



ISMMM

INSTITUTO SUPERIOR
MINERO METALÚRGICO DE MOA
Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
FACULTAD METALURGIA-ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Análisis de diseño de los cojinetes de contacto plano en los
Compresores 2BM 10-58/8 de la termoeléctrica en la
Empresa Comandante Ernesto Che Guevara

Autor: Livan Arguelles Pereira

Tutor (es): Ing. Marlo Leyva Tarafa

Ms. C. Giovanni Martínez Ruiz

Moa, junio de 2018

“Año 60 de la Revolución”





DECLARACIÓN DEL AUTOR

Yo Livan Arguelles Pereira:

Autor de este trabajo de diploma, así como mis tutores, Marlo Leyva Tarafa y Giovanni Martínez Ruiz, declaramos la propiedad intelectual al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Diplomante: Livan Arguelles Pereira

Tutor: Ing. Marlo Leyva Tarafa

Tutor: MSc. Giovanni Martínez Ruiz



Pensamientos

¿A qué le vamos a temer?, ¿a qué le podemos temer? Dediquémonos a trabajar y veremos cómo le vamos a encontrar las soluciones, que nadie las tiene aquí, nosotros no las tenemos; pero sí tenemos la seguridad de que con ustedes las vamos a encontrar.

Fidel Castro Ruz

El porvenir del país está ligado directamente al desarrollo de la ciencia y la técnica. Nunca podremos caminar con nuestros propios pies, mientras no tengamos una tecnología avanzada, basada en una técnica propia, en una ciencia propia. Por ello, la tarea de crear ingenieros es importante...

"Si no existe organización, no existe racionalidad, las ideas después del primer impulso, van perdiendo eficacia, van cayendo en la rutina, en el conformismo y acaban por ser simplemente un recuerdo".

Ernesto Che Guevara



Dedicatoria

Dedicarles quiero, a mi hijo Josué David Arguelles Bauta por ser el máximo impulsor de mis aspiraciones, a mis padres Alexis Pereira Torres e Ivan Arguelles Duvergel por ser el eslabón principal en la unión de los retos de la vida, a mis cuatro hermanos Alien Arguelles Pereira, Islen Arguelles Pereira, Ivan Arguelles Borrero y Janiel Arguelles Rodríguez por ser el faro de guía que me condujo a tan importante logro de convertirme en un profesional de la ingeniería mecánica; a mis abuelos maternos que Dios los tenga en la gloria Dulce María Torres González y Wilfredo Pereira Torriente por ser los ángeles de mi guarda y el motor impulsor en mi educación y aspiraciones, en resumen a mi familia y amigos, que fueron la fuente de inspiración para poder ser hoy una persona preparada científico y culturalmente, capaz de poder enfrentar los desafíos de la vida sabiendo que he de salir triunfador de estos.



AGRADECIMIENTOS

A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desempeño de mi carrera.

A mis tutores por confiar en mí en la realización de este trabajo, el ing. Marlo Leyva Tarafa y MSc Giovanni Martínez Ruiz.

A mis familiares que me apoyaron en los momentos de mi vida en que más lo necesitaba.

A mis amigos que siempre creyeron en mí.

A los que de una forma u otra me apoyaron y ayudaron en la realización de este trabajo.

A la revolución, por darme la oportunidad de convertirme en profesional.

A todos.

Muchas Gracias.

**Resumen**

En el trabajo se realiza el análisis del diseño y funcionabilidad de los cojinetes de contacto plano, de los Compresores 2BM10-50/8 que suministran aire a los generadores de vapor de la Termoeléctrica en la empresa Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, para esto, se calcularon los parámetros fundamentales de diseño, detectando de esta manera, que las holguras son muy pequeñas y la película de lubricante no cumple la condición de separar las superficies de contacto, por lo que el sistema se encuentra bajo régimen límite de lubricación, de forma que no se garantizan las condiciones de operación, resultando ineficiente, el enfriamiento de las chumaceras. Se propone un sistema de lubricación forzada, el cual cumple con las condiciones para el adecuado funcionamiento de los cojinetes. Por último, se muestra el efecto económico de la propuesta realizada, ascendente a 16338,93 CUC.

**Abstract**

In the work the analysis of the design and functionality of the flat contact bearings of the Compressors 2BM 10-50/8 that supply air to the steam generators of the Thermoelectric in the Company Comandante Ernesto Che Guevara, for this, is carried out. They calculated the fundamental parameters of design, detecting in this way, that the clearances are very small and the lubricant film does not meet the condition of separating the contact surfaces, so that the system is under the lubrication limit regime, so that the operating conditions are not guaranteed, resulting in inefficient cooling of the bearings. A forced lubrication system is proposed, which meets the conditions for the proper functioning of the bearings. Finally, it shows the economic effect of the proposal made, up to 16338, 93 CUC.

**Índice**

Introducción.....	1
CAPÍTULO1. MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO	4
1.1. Introducción.....	4
1.2. Generalidades sobre los Compresores	4
1.3. Principio de Funcionamiento de los Compresores	5
1.4. Reseña Histórica de los cojinetes de contacto plano	6
1.5. Clasificación de los cojinetes de contacto plano	8
1.5.1 Clasificación según la dirección en que soportan las cargas:	8
1.5.2 Según las condiciones de lubricación:.....	8
1.6. Generalidades del diseño de los apoyos y cojinetes de contacto plano.....	8
1.6.1. Cojinetes de fricción seca.....	10
1.6.2. Cojinetes de fricción líquida.....	10
1.6.3. Cojinetes de fricción mixta.....	10
1.6.4. Características generales de los cojinetes de fricción	10
1.7. Materiales babbitt	13
1.7.1. Características del Babbitt.....	16
1.7.2. Clasificación de los metales Babbitt	17
1.7.3. El babbitt en el campo industrial.....	18
1.7.4. Aleaciones de metal babbitt	20
1.7.5. Propiedades tribológicas de los materiales babbitt	23
1.8. Conclusiones del Capítulo I.....	24
Capítulo II. Materiales y Métodos utilizados en la investigación.....	25
2.1. Introducción.....	25
2.2. Características técnicas del Compresor 2bm10-50/8.....	25
2.2.1. Análisis microestructural:.....	25
2.2.2. Lubricación	27
2.3. Coeficiente de fricción	28
2.4. Material adecuado para la construcción de los cojinetes	29
2.5. Rugosidad superficial para cada superficie	30
2.6. Enfriamiento del cojinete	30
2.7. Cálculo del espesor mínimo de la película del lubricante	31
2.7.1. Cálculo de la deflexión máxima que ocurrirá en el cojinete:.....	31



2.7.2. Cálculo de la excentricidad relativa:	32
2.8. Cálculo del parámetro que considera las propiedades del lubricante:	34
2.9. Determinación de la viscosidad del aceite.....	36
2.10. Cálculo de la carga máxima que podrá soportar el cojinete	37
2.11. Propuesta de sistema de mantenimiento	41
2.11.1. Estado técnico del equipo	41
2.11.2. Procedimiento para determinar el estado técnico de un equipo.....	42
2.11.3. Determinación del Ciclo de Mantenimiento de cada equipo.....	42
2.11.4. Mediciones de síntomas.....	43
2.12. Métodos de los elementos finitos. Módulo de ensamble	44
2.12.1. Mallado del modelo	45
2.13. Conclusiones del capítulo II.....	47
CÁPITULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL.....	48
3.1-Introduccion.....	48
3.2. Análisis de la elaboración de las probetas.	48
3.2.1. Selección de las muestras.....	48
3.2.2. Análisis del desbaste y pulido para la observación micrográfica	49
3.2.3. Análisis del lavado y desengrasado	49
3.2.4. Observación con microscopía óptica.....	50
3.3. Distancia entre los apoyos	53
3.4. Resultados de los cálculos de mantenimiento.....	54
3.5. Resultados de los cálculos de diseño	55
3.6. Resultados de la propuesta de mantenimiento	58
3.6.1. Establecimiento del mantenimiento	58
3.6.2. Métodos del Mantenimiento Preventivo Planificado	59
3.6.3. Determinación del estado técnico del Compresor 2BM 10-50/8.....	60
3.6.4. Resultado del ciclo de mantenimiento	61
3.6.5. Mediciones de síntomas.....	61
3.7. Análisis por el método de los elementos finitos.....	62
3.7.1. Comportamiento de los desplazamientos.....	63
3.7.2. Comportamiento de las deformaciones	65
3.8. Análisis económico e impacto medio ambiental.	66



3.9. Impacto ambiental.	69
3.10. Conclusiones del capítulo III.....	71
Conclusiones Generales	72
Referencias Bibliográficas	73



Introducción

Desde los tiempos más antiguos el hombre ha tenido grandes necesidades de realizar diferentes tareas, como consecuencia de la acumulación de estas tareas y con la gran capacidad de razonamiento e inteligencia que posee se vio en la obligación de inventar herramientas y diferentes métodos que le dieran solución a su problema. Estas técnicas, a través de los años han ido perfeccionando junto con la tecnología, formando parte de nuestra sociedad. Hoy en día existe una gran competencia en el mercado industrial por la calidad requerida de los productos, esto es muy importante para intentar competir con las grandes empresas, para distribuir nuestros productos y aumentar el ingreso económico.

Los países desarrollados como Rusia, Japón, Estados Unidos descubrieron vías para aprovechar esos recursos naturales. Estos países con las necesidades de desarrollo fueron descubriendo las importancias de los minerales. Lo que llevaron a cabo un importante papel con las creaciones de pequeñas fábricas para obtener el mineral. En la provincia de Holguín donde se encuentra el municipio de Moa el cual posee una de las zonas mineras del níquel más extensa del país. El cual cuenta con dos fábricas productora del níquel, una de ella es la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Su principio de producción es la obtención de Níquel y Cobalto.

Situación Problemática

Las frecuentes roturas del compresor vienen dadas por el incremento del diámetro del cigüeñal; ya que por las elevadas temperaturas el babitt, elemento de recubrimiento, se desgasta y cae encima del mismo; provocando una desincronización en la rotación de este, induciendo un desgaste paulatino por la fricción entre el cigüeñal y los metales; por lo que las reparaciones son frecuentes mediante el relleno por soldadura, incrementando el diámetro de la pieza y provocando una mayor fricción; originando paros en la producción y por tanto en la generación de energía en la caldera; lo cual provoca una elevada contaminación al medio ambiente por la emisión de gases tóxicos, el elevado ruido del equipo al presentar un problema de falla, ocasionando graves daños a largo plazo a los

trabajadores y a la población, estos problemas que presenta el equipo le cuestan anualmente una elevada suma de capital a la empresa; por esta cuestión origina el siguiente problema de investigación.

Problema:

Defectuoso análisis de diseño de los cojinetes de contacto plano del Compresor 2BM10-50/8 provocando desgaste de la dimensión del cigüeñal por fricción durante los trabajos.

Objeto de investigación:

Equipo Compresor 2BM10-50/8.

Objetivo General:

Analizar los cojinetes de contacto plano del Compresor 2BM10-50/8 para evitar el desgaste del cigüeñal durante el funcionamiento del equipo.

Campo de Acción:

Análisis de diseño de los metales de los cojinetes de contacto plano del Compresor 2BM10-50/8.

Hipótesis:

Si se realiza el diseño de los cojinetes de contacto plano del Compresor 2BM10-50/8 en correspondencia al funcionamiento del equipo, entonces se disminuirá el desgaste por fricción que ocurre en el cigüeñal, por tanto se mejorara la explotación del equipo durante los trabajos de generación.

Objetivos específicos:

- Caracterizar el equipamiento para conocer los regímenes de explotación.
- Analizar los parámetros actuales de diseño que presenta el equipo para la fundamentación del diseño a partir de las condiciones de explotación.
- Analizar el diseño de los cojinetes de contacto plano del Compresor para disminuir el desgaste por fricción en el cigüeñal.



Tareas de Investigación:

- Fundamentación teórica de la instalación.
- Descripción de los parámetros técnicos-productivos del Compresor.
- Descripción de la metodología de cálculo para la realización del diseño
- Determinación de los parámetros para el diseño
- Realización de simulación por el método de elemento finito para comprobar los parámetros de diseño.
- Valoración de los resultados.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO

1.1. Introducción

Las máquinas en general son aparatos poderosos de que se sirve el hombre para la producción, en los cuales están previamente calculados los efectos de las fuerzas de potencia, roce, peso y resistencia, así como sus movimientos, teniendo como fin la utilización de las fuerzas de la naturaleza, para modificarlas, transformarlas, transmitir las y gastarlas con la debida oportunidad y la conveniente celeridad, a fin de que den el resultado apetecido, pues aunque carecen de voluntad, de inteligencia y de destreza, funcionan con mayor ajuste, regularidad y precisión que el más despejado obrero (Céspedes, 2013).

Estos aparatos, si bien tienen movimientos constantes, circunscritos y regulados por sus piezas, y si bien no piensan, juzgan y deliberan en sus procedimientos, el hombre los impulsa, los dirige y las adapta a sus fines productores, en calidad de auxiliarse de su trabajo (Larrazabal, 2013).

Este capítulo tiene como objetivo: Establecer el marco teórico de la investigación, respecto a las particularidades de los cojinetes de deslizamiento, con influencia de los lubricantes en la correcta explotación de dichos elementos, a partir de la sistematización del conocimiento de la bibliografía consultada.

1.2. Generalidades sobre los Compresores

Los compresores son máquinas que tienen por finalidad aportar una energía a los fluidos compresibles (gases y vapores) sobre los que operan, para hacerlos fluir aumentando al mismo tiempo su presión. Existen en la Termoeléctrica de la Fábrica Comandante Ernesto Che Guevara tres compresores de pistón 2BM10-50/8 de fabricación soviética que poseen dos etapas de compresión con enfriamiento de aire intermedio. El aire para la compresión es succionado mediante una toma a la atmósfera común para los tres compresores desde la cual el aire succionado pasa a una tubería colectora (Catálogo de Compresores).

Existen en la Termoeléctrica de la Fábrica Comandante Ernesto Che Guevara tres

compresores de pistón 2BM10-50/8 de fabricación soviética que poseen dos etapas de compresión con enfriamiento de aire intermedio. El aire para la compresión es succionado mediante una toma a la atmósfera común para los tres compresores desde la cual el aire succionado pasa a una tubería colectora.

1.3. Principio de Funcionamiento de los Compresores

Los compresores son máquinas de desplazamiento positivo en las cuales sucesivas cantidades de gas quedan atrapadas dentro de un espacio cerrado y, mediante un pistón, se eleva su presión hasta que se llega a un valor de la misma que consigue abrirlas válvulas de descarga.

El elemento básico de compresión de los compresores consiste en un sólo cilindro en el que una sola cara del pistón es la que actúa sobre el gas (simple efecto).

Existen unidades en las que la compresión se lleva a cabo con las dos caras del pistón (doble acción), actuando de la misma forma que si tuviéramos dos elementos básicos de simple efecto trabajando en paralelo dentro de una misma carcasa.

En el diagrama que presentamos a continuación podemos estudiar el funcionamiento básico interno de este tipo de compresores. El ciclo de trabajo del compresor se divide en cuatro etapas que son las que se reflejan en el gráfico:

A) Comienzo de la compresión. El cilindro se encuentra lleno de gas.

B) Etapa de compresión. El pistón actúa sobre la masa de gas reduciendo su volumen original con un aumento paralelo de la presión del mismo. Las válvulas del cilindro permanecen cerradas.

C) Etapa de expulsión. Justo antes de completar la carrera de compresión la válvula de descarga se abre (2). El gas comprimido sale del cilindro, debido a su propia presión, a través de la válvula de descarga. Antes de alcanzar el final de carrera (3) la válvula de descarga se cierra dejando el espacio libre del cilindro lleno de gas a la presión de descarga.

D) Etapa de expansión. Durante esta etapa tanto la válvula de descarga como la de entrada permanecen cerradas.

Un **compresor** es una máquina de fluido que está construida para aumentar la presión y desplazar cierto tipo de fluidos llamados compresibles, tal como lo son los gases y los vapores. Esto se realiza a través de un intercambio de energía entre la máquina y el fluido en el cual el trabajo ejercido por el compresor es transferido a la sustancia que pasa por él convirtiéndose en energía de flujo, aumentando su presión y energía cinética impulsándola a fluir.

Al igual que las bombas, los compresores también desplazan fluidos, pero a diferencia de las primeras que son máquinas hidráulicas, éstos son máquinas térmicas, ya que su fluido de trabajo es compresible, sufre un cambio apreciable de densidad y, generalmente, también de temperatura; a diferencia de los ventiladores y los sopladores, los cuales impulsan fluidos compresibles, pero no aumentan su presión, densidad o temperatura de manera considerable.

1.4. Reseña Histórica de los cojinetes de contacto plano

Según Franke, (2009) inventor del rodamiento antifricción en 1934, lo hizo con 2 objetivos, conseguir mover grandes cargas y ser muy flexible.

Desde la antigüedad el hombre se ha preocupado por la pérdida de potencia en las máquinas y el desgaste de las piezas en movimiento relativo. Pero aún hoy, en la actualidad, la investigación de estos fenómenos por su complejidad multifactorial tiene gran vigencia. En el presente trabajo nos proponemos abordar el estudio de los cojinetes de deslizamiento o de contacto plano, como elementos de máquinas que se emplean para guiar árboles y ejes, permitiendo que giren las piezas libremente y soportando las cargas que actúan sobre éstos. A diferencia de los cojinetes de rodamiento, que trabajan con fricción por rodadura, los cojinetes de contacto plano trabajan con fricción por deslizamiento. Por eso las pérdidas por fricción para los cojinetes de deslizamiento, que trabajan con frecuentes arranques y paradas o en régimen de lubricación límite o semi-límite, son mayores que las de los rodamientos. No obstante, el inconveniente asociado con las pérdidas por rozamiento, el campo de aplicación de los cojinetes de deslizamiento es amplio

Ellos pueden ser empleados:

- Para guiar árboles con elevada precisión
- En máquinas con vibraciones, fuertes sacudidas o golpes, como las prensas.
- Para trabajar en medios agresivos, por ejemplo, el agua salada.
- Donde no puedan existir elementos contaminantes, como la industria farmacéutica o la industria de alimentos
- En apoyos de árboles acodados, ej. los cigüeñales
- En árboles rápidos, ya que la vida útil de estos cojinetes no depende totalmente del número de ciclos de carga
- En árboles extra pesados, donde colocar un rodamiento sería caro, ya que debe fabricarse a pedido
- Para mecanismos de marcha lenta y poca Responsabilidad
- En montajes con dimensiones diametrales muy pequeñas.

Debe ser señalado que, con relación a los rodamientos, los cojinetes de deslizamiento necesitan mayores dimensiones longitudinales para lograr capacidades de carga semejantes. Además, los cojinetes de deslizamiento presentan aumentos progresivos de las holguras debido al desgaste por lo que requieren de un cuidadoso diseño y en ocasiones de complejos sistemas de lubricación, para garantizar un correcto funcionamiento.

Los cojinetes de rodadura (**González, 2004**) posiblemente sean las piezas más normalizadas a escala internacional, lo que no ocurre con los cojinetes de deslizamiento, que por su sencillez pueden no ser fabricados de forma centralizada, sin embargo en el mundo existen firmas dedicadas a la construcción y comercialización de cojinetes lisos. Muchos de los fabricantes prestigiosos de rodamientos se dedican también a la construcción y venta de cojinetes planos, ya sean enterizos, ranurados, partidos o de configuraciones complejas, hechos de materiales apropiados para los más variados usos, como la industria automotriz, las construcciones navales, los ferrocarriles, los equipos electrodomésticos, médicos y de la construcción o de la industria en general.

1.5. Clasificación de los cojinetes de contacto plano

Los cojinetes de deslizamiento pueden clasificarse para su estudio, atendiendo a diferentes criterios: dirección de las cargas, condiciones de lubricación, forma, relación longitud - diámetro y tipo de rozamiento, entre otros aspectos. A continuación, le presentamos los dos criterios de clasificación fundamentales:

1.5.1 Clasificación según la dirección en que soportan las cargas:

- Radiales
- Axiales
- Radio-axiales

1.5.2 Según las condiciones de lubricación:

- **Hidrodinámica:** las superficies del cojinete y el árbol están separadas totalmente por una cuña de lubricante que se forma debido al movimiento relativo entre ambas superficies, y depende de las características del movimiento, de la magnitud y dirección de la carga en el cojinete y de las propiedades del lubricante empleado.
- **Hidroestática:** se logra la separación de las superficies garantizando un suministro lubricante a presión en la zona de contacto
- **Límite:** se produce el contacto entre las crestas o superficies del cojinete y el muñón en la zona de contacto.

1.6. Generalidades del diseño de los apoyos y cojinetes de contacto plano

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 árboles 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.

1.6.1. Cojinetes de fricción seca

En los rodamientos con fricción seca se utilizan materiales de baja fricción y combinaciones. A veces también los hay autolubrificante (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.

1.6.2. 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.

1.6.3. 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.

1.6.4. Características generales de los cojinetes de fricción

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 contacto plano 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, 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 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, 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 Jójavaj (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.

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, y proporcionan puntos de apoyo para mantener el eje o árbol girando en ese lugar.

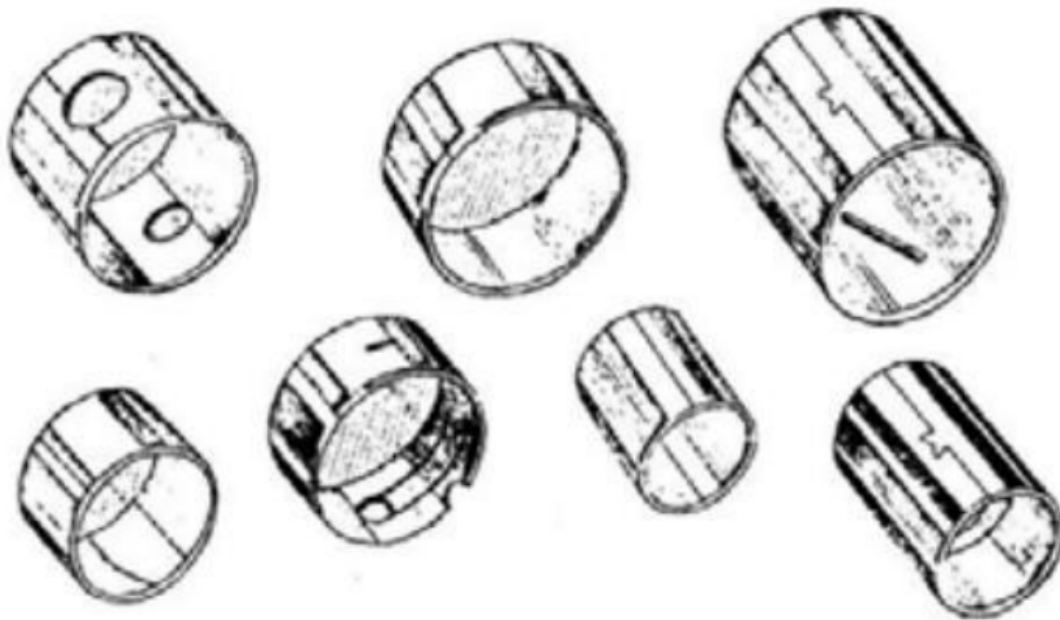


Figura 1.1. Cojinetes típicos del árbol. (Melo et al., 1983)

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 Compresores.

1.7. Materiales babbitt

El metal babbitt o metal de cojinete, es una de las distintas aleaciones utilizadas para la superficie de apoyo en un cojinete de contacto plano. El original de metal Babbitt fue inventado en 1839 por Isaac Babbitt (Hellemans, 1988) en Taunton,

Massachusetts, EE.UU. Más tarde se desarrollaron otras composiciones (la formulación exacta de Isaac Babbitt no se conoce con certeza). Es preferible al término "metal blanco", que también se refiere al metal de cojinete, porque "metal blanco" es un término ambiguo con significado polisémico.

El metal Babbitt de acuerdo con Dionisio (2003) se emplea habitualmente como una capa superficial fina en un complejo, una estructura multi-metal, pero su uso original se realizaba la colada en lugar del material de cojinete. El metal babbitt se caracteriza por su resistencia a la corrosión por frotamiento, es blando y se daña fácilmente, lo que sugiere que podría no ser adecuado para un cojinete de contacto plano. Sin embargo, su estructura está hecho de pequeños cristales duros dispersados en un metal más blando, lo que hace que sea un compuesto de matriz metálica.

Según Rivas *et al.* (2006), como el metal babbitt es un término genérico que se usa para designar la aleación antifricción de bajo punto de fusión (como la relacionada anteriormente), se funden como superficies de cojinete o apoyo en tapas o respaldos de acero, bronce o hierro fundido. El babbitt es uno de los metales denominados como antifricción cuyas aleaciones principales son estaño, plomo, antimonio y cobre. Existen 2 tipos de metales babbitt; el primero tiene base de estaño con más de un 50 % de este material y presenta buena adherencia sobre una base de hierro y tienen buena dureza en temperatura ambiente. El segundo tipo, es a base de plomo y también posee más del 50 % de este material.

Según Dobrovolski (1978) y Reshetov (1987), los materiales para cojinetes que se emplean con más frecuencia se citan a continuación junto con sus propiedades más destacadas.

1. Metal blanco: Expresión que se emplea para designar cualquier material que consta de un metal blando en el que se incrustan pequeñas esferas de un compuesto duro, estas esferas comunican a dicho material una elevada resistencia al desgaste, mientras que el metal blando cede y se extiende con facilidad para ofrecer una superficie de trabajo. El principal inconveniente de los materiales blancos es su

resistencia a la fatiga y capacidad de soporte de carga relativamente bajas, ambas propiedades disminuyen rápidamente al aumentar la temperatura. Los revestimientos de metal blanco de base de plomo y estaño de un espesor apreciable (superior a 0,4 mm), pueden emplearse con cargas de hasta 350 MPa y velocidades tangenciales de 150 m/min y temperaturas de 100 °C como máximo en la superficie del cojinete. Las propiedades de resistencias de las capas muy finas de metal blanco, en el orden de 0,025 a 0,125 mm, son bastantes distintos a la de los revestimientos más gruesos.

2. Metales blancos de base estaño o babbitt: El metal babbitt se emplea habitualmente como una capa superficial fina en un complejo, una estructura multimetal, su uso original se realizaba la colada en lugar del material del cojinete, este se caracteriza por su resistencia a la corrosión por frotamiento. Cuando el cojinete se desgasta, el metal más blando se erosiona tanto, que crea rutas para el lubricante entre los puntos duros que proporcionan la superficie de apoyo real (GOST 1320 - 74, 1975). Cuando el estaño se utiliza como el metal más suave, la fricción hace que este se funda y funcione como un lubricante, que protege el cojinete contra el desgaste cuando otros lubricantes están ausentes (Reshetov, 1987).

Estos materiales dan un excelente rendimiento, funcionan satisfactoriamente con un árbol de acero blando y ofrecen una buena resistencia a la corrosión. Sus buenas propiedades pueden atribuirse a que están compuestos por esferillas duras incrustadas en una matriz blanda y plástica, su mayor desventaja es la reducida resistencia a la fatiga, especialmente cuando el espesor del revestimiento del cojinete es de 0,4 mm o más, por otra parte, el estaño es un metal caro y frecuentemente escasea. Si el contenido de plomo de la aleación suele ser del 0,5 % como máximo, fuese superior al 3,5 %, ello puede dar lugar a algunos inconvenientes, si el contenido de plomo alcanza esta proporción, la aleación se vuelve tan blanda que puede desgastarse rápidamente al entrar en servicio. A continuación se muestra la Tabla 1.1, donde se exponen las diferentes marcas de material babbitt en función de parámetros de trabajo (presión, velocidad tangencial, temperatura, tensión de trabajo).

Tabla 1.1. Condiciones de empleo de los metales babbitt

Marca del Babbitt	Presión específica P (MPa)	Velocidad Tangencial v (m/s)	Tensión de trabajo P·v (MPa · m/s)	Temperatura de trabajo t (°C)
B88	19,61 - 14,71	50	73,55	75
B83	14,71 – 9,80	50	73,55 – 49,03	70
B83C	14,71 - 49,03	50	73,55 - 49,03	70
B16	9,80	30	29,41	70
BH	9,80 – 7,45	30	29,41 – 19,61	70
BC6	14,71	-	-	70

Fuente (Comas, 2011)

1.7.1. Características del Babbitt

De acuerdo con la estructura obtenida en la misma, es la encargada de garantizar la resistencia al par tribológico, pero cuando el cojinete se desgasta, el metal más blando se erosiona tanto que crea rutas para el lubricante entre los puntos duros que proporcionan la superficie de apoyo real. Cuando el estaño se utiliza como el metal más suave, la fricción hace que este se funda y funciona como un lubricante, que protege el cojinete contra el desgaste cuando otros lubricantes están ausentes.

Microestructuralmente, las aleaciones antifricción están formadas por un constituyente de granos duros que está englobado en la masa plástica formada por el otro constituyente. El constituyente duro resiste el desgaste con un coeficiente de rozamiento reducido y el constituyente blando permite el ajuste automático del cojinete al eje y asegura un reparto equitativo de las cargas, además, debe tener la capacidad de adherir a él partículas extrañas (polvo y suciedad del aceite) y soltar su lubricación, para que no produzca el desgaste natural de la matriz blanda.

En la actualidad existen muchas aleaciones babbitt. Algunas composiciones comunes son:

- 90 % estaño, 10 % cobre
- 89 % estaño, 7 % antimonio, 4 % cobre
- 80 % plomo, 15 % antimonio, 5 % estaño

- 76 % cobre, 24 % plomo
- 75 % plomo, 10 % estaño
- 67 % cobre, 28 % estaño, 5 % plomo

1.7.2. Clasificación de los metales Babbitt

Las principales aleaciones de metales blancos que aparecen en la tabla (metales Babbitt) preparadas a base de estaño y plomo se usan así:

Babbitt No. 1. Para cojinetes de motores de combustión interna. Es plástica y no se agrieta, pero debe usarse una capa delgada vaciada sobre un respaldo de bronce o acero.

Babbitt No.2. Contiene más antimonio siendo un poco más duradero presenta menos probabilidades de formar rebordes.

Babbitt No.3. Es una aleación más dura siendo la de mejor comportamiento cuando se ha asentado, no debe usarse para ejes de acero dulce.

Babbitt No.4. Es un metal antifricción para usos generales en maquinaria, el precio es económico.

Las aleaciones número 5 y 6 contienen mayor porcentaje de plomo, por lo tanto, no son recomendadas para trabajar como cojinetes en donde se eleve demasiado la temperatura.

Las aleaciones del No.7 al No.12 son todas en base de plomo siendo los metales antifricción más barato su aplicación es para servicio ligero y velocidades medias.

Los metales antifricción a base de cadmio tienen aplicación similar a la aleación cobre - plomo para servicio en motores de combustión interna con la ventaja que retienen más propiedades antifricción hasta temperaturas más altas, pero son más costosos.

Los metales antifricción base estaño (Sb) tienen poca adherencia sobre la base de hierro y tiene menor dureza en temperatura ambiente, pero conforme se eleva su temperatura el descenso de sus propiedades físicas no es tan acentuado como el

que tiene base de estaño.

Muchas de las aleaciones a base de estaño y a base de plomo pueden reemplazarse unas por otras, cuidando que las de base de estaño tienen mejor resistencia a la corrosión de los aceites ácidos. Se conocen como aleaciones o metales antifricción determinadas aleaciones más o menos complejas, empleadas para revestir cojinetes a los que se le proporciona cualidades muy superiores a las de metal base. Los metales comúnmente más usados en las aleaciones antifricción son: el estaño, plomo, cobre y antimonio.

Los motores de combustión interna utilizan el metal babbitt principalmente a base de estaño ya que puede soportar una carga cíclica. A base de plomo tiende a endurecerse y desarrollar grietas al trabajar, pero es adecuado para ser mecanizado con herramientas tales como tornos o sierras.

Los materiales babbitt se emplean preferencialmente de los broncees para que puedan servir de apoyo a árboles o ejes que giran a altas velocidades. Presentan excelente capacidad de penetración y muy buena condición de confortabilidad.

1.7.3. El babbitt en el campo industrial

Como elementos mecánicos que permiten el libre movimiento entre piezas fijas y móviles, los cojinetes antifricción son esenciales para la maquinaria: sostienen o guían sus piezas móviles y reducen al mínimo la fricción y el desgaste. La fricción consume energía inútilmente y el desgaste altera las dimensiones y el ajuste de las piezas hasta la inutilización de la máquina (Takemoto y Takemoto, 2004). Durante muchas décadas han servido de pauta y comparación para establecer la calidad de otros materiales para cojinetes.

Alrededor de 1930 empezaron a realizarse algunos progresos importantes en el campo de los metales para antifricción. En un solo cojinete se combinan hoy distintas composiciones que constituyen algunos de los sistemas más logrados. Este paso viene determinado por la teoría de la fricción, ampliamente aceptada, que dice que la sustancia ideal para cojinetes debe tener cierta dureza y resistencia, pero también una superficie blanda fácilmente deformable.

El hierro fundido es uno de los materiales más antiguos para cojinetes. En la antigüedad ya se utilizaba en la India y en China. Con el advenimiento de maquinaria más compleja en la evolución industrial, el hierro fundido llegó a ser un material corriente para cojinete y todavía se utiliza cuando se destina a un uso relativamente ligero.

Investigaciones recientes en ciertos campos han demostrado, aunque parezca extraño, que materiales muy duros pueden tener características adecuadas para cojinetes en aplicaciones especiales. Se utilizan materiales como stellite, carboly, colmonoy, hastelloy y alundum, a causa de su dureza, estos cojinetes deben ser extremadamente suaves y su geometría perfecta, pues existen pocas posibilidades de que se corrijan faltas de alineación por desgaste.

En muchas piezas para la construcción de maquinarias se emplean ampliamente aleaciones de deslizamiento, en particular los babbitt. Por sus propiedades antifricción los babbitt superan a todas las restantes aleaciones de deslizamiento, pero las afectan significativamente su resistencia a la fatiga, lo cual influye en la capacidad de trabajo general de los cojinetes (Chichinadze *et al.*, 2003). Los babbitt poseen baja dureza (13 – 32 HB), tienen temperatura de fusión no muy alta (240 – 320 0C), elevada capacidad de reblandecimiento (9 - 24 HB a 100 0C), se pueden procesar de forma excelente y constituyen un compensador muy particular de diferente género de imprecisiones del tratamiento de la capa antifricción y de montaje de los cojinetes.

El mejor conjunto de propiedades antifricción las poseen los babbitt en base a estaño (B88, B83, B83S). Debido a su alto contenido de estaño, elemento que permanece caro, los mismos se usan preferentemente para cojinetes de alta responsabilidad, empleados en turbinas de vapor, piezas, ejes de distribución de motores de baja potencia, compresores, que trabajan a grandes velocidades y sometidos a altas cargas (Arzamasov *et al.*, 1990 y Kazanski *et al.*, 2004).

1.7.4. 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 1.2 se expone la composición química de algunas de estas aleaciones de babbitt que se rigen por la norma ASTM B23.

Tabla 1.2. Aleaciones babbitt base estaño y base plomo

Aleación	Base	Composición química (%)				Límite elástico (Mpa) a 20 °C	Dureza (HB)	
		Sn	Sb	Pb	Cu		20 °C	100 °C
Tecnofric101	Sn	90-92	4-5	0,35	4-5	16,9	17,0	8,0
Tecnofric102	Sn	88-90	7-8	0,35	3-4	23,1	24,5	12,0
Tecnofric103	Sn	83-85	7,5-8,5	0,35	7,5-8,5	36,9	27,0	14,5
Tecnofric107	Sn	9,3-10,7	14-16	72-75,5	0,50	17,2	22,5	10,5
Tecnofric108	Sn	4,5-5,5	14-16	77-80	0,50	18,3	20,0	9,5

Fuente: (Comas, 2011)

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 1.3. 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	$6 \pm 0,5$	0,55
B - 88	88 ± 1	$8,5 \pm 0,5$	$3.5 \pm 0,5$	0,51

Fuente: (Comas, 2011)

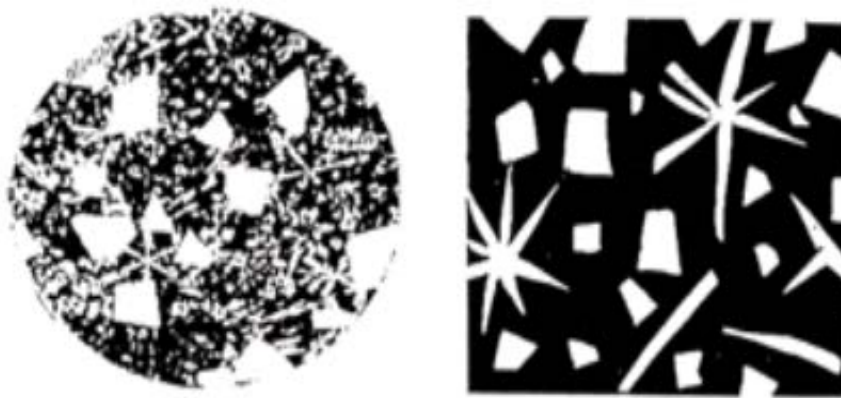


Figura 1.2. Estructura cristalina del Babbitt B 83. (Efremov, 1976)

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.

1.7.5. 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 sólida 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

1.8. Conclusiones del Capítulo I

- La bibliografía consultada es extensa en cuanto a los cojinetes de contacto plano, define las principales aplicaciones, forma de construcción y de explotación de estos, en la rama de la industria moderna.
- La correcta selección de un aceite lubricante, depende de varios factores, de ahí, se deduce el análisis de las propiedades y características particulares de estos, en la lubricación de los más diversos pares tribológicos.
- En los trabajos referentes a los Compresores 2BM10-50/8, no hacen referenciar el diseño de los cojinetes de contacto plano de estos, ni al mantenimiento de equipos.

Capítulo II. Materiales y Métodos utilizados en la investigación

2.1. Introducción

Toda máquina, según su tamaño y complejidad de estructura, consta de cierto número de unidades de montaje, es decir conjunto de elementos (piezas). El desarrollo de las estructuras de las piezas está indisolublemente vinculado con el desarrollo técnico de los aparatos en general, el nivel de producción de máquinas y su perfeccionamiento son un índice convincente del desarrollo industrial de un país. Los equipos se perfeccionan continuamente de acuerdo con las nuevas exigencias que imponen las condiciones de explotación y producción, al igual que las nuevas posibilidades que se abren con el desarrollo de la ciencia, con la aparición de nuevos materiales, así como con los nuevos procedimientos de dar a estos una forma conveniente y las propiedades requeridas (Reshetov, 1987).

Este capítulo tiene como objetivo: Establecer el análisis microestructural del material babbitt que se utilizará, la metodología para efectuar el análisis técnico - funcional de los cojinetes de contacto plano de los Compresores 2BM10-50/8 de la Termoeléctrica de la Empresa Ernesto Che Guevara, la simulación por el método de elementos finitos.

2.2. Características técnicas del Compresor 2bm10-50/8

- Tiene una presión de trabajo de 8 atm.
- Trabaja con una capacidad de 3000 m³/h.
- Tiene 2 pistones.
- Fabrica 50 m³ de aire por minuto con 8 Kgf/cm².

2.2.1. Análisis microestructural:

Para la observación se empleó un microscopio óptico binocular marca Novel NJF – 120A ubicado en el laboratorio de ciencias de los materiales en el ISMMM de Moa, este está dotado con un portaobjetos giratorio e iluminador. La observación se realiza empleando distintas combinaciones de objetivo y ocular para obtener las imágenes más precisas. La observación de cada superficie a analizar es necesario fotografiarla

para procesar la información y para esto se utilizó una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. En la figura 2.1 se puede observar la estructura metalográfica patrón del babbitt 583.

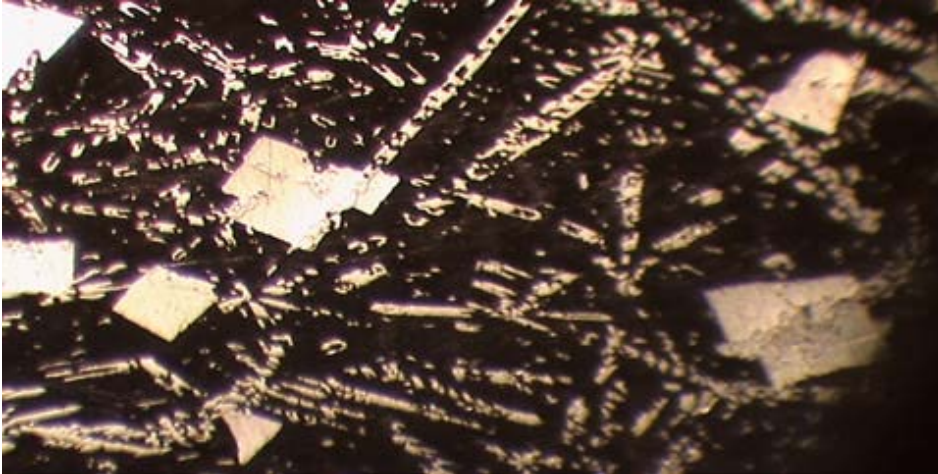


Figura 2.1. Estructura patrón del Babbitt 583 (40X)

En la figura 2.2, se observa la imagen del microscopio empleado en la observación de las muestras.



Figura 2.2. Microscopio Óptico NOVEL modelo NIM-100.

2.2.2. Lubricación

La lubricación de un cojinete 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 induce a 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, pues 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.

Si el cojinete trabaja en régimen hidrodinámico con lubricación perfecta, la fricción aumenta ligeramente al aumentar la velocidad de rotación del conjunto; cuando el cojinete arranca o para, es inevitable encontrarse con situaciones en las que hay 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, estas aleaciones tienen bajo punto de fusión, así que podemos evitar 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.

En resumen, la conformabilidad de las aleaciones Babbitt permite a la carga repartirse 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.

2.3. Coeficiente de fricción

El coeficiente de fricción para las condiciones de diseño que se analizan, debe ser mínimo, y esto se logra aplicando un procedimiento que vincule las variables de entrada y de trabajo necesarias que garantice un resultado satisfactorio, el modo de cálculo para efectuar dicha determinación, es similar al realizado en el análisis de enfriamiento de chumaceras tomando como base, la Figura 2.7 en función del número de Sommerfeld y la longitud relativa del muñón, logrando de esta manera, el valor correspondiente a la variable de coeficiente de fricción y por tanto, aplicando la expresión 1.38 en función del parámetro de variable de coeficiente de fricción anteriormente calculado, se obtiene como resultado el coeficiente de fricción entre las superficies de trabajo para las condiciones de funcionamiento esperadas.

$$f = \frac{f\left(\frac{R}{Cr}\right)}{\frac{R}{Cr}} \quad (2.1)$$

Dónde:

f- coeficiente de fricción; adimensional.

$f\left(\frac{R}{Cr}\right)$ - variable de coeficiente de fricción; adimensional.

$\frac{R}{Cr}$ - relación entre el radio del cigüeñal y holgura radial; adimensional.

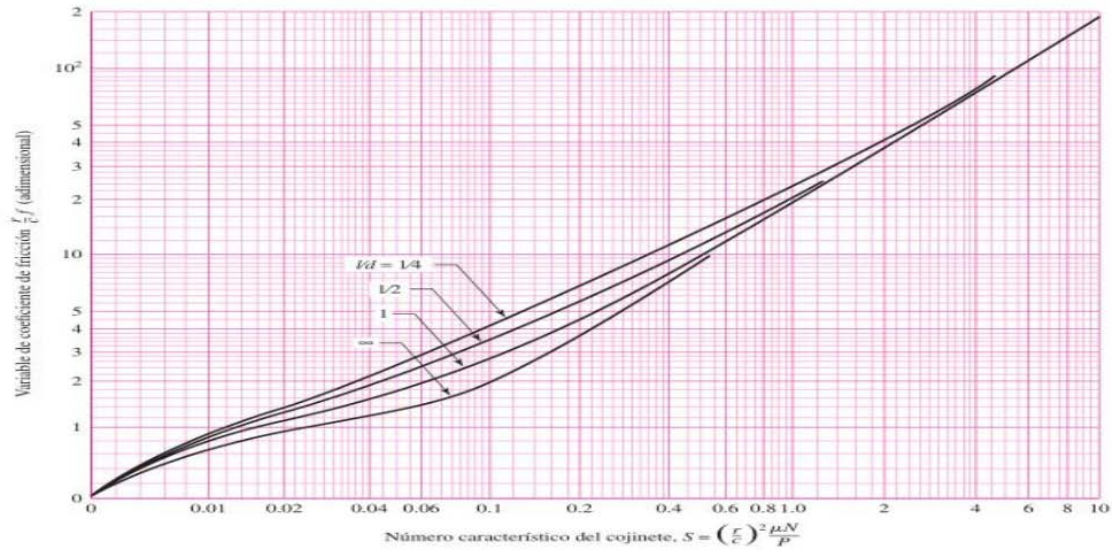


Figura 2.3. Variable de coeficiente de fricción en función del número de Sommerfeld (Fuente: Budynas, 2008).

2.4. Material adecuado para la construcción de los cojinetes

Además de considerar individualmente la presión nominal del cojinete y la velocidad tangencial que se experimenta en la superficie de este, el producto de ambos factores es un parámetro importante de funcionamiento para diseñar cojinetes. El valor del producto de dichos elementos, es una medida de la capacidad del material en el cojinete para tomar la energía de fricción que se genera en dicho elemento (Mott, 2006). Durante los arranques y las paradas, existe contacto entre las superficies del árbol y del cojinete, resulta necesario garantizar la resistencia de este último al agarramiento (Dobrovolski, 1978), lo cual puede lograrse si se garantiza el cumplimiento de la siguiente expresión:

$$\frac{F \cdot n}{19100} \leq [p \cdot v] \quad (2.2)$$

Dónde:

F- fuerza aplicada sobre el cojinete de contacto plano; N.

n- número máximo de revoluciones que experimenta el cigüeñal; m/s.

$[p \cdot v]$ - factor admisible de materiales antifricción; MPa · m/s.

El numerador de la expresión mostrada, representa una unidad de potencia o energía transferida por unidad de tiempo; el denominador representa el área y por consiguiente, se puede pensar que el factor admisible de materiales antifricción es la tasa de entrada de energía al cojinete por unidad de área proyectada del mismo, si el coeficiente de fricción es aproximadamente uno, naturalmente, el coeficiente real de fricción es mucho menos que uno en el caso normal (Dobrovolski, 1978), entonces se puede decir que dicho factor es una medida comparativa de la capacidad que tienen los cojinetes para absorber energía sin sobrecalentarse.

2.5. Rugosidad superficial para cada superficie

Un muñón rectificado, con promedio de rugosidad superficial de 0,4 a 0,8 μm , se recomienda para cojinetes de buena calidad (Quijorna, 2007). El cojinete debe tener igual lisura o fabricarse con uno de los materiales más suaves, para que con un asentamiento inicial se puedan alisar los puntos altos, formando un buen ajuste entre el cojinete y el muñón (Faires, 2002). En equipos de gran precisión, se pueden usar el pulido o lapeado, para producir un acabado superficial del orden de 0,2 a 0,4 μm (Mott, 2006).

2.6. Enfriamiento del cojinete

Durante la explotación del cojinete de contacto plano, ocurre un incremento de temperatura debido a las fuerzas de rozamiento que ocurren entre las superficies de trabajo. El flujo de calor, producido por la fricción en el cojinete, es disipado a través de la chumacera al medio ambiente y por el lubricante que emerge del cojinete (NC ISO 7902, 2009). En la práctica, uno u otro de los dos tipos de dispersión de calor domina; en la etapa de diseño se desprecia uno, obteniéndose un margen de seguridad adicional, por tanto, se asume lo siguiente:

- Cojinetes lubricados sin presión (por ejemplo la lubricación de anillo) disipa el calor principalmente por convección al medio ambiente.
- Cojinetes lubricados por presión, el calor se disipa principalmente a través del

lubricante.

Para tal fin, se hace necesario analizar el comportamiento de dichos elementos mecánicos en función del parámetro temperatura, prácticamente, esto se basa en la determinación de factores importantes de diseño (viscosidad dinámica, espesor mínimo de la película de lubricante y coeficiente de fricción). Según las condiciones tomadas anteriormente, se empezará verificando si la disipación de calor de la chumacera por convección es factible, para tal caso, se toma como base la temperatura inicial del cojinete que debe posesionarse dentro de los límites correspondientes de funcionamiento (40 – 60 °C) según Dobrovolski (1978) y seguidamente, se determinan los parámetros fundamentales para tal análisis, donde se incluye la temperatura inicial real del cojinete; esta debe ser menor que la asumida para realizar el procedimiento anteriormente descrito.

2.7. Cálculo del espesor mínimo de la película del lubricante

Es conveniente determinar la película de aceite, que se formará según las rugosidades del conjunto árbol-cojinete:

$$h_{min} = \xi (R_{z1} + R_{z2} + Y_{piv}); \mu m \quad (2.3)$$

R_{z1} ; R_{z2} .- rugosidades del árbol y del cojinete respectivamente; mm

Estos parámetros se deben establecer preliminarmente según el tipo de ajuste a analizar.

ξ .- coeficiente de seguridad para las condiciones de explotación se debe escoger entre:

$$1,2 \leq \xi \leq 1,5$$

2.7.1. Cálculo de la deflexión máxima que ocurrirá en el cojinete:

$$Y_{piv} = 1,6 \frac{l_{coj}}{L} Y_{arb} \quad (2.4)$$

Donde

L.- longitud del árbol entre apoyos; mm

l_{coj} .- longitud o ancho del cojinete; mm

Y_{arb} .- deflexión máxima permisible del árbol; mm

En el caso de cojinetes autoalineantes $Y_{piv} = 0$

2.7.2. Cálculo de la excentricidad relativa:

La excentricidad relativa se calcula por la ecuación:

$$\chi = 1 - \frac{2 \cdot h_{\min}}{d \cdot \psi} \quad (2.5)$$

Dónde:

ψ .- holgura relativa

Este parámetro se calcula:

$$\psi = \frac{2 \cdot \delta}{d} \quad (2.6)$$

Siendo:

δ .- holgura diametral

Como inicialmente se desconoce la holgura algunos autores la recomiendan tomar:

$(0,0003 \leq \psi \leq 0,005)$, en cambio sí se conoce la velocidad circunferencial del árbol:

$$\psi = 0,8 \cdot v^{0,25} \quad (2.7)$$

v.- velocidad tangencial:

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{6 \cdot 10^4} \quad [\text{m/s}] \quad (2.8)$$

d.- diámetro nominal del muñón de apoyo

n.- número de revoluciones; rev/min

Se debe tener en cuenta que h_{min} debe estar en mm

Se determina el criterio de la carga

Para diseñar un cojinete, este es uno de los parámetros esenciales que caracteriza el comportamiento ante las cargas y se determina por la siguiente expresión:

$$\phi = 19,11 \left[\frac{p \cdot \psi^2}{\mu \cdot n} \right] \quad (2.9)$$

En esta ecuación se relacionan las características del cojinete con la carga que el mismo puede soportar y con la viscosidad del aceite requerida para el trabajo.

Se determina por la tabla 2 el valor del criterio de carga, el que depende de la excentricidad relativa y de la relación longitud de contacto diámetro nominal, a saber:

$$\frac{l_{coj}}{d} \quad (\text{se debe tener en cuenta que el valor de la excentricidad no aparece en su valor exacto por lo que se debe interpolar para encontrarlo}) \quad (2.10)$$

Tabla 2.2. Criterio de carga en dependencia de la relación geométrica y la excentricidad relativa

Criterio de la carga $\Phi = \frac{19,11 p \psi^2}{\mu n}$														
$\frac{l}{d}$	Valores de Φ para χ													
	0,33	0,4	0,5	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,83	0,9	0,925	0,95	0,975	0,99
1,5	1,37	1,76	2,47	3,50	4,16	5,10	6,42	8,32	10,3	17,9	23,8	37,3	76,7	196,4
1,3	1,20	1,55	2,20	3,17	3,80	4,68	5,96	7,79	9,68	17,2	22,9	36,2	75,2	193,9
1,2	1,11	1,43	2,05	2,97	3,58	4,44	5,68	7,47	9,30	16,66	22,34	35,4	74,1	192,0
1,1	1,00	1,30	1,89	2,75	3,33	4,15	5,34	7,08	8,86	16,00	21,6	35,4	82,7	190,0
1,0	0,896	1,17	1,70	2,51	3,05	3,83	4,96	6,61	8,35	15,31	20,7	33,4	71,1	187,0
0,9	0,781	1,03	1,51	2,24	2,75	3,47	4,54	6,10	7,75	14,43	19,74	32,0	68,95	183,4
0,8	0,662	0,874	1,30	1,95	2,40	3,06	4,03	5,48	7,02	13,35	18,40	30,20	66,10	178,7
0,7	0,540	0,716	1,07	1,64	2,03	2,61	3,47	4,78	6,18	12,00	16,80	27,85	66,20	171,8
0,6	0,421	0,562	0,85	1,31	1,64	2,13	2,87	3,98	5,21	10,42	14,75	24,95	57,30	162,5
0,5	0,310	0,416	0,636	0,99	1,25	1,64	2,22	3,15	4,16	8,52	12,33	21,28	50,60	149,0
0,4	0,208	0,281	0,433	0,705	0,867	1,14	1,57	2,26	3,02	6,43	9,55	16,72	41,65	129,4

2.8. Cálculo del parámetro que considera las propiedades del lubricante:

$$A_o = \frac{t_{med} - t_{ent}}{\mu} = 6 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\phi \cdot f}{\psi} \cdot \frac{n}{\frac{Q}{\psi \cdot v \cdot l_{coj} \cdot d} + \frac{\Pi}{\psi \cdot v}} \cdot \frac{1}{19,11 \cdot \psi^2} \quad (2.11)$$

Siendo

Q .- caudal de aceite para garantizar las condiciones de trabajo; m³/s

μ .- viscosidad cinemática del lubricante; Pa·s

Si se emplean aceites de la norma GOST, se determina por la figura 2, según el ángulo del parámetro del lubricante, para lo que:

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{A_o}{10^4} \right] \quad (\text{Gráfico de la figura 2a}) \quad (2.12)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{A_o}{10^3} \right] \quad (\text{Gráfico de la figura 2b}) \quad (2.13)$$

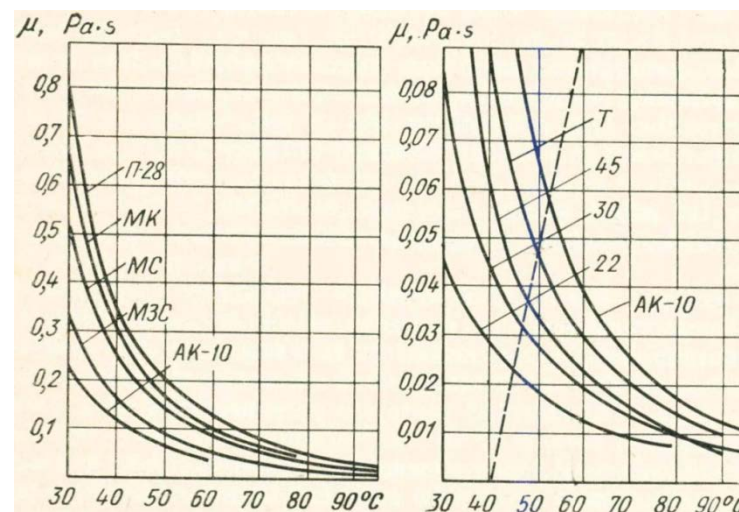


Figura 2.4. Viscosidad cinemática del aceite de lubricación según el ángulo

Para los aceites tipo ISO se determina por la figura 2

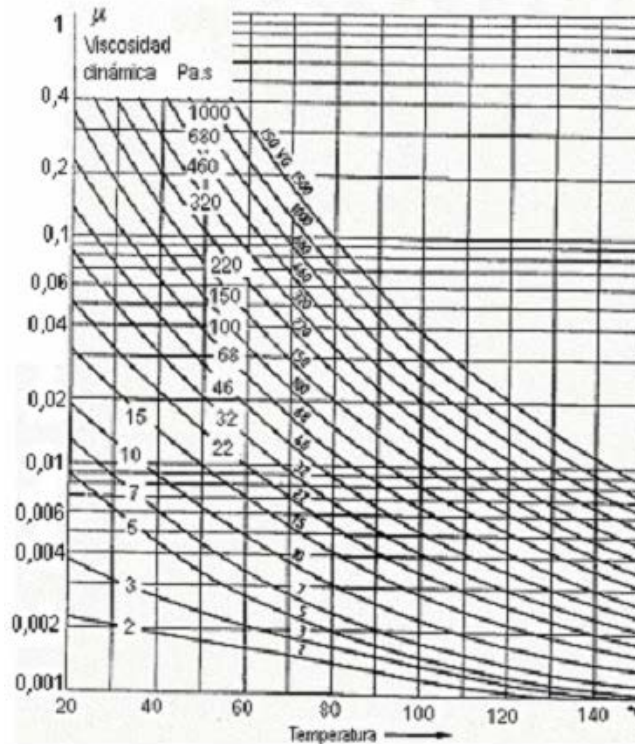


Figura 2.5. Viscosidad cinemática para aceites de la norma ISO, según la temperatura

Π .- coeficiente que depende del tipo de cojinete, según su construcción

$$\Pi = \frac{\alpha \cdot \pi}{405} \quad (2.14)$$

α .- coeficiente de transferencia de calor del material de fabricación; $W/m^2 \cdot \text{grad}$

Π se puede seleccionar en la tabla 2, se debe notar que el valor aparece multiplicado por 10^4 .

Tabla 2.3. Coeficientes α y Π según el tipo de cojinete

Valores de α y Π		
Tipo de Cojinete	α	$\Pi = \frac{\alpha \cdot \pi}{405} \times 10^4$
Cojinetes de construcción ligera, en condiciones difíciles de disipar el calor	0,013	1,0
Cojinetes de construcción normal, en condiciones medias de trabajo	0,018	1,4
Cojinetes de construcción pesada, con intensiva disipación del calor, refrigerados por agua, aire o aceite	0,033	2,5

Con los valores de χ y de $\frac{l}{d}$ se entra a la tabla (V. Dobrovolski), se selecciona $\frac{f}{\psi}$ y

$$\text{se determina también } \frac{Q}{\psi \cdot v \cdot l_{\text{coj}} \cdot d} \quad (2.15)$$

2.9. Determinación de la viscosidad del aceite

La ecuación de la recta que relaciona la temperatura media y la viscosidad del aceite:

$$t_{\text{med}} = t_{\text{ent}} + A_o \cdot \mu \quad (2.16)$$

t_{ent} .- temperatura de entrada, si coincide con la del ambiente se toma igual a 30 grados

Es necesario trazar dicha recta para determinar la viscosidad y la temperatura del aceite, pero hace falta primero determinar el ángulo cuya pendiente está dada por el parámetro A_o :

$$\beta = \arctg \frac{A_o}{10^4} \quad (2.17)$$

Según los elementos se selecciona el tipo de aceite

Tabla 2.4. Selección del tipo de aceite

		Valores de $\frac{f}{\psi}$ y $\frac{Q}{\psi \cdot v \cdot d}$							
$\frac{t}{d}$	Relaciones	α							
		0,33	0,50	0,70	0,80	0,90	0,95	0,975	0,99
1,5	$\frac{f}{\psi}$	2,87	1,92	1,24	0,97	0,67	0,48	0,35	0,22
	$\frac{Q}{\psi \cdot v \cdot d}$	0,0697	0,0896	0,1038	0,1009	0,0888	0,077	0,067	0,0576
1,3	$\frac{f}{\psi}$	3,26	2,13	1,33	1,02	0,700	0,490	0,350	0,22
	$\frac{Q}{\psi \cdot v \cdot d}$	0,0775	0,1006	0,1171	0,1134	0,0986	0,089	0,0718	0,0605
1,0	$\frac{f}{\psi}$	4,34	2,71	1,58	1,16	0,760	0,520	0,360	0,230
	$\frac{Q}{\psi \cdot v \cdot d}$	0,0917	0,1215	0,144	0,1415	0,122	0,1017	0,0843	0,0686
0,9	$\frac{f}{\psi}$	4,96	3,04	1,72	1,24	0,790	0,540	0,370	0,230
	$\frac{Q}{\psi \cdot v \cdot d}$	0,0968	0,1295	0,1563	0,1537	0,1334	0,1108	0,0909	0,0729
0,8	$\frac{f}{\psi}$	4,83	3,50	1,92	1,35	0,840	0,560	0,380	0,240
	$\frac{Q}{\psi \cdot v \cdot d}$	0,1023	0,1382	0,1695	0,1685	0,147	0,122	0,0997	0,0784
0,7	$\frac{f}{\psi}$	7,10	4,18	2,21	1,52	0,910	0,600	0,400	0,240
	$\frac{Q}{\psi \cdot v \cdot d}$	0,1078	0,1474	0,184	0,1852	0,164	0,1367	0,1115	0,0864
0,6	$\frac{f}{\psi}$	9,09	5,22	2,66	1,78	1,02	0,650	0,420	0,260
	$\frac{Q}{\psi \cdot v \cdot d}$	0,1132	0,1566	0,1995	0,204	0,1842	0,1552	0,1267	0,0974
0,5	$\frac{f}{\psi}$	12,3	6,94	3,39	2,20	1,20	0,730	0,460	0,270
	$\frac{Q}{\psi \cdot v \cdot d}$	0,1183	0,1656	0,2152	0,224	0,208	0,1785	0,1473	0,1133

2.10. Cálculo de la carga máxima que podrá soportar el cojinete

La presión que ejerce la carga sobre la superficie del cojinete se puede determinar por la ecuación:

$$p = \frac{Fr}{l_{coj} \cdot d} \quad (2.18)$$

Se debe comparar la presión admisible que es capaz de soportar el cojinete, según el coeficiente de seguridad establecido, en dependencia de la aplicación y de los materiales:

$$[p] = \frac{\phi \cdot \mu \cdot n}{19,11 \cdot \psi^2} \geq p; \text{ MPa} \quad (2.19)$$

Generalmente los valores límites de la presión oscilan entre $[p] = 4...25$ MPa.

Las propiedades de algunos materiales de aplicaciones generales para cojinetes aparecen en las tablas 2.5 y 2.6.

Tabla 2.5. Propiedades de algunos materiales para cojinetes

Material	$[p]$ [Mpa]	$[v]$ [m / s]	$[p \cdot v]$ [MPa·m/s]
Bronce	31.7	7.5	1.76
Cobre	-	-	2,62
Hierro	56.36	4	1.76
Resina Fenólica	42.27	12.5	0.528
Nylon	7.045	5	0.105
Teflón	3,52	0.5	0.035
Teflón Reforzado	17.61	5	0.35
Teflón Tejido	422.73	0.25	0.88
Madera	14.9	10	0.528
Carbono Grafitado	4.23	12.5	0.528

Tabla 2.6. Metales BABBIT para cojinetes de contacto plano

Material	Utilización media	p (MPa)	v _{máx} (m/s)	[pv] (MPa.m/s)
B 83 y B 89	Cojinetes expuestos a grandes cargas y elevadas velocidades	20	60	15
B 16	Cojinetes para tractores, laminadores y otras máquinas que trabajan sin cambios bruscos de carga	15	12	10
B 6	Cojinetes para reductores, bombas, ventiladores y compresores	5	6	5
BH	Cojinetes para turbinas de vapor, motores de potencia media y compresores	20	15	15
BK y BK2	Cojinetes que trabajan bajo cargas variables y bajas velocidades	15	15	6

Fuente: Catálogo General SKF

Se hace necesario determinar la holgura diametral máxima utilizando como ecuación básica:

$$\Delta_{\max B} = \psi \cdot d ; \mu\text{m} \quad (2.20)$$

Se debe tener en cuenta que para la construcción del cojinete es necesario seleccionar un ajuste tal que el juego máximo no exceda de $\Delta_{\max B}$.

Es necesario seleccionar el material para su construcción

Se debe calcular la resistencia al agarramiento, lo cual es posible durante las arrancadas y paradas:

$$pv = \frac{Fr \cdot n}{1910(l)} \geq [pv] \text{ kgf.m/cm}^2\cdot\text{s} \text{ (en este caso la longitud debe estar dada en cm)}$$

(2.21)

$[p.v]$ - factor admisible de materiales antifricción; MPa · m/s.

El material seleccionado debe tener un factor $[pv]$ inferior al calculado.

La viscosidad cinemática que se tiene en la realidad, considerando el lubricante utilizado y la temperatura de operación se muestra en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Viscosidad cinemática de algunas marcas de aceites ISO

Viscosidad cinemática a 40 °C (mm ² /s)				Viscosidad cinemática a 40 °C (mm ² /s)			
Clase ISO	media	mín.	máx.	Clase ISO	media	mín.	máx.
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42	ISO VG 68	68	61,2	74,8
ISO VG 3	3,2	2,88	3,52	ISO VG 100	100	90,0	110
ISO VG 5	4,6	4,14	5,06	ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 7	6,8	6,12	7,48	ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 10	10	9,00	11,0	ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 15	15	13,5	16,5	ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 22	22	19,8	24,2	ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 32	32	28,8	35,2	ISO VG 1 000	1 000	900	1 100
ISO VG 46	46	41,4	50,6	ISO VG 1 500	1 500	1 350	1 650

Fuente: Catálogo General SKF

Además de considerar individualmente la presión nominal del cojinete y la velocidad tangencial que se experimenta en la superficie de este, el producto de ambos factores es un parámetro importante de funcionamiento para diseñar cojinetes. El valor del producto de dichos elementos, es una medida de la capacidad del material en el cojinete para tomar la energía de fricción que se genera en dicho elemento (Mott, 2006). Durante los arranques y las paradas, existe contacto entre las superficies del árbol y del cojinete, resulta necesario garantizar la resistencia de este último al agarramiento (Dobrovolski, 1978).

El numerador de la expresión mostrada, representa una unidad de potencia o energía transferida por unidad de tiempo; el denominador representa el área y por consiguiente, se puede pensar que el factor admisible de materiales antifricción es la tasa de entrada de energía al cojinete por unidad de área proyectada del mismo, si el coeficiente de fricción es aproximadamente uno, naturalmente, el coeficiente real de fricción es mucho menos que uno en el caso normal (Dobrovolski, 1978), entonces se puede decir que dicho factor es una medida comparativa de la capacidad que tienen los cojinetes para absorber energía sin sobrecalentarse.

2.11. Propuesta de sistema de mantenimiento

2.11.1. Estado técnico del equipo

Un aspecto importante que se debe observar para planificar la actividad de mantenimiento es el conocimiento previo del Estado Técnico del equipo, por lo que se hace necesario efectuar una serie de trabajos iniciales para su evaluación, (Hernández, 2013).

El estado técnico de cualquier equipo está en función del tiempo. Para determinar el mismo se efectúa una revisión previa a cada equipo donde participan los técnicos de mayor experiencia y calificación y está dirigida a detectar el grado de desgaste de las diferentes partes y mecanismos de las máquinas, (Navarrete, 1986).

Según Navarrete (1986), esta inspección contempla:

1. Consumo de energía
2. Funcionamiento del elemento motriz y del acoplamiento
3. Estado de la carcasa del equipo
4. Funcionamiento de los mecanismos de regulación y mando
5. Funcionamiento de los órganos de trabajo
6. Estado de las transmisiones
7. Estado de conservación de los instrumentos que indican los parámetros de

funcionamiento del equipo

8. Nivel de ruido, vibraciones y temperatura
9. Otros parámetros que el experto considere importantes

2.11.2. Procedimiento para determinar el estado técnico de un equipo

En el MPP el procedimiento que se sigue para la determinación del estado técnico es muy sencillo y útil, al terminarse la revisión previa, se hace una valoración del equipo que puede ser de buena, regular, mala o muy mala. Para esto es necesario determinar el por ciento de eficiencia del equipo, (Navarrete, 1986).

Para determinarlo se multiplican la cantidad de aspectos evaluados como: buenos x 1, los regulares x 0.8, los malos x 0.6 y los muy malos x 0.4; se suman estos productos y el resultado se divide entre la cantidad de aspectos evaluados. Este resultado se multiplica x 100 y se obtiene el grado de eficiencia del equipo respecto a su condición inicial expresado en %, (Navarrete, 1986).

Según Navarrete (1986) para clasificar el estado técnico del equipo de acuerdo con la eficiencia que se obtuvo al efectuar la defectación utilizamos la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Eficiencia en dependencia del estado técnico

Eficiencia actual	Estado técnico
90 – 100%	Bueno
75 – 89%	Regular
50 – 74%	Malo
Menos del 50%	Muy Malo

Fuente: Catálogo General SKF

2.11.3. Determinación del Ciclo de Mantenimiento de cada equipo

Por ciclo de mantenimiento se entiende la cantidad y secuencia de los diferentes servicios de mantenimiento que se llevan a cabo en un equipo entre dos reparaciones generales, o entre la puesta en marcha y la primera reparación general, en caso de ser un equipo recién instalado. Esto constituye la parte más importante

del mantenimiento preventivo, ya que se aprovecha mejor al equipo, hay seguridad en la producción, ahorro de tiempo, de mano de obra, materiales, entre otros contenidos, (Navarrete, 1986).

Una vez definido el ciclo de mantenimiento y su duración se podrá conocer el tiempo entre dos servicios consecutivos y entre dos reparaciones. Para ello, según Navarrete (1986), pueden utilizarse las siguientes expresiones:

$$Ts = \frac{T}{R + P + M + 1} \text{ ;(horas)} \quad (2.17)$$

$$Tr = \frac{T}{P + M + 1} \text{ ;(horas)} \quad (2.18)$$

Dónde:

Ts - Tiempo entre dos servicios de mantenimiento (cualesquiera que sean).

Tr - Tiempo entre dos reparaciones

T - Duración del ciclo en horas

R - Cantidad de revisiones

P - Cantidad de reparaciones pequeñas

M - Cantidad de reparaciones medianas

2.11.4. Mediciones de síntomas

Según las condiciones dadas en la Empresa Termoeléctrica Lidio Ramón Pérez, nos permiten chequear los siguientes parámetros en el VTF – A:

- Vibraciones
- Temperaturas en las chumaceras
- Desalineamiento
- Estado del sistema de enfriamiento

Para lograr estas mediciones se utilizan los siguientes equipos:

- El VIBXpert II
- Cámara Termográfica Infrarroja Fluke
- Medidor de Resistencia de Aislamiento (Megger)
- Lámpara Estroboscopia

2.12. Métodos de los elementos finitos. Módulo de ensamble

El modelo del cual se partió presenta las características siguientes; un modelo compuesto de dos partes, un cojinete al cual se aplica una carga cuyo diámetro es de 180 milímetros y que cuenta con un radio de curvatura de 90 milímetros. El material utilizado para el respaldo es acero, el cual se idealizó como un material elástico. La segunda placa consistió de un material tribológico conocido comercialmente como la aleación ASTM B143 - 1A y que se consideró como un material isotrópico elástico lineal con endurecimiento.

En el módulo de ensamble se consideró las características fundamentales del elemento como: una masa de 20,46 kg, un volumen de $0,0022 \text{ m}^3$, la densidad del material de 8300 kg/m^3 y un peso de 180,914 N. En la figura 2.8 se muestra el ensamble del modelo visto desde el plano XY.

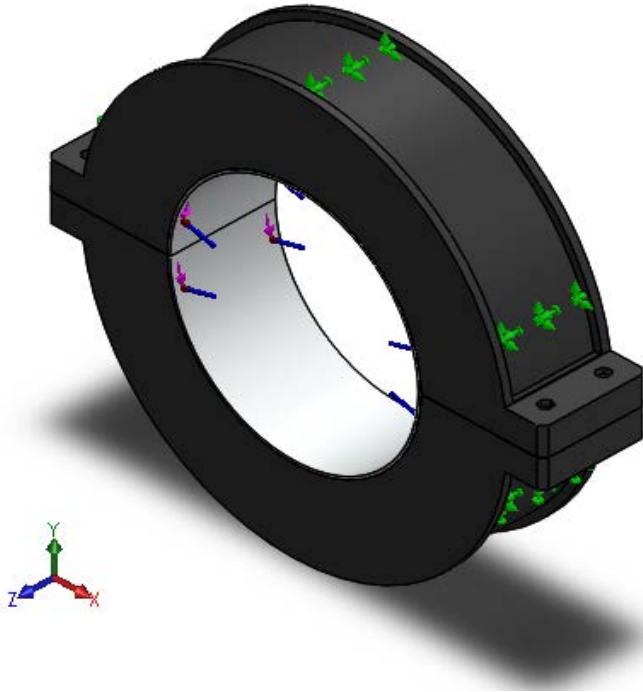


Figura 2.6. Ensamble del modelo desde el plano XY.

A la superficie del cojinete se le asignó puntos de referencias, los cuales determinarán su comportamiento dentro del modelo, es decir, mediante estos puntos se establecen los grados de libertad que rigen el movimiento del cojinete, se crean dos particiones con el fin de seccionarlo en cuatro partes y con ello lograr, en el módulo de mallado (*mesh*) una mejor malla de elementos finitos para esta pieza.

2.12.1. Mallado del modelo

El mallado es un paso crucial en el análisis de diseño, a razón de que es uno de los factores primordiales de los que dependen los resultados finales que se obtendrán. Cuando se realiza un modelo, se debe recurrir al análisis de la convergencia para seleccionar el tamaño correcto de los elementos en el mallado y de este modo obtener el mínimo de error en los resultados. La convergencia define que, al refinar progresivamente la malla, la solución numérica se aproxima, tanto como se desee, a la solución exacta; este es un factor que debe garantizar, que los resultados del cálculo no dependan de la densidad del mallado.

El software permite realizar un mallado más fino en las zonas de interés, es decir en las zonas donde el gradiente de temperatura es mayor, lo que permitirá una mayor

definición y detalle. En la tabla 2.6 se muestran los detalles del mallado del modelo.

Tabla 2.9. Detalles del mallado del modelo.

Número total de nodos	4 337
Número total de elementos	2 337
Cociente máximo de aspecto	19,259
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	59,1
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	10,2
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:05

Según los detalles del mallado establecidos en la tabla 2.6, el tipo de malla considerado es una malla sólida, el mallador utilizado es una malla basada en curvatura, los puntos Jacobianos tenidos en cuenta son 4 puntos y la calidad de malla es con elementos cuadráticos de alto orden.

Una vez que se establecieron las geometrías, propiedades, interacciones y condiciones en cada uno de los módulos anteriores, se definió el tipo y la geometría de los elementos finitos que compondrán la malla del modelo. La figura 2.7 muestra el modelo mallado.

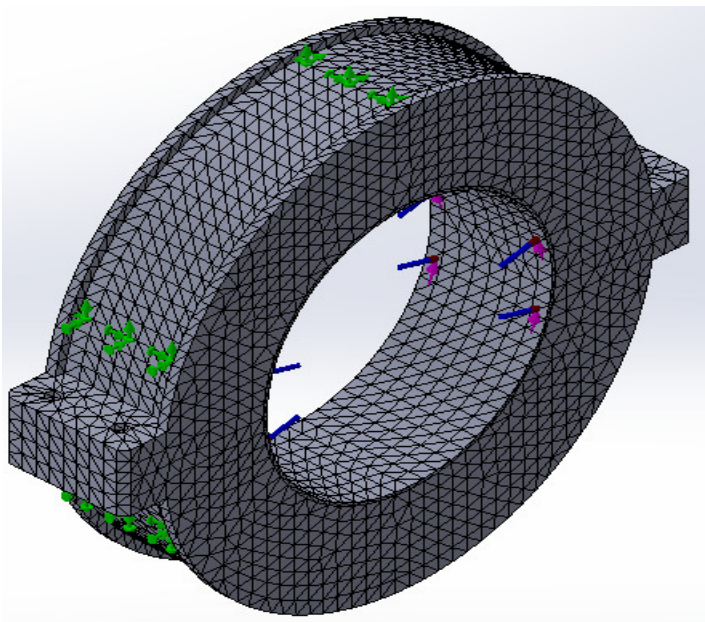


Figura 2.7. Modelo mallado.

Como se puede observar en la figura anterior, la solución obtenida mediante MEF se acercara más a la solución exacta, siempre que se aumente el número de elementos que conformara el mallado del modelo. A este estudio previo, como se ha referido anteriormente, se le denomina análisis de la convergencia. En el caso de la modelación de la transferencia de calor en la soldadura, se debe analizar el mismo modelo con varias densidades de malla, hasta encontrar los rangos de temperaturas, más exactas y precisas, así como el valor de las deformaciones y tensiones en los nodos deseados.

En las simulaciones se observará la importancia que tiene el efecto del valor de la carga del árbol sobre el cojinete, el cual es suficiente para alcanzar la deformación plástica del material tribológico y así poder formar la mezcla mecánica de la tribocapa. Así también se observará la influencia que se tiene en el giro del árbol para la formación de la tribocapa.

Después de haber ubicado las respectivas restricciones y carga radial, se seleccionó el tipo de resultados que se desea obtener, para este caso, se solicitan los esfuerzos equivalentes (Von-Mises), las deformaciones totales, factor de seguridad y análisis modal (primera velocidad crítica).

2.13. Conclusiones del capítulo II

1. Se estableció el procedimiento que permite, efectuar el diseño de los cojinetes de los cojinetes de contacto plano, empleados en los Compresores 2BM10-50/8 de la Termoeléctrica de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, bajo condiciones máximas de trabajo.
2. Se escogió el material para la construcción de los cojinetes el cual debió cumplir requisitos según la metodología aplicada en el capítulo, también se recomienda una propuesta de mantenimiento para un mejor funcionamiento del equipo.

CÁPITULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL

3.1-Introduccion

En los capítulos precedentes fueron estudiados los patrones, las ecuaciones y los procedimientos, que permiten establecer los métodos de diseño de cojinetes de contacto plano, empleados en los Compresores 2BM10-50/8 de la Termoeléctrica de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

La evaluación final de un proyecto es de primordial importancia para establecer en qué medida esta ha contribuido al desarrollo de la ciencia. El correcto análisis, permite afirmar las bases para futuros trabajos que se desarrollen sobre la temática, de ahí su significativa relación con la economía, la sociedad y el medio ambiente.

Se declara como **objetivo del capítulo**: Realizar el análisis de los resultados siguiendo la metodología planteada en el capítulo anterior, la valoración económica producto de la parada del equipo y el impacto medio ambiental asociado a la explotación.

3.2. Análisis de la elaboración de las probetas.

3.2.1. Selección de las muestras.

Para el análisis de las muestras estas fueron seleccionadas teniendo en cuenta diferentes factores como son:

1. muestra patrón del metal en estado natural: La selección se realizó a partir de la necesidad de tener una muestra comparativa con relación a los cambios que pudiesen existir después de analizar las muestras en diferentes condiciones de trabajo.
2. Muestra del metal soldado en el casquillo de hierro: La base del Babbitt es Ac del tipo AISI 1045, por lo que se hace necesario valorar la adherencia del metal antifricción después del proceso de soldadura. La base del Babbitt es base estaño.

3. Muestra del metal maquinado: Selección de muestras que, después de ser soldada y maquinado puede ser que existan defecto de soldadura y de acritud.

4. Muestras del metal fundido durante y después del trabajo: La selección de estas muestras dependerá de:

- Condiciones de cargas.
- Zonas de fricción entre el árbol y el cojinete.
- Zona de lubricación.

3.2.2. Análisis del desbaste y pulido para la observación micrográfica

Teniendo en cuenta las características de las probetas en cuanto al espesor de las mismas, el montaje se realizó en un dispositivo de fibra previamente maquinado, con el objetivo de lograr con la mayor uniformidad posible en el desbaste y pulido. En el desbaste primeramente se obtuvo una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de la máquina pulidora y papeles abrasivos del tipo No 150, 400, 430 y 600 (ISO 9001), variando la granulometría del mismo al ser aplicadas a la pieza de trabajo, desde la más gruesa a la más fina, montando la lija sobre una placa de vidrio, cambiando el sentido del lijado 90° al pasar de un pliegue a otro de manera que se elimine la capa de metal distorsionado y deslizado dejado por el anterior. Al concluir de pasar el papel abrasivo más fino se realizó la operación conocida como pulido fino, en el que se empleó la pasta abrasiva conocida comercialmente como “Pasta GOI”, añadida sobre discos provistos de paños o motas, hasta que se logró una superficie pulida.

Por último las muestras se pasaron en una pulidora metalográfica marca MONTASUPAL (ubicada en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM), para lograr el acabado final, en ella se utilizó un paño de fieltro grueso usando como sustancia abrasiva el óxido de cromo.

3.2.3. Análisis del lavado y desengrasado

Una vez pulida las probetas se lavaron con agua destilada, y secada con papel de filtro y finalmente se volvieron a lavar con tetracloruro de carbono eliminando todo

vestigio de grasa y pastas de pulir, posteriormente fueron sumergidas en acetona para eliminarle la humedad.

3.2.4. Observación con microscopía óptica

Para la observación se empleó un microscopio óptico binocular marca Novel NJF - 120A, ubicada en el laboratorio de ciencias de los materiales en el ISMM de Moa, este está dotado con un portaobjetos giratorio e iluminador vertical Novel este está dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. La observación se realiza empleando distintas combinaciones de objetivo y ocular de 40,100, 400 y 800X para obtener las imágenes más precisas.

Para colocar las probetas en el microscopio se montaron en un dispositivo con plastilina que permitió una nivelación adecuada de estas.

El análisis metalográfico consistió en la observación e identificación de las características de la estructura metalográfica en las probetas de muestra de cada cojinete, una de la zona de fricción entre el árbol y el cojinete y la otra de la zona donde comienza la lubricación del Babbitt B-83.

Fueron observadas probetas deformadas en el centro, y sin deformación en los bordes, de acuerdo con el diseño de observación expuesto en el capítulo anterior en el epígrafe 2.5.5., con un rango de aumento de 100X. En la figura 3.1(a) se observa el comportamiento microestructural del Babbitt patrón con respecto a la figura 3.1 (b), muestra soldada en el casquillo.

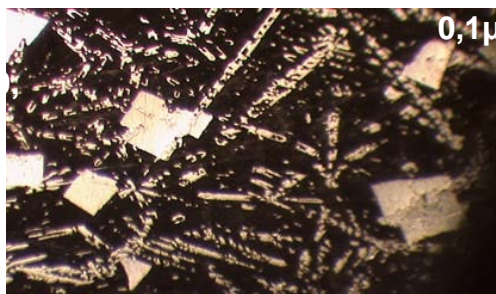


Figura 3.1 (a) Muestra patrón a 100 X

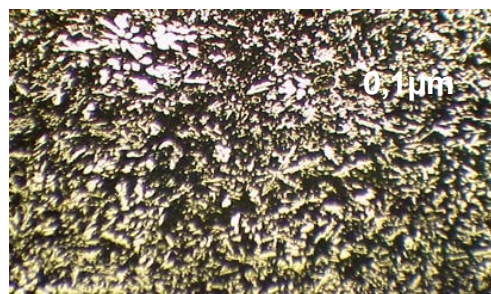


Figura 3.1 (b) Muestra casquillo soldado a100 X

En la figura 3.1 (a) se observa una microestructura de cristales en forma de estrella, (cobre antimonio), y en forma granular (estaño antimonio). El cobre forma con el antimonio una combinación química del tipo (Cu_3Sn) . Estas combinaciones poseen una temperatura de fusión más alta y se cristaliza en primer lugar, formando dendritas ramificadas que dificultan la licuación de los cristales cúbicos β , los cristales (Cu_3Sn) . Forman en el Babbitt incursiones sólidas que aumentan complementariamente la resistencia al desgaste del casquillo. Los cristales en forma granular forman una base de estaño antimonio (SnSb), la matriz granular estaño antimonio es tenaz y plástica y su tendencia a la rotura por fatiga es menor. El campo negro representa la masa plástica de solución sólida α de antimonio en el estaño.

La matriz de esta estructura según el diagrama Sn-Sb se obtiene a 232 0 C.

En la figura 3.1 (b) se observa una estructura con matriz estrellada, pero de menor tamaño producto del calentamiento por encima de 630 0 C, demostrando que cuando se excede el límite de temperatura en estos tipos de aleaciones su resistencia decae considerablemente ya que los cristales se estiran en formas de agujas (estructura acicular) haciendo menos resistente el material a la fricción, además se observa también poros e inclusiones metálicas que provocan el agrietamiento.

Durante el proceso de maquinado después de fundido, el metal adquiere otra estructura. En las figuras 3.1 (a) muestra patrón con respecto a la figura 3.2 (b) se puede observar el comportamiento microestructural.

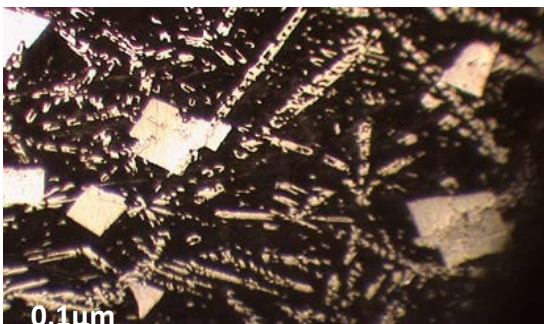


Figura 3.1 (a) Muestra Babbitt patrón 100x

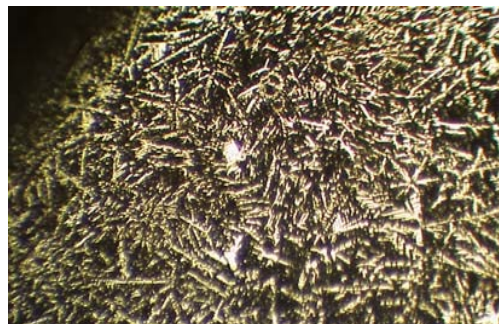


Figura 3.2 (b) Muestra Babbitt maquinado 100x

En esta figura puede observarse con mayor claridad el predominio de dentritas en forma de estrella característico de un metal que ha sufrido una tercera transformación por temperatura y disminución de su espesor. Además se observan ralladura en su superficie que son originadas por defectos en el proceso de maquinado, en el cual existe acritud aunque sea a pequeña escala.

En las figuras 3.1 (a) muestra patrón con relación a la figura 3.3 (b) muestra del metal fusionado por el trabajo se observa el comportamiento microestructural.

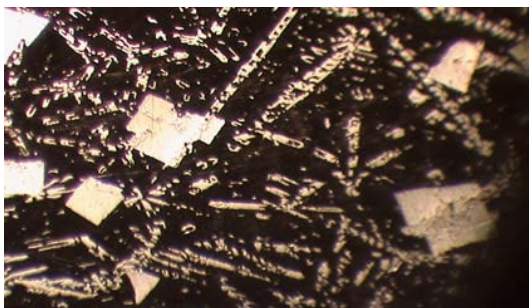


Figura 3.1 (a) Muestra Babbitt patrón 100x



Figura 3.3 (b) Muestra Babbitt fusionado durante el trabajo 100x

En la probeta 3.3 (b), podemos observar el predominio de cristales en forma de aguja o estrella, propio de la combinación (cobre estaño) en la aleación, se atribuye el predominio de estos cristales a que la combinación de (Cu 3 Sn), entre sus propiedades tiene mayor resistencia a la fricción y temperatura, de ahí que los cristales de estaño antimonio (Sn-SB) en esta probeta de metal fusionado por el trabajo aparezcan disminuido o mezclado cristales de estaño con la masa plástica negra que no es más que la combinación de estaño en el antimonio. Buscando garantizar mejor funcionamiento del cojinete de contacto plano, se realizó la fundición en un casquillo de bronce, como metal antifricción y que sirviera como material adhesivo en la capa de Babbitt. En la figura 3.4 (b) se observa la microestructura de esta aleación.

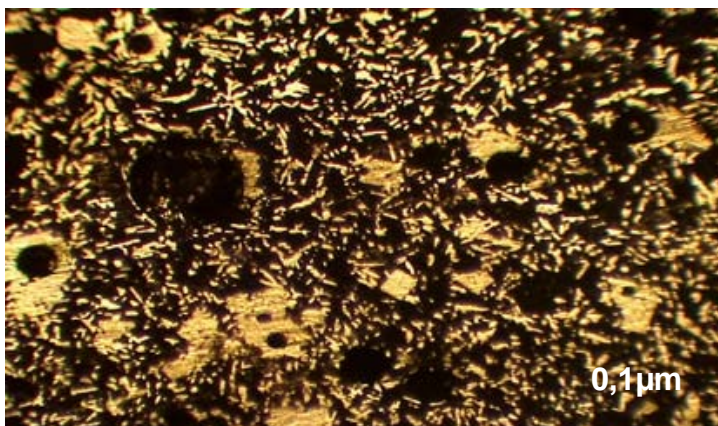


Figura 3.4 Muestra casquillo de bronce revestido con Babbitt 100x

Esta muestra fue fundida sobre un casquillo de Bronce buscando una mayor adherencia de la aleación antifricción, como puede observarse el ensayo no fue efectivo puesto que el Bronce le transmitió impurezas adicionales al babbitt hasta el punto que zonas como los granos de las diferentes combinaciones que no es común observar incrustaciones fueron afectados. Se observan grietas y poros profundos, así como una estructura estrellada. El equipo laboró poco tiempo con esta innovación quedando fundidos el material antifricción.

Considerando el número de revoluciones y las condiciones de trabajo del equipo, se tomaron muestras de otros casquillos para valorar la incidencia del desgaste y la fricción sobre el mecanismo, se pudo determinar que en otros cojinetes del mismo tipo, que trabaja en el soplador y que son restablecidos por el mismo método presentan problemas en su microestructura, lo que se puede determinar que el método empleado por soldadura oxiacetilénica para la recuperación de estos elementos no es la más apropiada, ya que a través de la misma se eleva la temperatura de fusión de estos metales y aparecen impurezas indeseables que afectan la función antifricción de estos materiales.

3.3. Distancia entre los apoyos

La distancia entre los apoyos donde van situados los cojinetes es de 1400mm. La operación de medición horizontal para la toma de la distancia entre los apoyos, se

realiza con una cinta métrica manual, fijando dos pequeñas barras en los extremos de los mismos con el objetivo de obtener las dimensiones exactas, garantizando la mayor precisión posible en los cálculos. El diámetro de la sección donde se colocan los cojinetes, es de 180mm. Dicha operación se efectúa con un pie de rey digital colocándolo de forma precisa en el eje después de haber eliminado todo tipo de suciedad en la superficie del eje.

3.4. Resultados de los cálculos de mantenimiento

Tabla3.2. Resultados del cálculo coeficiente de fricción y la determinación de la viscosidad del aceite la temperatura media

Denominación	Símbolo	Valor	U/M	Ecuación
variable de coeficiente de fricción; adimensional	$f \left(\frac{R}{Cr} \right)$	4,5	-	2.1
relación entre el radio del cigüeñal y holgura radial; adimensional	$\frac{R}{Cr}$	1125	-	2.1
coeficiente de fricción; adimensional	f	0,004	-	2.1
temperatura de entrada coincide con la del ambiente	t_{ent}	30	°C	2.16
viscosidad cinemática	μ	0,3	Pa·s	2.16
parámetro que considera las propiedades del lubricante	A_o	$2,94 \cdot 10^{-5}$	-	2.15
temperatura media	t_{med}	30,3	°C	2.16

Fuente: Propia

El coeficiente de fricción reduce su valor considerablemente, a favor del comportamiento del flujo de calor generado, si la holgura relativa de operación aumenta debido a que los ajustes entre el muñón y el cojinete cambiaron con el objetivo de lograr una mayor holgura, entonces los cambios térmicos de la holgura relativa del cojinete disminuye, en consecuencia a que la temperatura efectiva de la película de lubricante desciende y por tanto, la holgura relativa del cojinete se reduce.

Tabla 3.3. Resultados del Cálculo del espesor mínimo de la película del lubricante.

Denominación	Símbolo	Valor	U/M	Ecuación
Rugosidad del árbol	R_{z1}	1,5	mm	2.3
Rugosidad del árbol del cojinete	R_{z2}	1,6	mm	2.3
Coeficiente de seguridad para las condiciones de explotación	ξ	1,4	-	2.3
Espesor mínimo de la película del lubricante	h_{min}	8,66	μm	2.3
Deflexión máxima que ocurrirá en el cojinete	Y_{piv}	0,00543	mm	2.4

Fuente: Propia

Según los elementos se selecciona el tipo de aceite.

Se empleará aceite ISO VG 150 que posee una viscosidad cinemática de:

$$\mu = 0,3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

3.5. Resultados de los cálculos de diseño

Tabla 3.4. Resultados de la excentricidad relativa

Denominación	Símbolo	Valor	U/M	Ecuación
holgura relativa	ψ	1,18	-	2.7
velocidad tangencial	v	4,84	m/s	2.8
diámetro nominal del muñón de apoyo	d	180	mm	-
Número de revoluciones	n	514	min^{-1}	-
Constante pi	π	3,14	-	-
excentricidad relativa	x	0,92	-	2.5
relación longitud de contacto y el diámetro nominal	$\frac{l_{coj}}{d}$	0,727	-	2.10
criterio de carga	ϕ	178,7	-	2.9
velocidad circunferencial del árbol	$v^{0,25}$	1,48	rad/s	2.7
-	-	0,8	-	2.7
-	-	$6 \cdot 10^4$	-	2.8
-	-	1	-	2.5

Para diseñar un cojinete, este es uno de los parámetros esenciales que caracteriza el comportamiento ante las cargas, se determina por la tabla 2 el valor del criterio de carga, el que depende de la excentricidad relativa y de la relación longitud de contacto diámetro nominal. Con los valores de χ y de $\frac{l}{d}$ se entra a la tabla y se determina, $\frac{f}{\psi} = 0,24$, por tanto $f = 0,24 \cdot \psi = 0,324$ y se encuentra también

$$\frac{Q}{\psi \cdot v \cdot l_{coj} \cdot d} = 0,0784$$

Tabla 3.5. Resultados del cálculo del parámetro que considera las propiedades del lubricante:

Denominación	Símbolo	Valor	U/M	Ecuación
velocidad tangencial	v	4,84	m/s	2.8
coeficiente de transferencia de calor del material de fabricación	α	0,018	W/m ² .grad	
coeficiente que depende del tipo de cojinete, según su construcción	Π	0,26	-	-
criterio de carga	ϕ	1,35	-	2.11
-	-	0,000006	-	2.11
-	$\frac{f}{\psi}$	0,24	-	-
-	$f \cdot \psi$	0,324	-	-
-	$\frac{Q}{\psi \cdot v \cdot l_{coj} \cdot d}$	0,0784	-	-
holgura relativa	ψ^2	1,39	-	-
parámetro que considera las propiedades del lubricante	A_o	$2,94 \cdot 10^{-5}$	-	2.11

Al producirse calentamiento de las superficies en contacto (no adecuada evacuación del calor generado y no adecuada respuesta de los materiales a la temperatura correspondiente al régimen de funcionamiento), la temperatura de ambos elementos

se incrementa, incrementándose también el coeficiente de fricción y generándose más calor, hasta que el árbol y el cojinete quedan fuera de servicio; de esta forma desaparece la reacción tangencial de fricción y autosoldándose (agarrotándose) ambos elementos entre sí, no pudiendo seguir entonces rotando el árbol.

En la tabla 3.6 y 3.7 aparecen los parámetros de trabajo del cojinete de contacto plano, los cuales son útiles para la lubricación del mismo.

Tabla 3.6. Resultados del Cálculo de la carga máxima y la carga máxima admisible que podrá soportar el cojinete

Denominación	Símbolo	Valor	U/M	Ecuación
Carga que actúa sobre el cojinete	Fr	756,63	N	-
longitud o ancho del cojinete	l_{coj}	95	mm	-
diámetro nominal del muñón de apoyo	d	108	mm	-
presión que ejerce la carga sobre la superficie del cojinete	p	0,04	MPa	2.18
criterio de la carga	ϕ	178,7	-	2.9
viscosidad cinemática	μ	0,3	Pa·s	2.16
número de revoluciones	n	514	rev/min	-
holgura relativa	ψ^2	1,39	-	-
-	-	19,11	-	-
carga máxima admisible que podrá soportar el cojinete	$[p]$	10,43	MPa	2.19

Fuente: Propia

Con el valor obtenido de la carga sobre el cojinete se puede plantear que con el peso del árbol y el número de revoluciones más las condiciones de restablecimiento del cojinete de contacto plano este no soporta el trabajo, si se tiene en cuenta que existe fricción que genera temperatura, en estas condiciones de trabajo siempre los elementos de máquinas se retiran de servicios por el desgaste.

En la tabla 3.8 se establece el resultado de la holgura diametral máxima y juego máximo de la holgura diametral en la ecuación 2.20 propuesta en la metodología del capítulo anterior.

Tabla 3.8. Resultados de la holgura diametral máxima y juego máximo de la holgura diametral y la resistencia al agarramiento

Denominación	Símbolo	Valor	U/M	Ecuación
holgura diametral máxima	$\Delta_{\max B}$	213,12	μm	2.20
juego máximo de la holgura diametral	Δ_{\max}	0,082	μm	2.20
ajuste del diámetro superior	F8	0,060	-	2.20
ajuste del diámetro inferior	h6	-0,022	-	2.20
Carga que actúa sobre el cojinete	Fr	767,9	N	-
número de revoluciones	n	514	rev/min	-
-	-	1910	-	2.21
resistencia al agarramiento	p_v	2,17	MPa.m/s	2.21

Fuente: Propia

Con los resultados de la holgura diametral máxima y el juego máximo de la holgura diametral se llega a la conclusión de que es satisfactorio el resultado.

Es necesario seleccionar el material para su construcción

Se debe calcular la resistencia al agarramiento, lo cual es posible durante las arrancadas y paradas.

3.6. Resultados de la propuesta de mantenimiento

3.6.1. Establecimiento del mantenimiento

En la actualidad industrial es frecuente el uso del Sistema Alterno de Mantenimiento (SAM), que no es más que la búsqueda de la combinación más adecuada de

diferentes políticas de mantenimiento, de forma que se racionalicen los recursos financieros, materiales y humanos, y se logren altos indicadores de eficiencia en la actividad del mantenimiento industrial, (Hernández, 2013).

Es evidente que, en el ámbito industrial, no se debe aplicar una sola política de mantenimiento, sino la combinación de todas aquellas que sean posibles en diferentes proporciones, para lograr los mejores resultados técnico-económicos, lo cual ha propiciado que aparezcan sistemas de mantenimiento mixtos como por ejemplo:

- Mantenimiento preventivo planificado con mediciones de parámetros síntomas.
- Mantenimiento correctivo con mediciones de parámetros síntomas.

3.6.2. Métodos del Mantenimiento Preventivo Planificado

Según Hernández (2013), el Mantenimiento Preventivo Planificado contempla los siguientes servicios:

- **Servicio diario del equipo:** Para comprobar el estado técnico, elementos de lubricación y refrigeración además de velar por el cumplimiento de las normas de trabajo por parte de los operarios.
- **Trabajos periódicos:** Estos se hacen cada determinado tiempo según un plan previamente elaborado: limpieza de equipos que trabajan en condiciones de suciedad y contaminantes, cambio de aceite del sistema de lubricación, comprobación de la precisión de las holguras, entre otros.
- **Revisión:** Esta se realiza entre una reparación y otra según el plan, para comprobar el estado técnico del equipo, solucionar defectos sencillos y determinar los preparativos que deben hacerse para acometer la próxima reparación.
- **Reparación pequeña:** Esta es una reparación preventiva, o sea, previene posibles defectos en el equipo ya que posee un mínimo de volumen de trabajo. Aquí se reparan o se cambian un determinado número de piezas de fácil acceso y que se deterioran frecuentemente, además de regular los mecanismos, así se garantiza la explotación normal del equipo hasta la próxima reparación.
- **Reparación mediana:** Se reparan y se sustituyen piezas o partes del equipo de

mayor duración e importancia y de más difícil acceso. Durante esta, el equipo se desmonta parcialmente y con ella se garantiza la precisión necesaria, potencia y productividad hasta la próxima reparación planificada.

- **Reparación general:** Es la actividad de mantenimiento de mayor volumen de trabajo y se lleva a cabo para restituirle al equipo no menos del 90% de su efectividad y condiciones de diseño originales. Se realiza el desmontaje total del equipo, sustitución o reparación de piezas y partes desgastadas y reparación de las piezas básicas del equipo, así se garantiza la fiabilidad, potencia y productividad del equipo.

3.6.3. Determinación del estado técnico del Compresor 2BM 10-50/8

Según la revisión efectuada al Compresor 2BM 10-50/8, el 28 de mayo del 2018, el estado del equipo se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 3.9. Resultado de la revisión del Compresor 2BM10-50/8

	Cantidad de partes
Buenas	Motor eléctrico, acoplamiento, termómetros, manómetro de presión
Regulares	Chumaceras axiales y radiales, válvulas de regulación, empaquetaduras,
Malas	Compuertas de aire, temperaturas, placa de asiento, impelentes
Muy malas	-

Fuente: Propia

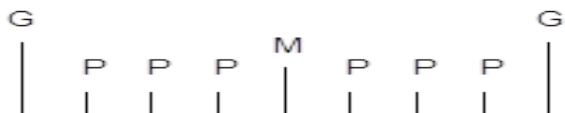
Según la información precedente, los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.10. Resultados del estado técnico del equipo

Evaluación	Coeficientes	Cantidad de piezas	Eficiencia actual	Estado técnico
Bien	1,0	4	50%	Malo
Regular	0,8	4		
Mal	0,6	4		

3.6.4. Resultado del ciclo de mantenimiento

Según Navarrete (1986), el ciclo de mantenimiento para compresores es el siguiente:



Y los tiempos de duración según la ecuación (2.18), se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.11. Tiempos del ciclo de mantenimiento

Duración del ciclo (horas)	Tiempo entre servicios (horas)
64800	8100

Las acciones que se realizarán en las reparaciones pequeñas son:

- Limpieza de guardera del coupling y de la tubería de enfriamiento.
- Limpieza de guardera del lado libre.
- Inspección de los tacos de acoplamiento.
- Limpieza de la caja interior del pedestal.

Por otra parte las acciones que se deben realizar en las reparaciones medianas:

- Mantenimiento del coupling y el semicoupling.
- Ajuste de chumacera con el árbol.
- Mantenimiento al muñón.
- Desmontaje de chumacera para defectado.

En las reparaciones generales se realizarán todas las acciones antes dichas y otras que los técnicos consideren.

3.6.5. Mediciones de síntomas

Las mediciones de síntomas para este equipo según la norma que establece la Unión Nacional Eléctrica (UNE), se realizan mensualmente, pero como en nuestro

ciclo de mantenimiento no poseemos revisiones, reducimos la frecuencia de mediciones quincenalmente, lo que nos permitirá mantener un mayor control sobre el equipo para decidir si se debe variar el ciclo en dependencia de los resultados que arrojen las mediciones expuesta en el epígrafe 2.7.3.

3.7. Análisis por el método de los elementos finitos

En la mayoría de los casos en los que se modela un rodamiento dentro de un sistema mayor, éste es considerado como un simple par de revolución ideal que absorbe los esfuerzos de forma regular y que no afecta al funcionamiento de dicho sistema. En la realidad esto no es cierto, pues un rodamiento produce vibraciones y permite pequeños desplazamientos y giros que deben tenerse en cuenta.

La simulación hecha por medio del MEF consistió en modelar una multicapa compuesta por la aleación tribológica blanda y un respaldo de acero. En los cojinetes de deslizamiento es este respaldo el que proporciona la rigidez a la estructura. La contraparte del tribopar se modeló como una superficie analítica idealmente rígida. En la figura 3.5 se muestran las tensiones obtenidas.

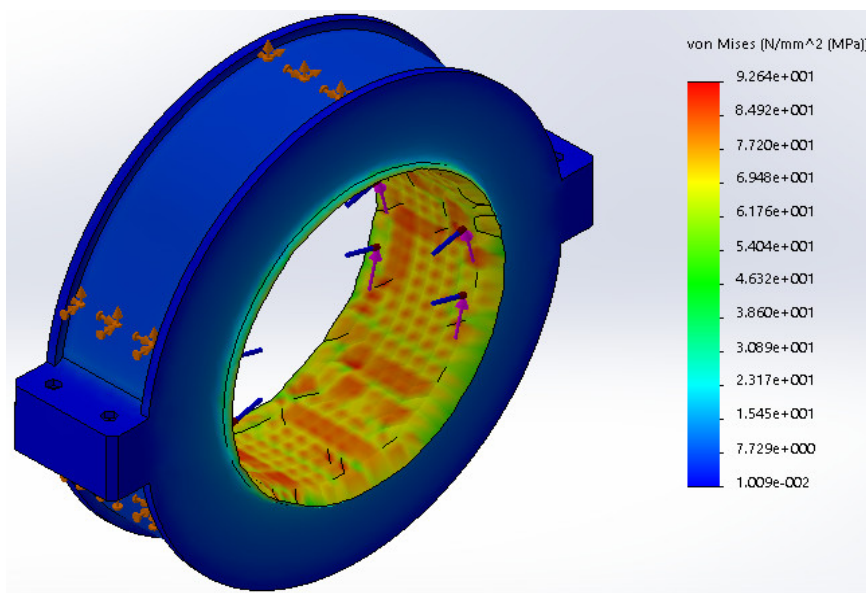


Figura 3.5. Tensiones de Von Mises.

Para una velocidad nominal de $3\,600\text{ min}^{-1}$, un árbol de acero y que según la cinemática de los cuerpos del par tribológico, formado por pares de materiales de diferentes dureza, se considera un par directo, ya que el elemento del par de mayor dureza (HB_2) se mueve con respecto al par más blando (HB_1), provoca sobre la superficie del cojinete alteraciones superficial como se observa en la figura, generado por el deslizamiento del babbitt. Este defecto que trae consigo la pérdida de material, también genera tensiones máximas de $9,264\text{ MPa}$ y mínima de $7,720\text{ MPa}$ en el interior de la pista de deslizamiento, luego las mismas se distribuyen por la superficie de trabajo y por efecto de la fricción y en el espesor que alcanza el babbitt ($2,3\text{ mm}$) se alcanzan valores de hasta $6,176\text{ MPa}$.

La cantidad de energía almacenable está limitada principalmente por las tensiones internas del rotor, ya que en el resto de elementos no ofrecen excesivos problemas. Los cojinetes de apoyo sólo presentan limitaciones de velocidad si el peso es muy elevado. Las tensiones del rotor tienen dos orígenes: las provenientes de las exigencias mecánicas y las generadas por el propio material, también llamadas tensiones residuales. Estas últimas permanecen en ausencia de velocidad y por lo tanto, no dependen del nivel de energía almacenada. Las tensiones mecánicas están originadas principalmente por la fuerza centrífuga, aunque también por la aceleración angular, el efecto giroscópico, el peso propio, el desequilibrio de masas y las vibraciones, de acuerdo con lo expuesto por Moreno *et al.* (2005).

3.7.1. Comportamiento de los desplazamientos

Se determinaron los desplazamientos que ocurren en el par tribológico. En la figura 3.6 se observa el comportamiento de dichas tensiones.

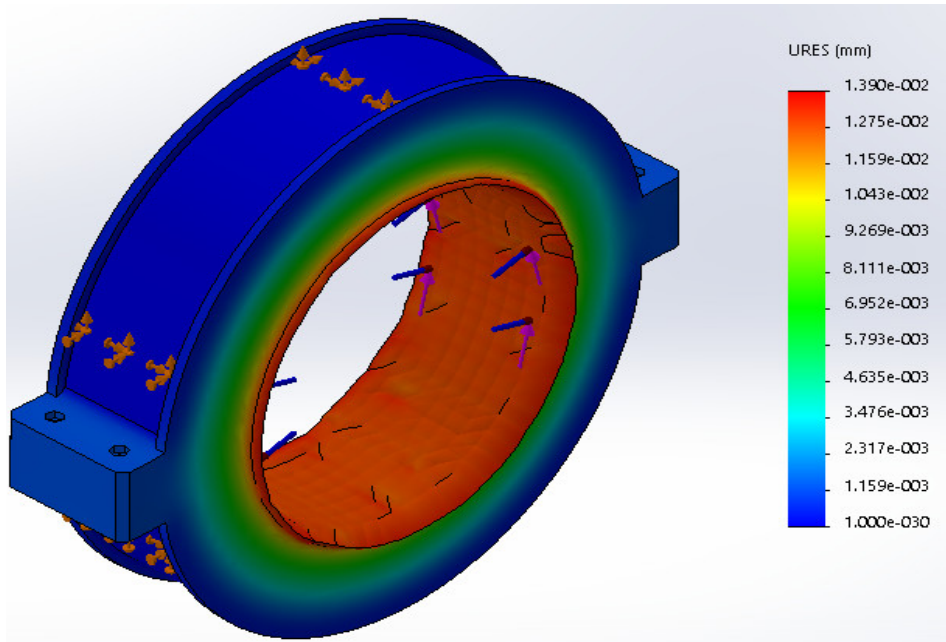


Figura 3.6. Desplazamientos del sistema árbol - cojinete.

Para establecer el comportamiento de los desplazamientos en el sistema árbol-cojinete se parte de la matriz de rigidez del sistema, que relaciona el vector de esfuerzos y el de los desplazamientos. En correspondencia con la figura, existe variación en los desplazamientos a lo largo del eje X, es decir, el estrechamiento que se produce en la pieza, lo cual está en el rango de valores desde 1,3 hasta 1,15 mm.

En los cuerpos circulares, los desplazamientos y deformaciones en las direcciones tangencial y radial no son independientes entre sí, el giro del árbol ocurre como resultado del desplazamiento en el eje z por efecto de la carga. La unión entre el árbol y el cojinete presentan dos tipos de uniones, la unión rígida y la elástica. La rígida, en este caso representada por el árbol, soportará la fuerza centrífuga mediante la tensión radial y la elástica (metal babbitt) permite el desplazamiento radial, sin embargo, al presentar una menor dureza que el primero, tiende a desgastarse con mayor rapidez.

Con las funciones de desplazamiento se ha definido de manera única el estado de deformación del elemento, en función de los desplazamientos nodales. Estas, junto a las deformaciones iniciales y a las propiedades del material han delimitado el estado tensional del contorno del elemento.

3.7.2. Comportamiento de las deformaciones

La figura 3.7 muestra la deformación del tribopar. Las simulaciones se realizan con tipo de elementos cinemáticas interpretándolos como elementos rígidos sin presentar deformación durante el contacto.

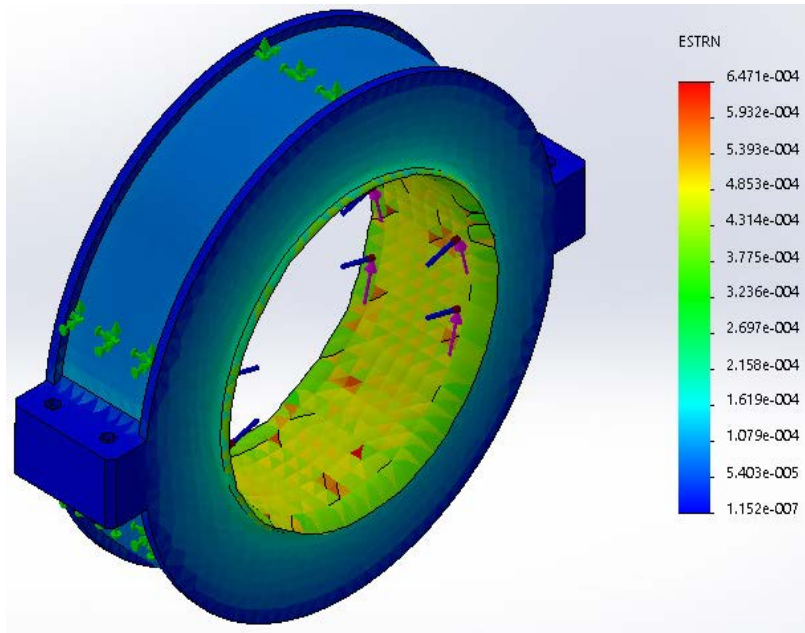


Figura 3.7. Deformación del par tribológico.

En la figura se muestra, que al entrar en contacto el par tribológico, en un único punto, bajo la acción de la fuerza, que cada uno de ellos ejerce sobre el otro (que se suele denominarse “carga”) se deforman en la región del primer contacto, al no existir un cuerpo que permita el libre desplazamiento entre ellas (lubricante), una de ellas se deforma por efecto de la fricción y el calor con valores máximos de $6,471 \times 10^{-4}$ mm y valores mínimos de desplazamiento de $1,152 \times 10^{-7}$ mm. En este caso, el cojinete de la turbina ha quedado deformado y esta deformación radial del material dificulta la unión con el eje. El desplazamiento radial genera simultáneamente una deformación radial y una tangencial y es debido a la geometría cerrada del cojinete, en donde el perímetro es función del radio.

Esta dependencia geométrica origina algunos efectos cruzados entre las tensiones tangencial y radial. Algunos son favorables, por ejemplo, la fuerza centrífuga, que es

radial, genera también tensión tangencial, pero otros son perjudiciales, por ejemplo, una tensión tangencial que no sea proporcional al radio genera tensión radial. Esta dependencia complica el comportamiento de giro del árbol, criterios expuestos por Suárez-Bustamante *et al.* (2012) y Liaño-Gómez (2016).

Los modelos analíticos permiten predecir el efecto de la deformación, con ellos se pueden obtener información de las deformaciones presentadas en el contacto de las piezas, pero debido al gran número de ecuaciones que puedan resultar al tratar de hallar estos resultados, se disminuyen las condiciones realistas del modelo. La forma del área de contacto, el modo en que ésta aumenta de tamaño y la distribución de tensiones en dicha región se adquiere de la relación de la geometría de los cuerpos y de la carga aplicada. Los datos que se obtienen de la ley de contacto superficial (ley de Hertz) se refieren a la tensión soportada en la zona de contacto de las superficies llamada geometría de huella. Las deformaciones son pequeñas en el área de contacto, por lo que puede aplicarse la teoría lineal de la elasticidad.

La fuerza aplicada influye de manera drástica sobre la cantidad de material que se desprende. En cambio, tiene poco efecto en la profundidad u homogeneidad de la tribocapa. Uno de los mecanismos de desgaste es el desprendimiento de partículas de material y su redeposición en algún punto delante del deslizamiento, donde la deformación plástica se da desde el primer incremento de tiempo, la cual a su vez también va incrementando conforme aumenta el tiempo de carga hasta llegar a un valor constante. La deformación cerca del punto de contacto, que se considera reversible, ya que el fenómeno se considera elástico, hace que ambos cuerpos estén en contacto en una superficie pequeña y finita, criterio expuesto por Sawalhi y Randall (2008).

3.8. Análisis económico e impacto medio ambiental.

La recuperación satisfactoria de los cojinetes de contacto plano del compresor 2BM10-50/8 de la Termoeléctrica en la empresa Cte. Ernesto Che Guevara, una vez deteriorado el producto de la fusión del metal Babbitt durante el trabajo, constituye una necesidad de primer orden, puesto que solo existe un equipo en espera para caso de avería y al haber uno averiado se carece de este. Al ocurrir la avería de los

cojinetes de contacto plano del compresor 2BM10-50/8 para lograr una reparación con máxima prioridad, se debía decidir entre dos alternativas.

Alternativa No1: Prolongar la parada del equipo y decidir importar los repuestos necesarios para la puesta en marcha del mismo o asignar el revestimiento de las chumacera con Babbitt mediante contrato a tercero, estos pueden ser empresas nacionales o extranjeras.

- **Ventajas:** Esta alternativa tiene la ventaja que permite acceder a mejores tecnologías de revestimiento con Babbitt donde la adhesión del metal antifricción al casquillo es superior y las impurezas en el metal depositado es mínima, en término generales un revestimiento con calidad superior.
- **Desventajas:** Tiene en contra que se prolonga el tiempo de reparación de las piezas en cuestión, hasta el punto que se corre el riesgo de parada de la unidad en caso de avería con de pérdida considerables en la producción de la empresa. Por otra parte el acople de los cojinetes al árbol requiere de gran precisión por lo que es común que después de la reparación halla que volverlos a maquinaslos buscando ajustes adecuado que permita la holgura ideal para la película de lubricante.

Alternativa No 2: Recuperación de los cojinetes por parte del personal de la entidad y puesta en marcha del equipo con la eficiencia requerida por la planta.

- **Ventajas:** Con este método las piezas reparadas quedan con muy buena calidad de acuerdo con los requerimientos del cliente. Disminuye considerablemente el tiempo de fabricación. Cercanía de los talleres para ultimar posible defectos de la reparación. Disminución considerable del costo de la reparación. Disposición de la mano de obra calificada para tal función desde el comienzo de la reparación hasta el montaje del equipo.
- **Desventajas:** La tecnología que se dispone en los talleres de la empresa para realizar la soldadura es oxiacetilénica, esta soldadura ha sido sustituida en el mundo desarrollado por la de deposición eléctrica, ya que con la anterior se corre el riesgo de contaminación del Babbitt por la incidencia de la llama, lo que trae

consigo la aparición de poros en el metal soldado y variación de la microestructura por sobre aumento de la temperatura al ser soldado.

A continuación se ofrece en las tablas (3.12, 3.13 y 3.14) el costo de la reparación de los cojinetes en la empresa y el costo promedio para los diferentes proveedores que realizan esta reparaciones en el mercado.

Tabla 3.12. Materiales usados para la reparación de los cojinetes.

Materiales usados para la reparación de los cojinetes				
No	Materiales	Cantidad	Costo por unidad	Costo total
1	Metal patente babbitt de alta B83	17,40 kg.	28,91	503,04
2	Alcohol clase A	1 Ltr	0,57	0,57
3	oxigeno	1botellón	16,44	16,44
4	Acetileno	1botellón	58,61	58,61
5	Barra, redonda, de bronce fosfórico	1 barra	1741,15	1741,15
			Total	2319,81

Fuente: Propia

En la tabla 3.13 se refleja el costo de la mano de obra emplea en la reparación de los cojinetes.

Tabla 3.13. Costo de mano de obra empleada en la reparación de los cojinetes.

Costo de mano de obra								
No	Especialidades	\$/h J.N	\$/h H.E	\$/h D.A	hrs.trab J.N	hrs. trab. H.E	hrs. trab. D.A	Ctotal hrs. trabajadas
1	Mecánico de taller A	12,08	15,67	19,26	32	0	13	555,56
2	Operador de máquina A	12,08	15,67	19,26	32	8	13	762,3
3	Eléctrico de mtto Ind. A	12,58	16,42	20,34	32	8	0	533,92
							Total	1851,78

Fuente: Propia

En la tabla 3.14 se establece el gasto total por las diferentes especialidades que intervienen en la reparación del cojinete

Tabla 3.14. Gasto total por las diferentes especialidades.

No	Gasto total por especialidades	Valor en CUC
1	materiales	2319,81
2	mano de obras	1851,78
3	Gasto total de la reparación en los talleres.	4171,59
4	Costo promedio de la reparación en el mercado	8095, 75

Fuente: Propia

Por las ventajas que ofrece para el proceso la alternativa #2 con respecto a la alternativa #1 y teniendo en cuenta las desventajas para lograr introducir mejoras en la reparación se escoge la alternativa #2 para la reparación de los cojinetes de contacto plano del compresor 2BM 10-50/8 de la Termoeléctrica de en la empresa Cte. Ernesto Che Guevara.

Debemos aclarar que en la alternativa #1 que plantea la reparación de los cojinetes mediante contrato a tercero sería la ruta crítica ya que esta variante pone en riesgo la producción de la planta y la estabilidad del proceso de la empresa para mantener el régimen productivo de níquel y cobalto lo cual en las circunstancias actuales se hace muy difícil por disponibilidad y transportación a tiempo. Por lo que literalmente se puede decir que la producción se pudo afectar seriamente.

3.9. Impacto ambiental.

Una de las características de la enseñanza de la Ingeniería ha sido su adaptabilidad y buena voluntad a los cambios. Nuevos principios y técnicas han sido introducidos en los programas de estudio en cuanto han llegado a ser conocidos y aceptados. La necesidad del personal especializado con base en las más altas matemáticas y el conocimiento de los ordenadores, ha revolucionado los métodos académicos de la Ingeniería. Esta enseñanza forma hoy individuos altamente especializados y

capacitados técnicamente, los cuales tienen a su alcance instrumentos y técnicas para resolver los problemas empresariales e industriales que hubieran asombrado a los pioneros de este campo de la ciencia. La Ingeniería surge en Cuba como especialidad en la formación de Ingenieros, en 1962, como resultado de la necesidad que tenía la Revolución de impulsar la formación de Ingenieros que desarrollasen y explotasen eficientemente la creciente y sostenida base productiva que el proceso de industrialización que se estaba realizando.

Cuando se creó, este ingeniero tenía como objetivo fundamental la dirección de los procesos productivos y explotar y mantener eficientemente el equipamiento industrial, organizando los procesos productivos y auxiliares. Su perfil era por tanto de explotación y de un carácter amplio, que incluía todos los aspectos tecnológicos de la producción e inclusive de carácter constructivo.

Algunos de los procesos tecnológicos de producción que se deben estudiar y valorar cuidadosamente son los de elaboración de los metales por corte, mediante el torneado, fresado, taladrado, rectificado y acepillado. Operaciones que se ejecutan en casi todas las fábricas y talleres del país, y cuya influencia sobre el consumo energético y gasto de materiales es elevado. En estas operaciones la productividad y calidad de las piezas que se elaboran, dependen, entre otros parámetros, del correcto cálculo y establecimiento de los elementos del régimen de corte.

La alteración de alguno de estos elementos, además de afectar la productividad de piezas, así como, el acabado y precisión de las mismas, lo que traería como consecuencia el incumplimiento de su asignación de servicio y afectaciones a otras piezas de las máquinas y mecanismos donde se instalan, trae consigo además, las siguientes consecuencias:

- Exceso en la emanación de gases y vapores provocado por la alteración de los fenómenos térmicos que ocurren durante el corte.
- Derrame y evaporación de líquidos lubricantes y refrigerantes.
- Gasto de materiales (por errores de elaboración en las piezas producidas, por reparaciones, desgaste de herramientas de corte y utilización de piezas de

repuesto).

- Aumento del ruido en los talleres y fábricas por el desgaste acelerado de las piezas de las máquinas herramienta donde se realiza el trabajo.
- Estrés de los operarios, por agotamiento físico y psicológico a causa del exceso de tiempo de trabajo empleado en la elaboración de las piezas o por tener que elaborarlas nuevamente.

3.10. Conclusiones del capítulo III

1. En los experimentos realizados se demuestra que existe una variación en la microestructura del material antifricción en el cojinete, quedando evidenciado por la compactación de los cristales estaño antimonio en la masa de antimonio en la aleación y la presencia ó predominio de los cristales en forma de estrella y agujas alargadas después de la fusión del metal en el cojinete, propio de la aleación cobre estaño que tiene mayor temperatura de fusión y resistencia al desgaste.
2. La deformación plástica superficial del material antifricción en el cojinete producto de la fricción por rodadura del árbol tiene un efecto económico por el alto costo de los materiales en el mercado y la utilización de personal especializado para estas labores, evidenciando que para la recuperación se consume un costo de 4171,59 CUC y la compra del mismo importa un costo de 8095,75 CUC, ahorrándose 3924,16 CUC
3. En los epígrafes 3.3 y 3.4 se establecieron el cálculo de lubricación del cojinete quedando demostrado que el mismo en buenas condiciones de lubricación y seleccionando adecuadamente el material antifricción el cojinete de contacto plano tendría una vida más duradera.



Conclusiones Generales

1. El análisis de la estructura del compresor 2BM 10-50/8, se centra en el cojinete de contacto plano; en las partes fundamentales como: chumacera, babbitt y material.
2. El método de elementos finitos por criterio de Von Mises permite determinar la generación de tensiones máximas de 9,264 MPa y mínima de 7,720 MPa en el interior de la pista de deslizamiento, luego las mismas se distribuyen por la superficie de trabajo y por efecto de la fricción y en el espesor que alcanza el babbitt (2,3 mm) se alcanzan valores de hasta 6,176 MPa; donde permite el libre desplazamiento entre ellas (lubricante), una de ella se deforma por efecto de la fricción y el calor con valores máximos de $6,471 \times 10^{-4}$ mm y valores mínimos de desplazamiento de $1,152 \times 10^{-7}$ mm.
3. La deformación plástica superficial del material antifricción en el cojinete producto de la fricción por rodadura del árbol tiene un efecto económico por el alto costo de los materiales en el mercado y la utilización de personal especializado para estas labores, evidenciando que para la recuperación se consume un costo de 4171,59 CUC y la compra del mismo importa un costo de 8095,75 CUC, ahorrándose 3924,16 CUC.

Referencias Bibliográficas

1. Catálogo de Compresores (2003) *Generalidades de los compresores*.
2. Céspedes, (2013).
3. Comas, G. (2011). cojinetes de matl antifricción. *Interempresas*.
4. Dobrovolski, V. (1991). *Elementos de máquinas*. Moscú: Mir.
5. Hellemans, (1988) *Materiales Babbitt, Taunton, Massachusetts, EE.UU.*
6. Hernández Arcelio, P. B. (2011). *Propiedades del Babbitt B-83, obtenido por el método de fundición turbulento*. Medellín: Latin American and Caribbean Conference (LACCEI).
7. Hernández, A. G. (2013). Políticas y sistemas de mantenimiento. Moa.
8. Larrazabal, (2013).
9. Mataix, C. (1986). *Mecánica de los Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Madrid: Ediciones del Castillo, S. A.
10. Navarrete, E. P. (1986). *Mantenimiento Industrial*. La Habana: Gente Nueva.
11. Quijorna, A. J. (2007). *Elementos de Máquinas*. España: IMM.
12. Reshetov, D. (1987). *Elementos de máquinas*. Moscú: Mir.
13. Jóvaj (1987), Baranov (1999) y Herrera (2005b).
14. Albarracín (1996)
15. A.p Guliaev Micrografía Tomo II. Editorial Moscú 1978
16. Alfonso, E; Martin, J. Aplicación de la Ley de Wolf-Bragg en la determinación de las tensiones residuales de primer género. Memorias del II Taller Internacional de Didáctica de la Física “DIDACFISU’ 2000”.
17. Alfonso, E. Apuntes sobre la interrelación composición– microestructura y propiedades del acero. Monografía. ISBN 959-16- 0188-3. Universidad de Matanzas. 2002.



18. Alvarez, E; G, M. Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos. Construcción de Maquinaria. UCLV. Año 20. N 2. Mayo-agosto. 1995. p 69-76.
19. Alvarez, E. N, Lancestremere, J, Mareglia, J. C, Barr, J. Fundamentos de la trafilación. Tecnología Mecánica II. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería, 2004.
20. American Heller Corporation. "Skiving & Burnishing", USA, Obtenido de la Red mundial el 15 de febrero del 2003, [http:// www.americanheller.com](http://www.americanheller.com).
21. Barceinas, S y Juárez, A.H. Propiedades, Fortalecimiento y comportamiento de los Materiales, Capítulo IV, 2001.
22. Barret, C. Estructura de los metales. 1 ed. Editorial Aguilar. Madrid. 1957. 838p
23. Bushan, B; Gupta, B.K. Handbook of tribology. McGraw-Hill. New York 1991
24. Bright Burnishing Tools. "What is roller burnishing?", India, Obtenido de la Red
25. Franke, Rodamiento antifricción, sistemas lineales para la industria (2009).
26. Franke GMBH. (2009). Certificados ISO 9001:2000 e ISO 14001:2004. Aalen, Alemania
27. González Rey, G., García Toll, A., Ortiz Cárdenas, T. (2003). 14.Elementos de Máquinas. La Habana. Cuba
28. González Rey, A. García Toll, T. Ortiz Cardenas Elementos de Máquinas. Cojinetes de deslizamiento. Transmisiones Mecánicas. (2004)
29. Guliaev, A. Metalografía. Tomo II. Moscú. Editorial Mir. 1983. Pág. 17-22
30. Metal antifricción, reparación de rodamientos re-acondicionando el revestimiento anti-fricción o babbitt Eileen Banks (2008).
31. mundialel3deMayodel2003,<http://www.brightburnishingtools.com>.
32. Hu-Nai-Sai y Zhou Hui-Jiu The Effect of Surface Plastic Deformation on Fatigue Strength and its Mechanism. University Xian, China.2002.



33. Yu. M. Iajtin, metalografía y tratamiento térmico de los materiales editorial Moscú 1984.
34. Yu kozlov, Ciencia de los materiales. Editorial Mir 1986.
35. Kocks, U; Franciosi, P; Kawai, M.A. "A forest of latent hardening and its
36. 18 1103-1114 31. Key To Steel. Fracture Toughness. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en la World Wide Web en <http://www.keyto-steel.com/>
37. Key To Steel. Influence of Alloying Elements on Steel Microestructure. Key to Steel Web Site. 2002. Disponible en la World Wide Web en <http://www.key-to-steel.com/>.
38. Korotcishe.L. Procesos progresivos en la deformación plástica superficial por rodadura. Mir. Moscú. 1989. Pág 53-64.
39. Mazein, P.G. Prusakov, D.V., Tchunin, A.V. "Modelling the residua stresses and deformation during a surface plastic deformation operations", Proceeding of the Chelyabinsk Scientific Center, Issue #1, (10). January-March 2001, Rusia
40. MATERIALES. Bohler special steel manual for PC. Version 1.1. 1996

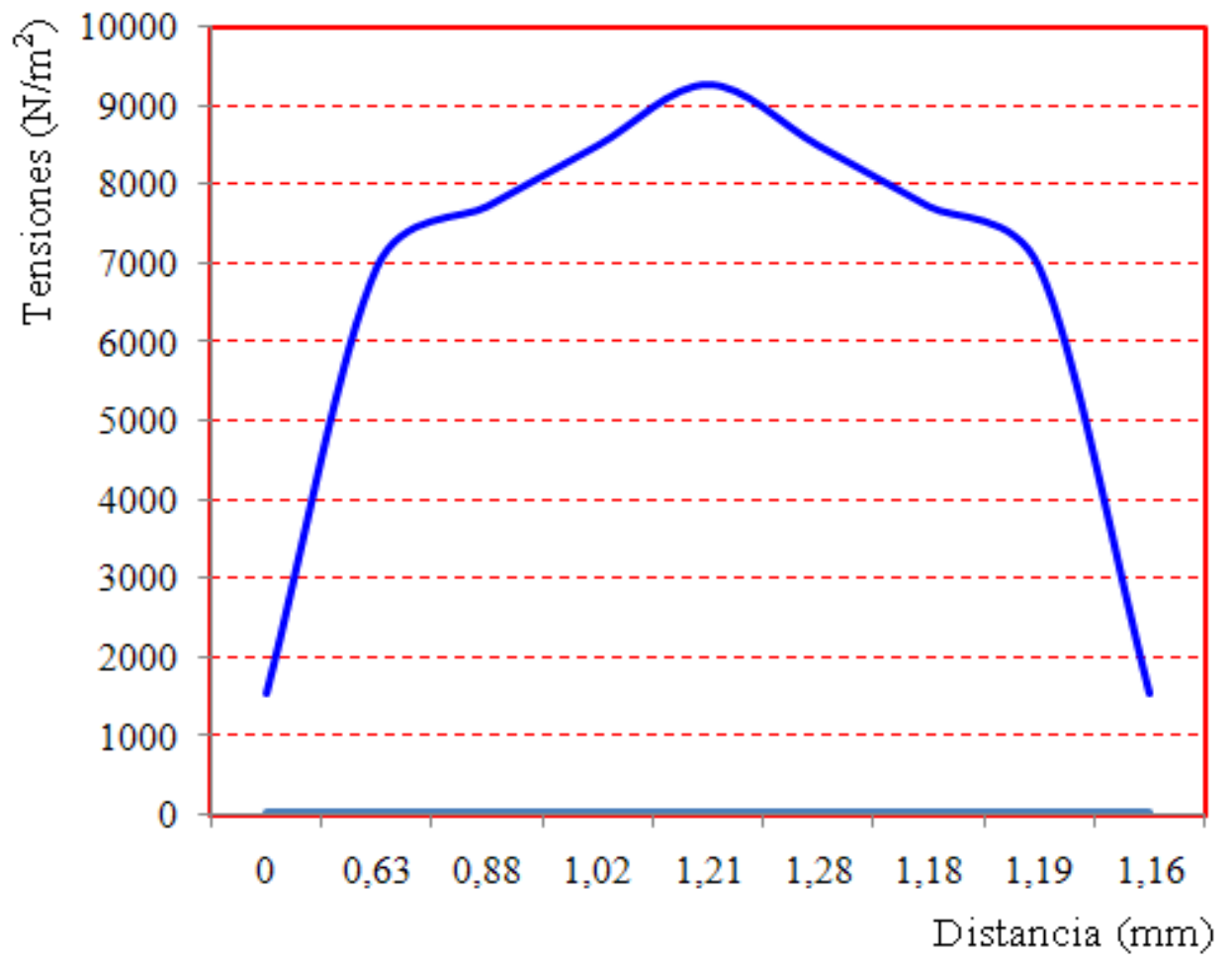
Anexos

Figura. Comportamiento de las tensiones vs dureza.



Figura. Cojinete de deslizamiento o contacto plano. a) tapa inferior



Figura 2.6. Área de selección de las muestras.