obtención de resultados de consultas de la Compañía FEV (Alemania).

Desde hace más de 10 años se vienen remotorizando los medios de transporte con dichos motores, tanto de la técnica militar como de la economía del país.

La serie YC4D es de 4 cilindro, tiene un consumo mínimo de combustible a plena carga ≤ 205 (g/kW.h), un peso neto de 380 (kg) y el árbol de levas cuenta con 5 apoyos. Los de la serie YC6J son de 6 cilindros, tiene un consumo mínimo de combustible a plena carga ≤ 200 (g/kW.h), un peso neto ≤ 760 (kg) y el árbol de levas cuenta con 7 apoyos.

2.2. Características constructivas generales de los cojinetes del árbol de levas de los motores YUCHAI

El sistema de distribución de gases, está compuesto entre otras piezas, por el árbol de distribución o de levas cuyos apoyos se alojan en los cojinetes bimetálicos anclados con apriete en el block. Al igual que en la generalidad de los motores de combustión interna, tal como se describe por diferentes autores, entre ellos Jovaj (1987), Herrera (2005a) y Daquinta et al. (2010), también en los motores YUCHAI, durante su funcionamiento, actúan las mismas fuerzas que generan en el árbol de levas deformaciones de torsión y flexión, desgastes de las superficies de deslizamiento de sus apoyos y hasta grietas que en casos extremos pueden conducir a la rotura por fatiga.

Como ya se señaló en el Capítulo I, los cojinetes tienen la función, no solo de servir de apoyo al árbol de levas y soportar las cargas, sino de absorber las cargas con las pequeñas deformaciones de torsión y flexión, y minimizar el desgaste del par tribológico muñón-cojinete, sobre todo el

de los muñones a costa de las propiedades físico-mecánicas del metal babbitt y de sus propiedades tribológicas en general, ya que, como se recoge en la literatura Baranov (1999) y Herrera (2005ab), el mecanismo de desgaste y su severidad entre dos superficies en rozamiento depende esencialmente de la forma en que ocurren los contactos entre las superficies, características y/o propiedades físico-mecánicas, de los materiales del par tribológico; e interacciones entre las irregularidades y las partículas contaminantes que pueden intervenir entre dichas superficies.

Según la Compañía de maquinaria YUCHAI Guangxi Lida (2009), el motor YUCHAI (China) tiene los alojamientos para los cojinetes del árbol de levas en el bloque del motor de diámetro $59^{+0.030}_0$ mm y el diámetro de los muñones del árbol de levas es de $55,5^{+0.060}_{-0.079}$ mm, que admite un desgaste límite permisible en explotación hasta un diámetro de 55,380 mm . El árbol tiene 5 ó 7 apoyos si el motor es de 4 ó 6 cilindro respectivamente.

La holgura entre los muñones del árbol de distribución y los apoyos del motor YUCHAI es radial. Los cojinetes que soportan el árbol de leva son construidos de casquillos de acero exterior enrollados, y rellenos en su interior con un metal antifricción Babbitt de alta velocidad. Estos cojinetes (figura 2.1), tienen de diámetro exterior $59^{+0.106}_{+0.087}$ mm (para el ajuste fijo en el alojamiento en el block) y $55,5^{+0.030}_0$ mm de diámetro interior (para el ajuste deslizante con el apoyo del árbol de levas). Poseen dos orificios para la lubricación de diámetro 10 mm cada uno. El desgaste límite permisible en explotación para el cojinete en su diámetro interior es hasta 55,63 mm .



Figura 2.1. Cojinete de fricción del árbol de levas del motor YUCHAI.

El ruido de los cojinetes del árbol de levas cuando hay desgaste resulta más difícil de detectar que en los del cigüeñal; en este caso la frecuencia de los golpes ayuda a la determinación, puesto que la velocidad de rotación es igual a la mitad de la del cigüeñal (en los motores de 4 tiempos) (MOTORGIGA, (2010).

Para el análisis de la posibilidad de recuperación de los cojinetes desgastados y de la propuesta del proceso tecnológico para llevar a cabo dicha recuperación y el diseño del equipamiento, es necesario desarrollar una caracterización más completa que no se brinda por el fabricante en la documentación técnica, ni por otra vía.

2.3. Caracterización en laboratorio de los cojinetes del árbol de levas de los motores YUCHAI

Para la caracterización en laboratorio se extrajeron muestras de cojinetes ya usados en explotación y sustituidos durante la reparación por haber rebasado valores de desgaste no permisible.

La extracción de las muestras se realizó mediante el corte con segueta manual en un mordiente teniendo en cuenta el espesor pequeño del cojinete, y posterior se realizó la elaboración de las superficies interesadas según el ensayo a realizar, considerando y cuidando que durante los procesos de corte y elaboración no aparecieran cambios de temperatura y otros factores con efectos en las propiedades del material a estudiar (Zabala, 2014).

2.3.1. Composición química de los materiales de los cojinetes bimetálicos

Para la determinación de la composición química pueden usarse métodos tales como: emisión atómica (espectral), absorción atómica, vía húmeda, carbonimetría, rayos-X, entre otros. Para este caso se realizó mediante Espectroscopía de Emisión Atómica en un equipo STATIONARY Spectrometer Belec Vario Lab incl (Figura 2.2) en el Laboratorio Químico de la Empresa Planta Mecánica de Santa Clara, sobre muestras con dimensiones aproximadamente de 20 x 20 mm .



Figura 2.2. Equipo STATIONARY Spectrometer Belec Vario Lab incl.

En la tabla 2.1, se muestra el resultado promedio (de cinco mediciones) de los análisis realizados a las muestras de los anillos cilíndricos exteriores de los cojinetes, considerando los elementos fundamentales que identifican el material. Puede observarse que se trata de un acero de bajo carbono, con este elemento como el más significativo en la composición.

Tabla 2.1. Composición química del anillo exterior de acero del cojinete (%)

C	Si	Mn	Cr	P	S
0,023	0,005	0,133	0,041	0,001	0,006

Es de señalar que en la práctica se demuestra que más del 90 % de los mismos anillos cilíndricos de los cojinetes pueden ser reutilizados en procesos de recuperación reiterados.

En el caso del metal babbitt se realizó análisis en el mismo equipo, sin embargo los resultados no fueron totalmente confiables debido entre otros aspectos a que el bajo espesor y bajo punto de fusión de la capa de babbitt permitía su penetración hasta el metal del anillo exterior de acero. No obstante, sí fue posible determinar que se trata de un babbitt base estaño con alto porcentaje de aluminio y pequeño porcentaje de plomo.

Aunque el resultado es incompleto, satisface para la etapa actual del objetivo y desarrollo del trabajo.

El método que debe usarse para un resultado correcto debe ser el de absorción atómica y se recomienda se realice futuramente para tomarlo como referencia para la selección final de los posibles babbitt comerciales a adquirir u obtener en la propia empresa, así como, para el desarrollo futuro de ensayos tribológicos o de resistencia al desgaste en laboratorio.

2.3.2. Caracterización metalográfica de los materiales del cojinete

Los análisis metalográficos del cojinete de deslizamiento se realizaron en el laboratorio de metalografía de la Universidad Central "Martha Abreu" de las Villas. Mediante la observación metalográfica. En estas observaciones, además de las microestructuras, se determinó con exactitud el espesor del anillo exterior de acero del cojinete y el espesor máximo del babbitt después del desgaste, aunque este último, solo como referencia, pues el espesor de la capa de babbitt del cojinete nuevo que es el de interés se obtiene solo por diferencia en la medición directa en un cojinete nuevo.

Para las observaciones metalográficas se montaron las probetas o muestras encapsuladas en resina epóxida dentro de un anillo plástico, para proteger y garantizar el correcto pulido de los bordes de dicha muestra dado su pequeño espesor. Las muestras ya montadas se prepararon mediante el desbaste con lijas de agua con números desde 100 hasta 800 en tres etapas: desbaste grueso, medio y fino, y posteriormente se realizó el pulido en la pulidora con paño y pastas abrasivas de óxido de cromo para pulir a espejo hasta obtener una superficie especular y sin las marcas de la elaboración, requerida para el ataque químico (Almendariz, 2013; citado por Zabala, 2014) (ver figura 2.3).

Para cada metal y aleación se utiliza un reactivo de ataque diferente. En este caso primeramente se utilizó el ataque con Nital al 2 % para la determinación del espesor del anillo de acero y posteriormente para el babbitt se utilizó 10 mg de FeCl_3 , 2 mg de HCL y 90 ml de H_2O , en la determinación de la microestructura.



Figura 2.3. Probeta lista para el ataque químico y análisis metalográfico.

Para las observaciones y análisis metalográfico fue empleado un microscopio óptico marca, Neophot 32 (figura 2.4). Las imágenes fueron registradas por medio de una cámara digital marca Canon, modelo A630, resolución 8 MPíxel, acoplada a este microscopio.



Figura 2.4. Microscopio utilizado para el estudio metalográfico de los depósitos.

2.3.2.1. Espesor del casquillo exterior y del metal antifricción Babbitt

Para la determinación del espesor del casquillo exterior y del metal antifricción babbitt se captaron imágenes con una escala de referencia en un microscopio de bajo aumento (figura 2.5).



Figura 2.5. Microscopio de bajo aumento.

Con el empleo del software ImageJ una vez obtenidas las imágenes necesarias se realizaron las mediciones de los espesores tanto del material del casquillo como del babbitt.

Como puede observarse la superficie del metal babbitt muestra irregularidades significativas variaciones en el espesor por los efectos de la fricción en las condiciones de explotación (figura 2.6).

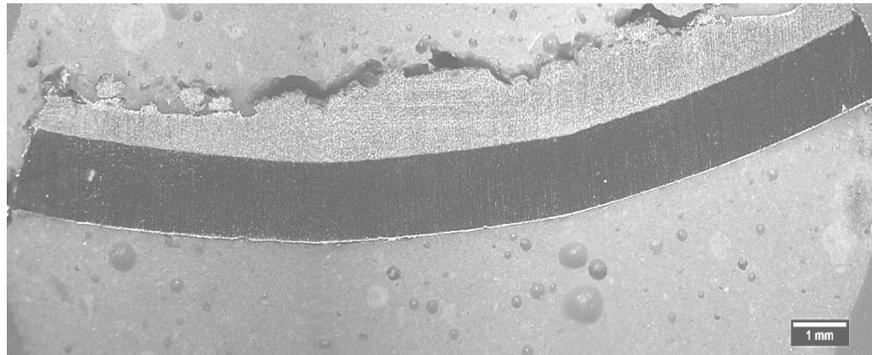


Figura 2.6. Muestra analizada del buje seleccionado a analizar después de la explotación.

Casquillo exterior del cojinete

Para el anillo exterior se realizaron diferentes mediciones, las que se muestran en la tabla 2.2. Los resultados permiten asegurar que dicho anillo está construido de una lámina de acero de 1,2 mm de espesor (ver figura 2.7). El valor de la media se determinó por la ecuación:

$$Media = \frac{\sum_{i=0}^n X_i}{n} \tag{2.1}$$

Tabla 2.2. Mediciones obtenidas del espesor del anillo exterior del cojinete

Medición	Ángulo	Longitud
1	-98,60	1,26 mm
2	-97,04	1,18 mm
3	-94,88	1,19 mm
4	-98,60	1,26 mm
5	-95,51	1,21 mm
Media	--	1,22 mm

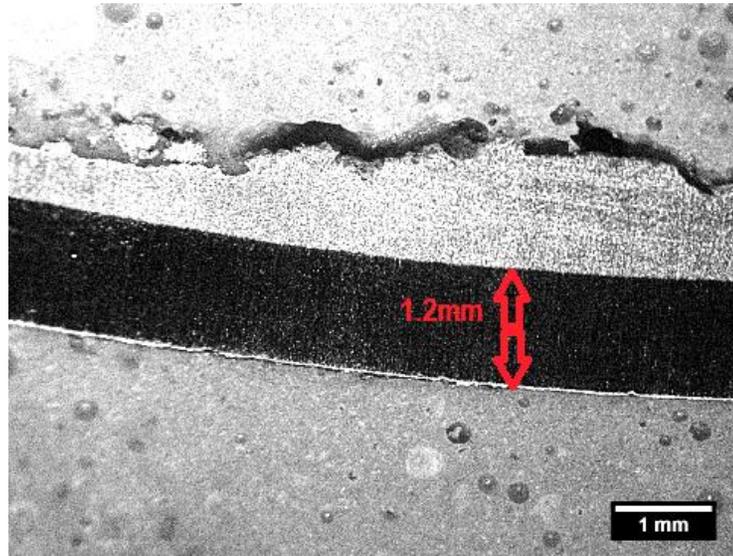


Figura 2.7. Espesor del material de casquillo de acero del cojinete.

A partir de los resultados del espesor del casquillo de acero exterior del cojinete y las dimensiones generales de este (diámetro exterior y diámetro interior de alojamiento del muñón), obtenidas del manual de explotación y mantenimiento del motor se puede definir que el espesor de la capa de metal antifricción Babbitt en el cojinete nuevo es de 2,3 mm .

Metal babbitt

De igual forma que para el casquillo exterior se realizaron mediciones del espesor del material antifricción babbitt en diferentes lugares de la muestra cuyos resultados se recogen en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Espesores del material antifricción Babbitt a lo largo de la muestra

Medición	Ángulo	Longitud
1	-96,63	0,63 mm
2	-90	0,88 mm
3	-98,13	1,02 mm
4	-94,82	1,21 mm
5	-93,9	1,28 mm
6	-92,83	1,18 mm
7	-92,79	1,19 mm
8	-92,15	1,16 mm
Media		1,07 mm

De los resultados de las mediciones anteriores se determinó que el cojinete de fricción en la muestra estudiada tiene un espesor promedio en la zona del babbitt (material con desgaste) de 1,07 mm, con un valor máximo de espesor en dicha zona de 1,28 mm y un valor mínimo de 0,63 mm (tabla 2.3 y figura 2.8). Estos resultados muestran una gran irregularidad del desgaste del cojinete, lo que muestra la posibilidad de que en explotación haya existido una lubricación deficitaria, o un exceso de contaminantes sólidos en el lubricantes, o un lubricante ya fuera de parámetros en sus propiedades por excederse en la explotación, considerando en este caso que la calidad del metal babbitt del cojinetes es la adecuada.

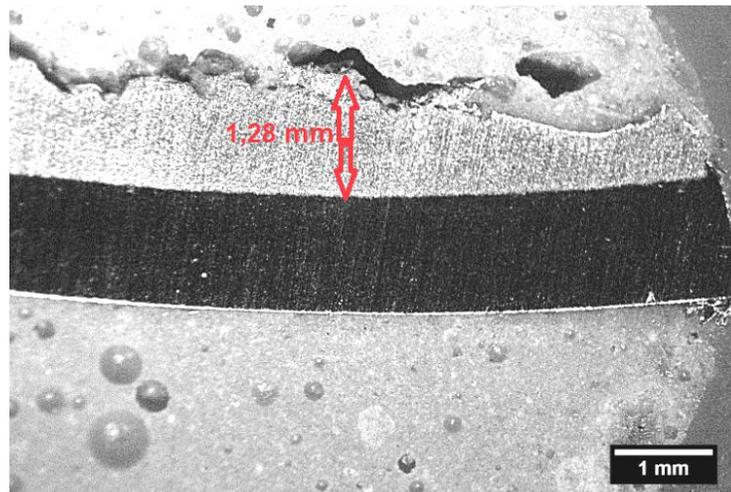


Figura 2.8. Espesor del material de antifricción Babbitt.

2.3.3. Microestructura del material antifricción (babbitt)

Las observaciones metalográficas se realizaron en el microscopio marca NEOPHOT 32 (figura 2.4) y la toma de imagen se realizó con una cámara digital acoplada al microscopio.

En la figura 2.9 se muestra la microestructura obtenida de la capa del metal antifricción del cojinete. En esta microestructura se observan las zonas oscuras que identifican la solución sólida compuesta por el estaño (Guliaev, 1976).

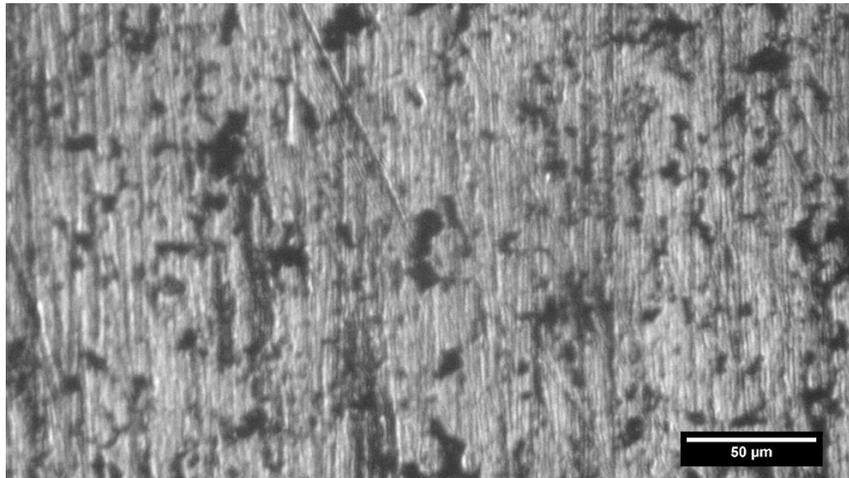


Figura 2.9. Microestructura del metal antifricción del cojinete de deslizamiento del árbol de levas del motor YUCHAI (200X).

2.3.4. Microdureza de la capa antifricción babbitt

La medición de la microdureza se realizó con un microdurómetro Vickers marca Shimatsu (figura 2.10), en el Laboratorio de Tribología y Materiales de la UCLV. Las mediciones se realizaron en la misma región en que se obtuvo la microestructura (figura 2.9). Para el ensayo fue aplicada una carga de 15 g, durante 15 s.



Figura 2.10. Microdurómetro marca Shimatsu.

Fueron realizadas un total de 10 mediciones en distintos puntos del metal antifricción del cojinete. Los resultados se muestran en la tabla 2.4. Se refleja una adecuada uniformidad de la dureza y en valores similares a las aleaciones babbitt comerciales base estaño.

Tabla 2.4. Microdureza del metal antifricción

Medición	Dureza (Hv)
1	39,61
2	33,07
3	35,48
4	39,61
5	39,31
6	22,71
7	33,07
8	35,48
9	30,91
10	36,78
Media	34,6

2.4. Proceso tecnológico del revestimiento de los casquillos con metal babbitt

Como ya se señaló en el Capítulo I, el proceso tecnológico de recuperación de los cojinetes por revestimiento con babbitt, se desarrolla en tres etapas fundamentales:

4. La preparación de los casquillos para el revestimiento.
5. La fusión del babbitt y revestimiento del casquillo.
6. La elaboración mecánica de los casquillos.

Siguiendo las recomendaciones y criterios de Efremov (1976), Herrera (2005a) y Zabala (2014) se recomiendan los pasos a seguir en cada una de las etapas del proceso tecnológico.

2.4.1. Preparación de los casquillos para el revestimiento

Esta etapa cuenta con tres operaciones que son determinantes para obtener una adecuada adherencia de la capa de babbitt, estas son:

1. Eliminación del babbitt viejo (desgastado).

2. Limpieza de los casquillos de la suciedad y óxido.
3. Estañado de los casquillos.

El proceso se debe desarrollarse siguiendo los pasos siguientes:

- Para eliminar el babbitt desgastado, el casquillo se sumerge en un crisol con babbitt fundido. Para esto, el casquillo se calienta previamente hasta (100-120) °C.
- El casquillo frío no se debe sumergir en babbitt fundido, puesto que el babbitt salpicaría el crisol y puede ocasionar quemaduras peligrosas.
- Después del calentamiento, el casquillo se sumerge en el crisol durante (10-15) segundos.
- Posteriormente se limpia la suciedad y óxidos del casquillo.
- Los agujeros para el engrase se tapan con asbesto.
- Se desengrasan en una solución del (8-10) % de sosa cáustica u otro proceso químico (es necesario tener en cuenta los efectos y protección cuando se trabaja con soluciones de sosa caustica).
- Se realiza el estañado de los casquillos que puede ser también en un crisol con estaño fundido. La temperatura del estaño, debe ser de (120-150) °C, la superficie bien estañada es de color blanco plateado.
- Las manchas amarillas en el estaño, indican su oxidación. En este caso, se elimina el estaño y se vuelve a estañar.
- Una vez hecho el estañado, los casquillos se deben revestir inmediatamente con el babbitt.

2.4.2. Fundición del babbitt y relleno de los casquillos

- La fundición del babbitt se hace en crisoles eléctricos, que pueden ser similares al mostrado en la figura 2.11. El crisol puede ser de distinta capacidad según el volumen de casquillos a revestir. Para pequeñas producciones se utilizan crisoles pequeños y fuentes de calentamiento convencionales.
- La preparación del crisol de fusión consiste en que el babbitt se va echando a trocitos

en el crisol; al mismo tiempo se va hechando carbón vegetal.

- Al utilizar babbitt viejo, en forma de viruta, barras etc., antes de la fundición se prepara el crisol de fusión.
- No se recomienda añadir al crisol de fusión virutas sin prensar. Antes del prensado, la viruta de babbitt, debe librarse de las virutas de los metales ferrosos. Para esto, las virutas se hechan en un cajón de madera y se remueven con un imán.
- Las virutas pueden ser prensadas en una prensa hidráulica con un dispositivo o accesorio como el mostrado en la figura 2.12.

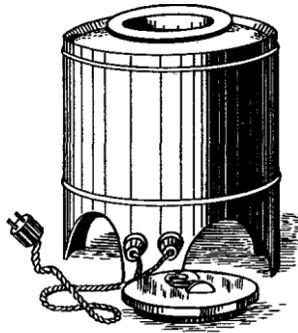


Figura 2.11. Crisol eléctrico para fundir el babbitt. (Efremov, 1976).

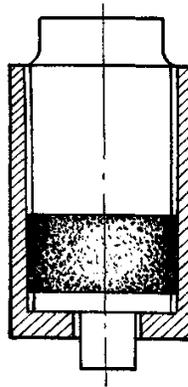


Figura 2.12. Esquema de un accesorio para prensar las virutas de babbitt.

(Efremov, 1976)

- Las virutas prensadas, barras y trozos de babbitt, se deben refinar. El proceso de refinado del babbitt consiste en los pasos siguiente:
 1. Al crisol junto con el babbitt, se echa cloruro de zinc.
 2. El babbitt se funde y junto con él, se funde el cloruro de zinc, que lo protege de las

oxidaciones. Además, el cloruro de zinc disuelve los óxidos de los metales.

3. Al babbitt se le echa con una cuchara cerrada sal de amoníaco. La cuchara con sal amoníaco se introduce casi hasta el fondo del babbitt líquido, revolviéndolo constantemente. Para evitar reacciones violentas, la sal de amoníaco en la cuchara se envuelve en papel. Los vapores del amoníaco, pasando a través del babbitt fundido, restablecen los óxidos convirtiéndolos de nuevo en metales.
4. Después del refinado, se elimina el cloruro de zinc, para lo cual se hecha sobre la superficie del babbitt aserrín seco.
5. El babbitt refinado se echa en los moldes quedando ya preparado para la carga.
 - La carga debe estar compuesta de un (25-30) % de babbitt refinado y un (70-75) % de babbitt nuevo.
 - De acuerdo con el análisis, se le añaden los componentes que se han quemado durante la fundición.
 - Para vaciarlo en los casquillos, el babbitt se debe calentar a unos (50-60) °C más del punto crítico superior de su fusión.
 - Al calentarse el babbitt se oxida. Para disminuir su oxidación, hace falta reducir al mínimo el tiempo entre la fundición y el proceso de rellenado de los casquillos.
 - La temperatura del babbitt se controla. El babbitt se debe fundir en pequeñas porciones.
 - El babbitt se protege bien de la oxidación mediante una capa de (25-30) mm de carbón vegetal, que se hecha en la superficie al comienzo de la fundición.

2.4.3. Elaboración mecánica de los casquillos

La elaboración mecánica de los casquillos se realiza una vez finalizado el proceso de rellenado, después que estos estén completamente frío. Si la elaboración es a una medida de reparación establecida por el fabricante o la empresa reparadora para ser montados directamente en el block del motor, se recomienda realizar la operación en un torno, donde el operario deber darle las dimensiones deseables a obtener. Si serán elaborados a una dimensión determinada después de montados en el block, se prevé la sobremedida durante el revestimiento del casquillo.

2.5. Criterios a seguir para la obtención de aleación Babbitt B83

La aleación antifricción Babbitt B83, como se señaló en el Capítulo I, es una de las más comercializadas y presenta comportamiento y durabilidad en explotación muy satisfactorios en una amplia gama de motores de combustión interna, tanto para cojinetes de árboles de levas como para cojinetes de los cigüeñales.

Obtención del Babbitt B83

Esta es una aleación base estaño que contendrá elementos tales como antimonio y cobre fundamentalmente. En la figura 2.13 se observa el sistema binario Sn – Sb. De acuerdo con Guliaev (1976), la aleación óptima para metal babbitt responde a la composición química de 13 % de Sb y el 87 % de Sn, cuya estructura tiene dos fases, $\alpha + \beta'$, siendo α una solución sólida a base estaño (matriz blanda) y β' una aleación sólida a base del compuesto intermetálico SnSb (inclusiones dura).

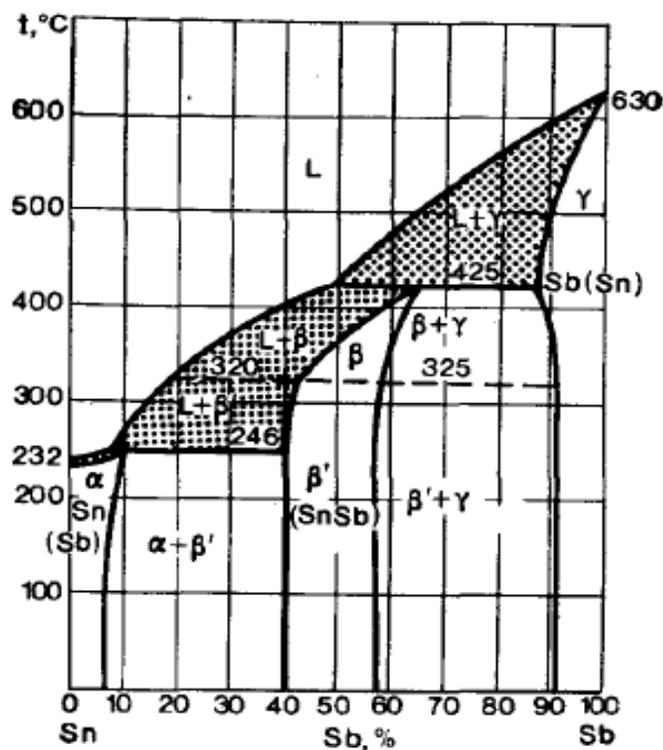


Figura 2.13. Diagrama de estado Sn-Sb. (Guliaev 1976)

Con frecuencia en los metales babbitt Sn-Sb, se adiciona Cu, que disminuyen la segregación debida a la densidad y, por otra, forma el compuesto Cu_3Sn , que desempeña el papel de inclusiones duras.

La estructura típica de la aleación babbitt estaño-antimonio-cobre B83 (B83) se presenta en la figura 2.14 (Guliaev (1976) y su composición química se muestra en la tabla 1.2 del Capítulo I.) En la microestructura sobre el fondo oscuro de solución sólida α se observan las inclusiones cúbicas del compuesto SnSb y otras más pequeña de compuesto Cu_3Sn . Si la aleación se calienta se forman inclusiones más gruesas y empeora la calidad del babbitt.

Casi la totalidad de los autores y en particular Guliaev (1976), exponen que las aleaciones babbitt estaño-antimonio-cobre (B83 y B89) son las de mejores propiedades, ya que la matriz de estaño es tenaz y plástica y su tendencia a la rotura por fatiga es menor.



Figura 1.14. Microestructura de la aleación B83. (100X) (Guliaev (1976))

Para obtener la aleación del babbitt que se desea, destinado al recubrimiento de los bujes del árbol de levas del motor YUCHAI, es necesario contar con los elementos antes mencionados (estaño (Sn), antimonio (Sb), cobre (Cu)). La obtención de este metal antifricción con frecuencia se realiza en hornos de crisol con calentamiento por resistencia eléctrica (Efremov 1976). Para la obtención en las condiciones de talleres de nuestro país y en particular la Empresa Militar Industrial de Sancti Espíritus “Coronel Francisco Aguiar Rodríguez”, puede ser considerada como alternativa el calentamiento del crisol dentro de un horno de tratamiento térmico o en una fragua.

De acuerdo a la composición del babbitt B83 (83 % de estaño, 11 % de antimonio, 6 % de cobre (GOST 1320-41)), para obtener 500 g se debe conformar la siguiente carga:

415 g de Sn; 55 g de Sb y 30 g de Cu.

De manera similar a lo descrito para la obtención del B83, se puede obtener la carga correspondiente a cualquier otra aleación babbitt que se desee. En todos los casos la fusión puede ser realizada en un crisol dentro de un horno o en una fragua, con el vertido posterior para el recubrimiento del casquillo.

Pasos en la tecnología para la fusión del babbitt

1. Definición de la aleación a obtener y la relación de componentes.
2. Preparación de la materia prima. La materia prima debe estar en trozos o fracciones de tamaño ≤ 10 mm.
3. Dosificación de la carga. Los componentes de carga son pesados en una balanza técnica en las proporciones correspondientes a la carga definida.
4. Adición del cobre al crisol y colocación en el horno o la fragua para iniciar el calentamiento. El cobre se adiciona primero con el objetivo de precalentarlo, ya que es el componente de mayor temperatura de fusión de 1083°C.
5. Luego de fundido el cobre se adicionan el estaño (temperatura de fusión de 232°C) y luego el antimonio (temperatura de fusión de 630.63°C).
6. El metal en el horno, luego de la fusión, se le da un sobrecalentamiento para facilitar el proceso de vertido.
7. El vertido para la aplicación al cojinete debe realizarse en el menor tiempo posible.
8. El enfriamiento ocurre al aire estático (condiciones del ambiente).

Capítulo III

Diseño de una máquina de fundición centrífuga

3.1. Principio físico de la fundición centrífuga

De acuerdo con lo planteado en UMSS (2016), la fundición centrífuga es el proceso de hacer girar el molde mientras se solidifica el metal, utilizando así la fuerza centrífuga para distribuir el metal fundido en el molde. Se obtienen mayores detalles sobre la superficie de la pieza y la estructura densa del metal adquiere propiedades físicas superiores. Las piezas de forma simétricas se prestan particularmente para este método, aun cuando se pueden producir otros muchos tipos de piezas fundidas.

Existen tres tipos de fundición centrífuga:

1. fundición centrífuga real
2. fundición semicentrífuga
3. fundición centrífuga o centrifugado

Fundición centrífuga real:

El metal fundido se vacía en un molde que está girando para producir una parte tubular.

Fundición semicentrífuga:

En este método se usa la fuerza centrífuga para producir fundiciones sólidas en lugar de partes tubulares.

Fundición centrifugada:

Es un sistema donde por medio de un tallo se hace llegar metal fundido a racimos de cavidades colocadas simétricamente en la periferia de manera que la fuerza centrífuga distribuya la colada del metal entre estas cavidades.

El método a aplicar en la recuperación de estos cojinetes de deslizamiento es la fundición centrífuga real.

De acuerdo con lo que se plantea en UMSS (2016), la alta velocidad genera fuerzas centrífugas que impulsan al metal a tomar la forma de la cavidad del molde. La forma exterior de la

fundición puede ser redonda, octagonal, hexagonal o cualquier otra. Sin embargo, la forma exterior de la fundición es perfectamente redonda (al menos teóricamente), debido a la simetría radial de las fuerzas en juego la orientación del eje de rotación del molde puede ser horizontal o vertical, pero esta última no es la más común. Para que el proceso trabaje satisfactoriamente se calcula la velocidad de rotación del molde en la fundición centrífuga horizontal donde la fuerza centrífuga no es una fuerza propiamente como tal, sino que es producida por la inercia de los cuerpos al moverse en torno a un eje, pues estos tienden a seguir una trayectoria tangencial a la curva que describen.

Esta fuerza aumenta con el radio de giro y con la masa del cuerpo, siendo la siguiente ecuación la que los relacione:

$$F_c = \frac{mv^2}{R} \quad (3.1)$$

$$GF = \frac{F_c}{W} = \frac{mv^2}{Rmg} = \frac{v^2}{Rg} \quad (3.2)$$

Donde:

F_c = fuerza (N)

m = masa (kg)

v = velocidad (m/s)

R = radio interior del molde (m)

$W = mg$ es su peso (N)

G = aceleración de la gravedad (m/s^2)

El factor GF es la relación de fuerza centrífuga dividida por el peso.

La velocidad v puede expresarse como $2\pi RN / 60 = \pi RN / 30$ donde N velocidad rotacional (rpm). Al sustituir esta expresión en la ecuación 3.2 se obtiene:

$$GF = \frac{R \left(\frac{\pi N}{30} \right)^2}{g} \quad (3.3)$$

Despejando la velocidad rotacional N y usando el diámetro D en lugar del radio, se obtiene:

$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2gGF}{D}} \quad (3.4)$$

Donde:

D = diámetro interior del porta buje listo para fundir (m)

N = velocidad de rotación (rpm)

Algunos autores relacionados con esta problemática (Pérez et al., 2012; UMSS, 2016) nos plantean que los valores del factor GF apropiados para la fundición centrífuga horizontal deben estar entre 60 y 80, aunque esto depende hasta cierto punto del metal que se funde. Si es demasiado bajo durante la solidificación no se lograra que el metal líquido se adhiera en las paredes del molde por la que ocurriría escurrimiento al interior del molde, es decir ocurren deslizamientos entre el metal fundido y la pared del molde, lo cual significa que la velocidad rotacional del metal es menor que la del molde.

3.2. Diseño y cálculo de los elementos constructivos fundamentales de la máquina

En la figura 3.1, se muestra un esquema básico de los componentes fundamentales de la máquina para el diseño, elaborado según los criterios y bibliografía revisada en el Capítulo I. Entre los elementos constructivos fundamentales a considerar para el cálculo y diseño se encuentran el porta buje, la transmisión por polea y el árbol de trasmisión, así como la selección del motor eléctrico y los apoyos (chumaceras) para el árbol principal.

El bastidor solamente se representa y queda a consideraciones de la empresa, según el laminado que tenga en existencia en ese momento o la posibilidad de utilización del bastidor o parte de él, de otra máquina fuera de servicio permanente. De igual forma, el dispositivo de alimentación de babbitt, quedará a diseñarse de acuerdo con las consideraciones de la empresa.

En caso de que la empresa cuente con disponibilidad de algún motor eléctrico que garantice la potencia necesaria y decida utilizarlo, debe realizar nuevamente los cálculos de la transmisión por polea y dimensionar nuevamente los elementos, siempre garantizando el número de revoluciones del porta buje.

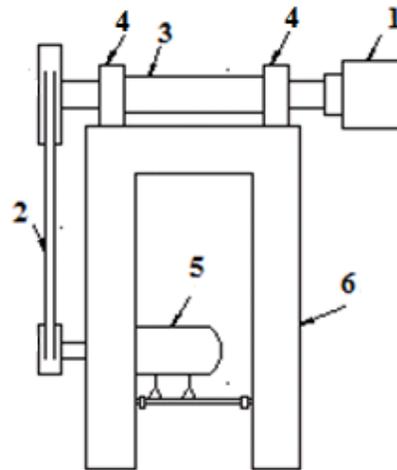


Figura 3.1. Esquema de la máquina.

- 1. Porta buje 2. Trasmisión por correa 3. Árbol de transmisión 4. Chumaceras
5. Motor eléctrico 6. Bastidor.**

3.2.1. Diseño y cálculo del cuerpo porta buje

Para el diseño del porta buje se tomó en cuenta varios parámetros muy importantes, los cuales se describen a continuación (Quesada y Caluña, 2013):

- El espesor del porta buje no debe ser demasiado estrecho ya que en el momento del colado puede sufrir fuertes variaciones de temperatura, se calienta fuertemente en cada llenado y se enfría rápidamente en cada desmoldeo.
- Un espesor de mesiado grande puede generar una inercia térmica, la cual necesita un largo calentamiento para la puesta en marcha del porta buje.
- El tipo de material que se utilice para la fabricación del porta buje debe tener un punto de fusión muy superior al metal a ser colado.
- El porta buje debe permitir la disminución de pérdidas del material colado.
- Debe poseer una conicidad del 3% en el diámetro interno (D_i) para facilitar la extracción de la pieza.
- Cabe aclarar que el tipo de material a fundir no influye en el dimensionamiento pero si es un factor a tener en cuenta para la selección del material de construcción del mismo.

Teniendo en cuenta estas consideraciones para determinar el espesor del porta buje se estableció que este fuera aproximadamente entre 3 o 4 veces el espesor de la pieza a recuperar, que en nuestro caso el objetivo es recubrir con un espesor de 3,5 mm de metal babbitt los

casquillos de apoyo del árbol de levas del motor YUCHAI que se encuentra desechados por desgaste.

El material seleccionado para la construcción del porta buje es el acero AISI 1018, debido a sus propiedades físicas y su disponibilidad.

Tabla 3.1. Propiedades del acero AISI 1018 (Quezada y Caluña, 2013)

Estado	Sólido
Densidad	7900 kg/m ³
Dureza	1300 MPa
Coefficiente de Poisson	0,29
Calor específico	420 J/(kg K)
Punto de fusión	1520 °C
Punto de ebullición	3000 °C
Límite superior de trabajo en caliente	1350 °C
Esfuerzo de fluencia	295 MPa
Resistencia a la tracción	395 MPa

3.2.1.1. Dimensionamiento del porta buje

Teniendo en cuenta que el porta buje no va a estar sometidos a grandes cargas el dimensionamiento de este se realizó de acuerdo a los diámetros y tolerancia del buje a recuperar. Según esto se determinó que el diámetro interior del porta buje sea de $59 D8 \left(\begin{smallmatrix} +0,146 \\ 0,100 \end{smallmatrix} \right) mm$. Además se decidió que tuviera un espesor de 10 mm y un diámetro exterior del mismo de 80 mm. En la figura 3.2 se puede observar algunas de las dimensiones de este (ver plano en anexo).

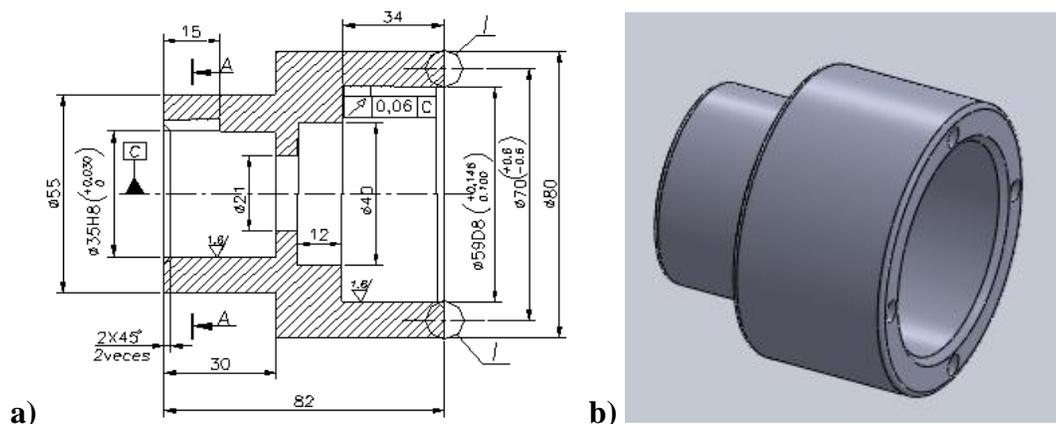


Figura 3.2. Principales dimensiones del porta buje (a), vista tridimensional (b).

Durante la preparación de la máquina para realizar la fundición en el interior de este se coloca una tapa, seguidamente se le introduciría el casquillo a rellenar y posteriormente se le pondría dos tapas exteriores evitando la salida de babbitt.

3.2.1.2. Dimensionamiento de las tapas del porta buje

Tanto la tapa interior como la primera de las tapas exteriores serán de grafito ya que según lo abordado por Duran y Rivas (2005), el grafito puede ser fácilmente trabajado en máquinas en una variedad de formas diferentes con un acabado superficial muy bueno, buena conductividad térmica (tres veces mayor que el hierro) y un calor específico adecuado (dos veces el del hierro). La capacidad de enfriarse es buena y no es reactivo con la mayoría de los metales fundidos. Es extremadamente resistente al choque térmico, y su resistencia se incrementa a medida que aumenta la temperatura. Posee un módulo de Young relativamente bajo y su elasticidad aumenta a medida que se incrementa la temperatura. En la tabla 3.2 se muestran las propiedades físicas del grafito.

Tabla 3.2. Propiedades físicas del grafito: (Duran y Rivas, 2005)

Estado	Sólido
Densidad	2260 kg / m ³
Dureza	0,5 Mohs
Punto de fusión	3800 K
Punto de ebullición	5100 K
Conductividad térmica	19,6 W / (cm K)
Calor específico	710,6 J / (kg K) (g)

El orificio de las tapas exteriores por las cuales se ingresa el babbitt líquido es de 54 mm de diámetro como máximo. La tapa de grafito debe de ser de 10 mm aproximadamente de espesor y 80 mm de diámetro exterior (ver plano en anexo) y la de acero ASISI 1018 de 5 mm de espesor (ver plano en anexo). Ambas se fijarán al cuerpo del porta buje por los 4 orificios de 7 mm de diámetro con tornillos o espárragos M6 fijados al cuerpo.

La tapa interior, de 58,5 mm de diámetro exterior y espesor 6 mm, es de grafito (ver plano en anexo).

3.2.1.3. Determinación de la velocidad necesaria de giro del porta buje

Sustituyendo en la ecuación 3.4 los valores de $GF = 70$ y $D = 0,0578$ m se obtiene:

$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2 * 9,81 * 70}{0,0578}}$$

$$N = 1471,99rpm$$

3.2.1.4. Cálculo de comprobación del porta buje

Los esfuerzos radiales, anulares y longitudinales que se dan en el porta buje son generados básicamente por la presión interna ejercida por el material colado. Además es conocido que no existe presión externa.

Para realizar el análisis de esfuerzos según lo planteado por Mot (2010); citado en Quesada y Caluña (2013) debemos definir cuál es el estudio que se va a realizar. En primer lugar debemos definir si el molde es un recipiente de pared gruesa o delgada para determinar este valor hacemos uso de la siguiente ecuación:

$$\frac{Rm}{t} \geq 10 \quad (3.5)$$

Dónde:

Rm = radio medio (mm)

t = espesor del molde (mm)

Si la relación entre el radio medio y el espesor del molde es mayor o igual que diez se considera un recipiente de pared delgada, caso contrario se lo considerará como recipiente de pared gruesa.

Para determinar el radio medio lo hacemos mediante el uso de la siguiente expresión:

$$Rm = \frac{(Re + Ri)}{2} \quad (3.6)$$

Dónde:

Re = radio externo del porta buje (mm)

Ri = radio interno del porta buje (mm)

Se obtiene:

$$Rm = 34,45mm$$

Sustituyendo en la ecuación 3.5, $t = 12 \text{ mm}$ y $Rm = 34,45 \text{ mm}$ se obtiene:

$$2,87 < 10$$

Por lo que en este caso se deberá realizar un análisis para recipientes de pared gruesa.

Presión interna.

Para poder determinar los esfuerzos que se dan en las paredes del molde es necesario conocer la presión interna que se da debido a la rotación del metal fundido, el cálculo de la presión interna está definido por (Gere y Timoshenko, S/A; citados en Quesada y Caluña, 2013):

$$P = \frac{Fc}{A} \quad (3.7)$$

Dónde:

P = presión ejercida en las paredes del porta buje

Fc = fuerza centrífuga

A: área interna del porta buje

La masa que va a girar dentro del porta buje listo para fundir es la del recubrimiento a obtener (babbitt). Este cálculo lo podemos apreciar a continuación conjuntamente con la velocidad.

Volumen del recubrimiento

$$VR = \pi \cdot Re^2 \cdot Lp - \pi \cdot Ri^2 \cdot Lr \quad (3.8)$$

Dónde:

VR = volumen del recubrimiento a obtener (cm^3)

Re = radio externo del recubrimiento a obtener (cm)

Ri = radio interno del recubrimiento a obtener (cm)

Lr = longitud del recubrimiento a obtener (cm)

Sustituyendo $Re = 2,89 \text{ cm}$, $Lr = 2,70 \text{ cm}$ y $Ri = 2.70 \text{ cm}$ se obtiene que:

$$VR = 9,01 \text{ cm}^3$$

Masa del recubrimiento

$$\rho_r = \frac{m_r}{VR} \quad (3.9)$$

Dónde:

ρ_r = densidad del recubrimiento (g/cm³)

m_r = masa del recubrimiento (g)

VR = volumen del recubrimiento (cm³)

Sustituyendo $\rho_r = 7,4 \text{ g/cm}^3$ y $VR = 9,01 \text{ cm}^3$ se alcanza que:

$m_r = 66,67 \text{ g}$

Determinación de la velocidad.

$$V = \frac{\pi * d * n}{60000} \quad (3.10)$$

Donde:

V = velocidad de rotación (m/s)

d = diámetro interior del molde con el buje listo para fundir (mm)

n = velocidad de rotación del molde (rpm)

Sustituyendo $d = 57,8 \text{ mm}$ y $n = 1471,99 \text{ rpm}$ se obtiene:

$V = 4,45 \text{ m/s}$

Cálculo de la fuerza centrífuga

Sustituyendo en la ecuación 3.1 los valores de $m_r = 0,67 \text{ kg}$, $V = 4,45 \text{ m/s}$ y $R_i = 0,029 \text{ m}$ se obtiene:

$F_c = 459,09 \text{ N}$

Área interna del porta buje listo para la fundición es:

$$A = 2\pi \cdot r \cdot h \quad (3.11)$$

Donde:

A = área interna del porta buje listo para la fundición (m²)

r = radio interno del porta buje listo para la fundición (m)

h = longitud del recubrimiento (m)

$$A = 2\pi \cdot 0,03m \cdot 0,03m$$

$$A = 0,006 \text{ m}^2$$

Sustituyendo en la ecuación 3.7, $F_c = 459,09$ y $A = 0,006 \text{ m}^2$ la presión interna en el porta buje es:

$$P = 76515 \text{ Pa}$$

Las ecuaciones que definen los esfuerzos tanto, longitudinal, radial y anular están dadas por las ecuaciones mostradas en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Ecuaciones de esfuerzos (Mott, 2010); citado en Quesada y Caluña, 2013)

Tipo de esfuerzo	Esfuerzo máximo
Longitudinal	$T_l = \frac{Pa^2}{b^2 - a^2}$ (uniforme en toda la pared)
Anular (tangencial)	$T_t = \frac{P(b^2 + a^2)}{(b^2 - a^2)}$ (en la superficie interna)
Radial	$T_r = -P$ (en la superficie interna)

Donde:

$a = 28,9 \text{ mm}$ (radio interno del porta buje listo para fundir)

$b = 40 \text{ mm}$ (radio externo del porta buje listo para fundir)

$P = 76515 \text{ Pa}$ (presión interna en todas las direcciones)

Esfuerzo anular

La presión interna P empuja hacia afuera alrededor el anillo. El anillo debe desarrollar un esfuerzo de tensión en una dirección tangencial a la circunferencia del anillo para resistir la tendencia de la presión a hacer estallar el molde.

$$T_t = \frac{P(b^2 + a^2)}{b^2 - a^2} \tag{3.12}$$

$$T_t = 76515Pa$$

Esfuerzo radial

El esfuerzo radial generado en el porta buje es un esfuerzo de compresión y varía desde cero en la superficie externa del molde hasta el máximo valor en la superficie interna, donde es igual a la presión interna.

$$\begin{aligned} Tr &= -P \\ Tr &= -91,98Pa \end{aligned} \tag{3.13}$$

Esfuerzos de diseño

En el esfuerzo de diseño debe tener en cuenta el material del cual está hecho el recipiente el ambiente de operación y si la presión es constante o variable.

La colada del babbitt ejercerá una presión estable sobre las paredes internas del molde por lo que el esfuerzo de diseño se puede basar en la resistencia a la cedencia del material, además todos los esfuerzos se han analizado con la máxima presión que se tendrá sobre el molde.

$$Td = Sy / N \tag{3.14}$$

Dónde:

Td = esfuerzo de diseño

Sy = cedencia del material

N = factor de diseño

Factor de Diseño

La selección del factor de diseño N, con frecuencia se hace conforme a un reglamento debido al peligro creado cuando un recipiente a presión falla.

Esto es particularmente cierto en el caso de recipientes que contienen gases o vapor a presión porque las fallas producen la expulsión violenta del gas al liberarse un alto nivel de la energía almacenada (Mott, 2010).

Sin un reglamento, se usará $N = 4$ como el valor mínimo y se debe utilizar valores mayores en aplicaciones críticas o donde exista incertidumbre con respecto a las condiciones de operación o las propiedades del material, en nuestro caso utilizaremos un factor de diseño $N = 5$, debido a que no existe un reglamento especificado que estandarice los factores de diseño en moldes centrífugos.

El esfuerzo máximo es el anular por lo tanto la resistencia a la cedencia requerida del material es de:

$$S_y = T_t \cdot N \quad (3.15)$$

Sustituyendo $T_t = 76515 \text{ Pa}$ y $N = 5$ se obtiene:

$$S_y = 0,38 \text{ MPa}$$

Tabla 3.4. Resistencia a la cedencia (Mott, 2010; citado en Quesada y Caluña, 2013)

Material	Condición	Resistencia a la cedencia S_y (MPa)	Porcentaje de alargamiento (%)
1018	Sin tratamiento	310	36
1018	Recocido	276	38
1018	Estirado en frío	482	28
1020	Recocido	296	36
1020	Laminado en caliente	331	36
1020	Estirado en frío	441	20

Por lo que se determinará que el porta buje no se va a ver afectado por la presión ejercida del babbitt debido a la fuerza centrífuga sobre la pared interior del mismo.

3.2.2. Cálculo del sistema de transmisión

El sistema de transmisión cuenta con un motor eléctrico, una transmisión por correa, un árbol y los apoyos de este (Figura 3.1). Para el cálculo del sistema de transmisión se ha tenido en cuenta la velocidad teórica a la que debe girar el molde.

La potencia que se debe transmitir para el movimiento del porta buje es por la ecuación (Mott, 2010):

$$P = M \cdot W \quad (3.16)$$

Dónde:

P = potencia requerida

M = torque mínimo necesario para generar movimiento en el molde a la velocidad angular requerida

W = velocidad angular

El torque mínimo necesario para generar el movimiento en el molde está definido por la siguiente ecuación (Shigley et al., S/A; citado en Quezada y Caluña, 2013):

$$M = I \cdot \alpha \quad (3.17)$$

Dónde:

I = momento de inercia del porta buje y del metal a fundir (kg m²)

α = aceleración angular requerida (rad/s²)

Teniendo en cuenta la configuración del porta buje igual a la de un cilindro hueco su momento de inercia en el eje de rotación x está definido por la siguiente ecuación:

$$I_{pb} = \frac{1}{2} M (R1^2 + R2^2) \quad (3.18)$$

Dónde:

I_{pb} = inercia del porta buje (kg m²)

M = masa del porta buje listo para la fundición (kg).

R1 = radio interno del porta buje (m)

R2 = radio exterior del porta buje (m)

El momento de inercia del porta buje listo para fundir se determinó una vez obtenida la masa total del mismo, donde para el cálculo de esta se tuvo en cuenta las dimensiones de las tapas, las dimensiones del casquillo a recuperar, la densidad del acero AISI 1018 que es de 7900 Kg/m³ y la densidad del grafito que es igual a 2260 Kg/m³ obteniéndose:

$$M = 1,78 \text{ kg}$$

Sustituyendo M = 1,78 kg, R1 = 0,03 m² y R2 = 0,04 m² en la ecuación 3.18 se obtiene:

$$I_{pb} = 0,002 \text{ kg m}^2$$

La aceleración angular está definida por:

$$\alpha = W / t \quad (3.19)$$

Dónde:

α = aceleración angular (rad/s²)

W = velocidad angular (rad/s)

t = tiempo en el que se alcanza la aceleración angular (s)

Según resultados alcanzado anteriormente de la velocidad necesaria del porta buje (N = 1471,99 rpm) se obtiene que:

$$W = 154,15 \text{ rad/s}$$

El tiempo que se asume para que el molde alcance dicha velocidad angular es de aproximadamente 3 segundos, sustituyendo en la ecuación 3.19, $W = 154,15 \text{ rad/s}$ y $t = 3 \text{ s}$ se obtiene:

$$\alpha = 51,38 \text{ rad/s}^2$$

Sustituyendo $I = 0,002 \text{ kg m}^2$ y $\alpha = 51,38 \text{ rad/s}^2$ en la ecuación 3.17 se obtiene:

$$M = 0,10 \text{ N m}$$

Sustituyendo en la ecuación 3.16, $M = 0,10 \text{ N m}$ y $W = 154,15 \text{ rad/s}^2$ se obtiene que:

$$P = 0,015 \text{ kW}$$

Teniendo en cuenta que la potencia requerida para generar movimiento en el porta buje es de 0,015 kW, se deberá seleccionar un motor eléctrico de mayor.

3.2.3. Selección del motor eléctrico

Según Cosgra (2016), se selecciona por la serie MY un motor monofásico MY 71 1-2 (figura 3.3) el cual lleva rodamientos rígidos de bolas con obturaciones de caucho en ambos lados, está lubricado de por vida y no necesita mantenimiento. En la tabla 3.5 se muestran las características eléctricas del motor MY 71 1- 2.

Tabla 3.5. Características eléctrica del motor MY 71 1-2.

Tipo	Potencia (kW)	N (rpm)	η (%)	Nivel sonoro Db (A)	M (kg)
MY 71 1-2	0,37	2800	63	75	5,1



Figura 3.3. Motor monofásico MY 71 1-2. (Cosgra, 2016)

El motor seleccionado puede que no esté dentro de las posibilidades de la empresa, por lo que la empresa puede sustituirlo por otro que esté a su alcance, siempre y cuando se tenga en cuenta la velocidad de giro del porta buje para recalcular el sistema de transmisión.

3.2.4 Transmisión flexible (Correa)

La correa seleccionada es tipo trapezoidal según Mott (2010) se fabrican de tela con un refuerzo de algodón, rayón o nilón que se impregna de caucho. En comparación con las correas planas se destacan las siguientes diferencias:

- Las correas trapezoidales utilizan poleas ranuradas. Esta circunstancia aumenta el coeficiente de fricción lo que redundará en una mayor capacidad de carga.
- Las distancias entre centros son más cortas. En las correas planas, en principio no hay limitación a la distancia entre centros. En las correas trapezoidales, cuando la distancia entre centros es muy grande, la vibración del ramal conducido provoca la abrupta disminución de la vida útil de la correa.
- Son menos eficientes.
- Se fabrican enterizas, de ciertas longitudes por lo que no necesitan empalme.
- Se puede montar más de una correa en la transmisión, regulando así la capacidad de carga.

3.2.4.1 Cálculo de la transmisión por correa y polea

Para el cálculo se siguió la metodología establecida (Facultada de Mecánica, 2016a), la cual es un resumen del procedimiento planteado por Mott (2010).

1. Selección de la correa

En función del T_1 y mediante la (Tabla 8).

$$T_1 = 9550 \frac{P_1}{n_1} \quad (N \cdot m) \quad (3.20)$$

$$T_1 = 9550 \frac{0,37kW}{2800rpm} = 1,26N \cdot m$$

Se seleccionó la correa tipo Z:

Tabla 3.6. Características de la correa tipo Z.

Tipo de Correa	b_0 (mm)	b (mm)	h (mm)	A (mm ²)	L_0 (mm)	L_{min} (mm)	$L_{máx}$ (mm)	D_{1min} (mm)	T_1 (N·m)	q_m (kg/m)	$V_{máx}$ (m/s)
Z	8.5	10	6	47	1320	400	2500	63	Hasta 25	0.06	25

2. Diámetro de pasos de las poleas (D_1 y D_2)

El diámetro de paso de la p Polea menor D_1 se selecciona de acuerdo a la condición 1:

$$D_{1min} \leq D_1 \leq D_{1máx} \quad (\text{mm}) \quad (\text{Condición: 1})$$

El diámetro mínimo (D_{1min}) se ofrece en la tabla 9. Asimismo, el diámetro máximo se calcula por la siguiente expresión:

$$D_{1máx} = \frac{6 * 10^4 * V_{máx}}{\pi * n_1} \quad (\text{mm}) \quad (3.21)$$

$V_{máx}$: se encuentra en la tabla 3.6

$$D_{1máx} = \frac{6 * 10^4 * 25}{\pi * 2800} = 170,52mm$$

De esta forma, teniendo en cuenta el intervalo: $63 \leq D_1 \leq 170,52$ y los valores de diámetros preferidos que se recomiendan en la tabla 9 se seleccionó:

$$D_1 = 112mm$$

El diámetro de pasos de la p Polea conducida se calcula por la ecuación:

$$D_2 = \frac{n_1}{n_2} * D_1 = U_{co} * D_1 \quad (3.22)$$

$$D_2 = \frac{n_1}{n_2} * D_1 = \frac{2800}{1534,31} * 112 = 204,39mm$$

3. Velocidad de la correa (V)

La velocidad de la correa se calcula por la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\pi * D_1 * n_1}{60000} \text{ (m/s)} \quad (3.23)$$

Se debe cumplir:

$$V_{1\min} \leq V_1 \leq V_{1\max} \quad (\text{Condición: 2})$$

Donde:

$$V_{1\min} \approx 5 \text{ m/s} \rightarrow \text{Se toma de la tabla 9.}$$

$$V_{\max} \approx 25 \text{ m/s} \rightarrow \text{Se toma de la tabla 9 considerando el valor seleccionado de } D_1.$$

$$V = \frac{\pi * 112 * 2800}{60000} = 16,42 \text{ m/s}$$

4. Distancia entre centros de referencia (a)

Se calcula la distancia entre centros de referencia por la siguiente ecuación:

$$a_r = \frac{1,5 \cdot D_2}{\sqrt[3]{\frac{n_1}{n_2}}} \text{ (mm)} \quad (3.24)$$

Aquí también se debe cumplir la condición 3:

$$a_{\min} \leq a \leq a_{\max} \quad (\text{Condición: 3})$$

Donde la distancia entre centros mínima es:

$$a_{\min} = 0,55(D_1 + D_2) + h \text{ (mm)} \quad (3.25)$$

La altura de la correa (h) se toma de la tabla 8.

$$a_{\min} = 0,55(112 + 204,39) + 6 = 180,01mm$$

La distancia entre centros máxima es:

$$a_{\max} = 3(D_1 + D_2) \text{ (mm)} \quad (3.26)$$

$$a_{\max} = 3 * (112 + 204,39) = 949,17mm$$

Entonces:

$$a_r = \frac{1,5 * 204,39}{\sqrt[3]{\frac{2800}{1534,31}}} = 251,30mm$$

5. Longitud de paso de las correas o bandas (L)

Se calcula la longitud de paso de la correa por la ecuación:

$$L = 2a + 1,57(D_1 + D_2) + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4a} \quad (mm) \quad (3.27)$$

$$L = 1007,82mm$$

El valor de L se normaliza al más cercano por la tabla 10.

Aquí también se debe cumplir la condición:

$$L_{mín} \leq L \leq L_{máx} \quad (mm) \quad (\text{Condición: 4})$$

$L_{mín}$ y $L_{máx}$ se toman de la tabla 8.

$$L_{mín} = 400mm$$

$$L_{máx} = 2500mm$$

$$L = 1000mm$$

6. Cálculo de la distancia entre centros definitiva de la transmisión

$$a = \frac{\Delta P + \sqrt{\Delta P^2 - 32(D_2 - D_1)^2}}{16} \quad (mm) \quad (3.28)$$

$$\Delta P = 4L - 6,28 * (D_2 + D_1)mm$$

$$\Delta P = 2013,07mm$$

$$a = 247,32mm$$

7. Cálculo y comprobación del ángulo de abrazado en la polea menor (θ_1).

$$\theta_1 = 180^\circ - \frac{57,3(D_2 - D_1)}{a} \geq \theta_{mín} \quad (3.29)$$

$\theta_{mín}$: Se toma igual a 120° , aunque se admite hasta 90° .

$$\theta_1 = 158,59^\circ$$

8. Cálculo de resistencia de las correas

Se calcula el número necesario (N_n) de correas por la ecuación:

$$N_n = \frac{P_1}{[P]} \quad (3.30)$$

[P]: es la potencia que puede transmitir una correa durante un tiempo prolongado:

$$[P] = \frac{P_0 C_\theta C_1 + \Delta P_U}{K_S} \quad (kW) \quad (3.31)$$

Donde:

Los valores de P_0 se ofrecen en la tabla 9. La longitud de ensayo de la correa L_0 se toma de la tabla 8.

$P_0 = 1,88$ kW para $V=16,42$ m/s según la tabla 9 una vez realizada la interpolación.

Los términos $C_\theta, C_1, \Delta P_U$ y K_S consideran las condiciones reales de explotación de las transmisiones por correas.

C_θ : Coeficiente que considera la influencia del ángulo de abrasado en la capacidad de carga de la transmisión. Se calcula por la ecuación:

$$C_\theta = 1,24(1 - e^{\theta/110}) \quad (3.32)$$

$$c_\theta = 1,24(1 - e^{\frac{-158,59}{110}}) = 0,95$$

C_1 : Coeficiente que considera la longitud de la correa. Se toma de la tabla 11.

$$\frac{L}{L_0} = 0,76 \text{ Hay que interpolar. Dando como resultado } c_1 = 0,94$$

ΔP_U : Considera la relación de transmisión. Se calcula por la ecuación:

$$\Delta P_U = \frac{\Delta T_u n_1}{9550} \quad (3.33)$$

ΔT_u : Variación del torque útil. Se toma de la tabla 12.

$$\Delta T_u : 0,4$$

Sustituyendo en la ecuación 3.34 se obtiene que:

$$\Delta P_u = 0,12 \text{ kW}$$

K_S : Coeficiente que considera el régimen de trabajo. Se toma de la tabla 13.

$$K_S: 1,1$$

Según la ecuación 3.32 y 3.31 respectivamente se obtiene:

$$[P] = \frac{1,88 * 0,95 * 0,94 + 0,12}{1,1} = 1,64 \text{ kW}$$

$$N = \frac{N_N}{C_N} = \frac{0,23}{1} = 0,23$$

Teniendo en cuenta la condición 5:

$$N = \frac{N_n}{C_n} \leq N_{m\acute{a}x} = 12 \quad (\text{Condición: 5})$$

C_n : Coeficiente que tiene en cuenta la distribución irregular de la carga entre las correas. Se toma de la tabla 14.

Se determinó:

$$N=1$$

9. Pretensión de las correas (σ_0)

$$\sigma_0 = \frac{F_i}{A} \geq \sigma_{0\text{mín}} \quad (\text{MPa}) \quad (\text{Condición: 6})$$

$$\sigma_{0\text{mín}} = (1,6 \div 2) \longrightarrow \text{Para las correas clásicas}$$

$$\sigma_{0\text{mín}} = 2 \longrightarrow \text{Para las correas estrechas}$$

F_i : es la fuerza producida en la correa debido a la pretensión inicial σ_0

$$F_i = \frac{780P \cdot K_s}{N \cdot v \cdot C_\theta} + q_m v^2 \quad (3.34)$$

q_m : Es la masa de un metro de la correa. Se toma de la tabla 8.

$$F_i = \frac{780 * 0,37 * 1,1}{1 * 16,42 * 0,95} + 0,06 + 16,42^2 = 290,03N$$

$$\frac{F_i}{A} = \frac{290,03}{47} = 6,17MPa$$

10. La fuerza sobre los apoyos

$$R_1 = R_2 = 2F_i \cdot N \cdot \text{sen}(\theta/2) \quad (3.35)$$

$$R_1 = R_2 = 2 * 290,03 * 1 * \text{sen} \frac{158,59}{2} = 569,96N$$

Los principales parámetros geométricos de la polea por la tabla 15 y las ecuaciones siguientes son:

$$De_{1,2} = D_{1,2} + 2\Delta \quad (3.36)$$

$$Df_{1,2} = De_{1,2} - 2H \quad (3.37)$$

$$B = (N - 1)t + 2S \quad (3.38)$$

$$D_{e_1} = 112 + 2 * 2,5 = 117mm$$

$$D_{e_2} = 204,39 + 2 * 2,5 = 209,39mm$$

$$D_{f_1} = 117 - 2 * 9,5 = 98mm$$

$$D_{f_2} = 209,39 - 2 * 9,5 = 190,39mm$$

$$B = (1 - 1) * 12 + 2 * 8 = 16mm$$

3.2.5. Cálculo y dimensionamiento del árbol de transmisión

El procedimiento de diseño del árbol que se aplica es el planteado por Mott (2010), el cual es establecido según lo recomendado por la norma ANSI B106.1M-1985, Design of Transmission Shafting (Diseño de ejes de transmisión). Esta norma establece como determinar el diámetro que requieren los ejes en cualquier sección para resistir la combinación de esfuerzo cortante torsional y esfuerzo flexionante. Se realizaron todos los cálculos correspondientes según lo planteado por Facultad de Mecánica (2016b) en el cual se resume el procedimiento planteado por Mott (2010).

Las fuerzas que actúan sobre el árbol tanto de la polea como las del porta buje se representan en la figura 3.4:

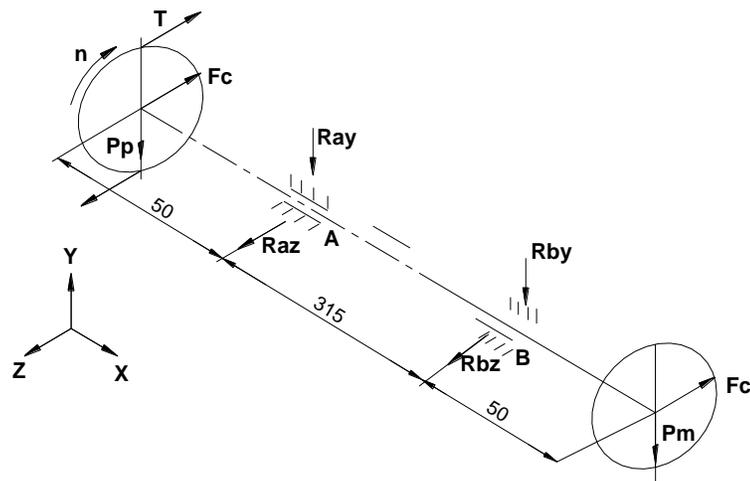


Figura 3.4. Representación espacial de las fuerzas que actúan sobre el árbol.

En el extremo izquierdo:

El momento torsor en el árbol se calcula por la siguiente expresión:

$$T = 9550 \frac{P_1}{n_2} \quad (kN \cdot mm) \quad (3.39)$$

Donde:

$P_1 = 0,37$ kW Potencia que trasmite el motor

$n_2 = 1471,99$ rpm Velocidad de giro del eje

$$T = 2,4kN \cdot mm$$

La fuerza en el árbol debido a la transmisión por correa (F_c) se calcula por la ecuación 3.40:

$$F_c = \frac{3T}{D_2} \quad (kN) \quad (3.40)$$

Sustituyendo $T = 2,4$ kN mm y $D_2 = 214$ mm (diámetro de la polea conducida) se obtiene:

$$F_c = 0.03kN$$

Se calcula el peso de la polea (P_p) por la siguiente ecuación:

$$P = m * g \quad (N) \quad (3.41)$$

Siendo $m = 5,50$ kg (masa de la polea) y $g = 9,81m/s^2$ (aceleración de la gravedad) se obtiene:

$$P = 53,96N$$

En el extremo derecho:

La fuerza centrífuga que ejerce el porta buje sobre el árbol se calcula por la ecuación 3.1. Teniendo en cuenta que la fuerza centrífuga que se desea obtener es la fuerza que ejerce el porta buje sobre el árbol en el momento que se está realizando la fundición se utilizaron datos calcula con anterioridad tales como:

$m = 1,78$ kg Masa del porta buje listo para la fundición

$V = 4,45$ m / s Velocidad del porta buje

$R = 0,040$ m Radio de giro del porta buje

Sustituyendo estos valores en la ecuación 3.1 se obtiene que:

Se obtiene que la fuerza centrífuga que ejerce el porta buje es:

$$F_c = 881,21N$$

Luego se calculo el peso (P) del porta buje a través de la ecuación 3.42:

$$P = m * g \quad (N) \quad (3.42)$$

Donde:

$g =$ aceleración de la gravedad $9,81(m / s^2)$

$m =$ masa del porta buje listo para la fundición (kg)

$P = 17,46$ N

Cálculo de las reacciones en los apoyo

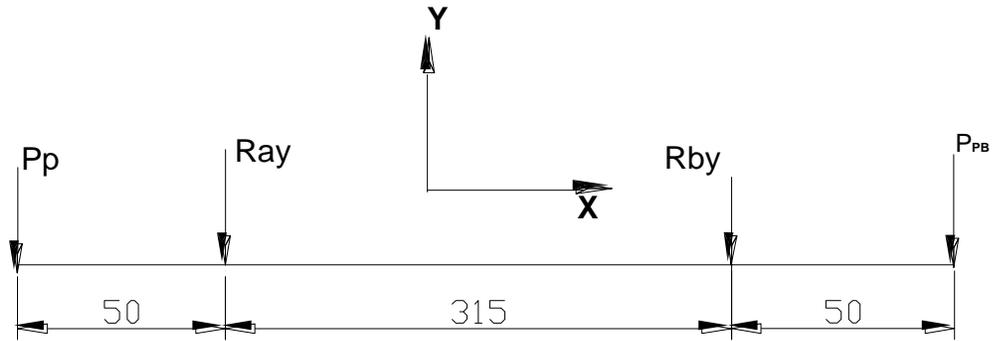


Figura 3.5. Fuerzas que actúan en el plano Y – X.

Realizado la suma de momentos con respecto al punto A y B se obtiene que:

$$R_{by} = - 0,01 \text{ kN}$$

$$R_{ay} = - 0,06 \text{ kN}$$

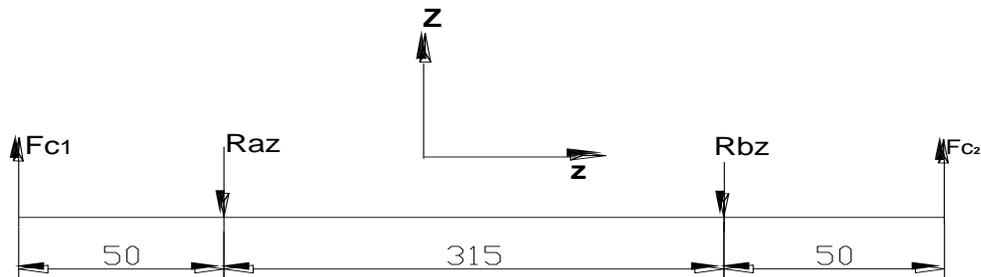


Figura 3.6. Fuerzas que actúan en el plano Z – X.

Para obtener las reacciones en los apoyos en el plano Z – X (figura 3.6) se realizaron la suma de momentos con respecto al punto A y B donde se obtiene:

$$R_{bz} = 1,01 \text{ kN}$$

$$R_{az} = - 0,10 \text{ kN}$$

Las reacciones totales en los apoyos son:

$$R_a = \sqrt{R_{ay}^2 + R_{az}^2} = 0,12 \text{ kN} \quad R_b = \sqrt{R_{by}^2 + R_{bz}^2} = 1,01 \text{ kN}$$

En la figura 3.7 se muestra el gráfico de variación de las cargas internas.

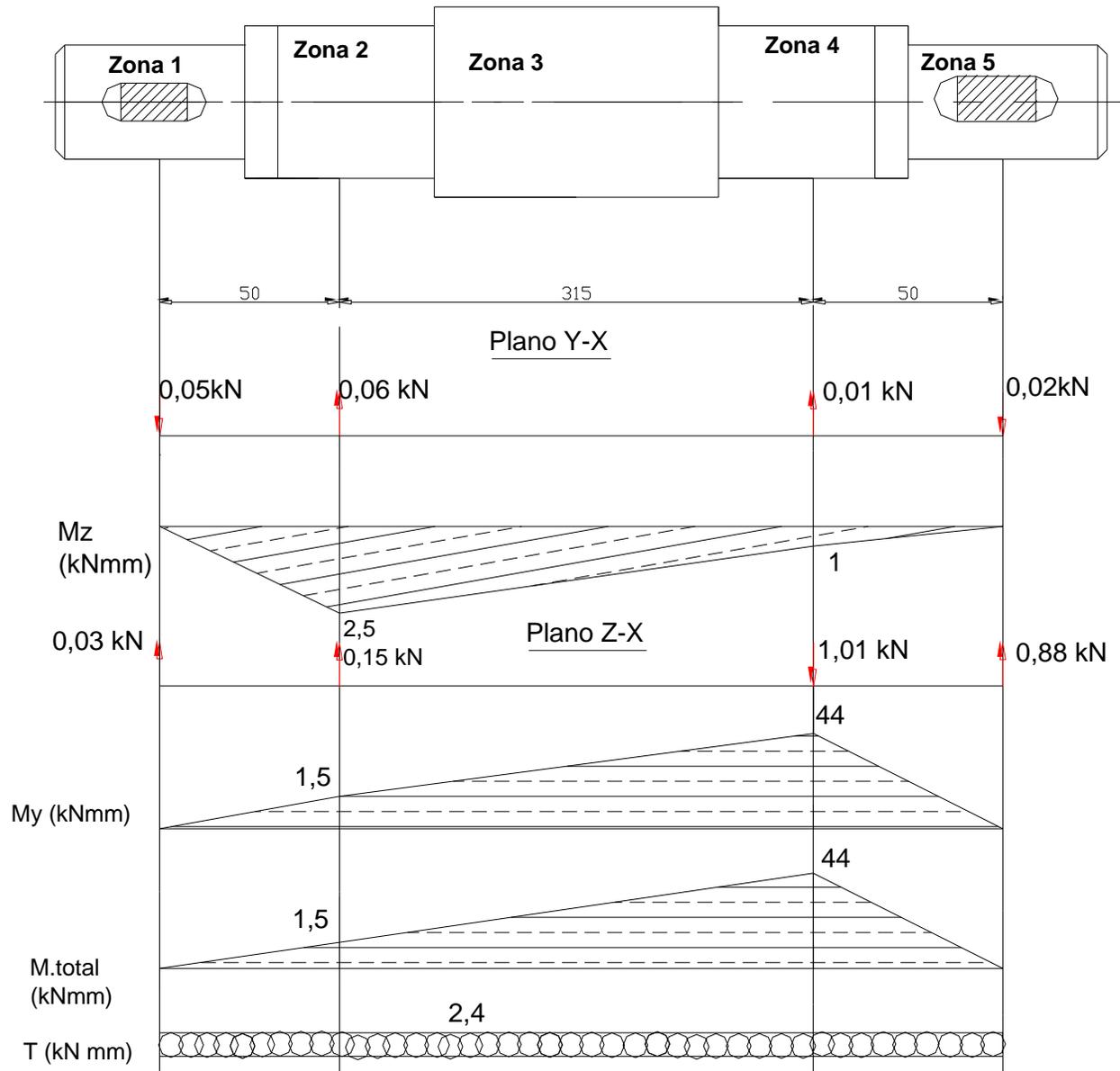


Figura 3.7. Diagrama de fuerzas internas en el árbol.

Selección del material

Se selecciona el acero AISI 1040 laminado en caliente, que es muy utilizado en la fabricación de árboles y ejes, sus características se muestran a continuación:

Tabla 3.7. Composición química y propiedades mecánicas del AISI 1040 (Mott, 2010)

Composición química	%
Carbona(C)	0.37 – 0.44
Manganeso(Mn)	0.60 – 0.90
Azufre(S)	< = 0.050
Fósforo(P)	<= 0.040
Hierro(Fe)	98.06 – 99
Propiedades mecánicas	KSI (MPa)
Tensión máxima σ_u	76.1 (525)
Tensión de fluencia	42.1 (290)
Elongación	18%
Modulo de elasticidad	29000 KSI

Para obtener el límite de fatiga del material se utiliza la figura 4 para superficie maquinada.

Donde se obtiene:

$$S'n = 200MPa$$

El cálculo de la resistencia a la fatiga estimada real (S'n) obtiene por la ecuación:

$$S'n = S_n \cdot C_m \cdot C_{st} \cdot C_r \cdot C_s \quad (3.43)$$

Donde:

$C_m = 1$ → Factor del material (tabla 3)

$C_{st} = 1$ → Factor de tipo de esfuerzo para la flexión.

$C_r = 0,81$ → Factor de confiabilidad (tabla 4 para un 99% de confiabilidad).

$C_s = 0,84$ Para un diámetro de 40 mm .Factor de tamaño (figura 3).

Sustituyendo estos valores en la ecuación 3.44 se obtiene que:

$$S'n = 136,08MPa$$

Determinación de los diámetros mínimos de cada escalón

Estimando el diámetro interior del rodamiento aproximadamente entre 30 y 40 mm, tenido en cuenta que el mismo debe ser múltiplo de 5 y además menor que el diámetro de la zona 3, que aun no se conoce. Donde para $d_2 = d_4 = (30/40 \text{ mm})$ se tiene que el ancho (B) de la chumacera es aproximadamente de 65 mm.

El diámetro mínimo de cada escalón se calcula por la ecuación:

$$d_{\min} = \left[\frac{32 \cdot N}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t \cdot M}{S \cdot n} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot 10 \quad (3.44)$$

- Diámetro mínimo en la zona 4 (zona del cojinete del rodamiento)

El momento flector total en el apoyo B es:

$$M = \sqrt{M_z^2 + M_y^2} \quad (3.45)$$

Siendo $M_z = 1,33 \text{ kN mm}$ y $M_y = 39,78 \text{ kN mm}$ se obtiene que:

$$M = 39,80 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

Sustituyendo en la ecuación 3.44:

$N = 2,25$ Factor de seguridad tabla 2

$K_t = 2,5$ se toma la opción más desfavorable (chaflán agudo)

$M = 39,80 \text{ kN mm}$

$S \cdot n = 136,08 \text{ Mpa}$

$T = 2,4 \text{ kN mm}$

$S_y = 290 \text{ MPa}$

Se obtiene que $d_{4\min} = 25,55 \text{ mm}$

- Diámetro mínimo en la zona 5 (zona del porta buje)

Siendo $M_z = 0,33 \text{ kN mm}$ y $M_y = 15,40 \text{ kN mm}$ el momento flector total que se obtiene según la ecuación 3.45 es:

$$M = 15,40 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

Sustituyendo en la ecuación 3.44:

$N = 2,25$ Factor de seguridad tabla 2

$K_t = 2,5$ se toma la opción más desfavorable (chaflán agudo)

$M = 15,40 \text{ kN mm}$

$S \cdot n = 136,08 \text{ Mpa}$

$S_y = 290 \text{ MPa}$

Se obtiene que $d_{5\min} = 20,71 \text{ mm}$

Selección de los diámetros de cada escalón

Finalizado el cálculo de los diámetros mínimos de cada escalón del árbol de transmisión se determinó que el diámetro de la zona 2 y zona 4 (zonas de apoyo en chumaceras) es de 40 mm. El diámetro de la zona 1 (zona de la polea conducida) es de 35 mm igual a este es el de la zona 5 (zona donde va el porta buje). El diámetro de la zona 3 se determinará una vez finalizado la selección de las chumaceras.

Selección de los rodamientos

Como los rodamientos están sometidos a carga radial solamente, la carga equivalente se determina por la ecuación 3.46:

$$P = V \cdot R \quad (3.46)$$

Donde:

V = factor de rotación es igual a 1 ya que lo que gira es la pista interior del rodamiento.

R = carga radial máxima (1,01kN)

Sustituyendo estos valores en la ecuación 3.46 se obtiene que:

$$P = 1,01\text{kN}$$

- Determinando como diámetro del árbol en esa zona igual a 40 mm.
- La duración de diseño del rodamiento que se requiere es de 20000 a 30000 h
- El factor por velocidad (f_v) para 1471,99 rpm es 0,28 y el factor por duración (f_L) es 3,8 (Mott, 2010).

La capacidad de carga dinámica básica requerida se calcula:

$$C = P_d \left(\frac{f_L}{f_v} \right) \quad (N) \quad (3.47)$$

Obteniéndose:

$$C = 13,71 \text{ kN}$$

De acuerdo a las dimensiones del árbol y la capacidad de carga dinámica requerida se seleccionó según SKF Group (2008), la chumacera SYNT 40F cuyas dimensiones se plantean en la tabla 3.8:

Tabla 3.8. Dimensiones de la chumacera de la serie SYNT (SKF Group, 2008)

Diámetro (mm)	Dimensiones									Masa (kg)	Designación general	Capacidad de carga (kN)	
	A	B	H	H ₁	H ₂	J	L	N	G			Dinámica C	Estática C ₀
40	60	65	115	60	25	170	205	20	12	3,9	SYNT 40F	96,5	90

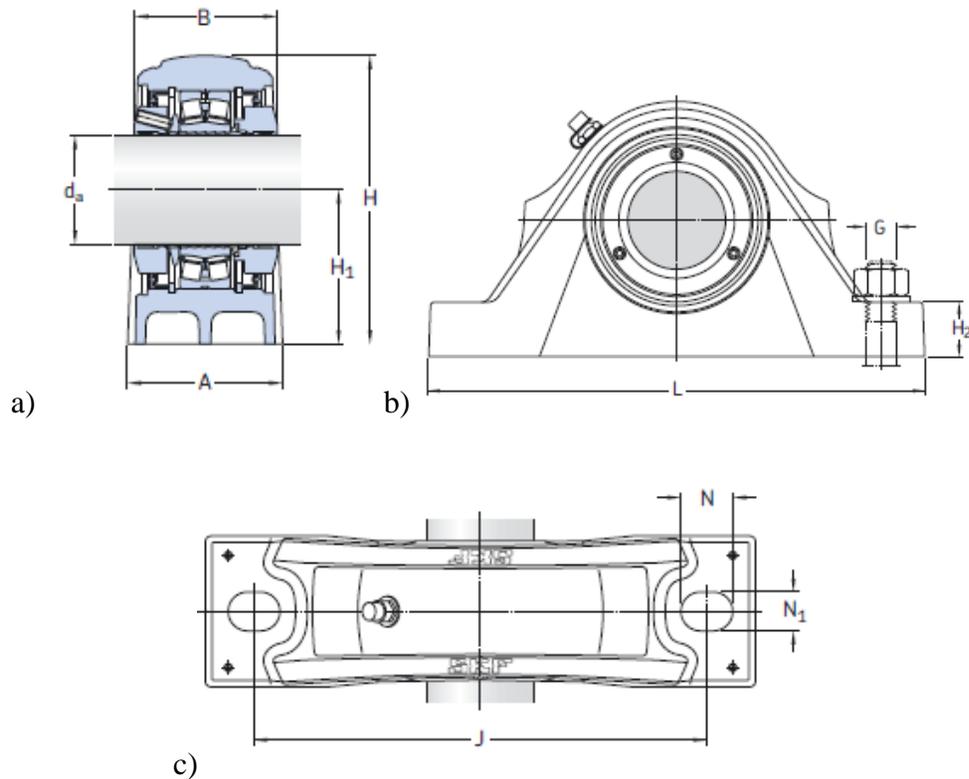


Figura 3.8. Vista de la chumacera (a (interior), b (frontal), c (superior)). (SKF Group, 2008)

Teniendo en cuenta las dimensiones del rodamiento seleccionado se determinó que la zona 3 debe tener un diámetro de 50 mm.

Cálculo del chavetero

La figura 3.9 muestra las dimensiones de la sección transversal del chavetero en la zona 1 que es igual al de la zona 5.

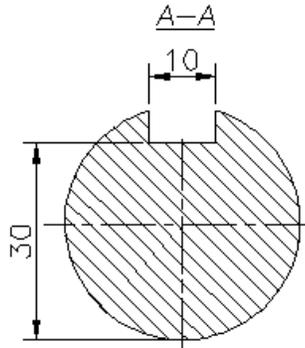


Figura 3.9. Dimensiones del chavetero de la zona 1 y zona 5.

Así, para $d_1 = 35 \text{ mm}$, $b = 10 \text{ mm}$, $h = 8 \text{ mm}$, $t_1 = 5 \text{ mm}$

Las tensiones de contacto se calculan por la ecuación 3.49:

$$\sigma = \frac{4T}{h * d * l} \leq [\sigma] = 0,4S_y \quad (3.48)$$

Donde:

$S_y = 290 \text{ MPa}$ Para acero AISI 1040 laminado en caliente.

La longitud mínima del chavetero se calcula a partir de la ecuación 3.50:

$$l_{\min} = \frac{4T}{h \cdot d \cdot 0,4 \cdot S_y} \quad (\text{mm}) \quad (3.49)$$

$$l_{\min} = 0,16 \text{ mm}$$

La longitud total del chavetero es: $l + b = 0,16 + 10 = 10,16 \text{ mm}$ → Atendiendo a la longitud del escalón de la zona 1 y la zona 5 se asume una longitud total del chavetero de 20 mm.

3.2.6. Dispositivo de alimentación del babbitt fundido

Para la construcción del vertedero se recomienda tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Material con elevado punto de fusión.
- De forma cilíndrica que permita contener el babbitt fundido. Además debe contar con un recubrimiento interno de cemento refractario para disminuir la tasa de transferencia de calor al medio y poder aprovechar así la energía térmica que ayuda a la fluidez del babbitt fundido.

- Debe poseer un canal semicircular dispuesto con una inclinación de aproximadamente de 20° que permita la conducción del metal fundido del recipiente al molde.
- Será móvil, para permitir la extracción de la pieza fundida luego de que finalice el proceso.

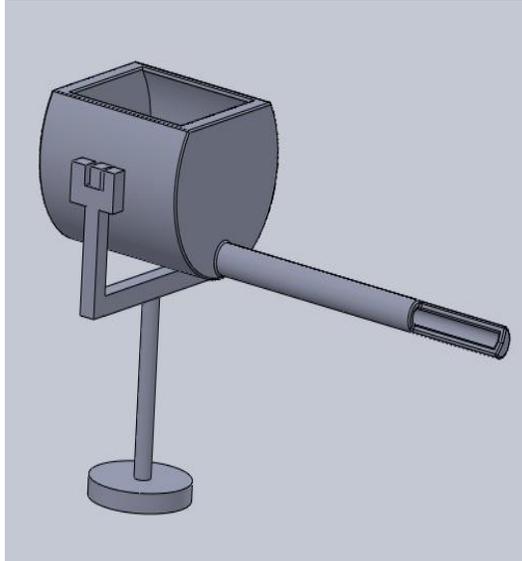


Figura 3.10. Dispositivo de alimentación del babbitt fundido.

Una de las diferentes variantes para la construcción de este puede ser como la que se muestra en la figura 3.10, la empresa hará este de acuerdo a sus posibilidades siempre teniendo en cuenta las consideraciones planteadas anteriormente.

3.2.7. Estructura de bastidor

La estructura del bastidor se deja a consideración de la empresa este puede ser construido o seleccionado por la empresa si dispone de alguno que este dentro de sus posibilidades siempre y cuando permita un adecuado montaje de la máquina y soporte todas las cargas de cada uno de los elementos de la máquina.

En la figura 3.11 se puede ver una variante de cómo puede quedar el bastidor de la máquina.

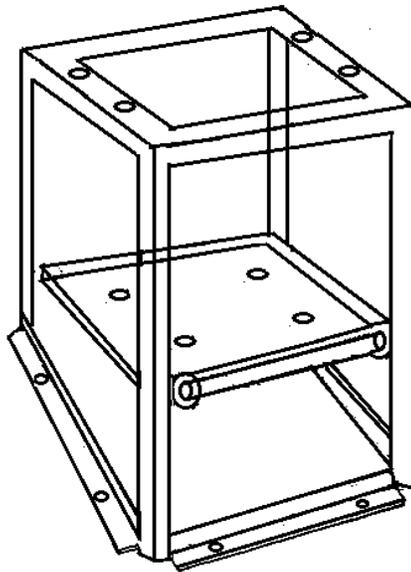


Figura 3.11. Variante de cómo puede quedar el bastidor.

3.3 Consideraciones económicas

No se cuenta con toda la información específica, ni tampoco a la empresa le fue posible en estos momentos aportar datos específicos necesarios para desarrollar un análisis económico de la recuperación o el posible costo de fabricación del equipo. No obstante, se conoce que el precio de comercialización de los cojinetes de deslizamiento desde China es de 24,28 Euros cada cojinete (Autoestoria, 2016). Considerando el motor YUCHAI de cuatro cilindros que posee cinco cojinetes, el costo total de compra es de 121,4 Euros, a lo cual hay que agregar otros gastos por transportación, almacenamiento, etc.

Por otra parte hay experiencias de tecnologías de recuperación de cojinetes de árboles de levas de motores de combustión interna con Babbitt B83 y otras aleaciones, reportadas en Colectivo de autores (1993a) y Herrera (2005a), en que los costos de recuperación por aportación de la capa de babbitt se encuentran entre un 25 % y 35 % del precio total del cojinete, a lo que se agrega además que los precios de los cojinetes son inferiores a los que se comercializan los cojinetes del motor YUCHAI por China.

Conclusiones

- Los cojinetes de deslizamiento del árbol de levas tienen un diámetro exterior de $59^{+0.106}_{+0.087}$ mm y $55,5^{+0.030}_0$ mm de diámetro interior. La falla fundamental que presentan es el desgaste adhesivo por fricción con un componente de abrasión no despreciable debido a contaminación en el lubricante. El desgaste límite permisible en explotación es hasta diámetro 55,63 mm (0.13 mm en desgaste absoluto).
- Los análisis metalográfico y mediciones de laboratorio arrojaron que el anillo metálico exterior del cojinete está construido de una chapa enrollada de acero de bajo carbono (0,023 % C) con espesor de 1,2 mm. La capa de trabajo de metal antifricción es de 2,3 mm de un babbitt base estaño con presencia de aluminio y pequeño porcentaje de plomo, como elementos fundamentales, con microdureza promedio (34,60 Hv) y microestructura similares a los babbitt típicos con base estaño.
- El método seleccionado para la recuperación de los cojinetes es por aporte de metal mediante fundición centrífuga horizontal, con la reposición total de la capa de metal antifricción babbitt siguiendo el proceso tecnológico expuesto en el cuerpo del trabajo. El método de fundición centrifugada con el proceso tecnológico recomendado, no solo garantiza alta calidad, sino que se ajusta a las condiciones tecnológicas de la empresa.
- Los elementos constructivos calculados y dimensionados (eje principal, conjunto porta bujes y poleas del sistema de transmisión) y los elementos seleccionados (motor eléctrico, Chumaceras con cojinetes y polea), para el equipo destinado a la fundición por centrifugación deben garantizar un correcto funcionamiento de dicho equipo con los materiales seleccionados y factores de seguridad requeridos. La velocidad de rotación mínima necesaria que se debe garantizar en el equipo de centrifugación para la adecuada uniformidad y adherencia de la capa de babbitt al casquillo del cojinete es de 1472 rpm de acuerdo con los cálculos realizados.

Recomendaciones

Realizar análisis químicos por vía húmeda del babbitt de los cojinetes del motor YUCHAI para obtener la composición química más exacta del mismo y definir las posibilidades de reproducción de esta aleación antifricción en la empresa.

Considerar la aleación de antifricción Babbitt B83 (Rusia), como posible sustituto de la aleación original a partir de ensayos de desgaste en laboratorio de ambas aleaciones y otras que se consideren.

Fabricar la máquina o equipo para la fundición centrífuga con los elementos constructivos diseñados y los seleccionados a partir de las posibilidades de la empresa en la construcción del bastidor.

Bibliografía

1. Albarracín, A., (1996) *Tribología y lubricación industrial y automotriz*. Tomo I, 3ra. Edición. Colombia, 976pp.
2. Almendariz, M., (2013) *Libro de materiales*.
3. Andrade, S. y P. Salazar, (2012) *Reconstrucción de cojinetes de deslizamiento de la turbina Turbodyne del tercer molino del trapiche "B" en el ingenio San Sarlos mediante el proceso de fundición centrífuga*. Proyecto de grado previo a la obtención del título de: Ingeniero Industrial. Ecuador, Universidad Estatal de Milagro unidad académica ciencias de la ingeniería.
4. American Society of Mechanical Engineers, (1985) *Norma ANSI B106.1M-1985. Design of Transmission Shafting (Diseño de ejes de trasmision)*. Nueva York.
5. Aranda, C. y I. Wiesner, (2016) *Construcción y Puesta en Marcha de Centrifugadora Vertical de Metales*. Tesis de graduación de Ingeniero Mecánico. México, Escuela Superior Politécnica del Litoral, disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/11917/1/Construcci%C3%B3n%20y%20puesta%20en%20marcha%20de%20centrifugadora%20vertical%20de%20metales.pdf> [Accesado el día 7 de mayo 2016]
6. Autoestoria, (2016) Cojinetes del árbol de levas reparación. [En línea]. Disponible en: [http://www.autosetoria.fr/es/cojinetes de árbol de levas reparación+0.251100-1200.htm](http://www.autosetoria.fr/es/cojinetes%20de%20%C3%A1rbol%20de%20levas%20reparaci%C3%B3n+0.251100-1200.htm)
7. Baranov, I. A., (1999) *Recuperación de los elementos de máquinas, Construcción de maquinaria*. 2da Edición. Moscú.
8. Colectivo de autores, (1993) *Manual de recuperación de piezas*. C. Habana, Científico Técnico.
9. Colectivo de autores, (1993a) *Recuperación de un conjunto de Piezas de motores de combustión interna*. VII FORUN Nacional de Ciencia y Técnica. La Habana.
10. Comas, G., (2011) "Cojinetes-de-metal-antifricción". *Interempresas* [En línea], disponible en: http://www.interempresas.net/Componentes_Mecanicos/Articulos/46726-Cojinetes-de-metal-antifriccion.html [Accesado el día 10 de enero del 2016]

11. Compañía maquinaria de YUCHAI Guangxi Lida, (2009) *Manual del Manejo y Mantenimiento del Motor Diesel*.
12. Cosgra, (2016) “Motores asíncronos trifásicos y monofásicos”. *Catálogo de motores cemmer*. [En línea], disponible en: <http://www.mecanique-laine.com/images/Catalogue%20moteurs%20CEMER.pdf> [Accesado el 12 de febrero del 2016]
13. Daquinta, A. et al, (2010) “Durabilidad del par de fricción compuesto por el árbol de levas y el cuerpo de los cojinetes del motor VAZ de fabricación Rusa”. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* [En línea], Vol 19, No. 4, oct.-dic, pp. 67-73, disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542010000400011 [Accesado el día 20 de junio del 2015]
14. Duran, C. y O. Rivas, (2005) *Construcción de una Máquina de Fundición Centrífuga*. Tesis de graduación de Ingeniero Mecánico. San Salvador, Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”. http://cef.uca.edu.sv/descargables/tesis_descargables/maquina_fundicion_centrifuga.pdf . [Consultado el 10 de mayo 2016]
15. Efremov, V., (1976) *Reparación de automóviles*. Moscú, MIR
16. Electroverk steel, (2016). Disponible en: <http://www.evek.es/babbit-b16-b83.html> [Accesado el día 5 de mayo del 2016]
17. Facultad de Mecánica, (2016a) “Elementos de máquina II. Material de apoyo de correas” [En línea], UCLV, disponible en: [http://10.12.1.67/docs/FIMI/Formación del profesional / Especialidades / Ingeniería Mecánica / 4^{to} / Segundo Semestre / Elementos de Maquina II](http://10.12.1.67/docs/FIMI/Formación%20del%20profesional/Especialidades/Ingeniería%20Mecánica/4to/Segundo%20Semestre/Elementos%20de%20Maquina%20II).
18. Facultad de Mecánica, (2016b) “Elementos de máquina II. Material de apoyo de árboles y ejes” [En línea], UCLV, disponible en: [http://10.12.1.67/docs/FIMI/Formación del profesional / Especialidades / Ingeniería Mecánica / 4^{to} / Primer Semestre / Elementos de Maquina I](http://10.12.1.67/docs/FIMI/Formación%20del%20profesional/Especialidades/Ingeniería%20Mecánica/4to/Primer%20Semestre/Elementos%20de%20Maquina%20I).
19. Gere J. y S. Timoshenko, (S/A) *Mecánica de Materiales*.
20. Guliaev, A.P., (1976) *Metalografía*, Tomo 2, Moscú, Mir.

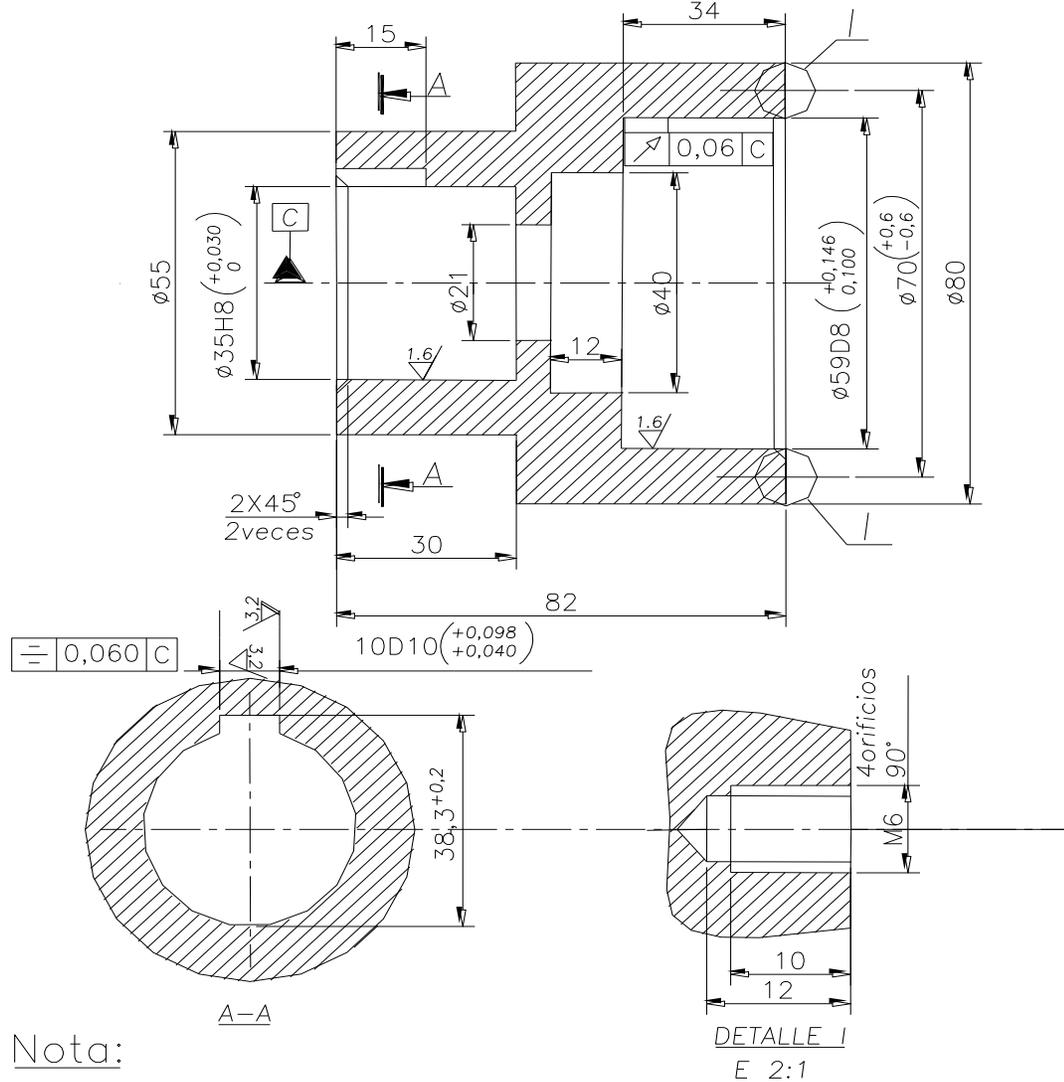
21. Herrera, A., (2005a) *Reparación de Motores y elementos de transmisión*. Universidad Popular de Nicaragua (UPONIC), Managua.
22. Herrera, A. y E. Alvares, (2005b) *Tribología*. Universidad Popular de Nicaragua (UPONIC), Managua.
23. Herrera, A., (2005c) *Recuperación de piezas por soldadura y otros métodos*. Maestría: Ingeniería del Mantenimiento. Universidad Popular de Nicaragua (UPONIC), Managua
24. Jójvaj, M. S., (1987) *Motores de Automóvil*. Moscú, Mir.
25. Melo, J. et al, (1983) ‘‘ Mecánica Diesel, Diagnostico de cojinetes’’. Vol 9, Bogotá [En línea], disponible en: http://biblioteca.sena.edu.co/exlibris/aleph/u21_1/alephe/www_f_spa/icon/35338/4/volumen%2009 [Accesado el día 3 de julio del 2015]
26. MOTORGIGA, (2010) ‘‘Cojinete de fricción - Definición – Significado’’. [En línea]. Disponible en: <http://diccionario.motorgiga.com/diccionario/cojinete-de-friccion-definicion-significado/gmx-niv15-con193604.htm> [Accesado el día 23 de junio de 2015]
27. Mott, R., (2010) *Diseño de elementos de máquinas, Diseño de ejes*. Vol II, La Habana, Félix Varela.
28. Mott L., (2016) *Resistencia de Materiales Aplicada*. 3° Edición.
29. Mott, R., (2010) *Diseño de elementos de máquinas, Diseño de una transmisión por bandas y cadenas*. Vol I, La Habana, Félix Varela.
30. Pérez, A. et al., (2012) *Diseño de una máquina didáctica para fundición centrífuga vertical*. [En línea], México, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Guanajuato, disponible en: http://somim.org.mx/articulos2010/memorias/memorias2012/articulos/pdfs/A2/A2_22.pdf [Accesado el día 7 de mayo del 2016]
31. Quezada, E. y O. Caluña, (2013) *Construcción e implementación de un prototipo de una máquina centrifugadora para la obtención de cilindros huecos sin costura de aluminio en el taller de fundición de la facultad de mecánica de la escuela superior politécnica*

- de Chimborazo*. Tesis de grado previa a la obtención del título de: ingeniero industrial. Ecuador, Escuela superior politécnica de Chimborazo, Facultad de mecánica.
32. Rodríguez, N., (2008) *Análisis de los parámetros que influyen la aparición de defectos de fundición en las camisas centrifugadas de la línea industrial en industrias lavco*. Proyecto de grado para optar el título de ingeniera metalúrgica. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, disponible en : <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1476/2/126085.pdf> [Accesado el día 20 de enero del 2016]
33. Shigley J. y J. Uicker, (S/A) Teoría de Máquinas y de Mecanismos.
34. SKF Group, (2008) ``SKF ConCentra roller bearing units The fast, easy, error-free way to install and remove plummer Blocks´´. Suecia, disponible en: <http://www.dexis-iberica.com/ficheros/26.pdf> [Accesado el día 15 de mayo del 2016]
35. Streetr P., (1983) *Tecnología de las aleaciones micro pulverizadas*. Congreso centroamericano de técnicos azucareros.
36. Streeter, P., (1996) *Introducción a la tecnología de rociado térmico y sus aplicaciones*.
37. UMSS–Facultad de Ciencias y Tecnología, (2016) ``Ing. Mecánica - Tecnología Mecánica II, Fundición Centrifuga´´. [En línea], Cap. II., Bolivia, disponible en: <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-222.pdf> [Accesado el día 5 de mayo 2016]
38. Wikipedia, (2016) ``Cojinete de deslizamiento´´ [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Cojinete_de_deslizamiento [Accesado el día 25 de abril de 2016]
39. Zabala, H., (2014) *Proceso para la obtención del babbitt 83 en el taller de fundición de la facultad de mecánica de la escuela superior politécnica de Chimborazo y sus aplicaciones en la industria*. Tesis de grado previa a la obtención del título de: Ingeniero Industrial. Riobamba, Ecuador, Escuela superior politécnica de Chimborazo.

ANEXOS

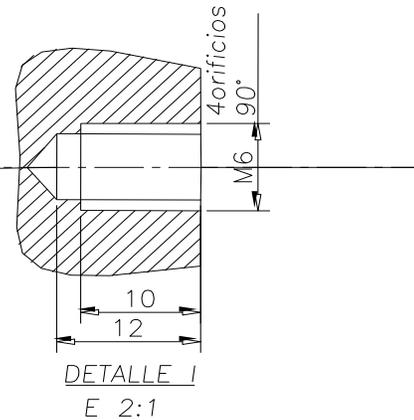
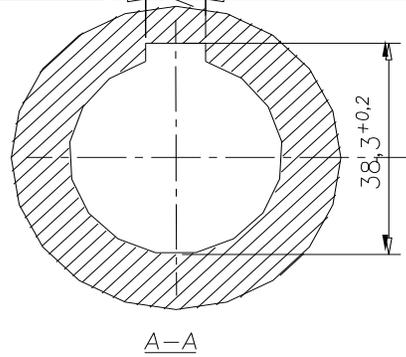
PLANO 1

6,3 (✓)



0,060 C

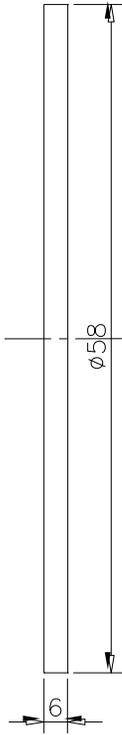
10D10 (+0,098 / +0,040)



Nota:
Eliminar cantos agudos

FIRMA Y FECHA									UCLV				
N° DE INVENTARIO D					Porta Buje				ETAPAS DE ELABORACION				
SUSTITUYE o					PLANO DE PIEZA				TT	PTI	A	P	DT
FIRMA Y FECHA	MODCANT	NO. NOTIF.	FIRMA	FECHA	Acero AISI 1018				MASA	ESCALA	HONJA No	CANTIDAD HOJAS	
N° DE INVENTARIO	DIB.	GUEVARA								1:1	1	1	
	PROY.												
	REV.												
	C.TECN.												
	C.NORM.												
	APR.												
												PLANO 1	

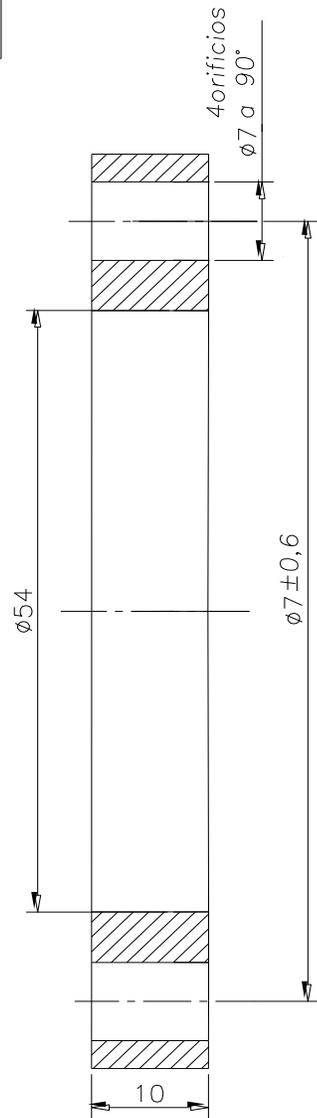
PLANO 1.1



FIRMA Y FECHA	
N° DE INVENTARIO D	
SUSTITUYE a	

FIRMA Y FECHA					Tapa Interior	UCLV				
						ETAPAS DE ELABORACION				
N° DE INVENTARIO	MOD.	CANTNO.	NOTIF.	FIRMA	FECHA	TT	PT	A	P	DT
	DIB.	GUEVARA				MASA	ESCALA	HONJA No	CANTIDAD HOJAS	
	PROY.					0,04kg	2:1	1	1	
	REV.				PLANO DE PIEZA	GRAFITO				
	C.TECN.					PLANO 1.1				
	C.NORM.									
	APR.									

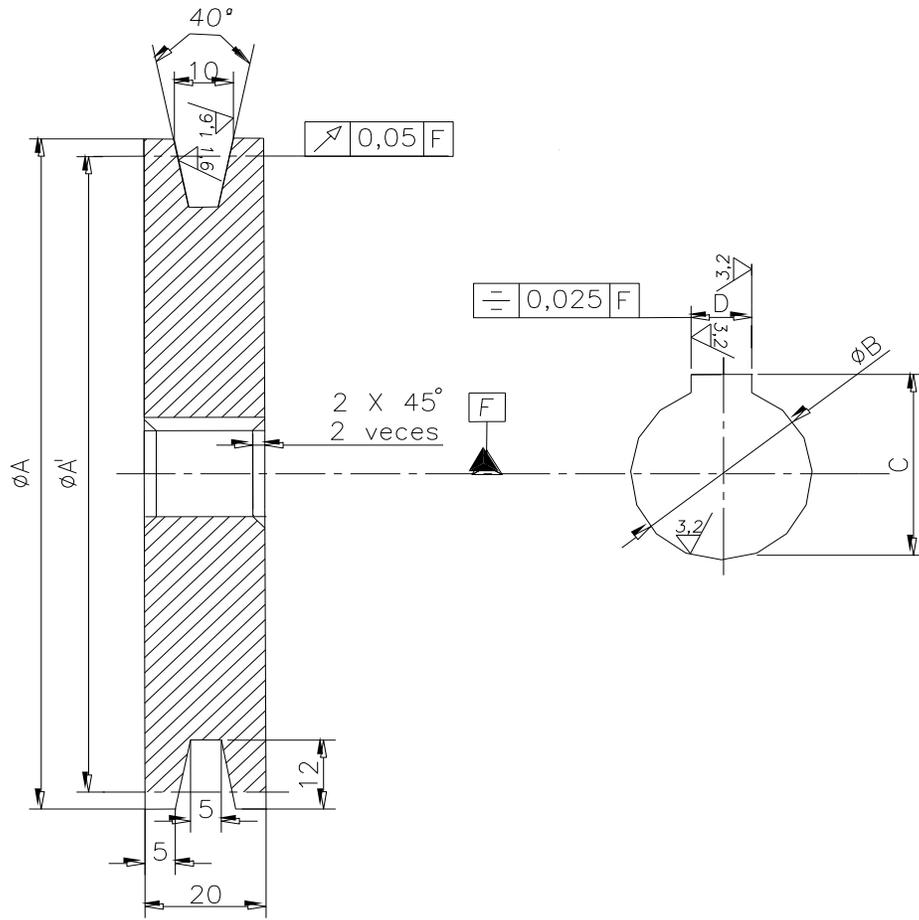
PLANO 1.2



FIRMA Y FECHA		FIRMA Y FECHA		FIRMA Y FECHA		FIRMA Y FECHA		FIRMA Y FECHA		FIRMA Y FECHA	
SUSTITUYE a		N° DE INVENTARIO D									
MOD.		CANT.		NO. NOTIF.		FIRMA		FECHA		Tapa Exterior	
DIB.		GUEVARA								UCLV	
PROY.										ETAPAS DE ELABORACION	
REV.										T T P T A P D T	
C.TECN.										MASA ESCALA HONJA No CANTIDAD HOJAS	
C.NORM.										0,05kg 2:1 1 1	
APR.										PLANO DE PIEZA	
										GRAFITO	
										PLANO 1.2	

PLANO 2

6,3/ (✓)



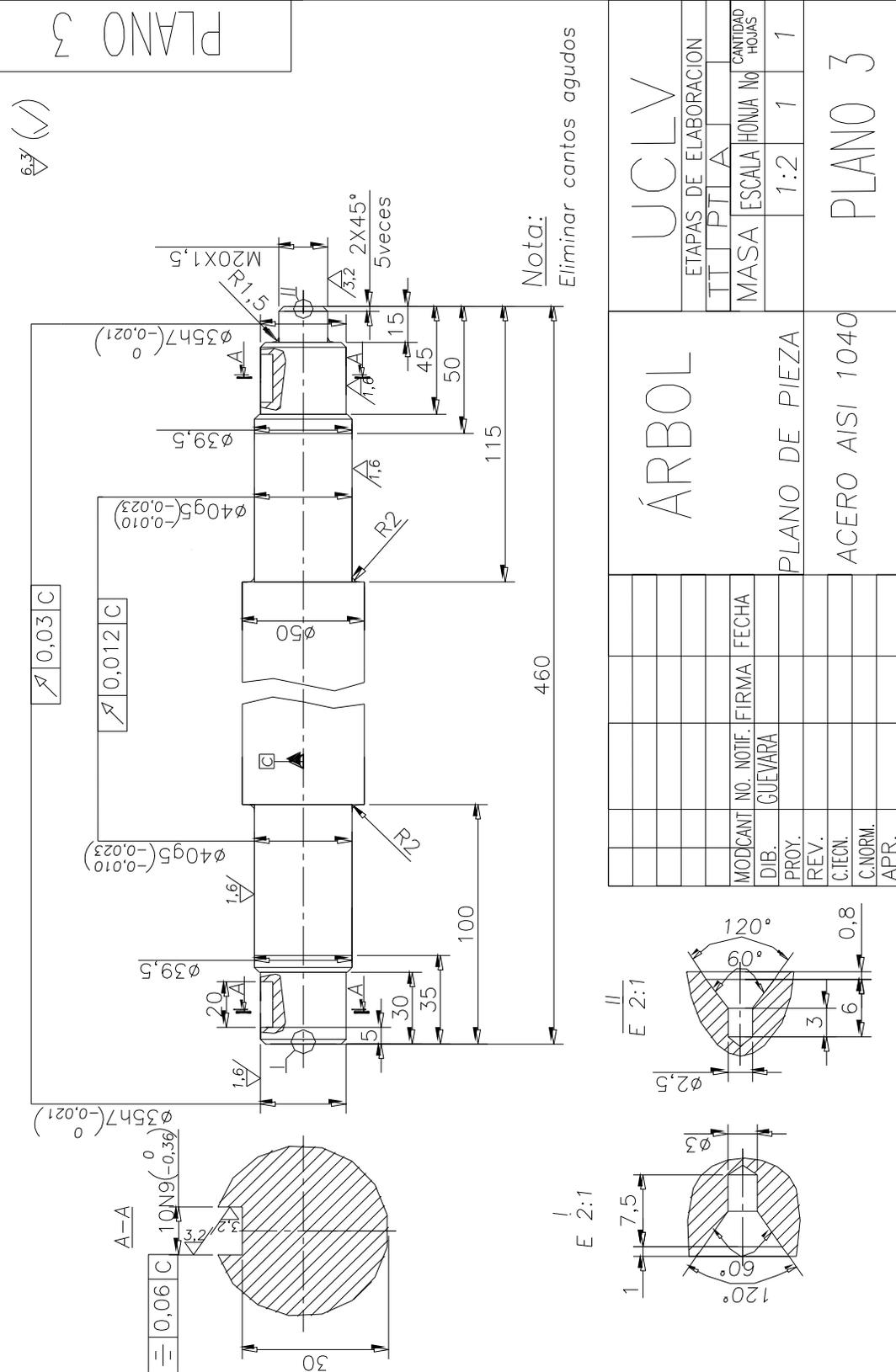
Nota:

Eliminar cantos agudos.

Poleas	ϕA	$\phi A'$	ϕB	C	D
Conductora	117	111	15	$17,3^{+0,1}$	5J9($\pm 0,015$)
Conducida	214	208	35h7	$38,3^{+0,2}$	10J9($\pm 0,018$)

N° DE INVENTARIO	FIRMA Y FECHA	N° DE INVENTARIO D	FIRMA Y FECHA	SUSTITUYE a	N° DE INVENTARIO	FIRMA Y FECHA	PLANO DE PIEZA	Aluminio	UCLV
									ETAPAS DE ELABORACION
									TT PT A P DT
									MASA ESCALA HONJA No CANTIDAD HOJAS
									1:1 1 1
									PLANO 2

N° DE INVENTARIO	FIRMA Y FECHA	SUSTITUYE a	N° DE INVENTARIO D	FIRMA Y FECHA



PLANO 3

6.3 (✓)

Nota:
Eliminar cantos agudos

ETAPAS DE ELABORACION		UCLV	
TT	PTIA	MASA	ESCALA
NO	HONJA	NO	CANTIDAD
1	1	1	1
PLANO DE PIEZA		PLANO 3	
ACERO AISI 1040			
MODCANT	NO. NOTIF.	FIRMA	FECHA
DIB.	GUEVARA		
PROY.			
REV.			
C.TECN.			
C.NORM.			
APR.			

