

REPÚBLICA DE CUBA.
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR.
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS.
FACULTAD DE INGENIERÍA



TRABAJO DE DIPLOMA
Facultad de Ingeniería
Colectivo de Mecánica Aplicada.



Título: Solución a la falla del cojinete hidrodinámico de la bomba de vacío en la Empresa Cereales Cienfuegos.

Autor: José Carlos Piñeiro Fernández

Tutor: Dr. Juan José Cabello Eras.

“Año 56 de la Revolución”

Cienfuegos 2014.

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS



Sistema de Documentación y Proyecto.

Hago constar que el presente trabajo constituye la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Cienfuegos, autorizando a que el mismo sea utilizado por el Centro de Estudio Superior para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de dicha institución.

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico Técnico

Nombre y Apellidos. Firma.

Vice Decano.

Firma del Tutor

Nombre y Apellidos. Firma.

Sistema de Documentación y Proyecto.

Nombre y Apellido. Firma.

“Aquella persona que nunca ha fallado es porque nunca ha intentado nada nuevo.”

Albert Einstein

Agradecimientos

A mis padres:

A ustedes, mis padres por apoyarme y darme la confianza para continuar el camino cuando pensé que todo estaba perdido, por darme la fuerza para levantarme y seguir adelante en el momento que la necesite, por compartir mi sacrificio y darme la oportunidad de graduarme en la universidad.

A mi familia:

Por estar siempre a mi lado, dotarme de los consejos más sanos y nutrirme de sus experiencias para ser mejor cada día. A mi tío Miguel y mi abuelo Luis aunque no puedan acompañarme en este momento de alegría, donde estén deben saber que llegue al final.

A mis profesores:

Porque sus enseñanzas a lo largo de la carrera me servirán para ser un profesional competente y comprometido con su labor. En especial a Juan José Cabello Eras por brindarme la oportunidad de ser tutorado por una persona que admiro mucho.

A mis amigos:

Por permitirme ser su amigo y por su apoyo incondicional en el momento en que lo necesite. En especial a Edel, Frank y Yoslendry mas que mis amigos, mis hermanos.

A la UCF:

Por darme la oportunidad de experimentar uno de los momentos inolvidables de mi vida, ser estudiante universitario y poder darme la oportunidad de graduarme como ingeniero mecánico.

A todos los que de una forma u otra hicieron posible realizar este sueño de graduarme como Ingeniero Mecánico.

Dedicatoria

A mi madre Luisa Fernández Jiménez, por ser lo más valioso que existe para mí, por tu comprensión, por aguantarme las malcriadeces, por luchar a mi lado todo estos años duros, por ser la columna donde me apoyo en los momentos difíciles.

A mi padre José Luis Piñeiro Morejón, por ser un escalón de referencia para mí, por ser ejemplo de todos los valores que han de caracterizar a los hombres.

A ambos mi agradecimiento por hacerme la persona que soy hoy, porque ustedes son la razón de mi existencia y a ustedes le debo lo que soy.

Resumen

El presente trabajo de diploma se orienta al restablecimiento de la capacidad operacional de los cojinetes hidrodinámicos de las bombas de vacío de la “UEB Cereales Cienfuegos”.

Consta de tres capítulos: un primer capítulo donde se realiza un análisis bibliográfico de los diferentes tipos de cojinetes ,según las condiciones de lubricación ,explotación y el tipo de carga a las que son sometidos ,la funciones de la lubricación en este tipo de cojinetes, los principales fallos, y los materiales que se emplean en su construcción. En el segundo capítulo se realiza una descripción de la empresa y una caracterización de la instalación donde se ubican las bombas de vacío, la solución aplicada a los cojinetes, además de la propuesta de una tecnología de recuperación. Finalmente en el tercer capítulo se realiza el redimensionamiento del conjunto cojinete-muñón y se realiza su optimización determinado la zona de ajustes donde el trabajo del cojinete es más satisfactorio y duradero.

Índice

Introducción.	1
Capítulo I: Generalidades sobre los cojinetes de deslizamiento.	4
1.1 Introducción al capítulo.	4
1.2 Bombas de vacío	4
1.3 Instalaciones por aspiración o succión.....	5
1.4 Funcionamiento.....	5
1.5 Ventajas y desventajas.	6
1.6 Cojinetes de deslizamiento.	7
1.7 Clasificación de los cojinetes de deslizamiento.....	7
1.8 Clasificación de los cojinetes de deslizamiento según las condiciones de lubricación.....	8
1.8.1 Lubricación Hidrodinámica.....	8
1.8.2 Lubricación Hidrostática.....	10
1.9 Funciones de la lubricación en los cojinetes de deslizamiento.	11
1.10 Lubricantes para cojinetes de deslizamiento.....	12
1.11 Clasificación de los cojinetes de deslizamiento radiales.	13
1.12 Fallos en los cojinetes de deslizamientos.	15
1.12.1 Fatiga por contacto.	15
1.12.2 Desgaste abrasivo.	17
1.12.3 Desgaste adhesivo.	18
1.12.4 Desgaste erosivo.	19
1.12.5 Desgaste corrosivo.	20
1.13 Materiales para la fabricación de cojinetes de deslizamiento.	21

1.13.1 Materiales metálicos.	21
1.14.2 Metales Babbitt.	21
1.13.3 Bronces.....	23
1.13.4 Aleaciones base Zinc y Aluminio.	24
1.13.5 Hierros fundidos antifricción.....	25
1.13.6 Materiales metalocerámicos.	25
1.13.7 Materiales no metálicos.	26
1.13.8 Materiales Plásticos.	26
1.13.9 Materiales elastoméricos (Gomas.)	26
1.13.10 Materiales Carbones-grafito.....	27
1.13.11 Madera.....	27
1.14 Aplicaciones del metal Babbitt antifricción en cojinetes de deslizamiento.	28
1.14.1 Aplicaciones de los cojinetes con babbitt.....	28
1.15 Cojinetes con metal babbitt.	28
1.16 Conclusiones parciales.	29
Capítulo II. Antecedentes de la falla, materiales y método de recuperación.....	30
2.1 Introducción al capítulo.	30
2.2 Descripción de la Empresa UEB Cereales Cienfuegos.....	30
2.3 Flujo productivo de la Empresa Cereales Cienfuegos.	31
2.4 Caracterización de la instalación.....	33
2.5 Características técnicas de la bomba de vacío.	34
2.6 Descripción del cojinete de deslizamiento.	36
2.7 Sistema empleado para la circulación del lubricante.	37
2.8 Tipo de aceite usado para la lubricación.	38

2.9 Análisis metalográfico de los materiales.	38
2.10 Descripción de la falla que se produce en el cojinete de deslizamiento.....	39
2.11 Determinación de las dimensiones diametrales en los muñones del árbol.	42
2.12 Solución aplicada al rediseño del cojinete de deslizamiento.....	44
2.13 Usos del babbitt B – 89.	47
2.14 Materiales utilizados para la recuperación del cojinete de deslizamiento.	50
2.15 Metodología para la recuperación del cojinete.....	51
2.16 Conclusiones parciales.	52

Capítulo III. Rediseño y optimización del cojinete de deslizamiento.. 53

3.1 Introducción al capítulo.	53
3.2 Factores de diseño en los cojinetes de deslizamiento.	53
3.3 Empleo de técnicas de optimización en el diseño.....	54
3.4 Rediseño del árbol y el cojinete.	56
3.5 Cálculos de optimización.	58
3.5.1 Datos del aceite empleado en los cojinetes de deslizamientos.	58
3.5.2 Datos del cojinete.	60
3.5.3 Determinación de las cargas que actúan sobre el cojinete de deslizamiento.....	61
.....	62
3.5.5 Cálculo de la clarencia diametral.	65
3.5.6 Dependencia entre los parámetros de operación del cojinete y la clarencia diametral.....	65
3.5.7 Balance térmico del cojinete.....	66
3.6 Análisis de los resultados obtenidos.	70
3.7 Ajuste recomendado.	74
3.7.1 Selección de la tolerancia del cojinete.....	74

3.7.2 Determinación del juego máximo.....	75
3.7.3 Determinación del diámetro mínimo.	75
3.7.4 Selección de la tolerancia del árbol.	76
3.7.5 Determinación del diámetro mínimo.	77
3.8 Comprobación de la resistencia al agarramiento.	77
3.8.1 Consideraciones finales.....	78
3.9 Conclusiones parciales.	79
Conclusiones Generales	81
Recomendaciones	82
Bibliografía	83
Anexos	84

Introducción.

La Empresa Cereales Cienfuegos tiene como objeto social la producción de harina de trigo, tiene más de treinta años de operaciones y su tecnología en sentido general tiene un grado de obsolescencia elevado.

Esta industria además del proceso relacionado con la molienda del trigo y la fabricación de la harina realiza operaciones de descarga a buques graneleros a través de los que recibe la materia prima.

En el sistema para la descarga de los buques y la transportación interna del trigo, las bombas de vacío juegan un papel fundamental. En los últimos años estas bombas han tenido numerosas paradas por el fallo de sus cojinetes y de hecho hay dos fuera de servicio.

Los cojinetes son de deslizamiento con lubricación hidrodinámica, después de veinte años de operaciones y como resultado del desgaste en sus superficies fallaron y fueron recuperados mediante una tecnología de rellenado con metal babbitt y posterior maquinado. Los cojinetes recuperados han tenido una vida útil limitada, de menos de un año lo que ha causado la inestabilidad en el trabajo de las bombas de vacío.

Esta baja vida útil puede tener varias causas, primeramente solo se recupera el casquillo, comoquiera que las dimensiones del muñón han variado por el desgaste y la holgura diametral no es la requerida para asegurar la formación de la película hidrodinámica de aceite durante un largo tiempo. En segundo lugar las condiciones en que se desarrolla la recuperación no aseguran la precisión requerida por este tipo de cojinete.

Para dar una solución correcta a la falla del cojinete es necesario el rediseño completo del conjunto, de manera que se restituyan las características dimensionales requeridas para asegurar su capacidad de trabajo durante un tiempo razonable.

Problema:

La baja vida útil de los cojinetes de deslizamiento de las bombas de vacío que succionan cereales de los buques mercantes.

Hipótesis:

Es posible rediseñar los cojinetes de las bombas de vacío que succionan cereales de los buques mercantes de manera que al recuperarse trabajen en lubricación hidrodinámica y tengan una elevada vida útil.

Objetivo General:

Rediseñar los cojinetes de las bombas de vacío de manera que se asegure un régimen de lubricación hidrodinámica en los cojinetes recuperados.

Objetivos específicos:

1. Realizar un estudio documental acerca de los cojinetes de deslizamientos.
2. Determinar la causa de la falla en los cojinetes.
3. Seleccionar los materiales que se utilizaran para el rediseño y recuperación de los cojinetes.
4. Elaborar y proponer una tecnología de recuperación para los cojinetes.
5. Rediseñar los cojinetes de deslizamiento, mantener su régimen hidrodinámico y que estos resistan las condiciones de explotación a la que serán sometido una vez recuperado.
6. Realizar los cálculos de optimización al rediseño de los cojinetes.
 - Establecer la clarencia diametral óptima en el cojinete de deslizamiento de la bomba de vacío y seleccionar las tolerancias de maquinado del casquillo y el árbol para que garanticen mejores condiciones de operación y mayor vida de servicio.
 - Seleccionar el ajuste requerido para la fijación del casquillo y el árbol a, con vistas a que la empresa pudiera recuperar completamente dicho casquillo.

- Realizar los cálculos de resistencia al agarramiento.

Resultados Previstos:

Se espera que mediante el rediseño de los cojinetes y su posterior recuperación las bombas de vacío puedan restablecer su capacidad de trabajo.

Capítulo I: Generalidades sobre los cojinetes de deslizamiento.

1.1 Introducción al capítulo.

En este capítulo se realiza una breve revisión bibliográfica acerca de las bombas de vacío, las instalaciones por aspiración o succión, como funcionan estas instalaciones, además de introducirnos propiamente al tema de los cojinetes de deslizamiento, donde se expondrá el principio de trabajo de los cojinetes, su clasificación según las condiciones de cargas, condiciones de explotación y en especial las condiciones de lubricación, también, como es la función de la lubricación para este tipo de cojinetes, los distintos tipos de lubricantes utilizados, la clasificación según su construcción, los tipos de fallas que le ocurren a estos y los materiales empleados para su fabricación, en específico el metal babbitt antifricción.

1.2 Bombas de vacío

Las bombas de vacío son utilizadas para crear el vacío y efectuar así la aspiración de partículas. Son habitualmente instaladas como máquinas aspiradoras en procesos de descarga industriales. Pueden ser instaladas en serie o paralelo en caso de requerir más de un equipo. Disponibles con salida tangencial o radial para direccionar la salida de aire.



Figura 1.1 Bomba de vacío.

1.3 Instalaciones por aspiración o succión.

Este tipo de transporte se emplea especialmente para manipular granos cereales, semillas, sal y otras sustancias granulosas que no sean adhesivas, pegajosas o frágiles.

Se utilizan para descarga a silos de vagones, de bodegas de buques, etc., pudiendo dar rendimientos de hasta 175000 litros de grano por hora, en la figura 1.2 se muestra un esquema de una instalación por aspiración.

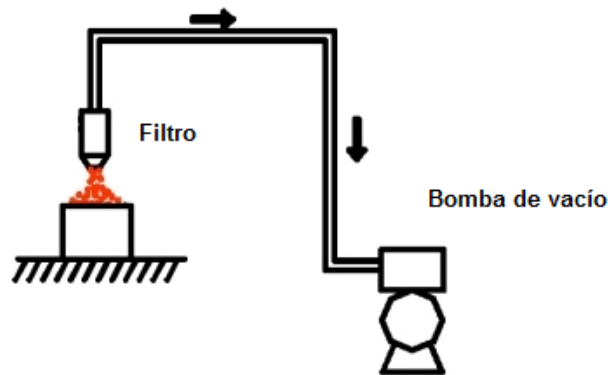


Figura 1.2 Esquema de instalación por aspiración.

1.4 Funcionamiento.

Estas instalaciones emplean el vacío para la succión de material. El aire es evacuado de la tubería de aspiración y la presión atmosférica empuja el material en la misma. Por tanto, es la presión atmosférica la que, indirectamente, hace el trabajo. La corriente de aire que se forma en el proceso de igualar las presiones, arrastra las partículas sólidas al interior de la tubería. En la figura 1.3 se muestra como se crea el vacío dentro de la tubería de succión.

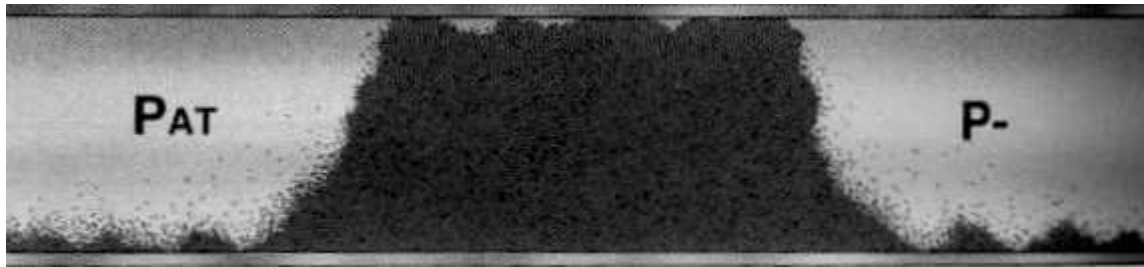


Figura 1.3 Diferencia de presiones en la tubería.

Todos los transportadores por vacío funcionan según el principio básico ilustrado en la figura 1.4, el material es transportado por una tubería, desde un punto de aspiración a un depósito en el que es separado del aire. Un filtro limpia el aire antes de que pase por la fuente de vacío. La secuencia de funcionamiento es regulada por una unidad de control.

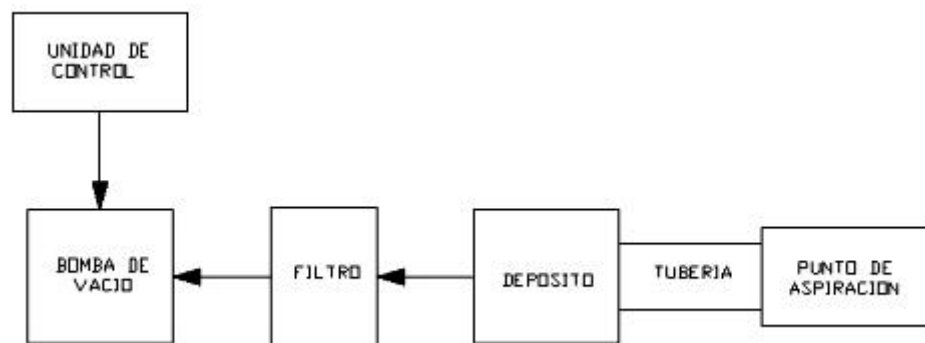


Figura 1.4 Esquema de funcionamiento de transportador por vacío.

1.5 Ventajas y desventajas.

Tienen las siguientes ventajas: simplicidad; posibilidad de aspirar los materiales de la pila o depósito donde están almacenados; evitan el paso de los materiales por la bomba.

Sus inconvenientes pueden resumirse como sigue:

Necesidad de instalar un filtro para separar el aire del material, limitación de la potencia porque en la práctica difícilmente se consiguen presiones inferiores a 0.9 atmósferas con una bomba y 0.4 atmósferas con un ventilador.

1.6 Cojinetes de deslizamiento.

Los cojinetes de deslizamiento basan su funcionamiento en la fricción por deslizamiento, un muñón y un casquillo fabricado de materiales con propiedades particulares y la introducción de un lubricante como tercer elemento del conjunto tribológico hacen que el coeficiente de fricción sea bajo, permitiendo al cojinete operar de manera tal que no se produzca contacto entre los metales (Figura 1.5).

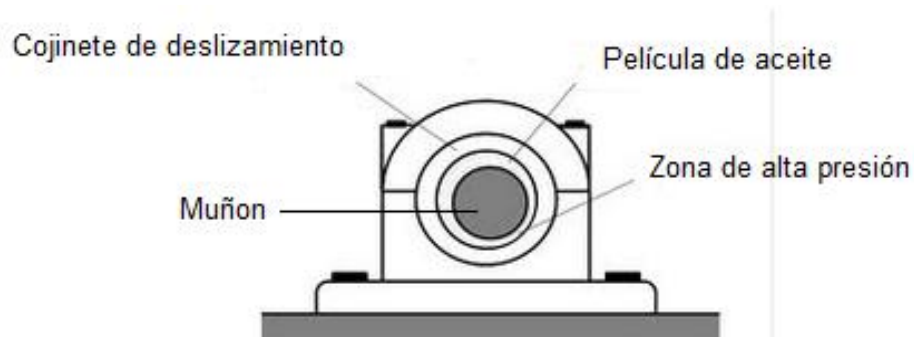


Figura 1.5 Cojinete de deslizamiento.

1.7 Clasificación de los cojinetes de deslizamiento.

Los cojinetes de deslizamiento se clasifican en dependencia de la relación entre la carga y el movimiento relativo, las condiciones de explotación y de lubricación. En la tabla 1.1 se muestra un resumen.

Tabla 1.1 Clasificación de los cojinetes de deslizamiento.

Relación entre la carga y el movimiento relativo	Cojinetes Radiales (Carga perpendicular al eje de rotación)
	Cojinetes Axiales (Carga paralela al eje de rotación)
	Guías Deslizantes (Carga perpendicular a la superficie deslizante)
Condiciones de Explotación	Cojinetes de Fricción Seca (No utilizan lubricantes)
	Cojinetes de Fricción Lubricada (Utilizan lubricantes en su explotación)
Condiciones de Lubricación	Cojinetes con Lubricación Limite
	Cojinetes con Lubricación Mixta
	Cojinetes con Lubricación Hidrodinámica
	Cojinetes con Lubricación Hidrostática

1.8 Clasificación de los cojinetes de deslizamiento según las condiciones de lubricación.

Los cojinetes de deslizamiento se pueden clasificar por sus condiciones de lubricación en, cojinetes hidrodinámicos o cojinetes hidrostáticos.

1.8.1 Lubricación Hidrodinámica.

La lubricación hidrodinámica se caracteriza por la existencia de una capa o película de lubricante, que separa completamente las superficies, evitando que se produzca el contacto metal - metal. La lubricación hidrodinámica no depende de la introducción del lubricante a presión, aunque ello puede ocurrir; pero si requiere la existencia de un suministro adecuado. La presión en la capa de lubricante la crea la propia superficie en movimiento al arrastrar el lubricante hacia una zona en forma de cuña, a una velocidad suficiente elevada que origine la presión necesaria para separar las superficies en contacto (Burgos, H.L 2002).

La figura 1.6 muestra como ocurre el proceso de lubricación hidrodinámica. El aceite entrando en la holgura que se reduce en dirección del giro del árbol; se comporta prácticamente como un líquido incomprensible. Esto lo obstaculizan las fuerzas de viscosidad, como resultado de lo cual en la capa de aceite surge una presión que crece progresivamente hacia el punto de mayor aproximación del árbol y del cojinete, donde la salida del aceite se hace dificultosa, debido al poco huelgo.

Una parte del aceite fluye por los extremos del cojinete y en sentido contrario al movimiento del árbol; la parte restante debe pasar por el lugar más angosto de la holgura. Las considerables presiones que se desarrollan en la capa del aceite producen en primer lugar cierto alzamiento del árbol, ensanchando las secciones de paso, en segundo lugar eleva la velocidad de escurrimiento del lubricante.

Debido a este efecto conjunto, se produce un estado de equilibrio que se caracteriza por tal reparto de presión en la capa de lubricante, con el cual el volumen de aceite que fluye en todas direcciones, en una unidad de tiempo, es igual al volumen del aceite aportado por el árbol, en el huelgo que se va estrangulando.

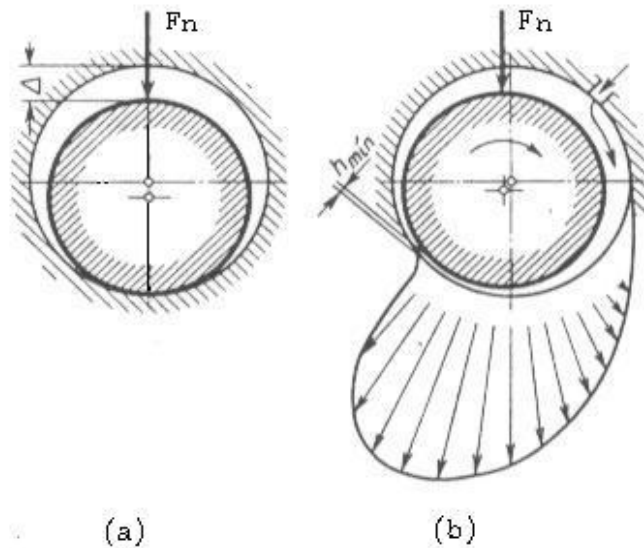


Figura 1.6 Lubricación hidrodinámica

El aceite entrando en la holgura que se reduce en dirección del giro del árbol; se comporta prácticamente como un líquido incomprensible; tiende a fugarse en sentido axial y circular (hacia los extremos del cojinete). Esto lo obstaculizan las fuerzas de viscosidad, como resultado de lo cual en la capa de aceite surge una presión que crece progresivamente hacia el punto de mayor aproximación del árbol y del cojinete, donde la salida del aceite se hace dificultosa, debido al poco huelgo.

1.8.2 Lubricación Hidrostática.

Consiste en suministrar presión elevada de aceite a unas cavidades situadas abajo del cojinete que soporta el árbol independientemente de que gire o no. Este tipo de lubricación se emplea en equipos en los que las velocidades relativas son pequeñas y los árboles son muy grandes.

En figura 1.7 se muestra el régimen de lubricación hidrostática o lubricación por presión de aceite.

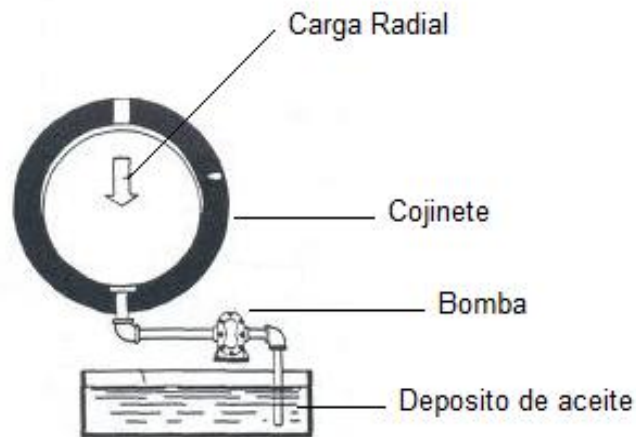


Figura 1.7 Lubricación por presión de aceite.

1.9 Funciones de la lubricación en los cojinetes de deslizamiento.

La lubricación en los cojinetes de deslizamiento tiene como función principal evitar o reducir el contacto metálico entre las superficies de deslizamiento, es decir, mantener bajo el rozamiento y el desgaste para así poder elevar la vida útil de los mismos.

En la figura 1.8 se muestra como el árbol se encuentra estático y como resultado de la velocidad periférica del muñón se forma una película de lubricante provocando una holgura entre el muñón y el casquillo para que no exista contacto entre los metales, según sea el espesor de la película de aceite, serán las condiciones de trabajo del árbol.

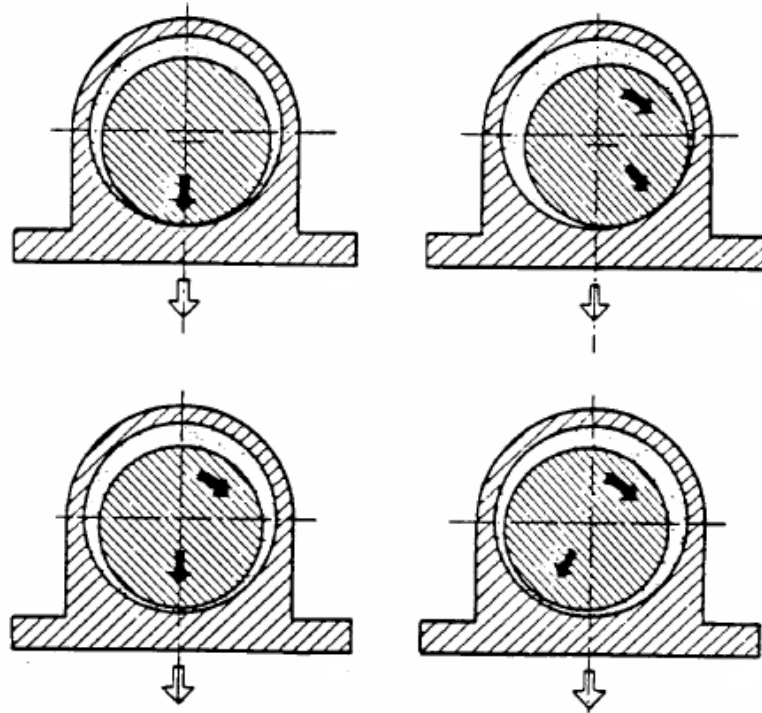


Figura 1.8 Formación de la película de lubricante.

1.10 Lubricantes para cojinetes de deslizamiento.

En la actualidad los lubricantes se consideran como el tercer material que constituye la unión tribológica, de aquí su importancia en el proceso de diseño de los cojinetes de deslizamiento.

En la lubricación de los cojinetes de deslizamiento radiales los lubricantes más utilizados son los aceites minerales y las grasas. Los aceites sintéticos pueden ser utilizados si la temperatura de trabajo del cojinete es muy alta. En la Tabla 1.2 se resume el rango de operación de los principales lubricantes.

La propiedad más importante de un aceite lubricante para la lubricación de los cojinetes de deslizamiento radiales es la viscosidad. Si la viscosidad es baja el cojinete tendrá una inadecuada capacidad de carga, mientras que si la viscosidad es alta la pérdida de potencia y las temperaturas de trabajo pueden ser innecesariamente altas.

Tabla 1.2 Campo de empleo de los lubricantes.

Lubricante	Rango de operación	Observaciones
Aceites minerales	Todas las condiciones de carga y velocidad	El rango de viscosidad disponible es amplio. Para problemas potenciales de corrosión con ciertos aditivos
Aceites sintéticos	Para todas las condiciones si la viscosidad adecuada está disponible.	El rango de viscosidad disponible es limitado.
Grasas	Uso restringido para velocidades de deslizamiento por debajo de 1 a 2 m/s	Bueno, cuando el sellado contra la suciedad y la humedad es necesario y cuando el movimiento es intermitente o actúan cargas de choque.

Los aceites lubricantes utilizados en los cojinetes radiales deben poseer la viscosidad adecuada, con el fin de que la cuña de aceite sea lo suficiente eficaz para mantener la película de lubricante adecuada.

1.11 Clasificación de los cojinetes de deslizamiento radiales.

Cojinetes de deslizamientos cerrados: Estos están constituidos por un casquete de una sola pieza e integrado al cuerpo del cojinete. Las insuficiencias principales de este tipo de cojinete estriban en la necesidad de introducir el muñón por los extremos y en

que no se puede compensar el aumento de la holgura del cojinete a medida que se desgasta este.

Cojinetes de deslizamiento partidos: El casquete está dividido en dos partes y puede ser independiente al cuerpo del cojinete, como en las aplicaciones automotrices y en los compresores de pistón o estar unidos a las dos mitades del cojinete, formando un solo bloque con cada una de ellas. Las dos mitades se acoplan y se unen con pernos.

En la figura 1.5 se muestran los diferentes tipos de cojinetes de deslizamiento según su construcción.

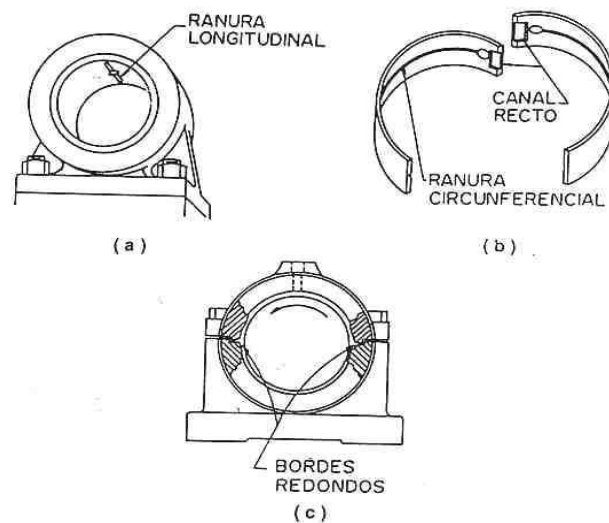


Figura 1.9 Cojinetes de deslizamiento radiales.

(a) Cerrados o de casquillo. (b) Divididos independiente del cuerpo del cojinete.

(c) Dividido integrado al cuerpo del cojinete.

Existen otros tipos de cojinetes radiales partidos que tienen su mayor aplicación en turbo - máquinas en donde debido a las altas velocidades de operación (7000 r.p.m. o más), se puede presentar el fenómeno de turbulencia en el aceite, lo cual da lugar a que la amplitud de las vibraciones en el árbol sea lo suficiente alta como para causar fallas catastróficas no solamente en los cojinetes sino en otros componentes del equipo.

1.12 Fallos en los cojinetes de deslizamientos.

Los cojinetes de deslizamiento al igual que otros elementos de máquinas sufren diferentes tipos de fallos durante su explotación y es necesario remplazarlos periódicamente; de lo contrario, se puede presentar que la máquina o equipo no funcione adecuadamente o en caso extremo deje de funcionar.

La vida útil de estos elementos es controlable y depende del diseñador, del usuario o del personal que efectúa el mantenimiento. Cuando las condiciones de montaje y explotación son satisfactorias, la vida de los cojinetes de deslizamiento o planos depende de los diferentes tipos de desgaste que se pueden presentar.

En la figura 1.10 se muestra un esquema con los fallos de los cojinetes planos donde se clasifican en las siguientes categorías:

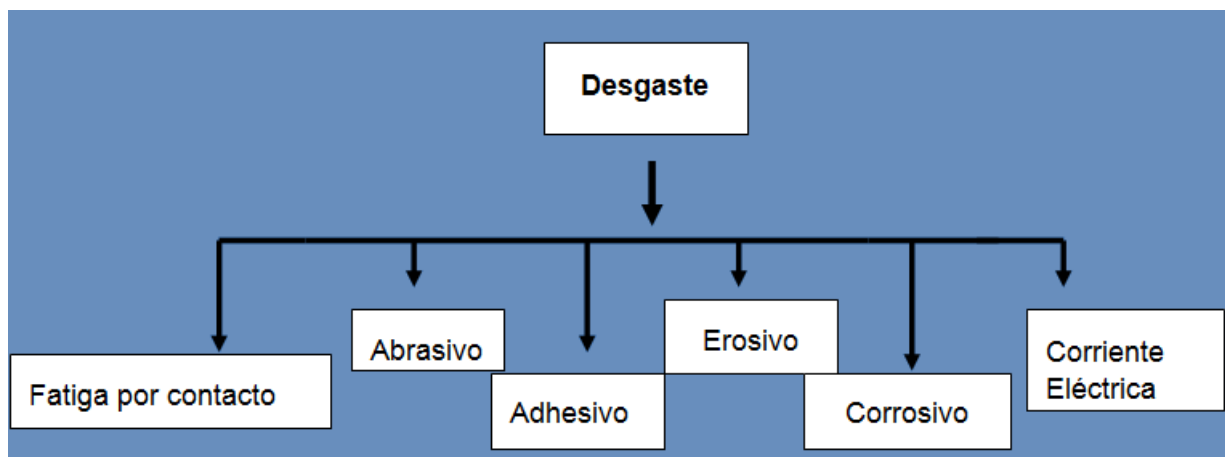


Figura 1.10 Esquema de los fallos a cojinetes de deslizamiento.

1.12.1 Fatiga por contacto.

La fatiga por contacto es un proceso normal que se presenta en todos los cojinetes planos radiales como resultado de la variación cíclica de los esfuerzos. La fatiga se puede acelerar como resultados de altas cargas, velocidades y temperaturas excesivas, por el tipo de material empleado, como es el caso de los babbitt, que presenta baja resistencia a la fatiga.

La fatiga en los materiales antifricción se manifiesta en primer lugar por la aparición de unas grietas diminutas paralelas que tienden a propagarse por toda la superficie de contacto; con el tiempo estas grietas se ensanchan y profundizan, trayendo finalmente el desprendimiento de una porción de material.

Observaciones: Un cojinete radial se debe de reemplazar cuando las caries o grietas cubren entre el 10 al 20 % de la superficie de contacto.

En general se considera que la resistencia a la fatiga se incrementa cuando se disminuye el espesor de la capa del material depositado. En la Figura 1.11 se muestra el estado de la superficie de un cojinete plano deteriorado producto de la fatiga.

La durabilidad del cojinete se puede incrementar con la disminución de las tensiones, el logro de una lubricación de película gruesa, una adecuada selección del lubricante, una selección correcta del huelgo.

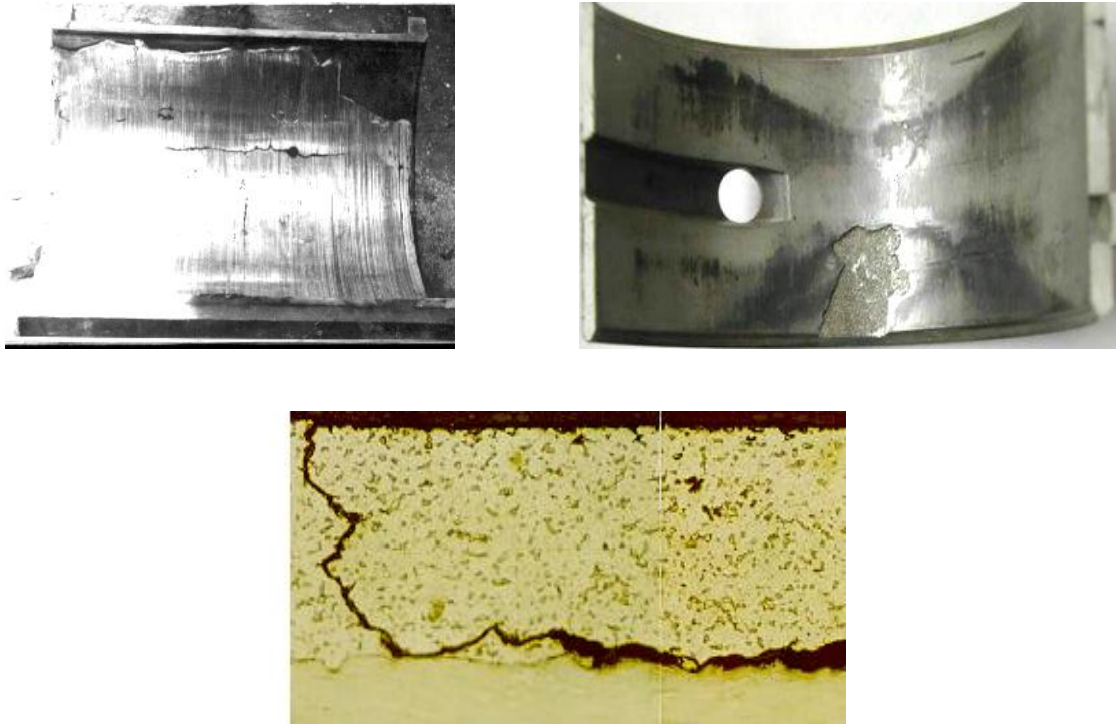


Figura 1.11 Desgaste por fatiga de una chumacera de metal babbitt.

1.12.2 Desgaste abrasivo.

Es el resultado de la presencia de partículas duras de origen metálico u orgánico entre las superficies en contacto, proveniente directamente del medio o por encontrarse en el aceite lubricante.

Si las partículas abrasivas son más blandas y de menor tamaño que la capa de material antifricción se pueden incrustar dentro de ella y no causar daños; si son más duras pueden causar rayaduras (deformaciones plásticas) o microcorte en la superficie. (Figura 1.12).

Es posible que estas partículas se adhieran al muñón desgastando el cojinete, o viceversa, en cuyo caso el muñón será afectado; también es posible que se adhieran las partículas a ambas superficies produciéndose el desgaste en ambas superficies.

El desgaste abrasivo también se produce, producto de la acción de asperezas superficiales de altas durezas al contactar con el material antifricción debido a la no existencia de una película lubricante de adecuado espesor.

Las medidas a tomar para evitar el desgaste abrasivo se corresponde con la filtración adecuada del aceite lubricante y el sellaje apropiado del cojinete plano. En el caso de la abrasión entre dos cuerpos el desgaste se disminuye, logrando una lubricación de película gruesa y/o la selección correcta de los materiales.

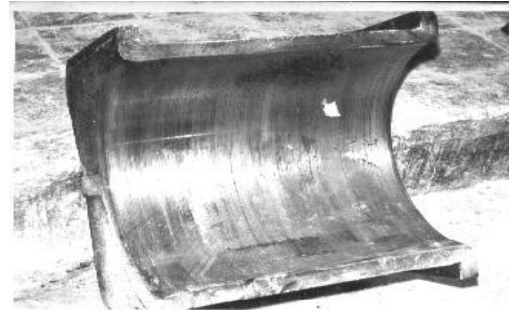


Figura 1.12 Desgaste abrasivo en un cojinete.

1.12.3 Desgaste adhesivo.

Es el resultado de una lubricación deficiente o nula entre el cojinete y el muñón, considerables cargas y velocidades de deslizamiento todo lo cual lleva a la adhesión entre las asperezas de las superficies y por lo tanto al agarramiento y desprendimiento del material menos resistente, en casos extremos es posible que se produzca la soldadura entre el cojinete y el muñón. El estado de las superficies se muestra en la Figura 1.13. Para combatir el desgaste adhesivo es necesario eliminar las causas que lo producen, lo que se logra con un diseño que asegure la lubricación hidrodinámica, una explotación eficiente y un montaje correcto.

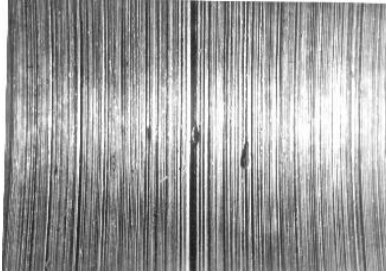


Figura 1.13 Desgaste adhesivo severo, conocido como gripado.

1.12.4 Desgaste erosivo.

Se presenta en la superficie del cojinete como resultado de la acción de un fluido, ya sea por alta presión o por cambios en su dirección. Esta acción da lugar a la formación de pequeñas oquedades, con el respectivo desprendimiento de material. En la Figura 1.14 se muestra como ocurre el desgaste erosivo bajo la acción de un flujo de aceite.

Este tipo de desgaste es factible que se presente con aceites que tienen una baja resistencia a la formación de espumas o por cavitación de la película lubricante, en este caso las burbujas de aire, al explotar, producen altas presiones localizadas que originan el deterioro de la superficie del cojinete.

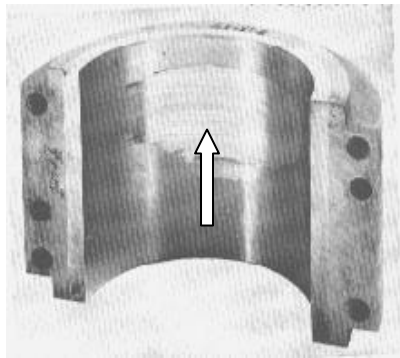


Figura 1.14 Desgaste erosivo debido al flujo de aceite.

1.12.5 Desgaste corrosivo.

La corrosión de los materiales de los cojinetes se debe a la acción química de los lubricantes oxidados o por la contaminación de estos con otras sustancias. El desgaste corrosivo también se puede presentar como consecuencia de la reacción de algunos aditivos de extrema presión con la superficie del babbitt, principalmente cuando existe agua en el aceite. La corrosión se manifiesta en la superficie del cojinete (Figura 1.15).

El desgaste corrosivo surge debido a la presencia en el lubricante de productos que agreden el metal del cojinete; los metales más propensos a la corrosión producto de determinados aditivos son: el cadmio y el plomo; poca tendencia a la corrosión lo tienen las aleaciones de aluminio y babbitt base estaño.

La presencia de azufre en el lubricante tiende a producir la corrosión de las aleaciones base cobre y de los babbitt. (Base estaño o plomo).

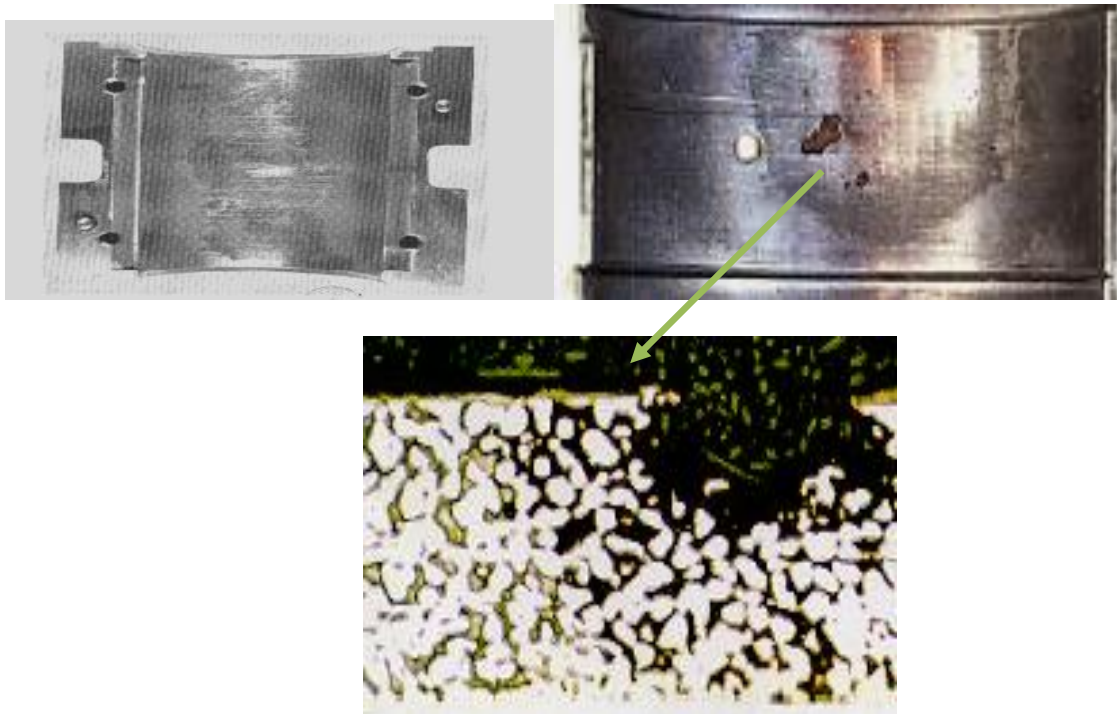


Figura 1.15 Desgaste corrosivo debido a la acción del lubricante.

1.13 Materiales para la fabricación de cojinetes de deslizamiento.

Si las condiciones de funcionamiento de los cojinetes de deslizamiento radiales fuesen ideales; las superficies del cojinete estuviesen separadas siempre por una película de lubricante, si nunca se presentasen deformaciones elásticas o térmicas, ni existiesen las irregularidades superficiales, ni el lubricante contuviese partículas extrañas (polvo u otros materiales abrasivos), se podría emplear prácticamente cualquier material en su construcción, siempre que tuviese la resistencia mecánica adecuada. Sin embargo estas condiciones ideales prácticamente no existen.

Es por esta razón que en la actualidad se emplea una amplia gama de materiales tribotécnicos en la construcción de los cojinetes de deslizamiento en correspondencia con las disímiles condiciones de explotación a que están sometidos.

Estos materiales se pueden dividir en tres grandes grupos:

1.13.1 Materiales metálicos.

Estos fueron los primeros materiales utilizados en cojinetes de deslizamiento, generalmente se emplean cuando existe preferentemente un régimen de lubricación hidrodinámico o mixto y en condiciones continuas de trabajo. Estos materiales se obtienen mediante procesos de fundición o laminado.

1.14.2 Metales Babbitt.

Los metales antifricción denominados babbitt son aleaciones de varios metales en los cuales, como componente principal, un metal blando y bastante resistente, tal como el estaño o el plomo, y ciertas cantidades de antimonio, cobre y algunos otros elementos. Porciones de estaño, antimonio y cobre se combinan y forman durante el enfriamiento cristales duros, estos cristales forman la superficie verdadera del cojinete, la cual soporta la carga, recibe los choques y vibraciones del árbol de apoyo y las trasmite a la base blanda del metal. La base blanda ofrece el efecto amortiguador y absorbe los choques. De esto se deduce que los cristales que tienen que soportar estas cargas deben ser duros, no muy grandes y estar densamente dispersos en toda la superficie.

Los babbitt se caracterizan por su plasticidad, buena capacidad de asentamiento y resistencia al desgaste. La plasticidad garantiza el reparto uniforme de la carga por la superficie portante, resulta relativamente sin peligro la penetración en el cojinete de partículas duras diminutas (polvo metálico, productos duros de la oxidación del aceite) que penetran en el babbitt y se neutralizan.

Generalmente los babbitt se utilizan en forma de capa moldeada sobre un soporte de bronce, acero o fundición de hierro. A fin de conseguir una adherencia adecuada, el substrato debe de encontrarse debidamente preparado y estañado, antes de moldear las capas de metal babbitt.

El espesor de la capa moldeada influye sobre la resistencia a la fatiga del babbitt y la vida de servicio del cojinete, con la disminución del espesor de la capa de recubrimiento se incrementa la resistencia a la fatiga y la vida de servicio del cojinete.

El espesor de la capa de recubrimiento también influye en el coeficiente de fricción, con el incremento de esta se incrementa el coeficiente de fricción.

El espesor del revestimiento se hace últimamente hasta 0.25 - 0.40 mm se obtienen mejores resultados con la aplicación electrolítica de la capa de babbitt de 10 a 20 μm . de espesor sobre un soporte de bronce poroso. La reducción de la resistencia mecánica del revestimiento de babbitt se previene refrigerando intensamente con aceite los cojinetes.

El incremento de la temperatura reduce considerablemente la resistencia mecánica de los babbitt, la resistencia a la compresión y la dureza Brinell. Los babbitt más típicos revelan que con una variación de la temperatura de 20 $^{\circ}\text{C}$ a 100 $^{\circ}\text{C}$, estos pierden aproximadamente el 50% de su resistencia a la compresión y su dureza inicial.

Los babbitt pueden trabajar en par con árboles de acero mejorado y normalizados con (HRC 25 - 35) sin embargo para aumentar la fiabilidad y la longevidad del cojinete es mejor someter los árboles al temple y el revenido a baja temperatura (HRC 50 – 55).

1.13.3 Bronces.

Los bronce son una de las aleaciones antifricción más utilizadas en la fabricación de cojinetes de deslizamiento, esto se debe a sus adecuadas características tribotécnicas y a sus excelentes características de fundición, maquinabilidad y a su economía.

En la actualidad se utilizan muchas aleaciones de bronce en una amplia gama de aplicaciones. Por un lado nos encontramos con aleaciones blandas, que contienen grandes cantidades de plomo y pequeñas de estaño, las cuales tienen una resistencia mecánica relativamente baja y buenas características tribológicas, y por otro, tenemos los de elevado contenido en estaño y pequeñas o nulas porciones de plomo. Entre ambos extremos se encuentran un número considerable de aleaciones, que tienen diversas cantidades de plomo y estaño y proporciones de otros elementos como Zn, Al, Si, P, Ni, etc.

Los bronce base estaño poseen las mejores propiedades antifricción (bajo coeficiente de fricción y buena resistencia al desgaste). Debido a su alta conductividad térmica y propiedades mecánicas se utilizan en cojinetes de deslizamiento sometidos a altas cargas.

Los bronce al plomo son más resistentes y duros que los babbitt. A diferencia de estos su dureza y resistencia mecánica permanecen prácticamente inalterables hasta 200 °C. El defecto de los bronce al plomo es su baja resistencia a la corrosión (debido a la presencia de plomo libre), además el plomo provoca la oxidación del aceite durante la explotación. La capacidad de asentamiento y las propiedades antifricción de los bronce al plomo son inferiores a la de los babbitt. Generalmente estas aleaciones se utilizan en cojinetes bimetálicos, el cuerpo de hierro fundido o acero y una capa de bronce. Las propiedades mecánicas se incrementan para capas finas (0.5 a 1.5 mm.) del bronce base plomo.

Los bronce al aluminio tienen una alta resistencia a la corrosión, altas propiedades mecánicas, bajo coeficiente de fricción con el acero, buena resistencia al desgaste, sin embargo exigen aumentar la dureza del otro material del par cinemático para evitar su desgaste.

Los bronce de aluminio-hierro que tienen una elevada dureza, se emplean para fabricar casquillos que trabajan a altas cargas y pequeñas velocidades, en condiciones de fricción mixta (por ejemplo, los casquillos guías de la válvula de admisión de los motores de combustión interna).

1.13.4 Aleaciones base Zinc y Aluminio.

Las aleaciones de aluminio antifricción poseen bajo coeficiente de fricción y resistencia al desgaste elevado. Sus cualidades tecnológicas son inferiores a la de los babbitt normales. Su mayor dureza hace que el acabado de los muñones y de los cojinetes debe ser más fino y el muñón debe ser duro. Si estas condiciones no se cumplen el desgaste se acelera. El alto coeficiente de dilatación lineal de estas aleaciones impone un ajuste más cuidadoso y con mayores huelgos.

Las aleaciones de aluminio se emplean en sustitución de los babbitt base estaño y de plomo, así como del bronce al plomo.

Las aleaciones base zinc tienen una amplia utilización hoy en día debido a su bajo costo y a sus aceptables propiedades antifricción.

La apreciable resistencia mecánica de estas aleaciones permite la construcción de tejuelas enteras, tanto si se fabrican en moldes de arena, como si son fundidos por centrifugado, así mismo se pueden fabricar por estampado. También se pueden fabricar cojinetes bimetálicos, donde la aleación base zinc puede recubrir el respaldo de acero mediante el proceso de fundición.

Las aleaciones base zinc como material antifricción pueden sustituir en algunos cojinetes al babbitt y a los bronce. Estas aleaciones se comportan más favorablemente que los babbitt y los bronce desde el punto de vista del desgaste sobre todo cuando existen partículas abrasivas, además presentan una tendencia reducida al agarramiento, cuando existen condiciones anormales de trabajo.

Estas aleaciones debido a su alto valor del coeficiente de dilatación lineal respecto a los bronce, deben de fabricarse los cojinetes con mayor huelgo, prácticamente deben hacerse con un huelgo, de 0.125 a 0.15 % del diámetro del árbol.

1.13.5 Hierros fundidos antifricción.

Como sucedáneos baratos de los broncees se emplean hierros fundidos grises antifricción. Los defectos de los hierros fundidos antifricción son su fragilidad y la alta dureza (HB 170 - 260), que excluye la posibilidad del autoajustamiento. Los cojinetes fabricados con estos materiales antifricción son sensibles a los torcimientos que provocan altas presiones de borde.

Los cojinetes de hierro fundido antifricción se emplean con árboles de alta dureza superficial (HB > 55).

1.13.6 Materiales metalocerámicos.

Se emplean en cojinetes de pequeñas dimensiones, después de haber sido impregnados de un lubricante.

Los cojinetes de estos materiales porosos antes de ser utilizados se impregnan en aceite a una temperatura de 100 °C a 120 °C. Con esta reserva de aceite es suficiente para varios meses de trabajo sin engrase. Periódicamente hay que reiterar la impregnación (disolviendo previamente el aceite viejo) Para aumentar la duración de servicio, en la construcción de los cojinetes se emplean depósitos que se llenan de aceite.

Los cojinetes de deslizamiento radiales fabricados con materiales metalocerámicos trabajan satisfactoriamente a cargas moderadas y pequeñas velocidades. El aceite en la zona cargada se escapa de la holgura de los poros y se escurre por las paredes del cojinete en parte hacia los extremos, donde sale al exterior y en parte hacia la zona no cargada, de donde ingresa de nuevo a la holgura. De este modo, en las paredes del cojinete se forma una circulación continua de aceite, cuya intensidad (y, por consiguiente, también el grado de disminución de la capacidad portante) depende de la penetrabilidad del material del cojinete (de las dimensiones y del volumen relativo de los poros) de las dimensiones geométricas del cojinete (de la longitud y el espesor), de la viscosidad del aceite, de la presión en la zona cargada y de otros factores.

Los cojinetes de materiales porosos se emplean en árboles de una dureza (HRC > 50).

1.13.7 Materiales no metálicos.

Estos materiales fundamentalmente se utilizan para condiciones ligeras de explotación de los cojinetes y para condiciones de fricción seca o lubricación con agua. Los materiales no metálicos más utilizados en la fabricación de cojinetes son: plásticos, goma, carbones-grafito y maderas duras.

1.13.8 Materiales Plásticos.

Los cojinetes de plástico se emplean fundamentalmente en el caso de fricción mixta (pequeñas velocidades de deslizamiento, movimiento oscilatorio), así como en los casos en que no es posible hacer llegar regularmente lubricante a los apoyos. Estos cojinetes pueden trabajar sometidos a pequeñas cargas y velocidades de deslizamiento, sin lubricante. Los cojinetes de plástico no esponjosos pueden utilizar como lubricante el agua, los plásticos químicamente resistentes, pueden trabajar con lubricantes químicamente activos.

En la fabricación de cojinetes plásticos, con frecuencia se emplean plásticos fenólicos (textolita etc.) Policarbonatos, poliamidas (caprón, nylon, etc.), plásticos fluorocarbúricos (PTFE o teflón).

Los casquillos de plásticos de paredes gruesas se emplean preferentemente para pequeños diámetros (menores de 30 mm.), pequeñas cargas y velocidades de deslizamiento. Teniendo en cuenta la posibilidad de variación volumétrica de los plásticos, la holgura relativa se hace de 2 a 3 veces mayor, por término medio, que la de los cojinetes metálicos. En el caso de grandes diámetros, para compensar las variaciones volumétricas los casquillos se hacen seccionados.

1.13.9 Materiales elastoméricos (Gomas.)

Los cojinetes de goma están constituidos por casquillos metálicos revestidos de cauchos sintéticos o naturales [cauchos fluorados y clorados, cauchos de silicona y de polisulfuro (tiocolos)] . Los mejores cauchos sintéticos son los cauchos fluorados. La dureza y la elasticidad de los cauchos pueden variar en amplios límites, cambiando su composición y su tecnología de fabricación.

Los cojinetes de goma preferentemente trabajan en agua. Se emplean en máquinas hidráulicas, para las herramientas mecanizadas submarinas, en las instalaciones finales de los árboles de hélice. Los cuerpos metálicos de los cojinetes se ejecutan de aceros inoxidables o se protegen de la corrosión aplicándoles películas poliméricas.

Los cojinetes de gomas blandas se emplean cuando es necesario asegurar el autoajustamiento del árbol, así como la amortiguación de sus vibraciones.

1.13.10 Materiales Carbones-grafito.

En la fabricación de cojinetes que trabajan sin lubricación, a elevadas temperaturas, bajo la acción de medios químicamente agresivos se emplean carbones-grafito (mezclas de grafito, carbón, negro de humo y coques en ligadura de pez y alquitranes de carbón mineral prensados y sometidos a sinterización).

Los carbones-grafito poseen buenas cualidades antifricción (el coeficiente de fricción seco es de 0.05 a 0.08), resistencia al calor y las sustancias químicas. Los carbones-grafito se mecanizan bien por corte. Su defecto es la fragilidad.

Los árboles que trabajan con cojinetes de carbones-grafito deben tener una dureza $HRC > 50$.

1.13.11 Madera.

Para los cojinetes se emplean especies duras de madera (palo santo, boj) como sucedáneos se pueden utilizar especies de roble, abedul y arce.

Las calidades más altas las posee la madera reforzada. La chapa de abedul constituida de muchas capas (lignofol) o virutas (lignostón), impregnadas con resinas fenol-formol y prensadas a presión de 30 a 50 MPa a una temperatura de 150 – 180 °C.

Los cojinetes de madera contrachapada se componen de listones con disposición de las capas perpendiculares a la superficie de rozamiento y se sujetan en cuerpos metálicos.

Se emplean para fabricar cojinetes de máquinas hidráulicas y cojinetes altamente cargados, pocas revoluciones y de grandes dimensiones, para los trenes de laminar.

1.14 Aplicaciones del metal Babbitt antifricción en cojinetes de deslizamiento.

Las aplicaciones actuales en las que se requiere el uso de cojinetes antifricción son muy diversas, y se ha demostrado el buen funcionamiento de la tecnología implicada y de las técnicas de fabricación de este tipo de componentes. La funcionalidad de los cojinetes antifricción es amplísima, existiendo numerosas aplicaciones, materiales y geometrías. Los cojinetes de metal Babbitt son adecuados para cargas grandes con velocidades pequeñas, para cargas pequeñas a grandes velocidades, para diámetros de eje elevados pero de longitud pequeña y viceversa, para distintos espesores de pared y diferentes requerimientos mecánicos, y todo con una gran variedad de materiales para aplicar según sea conveniente en cada caso.

1.14.1 Aplicaciones de los cojinetes con babbitt.

- Esfuerzos, choque elevado, cargas normales.
- Cojinetes de turbinas, compresores centrífugos.
- Cargas elevadas, turbinas, bombas, laminadores.
- Cojinetes de turbinas, compresores alternativos.
- Sellos compresores centrífugos, generadores, papeleras.
- Cojinetes cabeza de biela para compresores alternativos.

1.15 Cojinetes con metal babbitt.

Se suelen usar distintos materiales para el revestimiento del cojinete, pero los cojinetes con babbitt son los que se prefieren cuando el servicio es de trabajo pesado y se requiere poca fricción entre los metales. El revestimiento del cojinete puede consistir de una camisa de babbitt (de 3.175 mm de espesor o más).

El cojinete automotriz debe ser un cojinete de “precisión” y es utilizado mucho en bombas de alta velocidad, se consigue en una gran variedad de tamaños, una ventaja que permite utilizarlos en una gran diversidad de bombas.

1.16 Conclusiones parciales.

1. El régimen de lubricación deseado para cojinetes de deslizamiento es el hidrodinámico en el que solo hay contacto metal – metal en el arranque y la parada y tiene un bajo coeficiente de fricción.
2. Los materiales utilizados para la fabricación de cojinetes de deslizamiento tienen características especiales que los hacen apropiados para esta función.
3. Los metales babbitt para los cojinetes de deslizamiento son los que se prefieren cuando el servicio es de trabajo pesado y se requiere contacto metal – metal.

Capítulo II. Antecedentes de la falla, materiales y método de recuperación.

2.1 Introducción al capítulo.

En el presente capítulo se hace una descripción de la Empresa UEB Cereales Cienfuegos y de su flujo productivo, además de una caracterización de la zona donde se encuentran instaladas las bombas de vacío, se describe el cojinete a rediseñar, su sistema de lubricación y el tipo de aceite empleado, se analizan las fallas encontradas en el cojinete y se determina la variación de las dimensiones diametrales en los árboles y como tarea final la solución empleada para el rediseño del cojinete y la propuesta de una tecnología de recuperación.

2.2 Descripción de la Empresa UEB Cereales Cienfuegos.

Localización: Zona Industrial No. 2. Carretera de O'Bourke. Ciudad de Cienfuegos.

La Empresa de Cereales es la única de su tipo en la Región Central y una de las 5 de todo el país, pertenece a la Empresa Cubana de Molinería del MINAL. Fue fundada en el año 1976. Desde su creación ha tenido como función abastecer de harina de trigo una amplia región del país, producto este obtenido a partir del procesamiento del trigo como cereal y empleado en la elaboración de alimentos así como la venta del subproducto de este proceso. La organización cuenta con una capacidad de almacenamiento para el producto recibido compuesta por 4 baterías con una capacidad de almacenamiento de 60 000 TM de cereales y 300 T/d de descarga portuaria. A partir del año 2003 se realiza un nuevo proceso inversionista donde se introduce tecnología de punta con producciones más limpias de harina a partir del cambio tecnológico del molino No. 1 con una firma italiana con solo dos líneas que aumenta la capacidad y la efectividad a 350 T/d.

2.3 Flujo productivo de la Empresa Cereales Cienfuegos.

El flujo productivo como se muestra en la figura 2.1 comienza con la descarga y entrega del producto desde el muelle hacia los silos de almacenamiento, para esto se cuenta con dos torres de aspiración, con una capacidad cada una de 150 Tn/h, las cuales extraen el cereal de las bodegas de los buques entregándolas a dos transportadores exteriores, con una capacidad total de 300 Tn/h, en estos momentos se encuentra uno solo de servicio con 150 Tn/h, el producto es enviado por el sistema de elevación con una capacidad de 300 Tn/h, al almacenaje o silos, con una capacidad de 60 000 Tn. Estos son los encargados de entregar el trigo a los molinos.

En el Molino # 1 de Tecnología Italiana, 2003 se cuenta con un sistema de dos limpias con capacidad 18 Tn/h, y dos moliendas, correspondientes a las dos líneas de molinación con una capacidad de molienda de 14,5 Tn/h, la producción diaria aproximada es de 420 Tn.

El molino # 2 cuenta con una molienda de capacidad aproximada de 4,1 Tn/h, con tecnología Italiana, soviética, Alemana, etc. En este molino está instalada una planta de harina integral de 2 Tn/h, con una producción diaria aproximada 70 Tn.

Este flujo culmina con la entrega de harina a través de empaques en sacos por dos vías: camiones y ferrocarril.

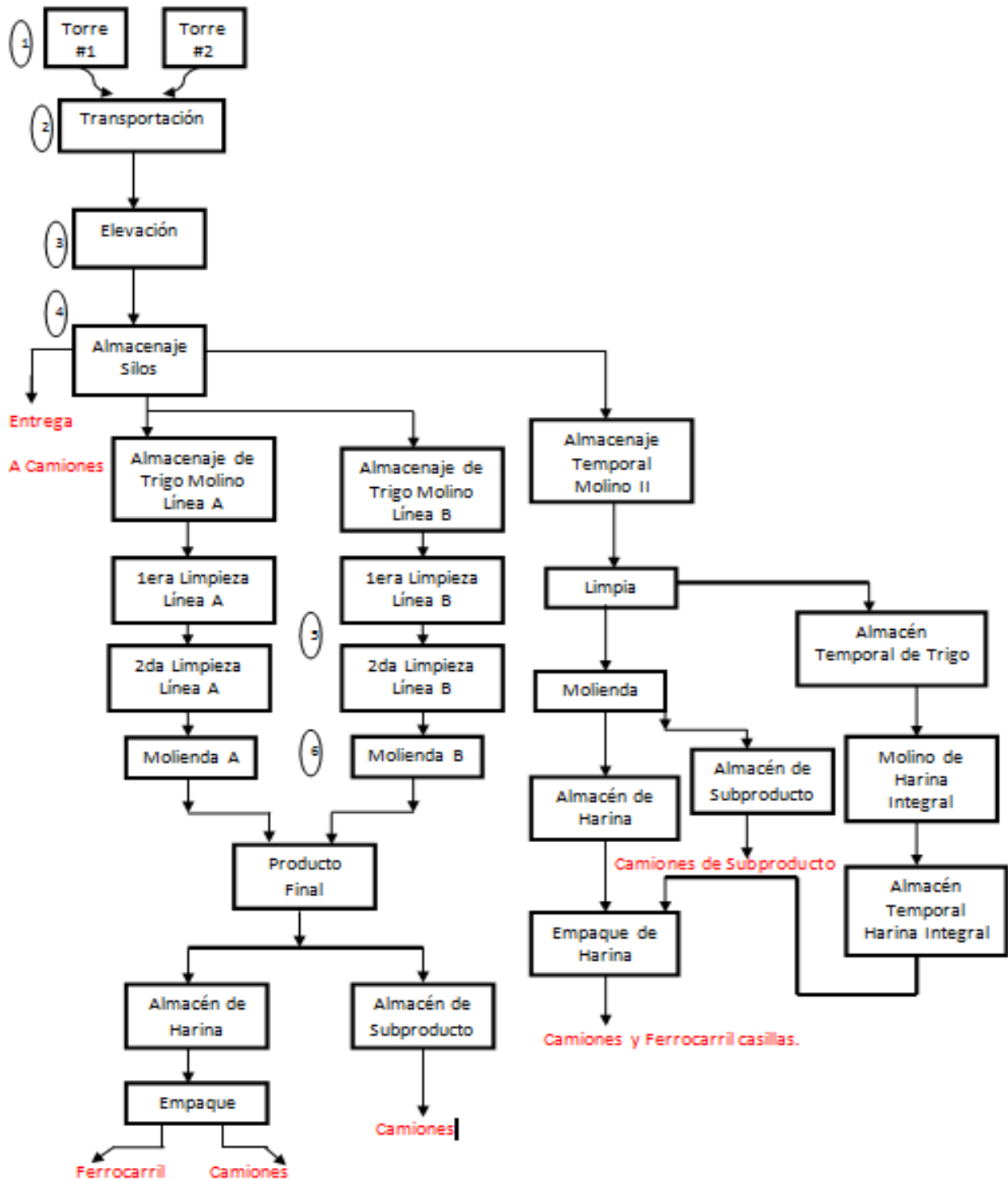


Figura 2.1 Diagrama de flujo productivo Empresa Cereales Cienfuegos.

2.4 Caracterización de la instalación.

La Empresa UEB Cereales Cienfuegos cuenta con 4 bombas de vacío de Tecnología Alemana de 1967, PUMPEN – u Geblasewerk, tipo TG 3NA7, para la descarga del cereal proveniente de los buques ,están ubicadas en las torres 1 y 2 del muelle de descarga (figura 2.2), de las cuales solo dos se encuentran en funcionamiento debido a que los cojinetes de deslizamientos se averiaron, las bombas cuentan con una capacidad cada una de 75 Ton/h y son las encargadas de realizar la descarga de cereal y enviarla a los silos de al almacenamiento.

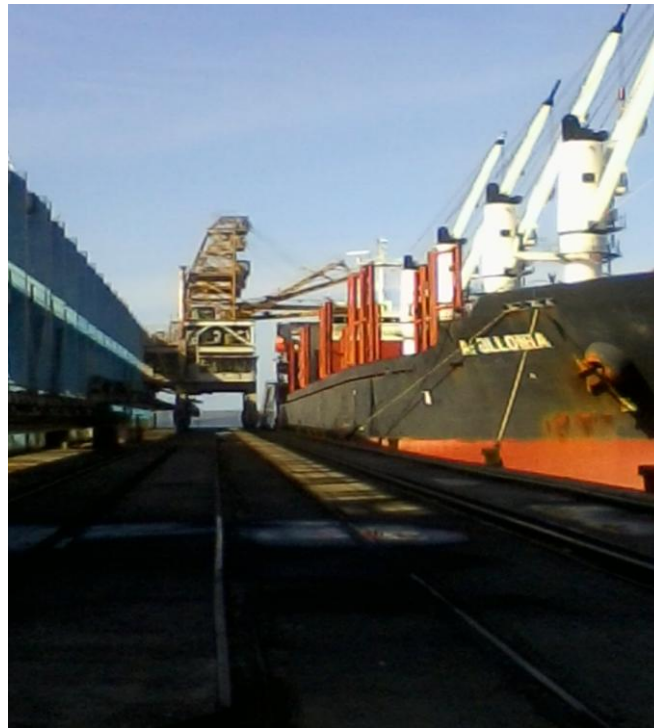


Figura 2.2 Muelle de descarga

En la figura 2.3 se muestra una de las 2 bombas que se encuentran ubicadas en la torre de No.1 del muelle de descarga, como se observa en la figura la bomba está compuesta por un motor eléctrico, una bomba eléctrica la cual impulsa la presión de aceite hacia las cavidades para evitar el contacto metal - metal que garantiza el régimen hidrodinámico en los cojinetes, la carcasa donde se encuentran el árbol con

los impelentes y los cojinetes de deslizamientos que soportan el árbol y con los impelentes.

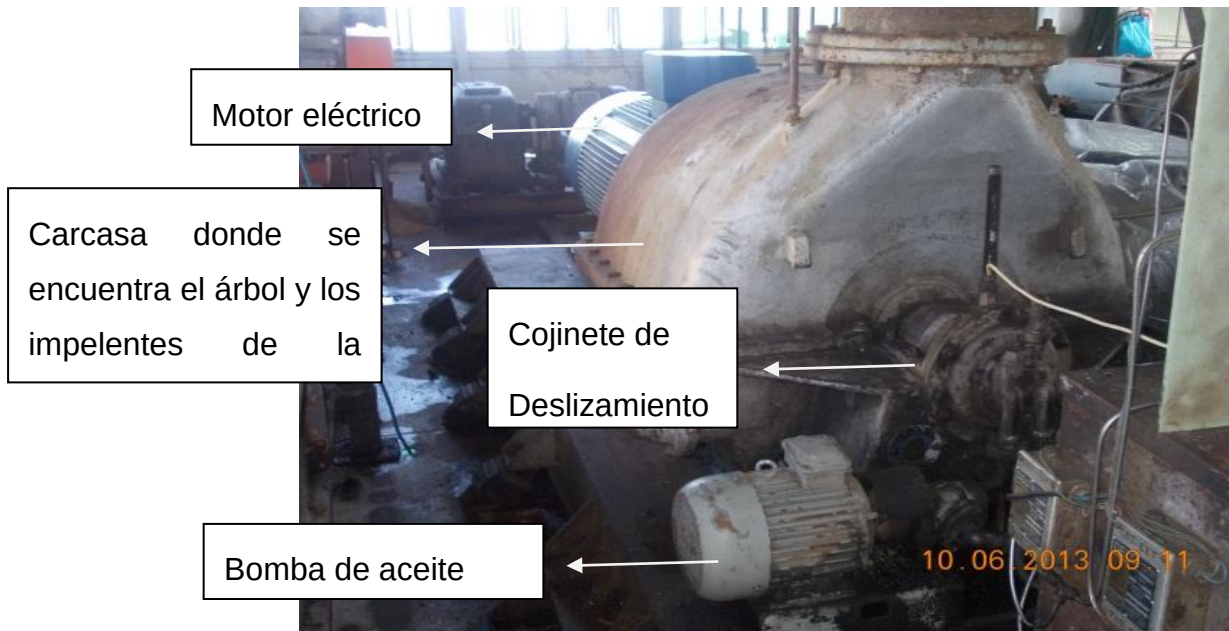


Figura 2.3 Bomba de vacío instalada en la torre No 1 del muelle de descarga.

2.5 Características técnicas de la bomba de vacío.

En la figura 2.4 se muestra el esquema de las bombas de vacío PUMPEN – u Geblasewerk instaladas en los muelles de descarga y en las tablas 2.1, 2.2, 2.3 se puede ver las características técnicas de los equipos instalados.

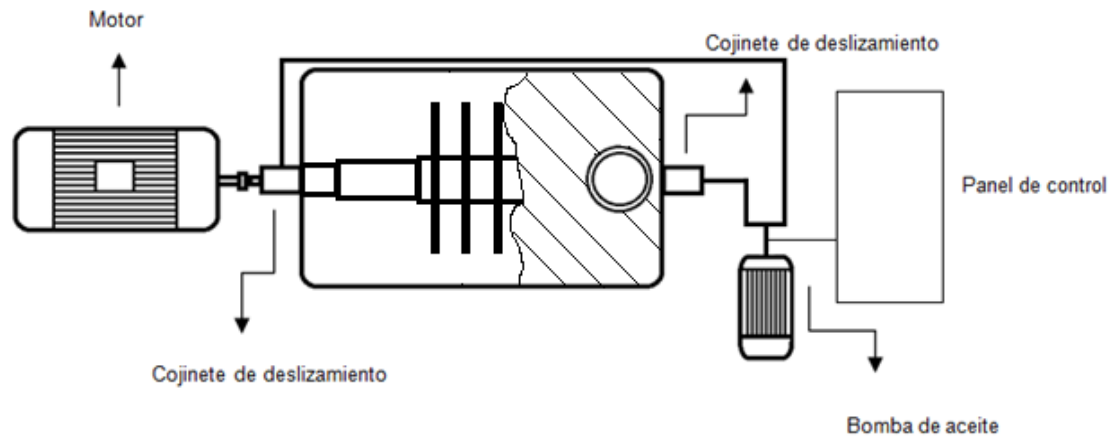


Figura 2.4 Esquema de la bomba de vacío.

Tabla 2.1 Datos técnicos de la bomba de vacío

PUMPEN – u Geblasewerk	
Tipo	TG 3NA7
País de fabricación	República Democrática de Alemania
Año de fabricación	1967
Potencia en el eje	108 kW
rpm en el eje	3500 rpm
Presión de succión del turbo	0.6 Kg/cm ²
Presión de descarga	1 kgf/cm ²
Temperatura inicial	34 °C

Tabla 2.2 Datos técnicos del motor eléctrico.

Peso	1040 Kg
Potencia	132 kW
Velocidad de rotación	2500 rpm

Tabla 2.3 Datos técnicos de la bomba de aceite.

Potencia	2.22 kW
Velocidad de rotación	1590 rpm
Presión de aceite	0.4 kgf/cm²

2.6 Descripción del cojinete de deslizamiento.

El cojinete de deslizamiento está construido de hierro fundido con un diámetro interior de 80 mm y un diámetro exterior de 132.2 mm, su longitud es de 115mm, presenta un revestimiento de metal babbitt antifricción (B-16) de producción nacional, con un espesor de 5 mm, un ancho de 50 mm y un diámetro de 70 mm, el que permite el deslizamiento del muñón mediante una película de aceite hidrodinámica. Como se puede observar en la figura 2.5 el cojinete debido a su régimen de explotación se encuentra en estado de deterioro por lo que se procederá a su rediseño y posterior recuperación.



Figura 2.5 Cojinete de deslizamiento.

2.7 Sistema empleado para la circulación del lubricante.

En la figura 2.6 se muestra la tapa lateral de la carcasa por donde circula el aceite para la lubricación del cojinete de forma hidrodinámica, como se observa el aceite entra por el lateral de la tapa hacia los cojinetes impulsado por la bomba a presión constante, la bomba inicialmente trabajaba durante el arranque y la parada para evitar el contacto entre superficies, pero actualmente se encuentra trabajando ininterrumpidamente.



Figura 2.6 Conducto para circulación de aceite.

2.8 Tipo de aceite usado para la lubricación.

El aceite empleado para la lubricación del cojinete es circulación 46 de la firma CUBALUB y es utilizado en la lubricación de cojinetes de deslizamiento para aplicaciones en sistemas de circulación de baño por película hidrodinámica (tabla 2.4).

Tabla 2.4 Propiedades del aceite circulación 46.

Tipo de Aceite	Viscosidad (cSt)		Índice de Viscosidad	Punto de Inflamación	Densidad a 20 °C (g/cm ³)
	40°C	100 °C			
Circulación 46	46	6.65	95	222	0.875

2.9 Análisis metalográfico de los materiales.

Según los resultados obtenidos del análisis metalográfico se determinó que el metal antifricción es babbitt B-16 es un babbitt al plomo de producción nacional utilizado actualmente en muchos equipos por su bajo costo y buenas propiedades antifricciónarias. En la tabla 2.5 se muestra la composición química y las propiedades mecánicas del tipo de metal babbitt utilizado en los cojinetes hasta el momento

Tabla 2.5 Composición química y propiedades mecánicas del babbitt B-16.

Material	Composición Química %					Dureza (HB)	Resistencia a la compresión (MPa.)
	Sn	Pb	Sb	Cu	Ni		
B-16	15 a 17	Resto	15 a 17	1.5 a 2	-----	20	56

2.10 Descripción de la falla que se produce en el cojinete de deslizamiento.

La falla de los cojinetes, según refieren los operarios se produce a un intervalo de 10 meses a un año y la sintomatología inicial es el calentamiento excesivo del cojinete y el lubricante, los cojinetes originales de las bombas fallaron después de más 17 años de operación, por lo que presumiblemente la recuperación no se realiza adecuadamente.

En la figura 2.7 se muestra uno de los cojinete deteriorados, donde se puede apreciar que ocurren desprendimientos del metal babbitt en distintas zonas, también en la imagen se aprecia zonas pulidas como resultados de contacto metal - metal y el consecuente desgaste. También se evidencian corrimientos de metal babbitt hacia los agujeros de lubricación.



Figura 2.7 Falla encontrada en los cojinetes.

La observación de las afectaciones en la superficie de trabajo permite componer una hipótesis sobre el origen de la falla: la naturaleza de los deterioros obedece a elevadas fuerzas tangenciales que originan el arrastre de material y su remoción, evidentemente el fallo obedece a un alto coeficiente de fricción entre el casquillo y el muñon.

Como los cojinetes estan diseñados para trabajar en un regimen de lubricación hidrodinamica con un bajo coeficiente de fricción, es claro que en la recuperación no se logran las condiciones para trabajar en este regimen, por lo que para alargar la vida útil de los cojientes debe rediseñarse el conjunto de manera que se asegure esto.

A la imposibilidad de que los cojientes recueprados trabajen en regimen de lubricación hidrodinamica contribuyen otros factores como que la rugosidad superficial de los muñones se ha deteriorado con los años de trabajo así como sus dimensiones diametrales (Figura 2.9).

En la figura 2.8 se muestran los árboles de la bombas de vacío ,estos se encuentran fuera de servicio y llevan un largo periodo sin funcionar,el personal de mantenimiento

los mantienen cubiertos con una capa de grasa lubricante para conservarlos hasta su puesta en funcionamiento.



Figura 2.8 árboles de las bombas de vacío.

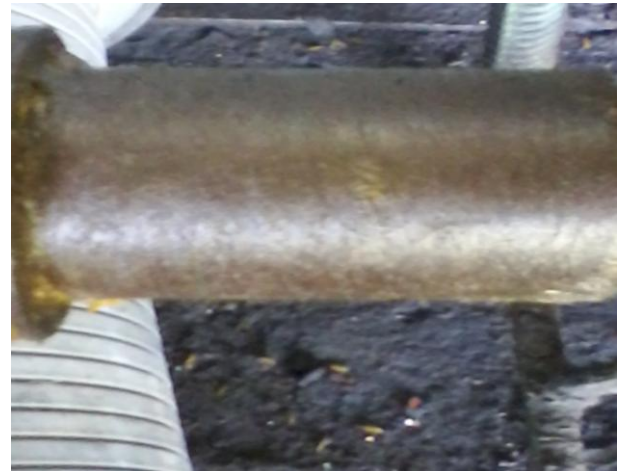


Figura 2.9 muñones de los árboles de las bombas de vacío.

La tecnología de maquinado aplicada a la terminación de las tejas esta orientada a obtener las dimensiones nominales de los cojinetes (70 mm) y al no tomar en cuenta las tolerancias con los muñones desgastados las holguras no son las requeridas para

asegurar la formación de una película hidrodinámica de aceite que evite el conatcto metal – metal.

En la figura 2.10 se muestra el árbol de la bomba de vacío con sus dimensiones originales.

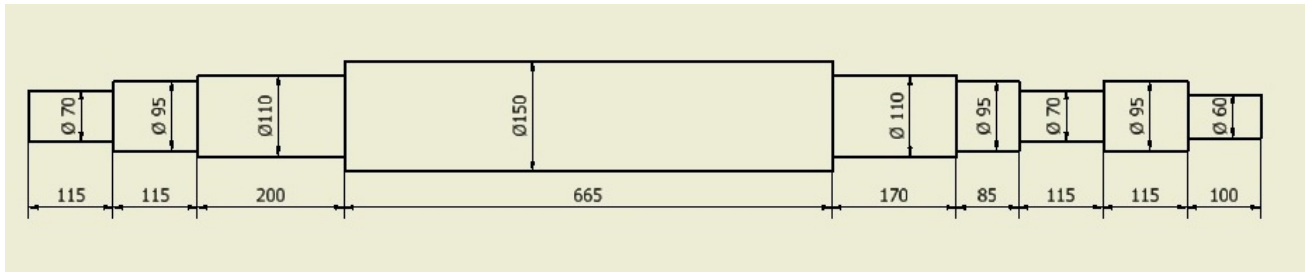


Figura 2.10 Dimensiones originales del árbol.

2.11 Determinación de las dimensiones diametrales en los muñones del árbol.

En la figura 2.11 se puede observar un esquema del árbol de las bombas, se señalan los muñones donde se acoplan los cojinetes de deslizamiento. Este estudio se le realizó a los dos árboles encontrados en el taller de la fábrica mostrados anteriormente.



Figura 2.11 Árbol de la bomba de vacío.

En los diagramas que a continuación se muestran se puede ver cómo han cambiado las dimensiones de los árboles por su régimen de trabajo. Estos diámetros varían desde 69 mm hasta 70 mm (diámetro original), por lo que se llega a la conclusión de que los árboles deben ser sometidos a un rectificado para que cuenten con una buena rugosidad superficial.

Mediciones realizadas al árbol 1.

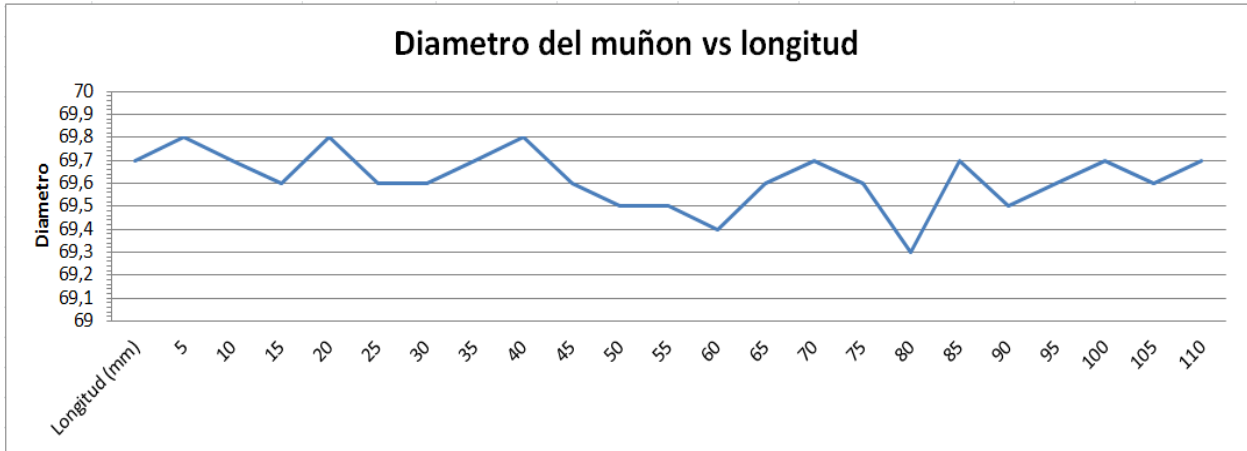


Figura 2.12 Diagrama de Diámetro vs Longitud del muñón 1.

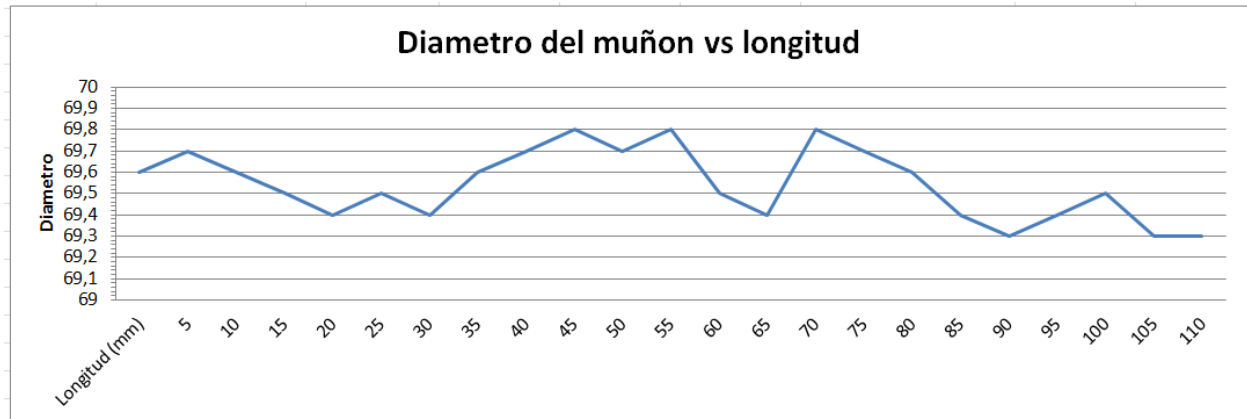


Figura 2.13 Diagrama de Diámetro vs Longitud del muñón 2.

Mediciones realizadas a los muñones del Árbol 2

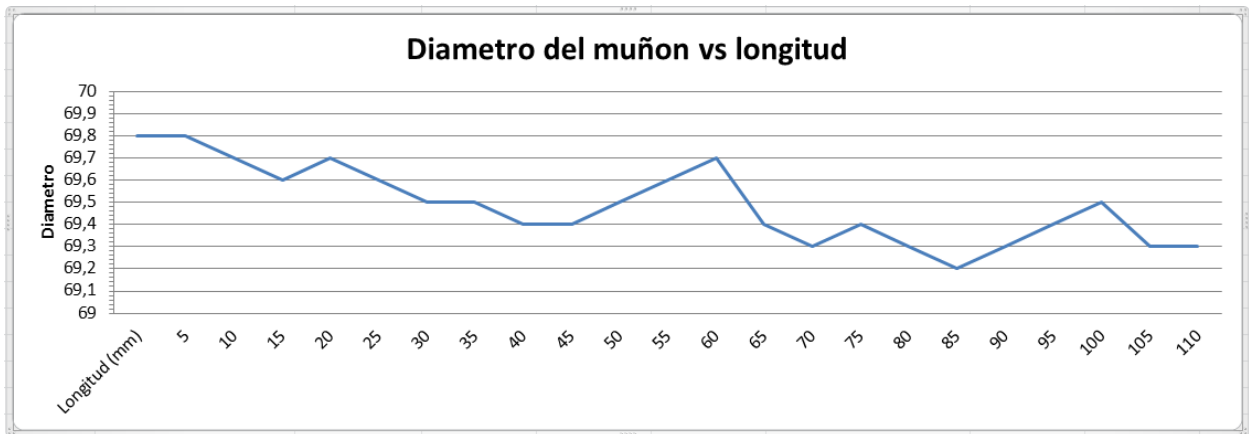


Figura 2.14 Diagrama de Diámetro vs Longitud del muñón 1.

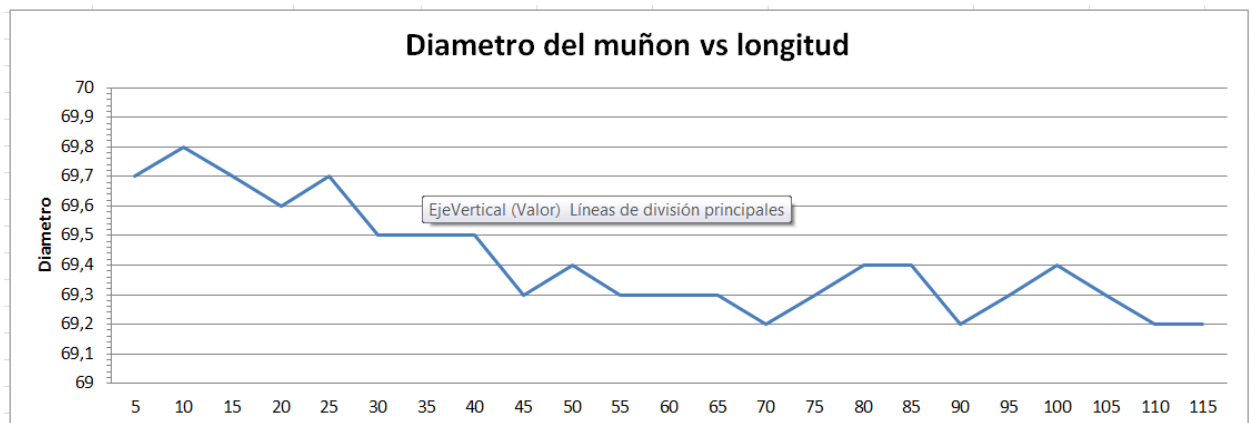


Figura 2.15 Diagrama de Diámetro vs Longitud del muñón 2

2.12 Solución aplicada al rediseño del cojinete de deslizamiento.

El buen funcionamiento de un cojinete antifricción, depende en gran parte de las propiedades mecánicas de las aleaciones que lo forman, y de un buen funcionamiento basado en una buena lubricación, pero también es necesario considerar su proceso de fabricación. El primer objetivo antes de decidir los materiales a utilizar y de hacer los cálculos, es el de conseguir que el cojinete permita un establecimiento fácil del régimen hidrodinámico, y que por tanto funcione a la temperatura lo más baja posible (según la viscosidad necesaria para el lubricante), y donde las superficies enfrentadas tengan un

mínimo número de tensiones provocadas por la fricción. Para ello se debe tener en cuenta el juego del árbol dentro del cojinete y la estructura interior del cojinete (el soporte del metal babbitt), la que debe ser la adecuada para la capa de metal antifricción, evitando la flexión en las cargas oscilantes y soportando los posibles esfuerzos laterales a los que pueden estar sometidos los cojinetes.

Por estas razones, el soporte debe ser suficientemente rígido y la adherencia del metal babbitt debe ser perfecta. La intercara entre los dos metales debe de soportar también dichos efectos, asegurando el buen funcionamiento del cojinete y su conductividad térmica, evitando así cualquier avería; la mala adherencia es una de las causas más frecuentes del fallo de un cojinete, junto con las averías por mala lubricación del conjunto. La calidad en el método de antifricciónado (o patentado) es determinante para asegurar un buen funcionamiento del cojinete.

Si el buje de bronce es más grueso en determinados lugares, el enfriamiento en estas zonas será más lento, pudiendo dar defectos a lo largo de la intercara y del metal babbitt, como consecuencia de las distintas velocidades de enfriamiento. En referencia al recubrimiento antifricción, también es necesario considerar su espesor, pues las propiedades pueden variar si existen diferencias considerables en la capa de metal Babbitt antifricción.

Para el rediseño del cojinete se sustituyó el metal B -16 del revestimiento por el B -89 el cual se seleccionó por sus buenas propiedades mecánicas como se muestra en las tablas 2.6, 2.7 y 2.8.

Tabla 2.6 Composición química del metal babbitt B – 89.

Denominación	Composición Química (%)				
	Sn	Sb	Cu	Pb	Otros
B-89	Resto	7.25	2.5	-	-
		8.25	3.5		

Tabla 2.7 Propiedades mecánicas del babbitt B – 89.

Densidad (g/cm ³)	Temperatura de Fusión (°C)	Coeficiente de dilatación lineal (10 ⁻⁶ /°C)	Elongación (δ) (%)	Dureza (HB)			
				20°C	50°C	75°C	100°C
7.3	342	23	10.6	24.3	18.2	14.8	10.3

Tabla 2.8 Otras Propiedades mecánicas del Babbitt (B – 89).

Denominación	E 10 ⁴ MPa	Límite de fluencia (Mpa)	Límite de resistencia (Mpa)	Presión de trabajo admisible (MPa) [p]	Temperatura de trabajo admisible (°C) [T]	Velocidad de deslizamiento admisible (m/s) [V]	[P.V] (MPa -m/s)
B-89	5.7	62	80	20-25	80	60-80	15- 20

2.13 Usos del babbitt B – 89.

El metal es utilizado cuando se trabaja con altas cargas y altas velocidades de rotación como cojinetes de deslizamiento de turbinas de vapor, turbogeneradores y motores diesel.

El bronce se usa típicamente en los cojinetes de deslizamiento, el buje de bronce puede ser recubierto de metal antifricción más suave que sostiene el árbol y lo que permite ser fácilmente reemplazados cuando se desgasta el metal antifricción.

En la tabla 2.9 y 2.10 se muestran la composición y las propiedades mecánicas del bronce seleccionado para el buje del cojinete.

Tabla 2.9 Composición y propiedades físico-mecánicas del bronce seleccionado.

Grupo	Denominación	E (MPa)	Elongación (%)	Dureza (HB)	Presión de trabajo admisible (MPa) [p]	Temperatura máxima de trabajo (°C) [T]	Usos
Bronces al estaño	SAE 62	103420	24-43	75-85	29-45	250	Cojinetes y bujes

Tabla 2.10 Composición química y propiedades físico-mecánicas del bronce.

Grupo	Denominación	Composición Química (%)	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de Fusión (°C)	Coefficiente de dilatación lineal (10 ⁶ /°C)	Límite de Fluencia (MPa)
Bronces al estaño	SAE 62	88 Cu – 10Sn – 2 Zn	8.70	1000	17.2	134-159

El hierro fundido en general, proporciona un material de larga duración en combinación con árboles de acero en aplicaciones de cojinetes.

En la figura 2.16 se muestra la composición de los metales utilizados para la construcción del cojinete.

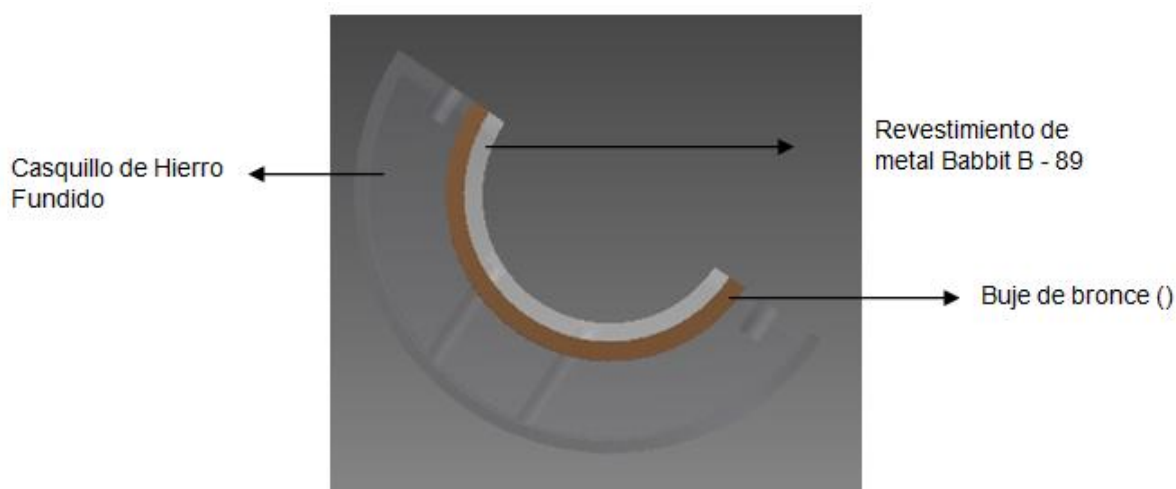


Figura 2.16 Materiales que componen el cojinete de deslizamiento.

En la figura 2.17 se puede observar una vista de la construcción del cojinete una vez rediseñado.

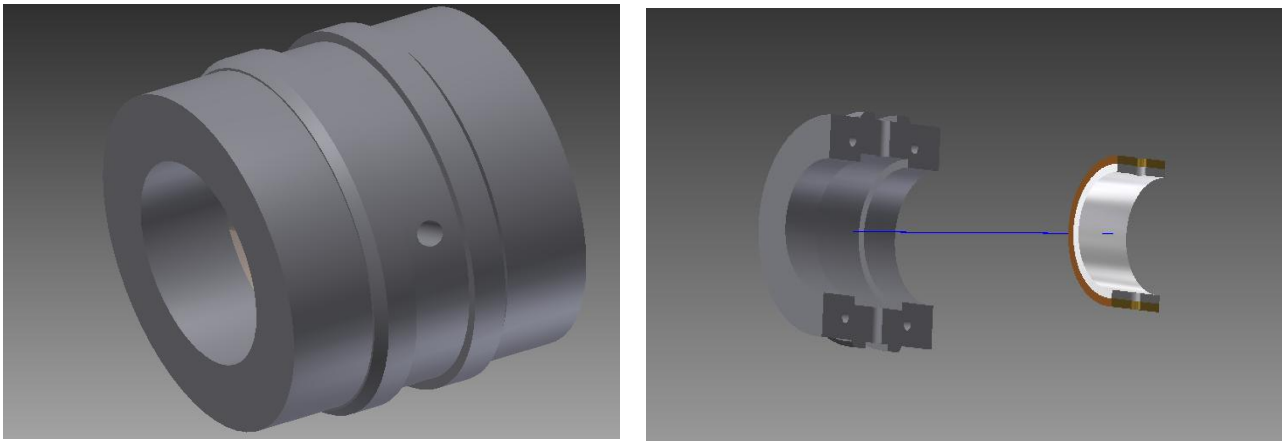
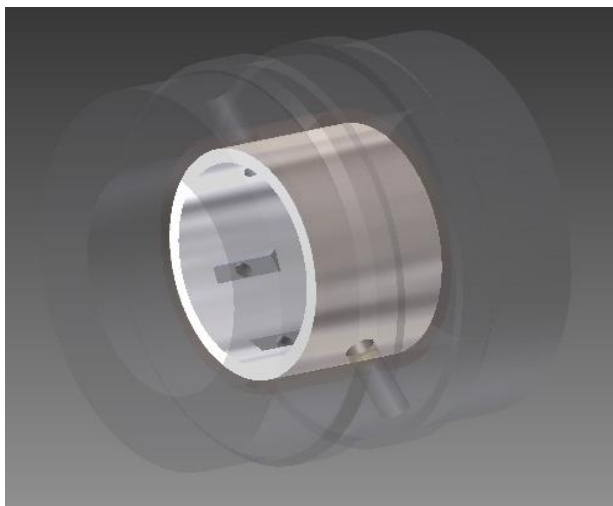
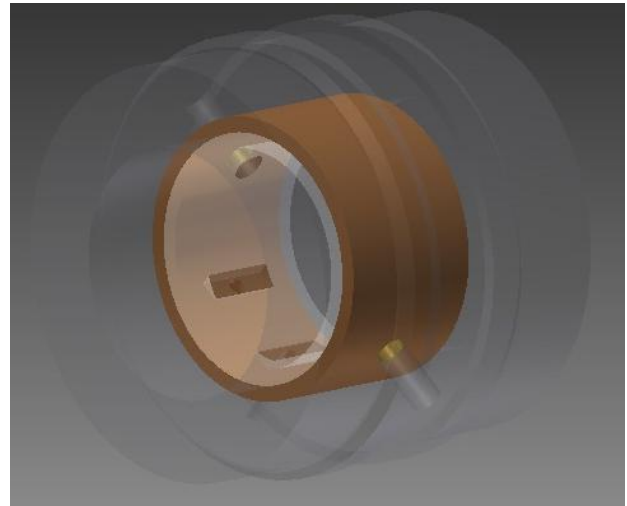


Figura 2.18 Cojinete con buje de bronce y revestimiento de metal Babbitt.



(a)



(b)

Figura 2.19 (a) revestimiento de metal Babbitt B – 89, (b) Buje de bronce al estaño.

El buje de bronce revestido de metal babbitt permite que cuando se produzca el desgaste en el revestimiento de babbitt este pueda ser remplazado por otro revestimiento y poder aprovechar el cojinete de hierro fundido, el babbitt se utiliza con frecuencia como un revestimiento de diámetro en los cojinetes de deslizamiento para recoger contaminantes lubricante y evitar daños friccionarios.

2.14 Materiales utilizados para la recuperación del cojinete de deslizamiento.

El casquillo del cojinete está construido de hierro fundido, compuesto de un buje de bronce, y la parte donde existe fricción por deslizamiento se recubre con el metal antifricción más apropiado para cada aplicación en este caso metal babbitt B-89. El metal babbitt tiene elevada resistencia a la fricción, y en caso de que, debido a una mala manipulación de la máquina, se rompa la película y se presente contacto metal - metal, el muñón no se daña y la capa de metal babbitt es fácil de reparar mediante las técnicas que se explican en el presente artículo.

Podemos afirmar que con un cojinete de este tipo se logra reducir la fricción para soportar y guiar un árbol rotatorio. Esta técnica de fabricación nos permite trabajar con cojinetes sin elementos de rodadura, y sin los problemas que éstos pueden comportar, a la vez que nos permite disponer de cojinetes para árboles de diámetros elevados, sin depender de los ya mencionados elementos de rodadura. La maquinaria industrial con elevada potencia y elevadas cargas, como turbinas de vapor, compresores centrífugos, bombas o grandes motores eléctricos utilizan cojinetes antifricción. Con una buena instalación y mantenimiento, los cojinetes antifricción pueden tener una vida infinita.

2.15 Metodología para la recuperación del cojinete.

Los pasos a seguir para la recuperación del cojinete son los siguientes:

1. Limpieza del soporte del cojinete mediante mecanizado.

Se le aplica un tratamiento térmico o a la llama, para eliminar posibles restos de una capa del metal Babbitt anterior y para eliminar cualquier impureza que pueda estar presente en el soporte (pinturas, óxidos, etc.). Una vez limpio, es necesaria una activación de la superficie para obtener la rugosidad necesaria para el proceso. La operación siguiente deberá efectuarse inmediatamente después de la limpieza.

2. Adicción del buje de bronce al casquillo.

Luego de terminar el tratamiento térmico y posteriormente limpieza de la superficie se introduce el buje de bronce este proceso ocurre con el metal dilatado (casquillo de hierro).

3. Relleno del buje de bronce con metal babbitt.

Para formar una capa uniforme de metal babbitt y asegurar la correcta adherencia al buje de bronce, se puede utilizar la técnica por soldadura manual la cual se utiliza en casos en los que el soporte no tiene una forma adecuada para poder instalarse en la máquina centrifugadora. Una vez depositada la capa de material, el soporte se enfría con agua.

4. Mecanizado en desbaste del cojinete.

Se realiza un cilindrado interior al revestimiento de babbitt con el objetivo de obtener un espesor de 6 mm.

5. Control de Calidad de la capa por ensayos no destructivos: líquidos penetrantes para control de poros o fisuras y ultrasonidos para asegurar la continuidad en la adherencia de la capa.

6. Mecanizado final del cojinete para alcanzar las medidas finales requeridas.

Se realiza un mandrinado interior de la superficie para obtener un buen acabado superficial y la tolerancia especificada por el diseñador.

7. Control de Calidad final.

Revisar las dimensiones obtenidas y comparar con las de los planos.

Así, una vez obtenida la capa de metal antifricción en el cojinete con la calidad exigida, se puede proceder a su instalación para que desempeñe su función.

2.16 Conclusiones parciales.

Se determinó que la falla en los cojinetes de deslizamiento es el contacto entre las superficies debido a que en la recuperación no se tiene en cuenta las dimensiones de los muñones y esto provoca que la película de aceite no sea la idónea para que el cojinete trabaje bajo régimen de lubricación hidrodinámico.

Las dimensiones realizadas a los muñones de los árboles arrojaron que estos no contaban con sus dimensiones diametrales originales y no presentaban un buen acabado superficial.

La vida del cojinete de deslizamiento bajo condiciones hidrodinámicas depende de una buena selección de los materiales para su recuperación y de su rediseño y el metal babbitt B-89 reúne las propiedades mecánicas ideales para ser empleado en este tipo de cojinetes, permite que cuando exista contacto entre superficies no se dañe el muñón del árbol.

La tecnología de recuperación permite recuperar el cojinete y devolverle su función original.

Capítulo III. Rediseño y optimización del cojinete de deslizamiento.

3.1 Introducción al capítulo.

En este capítulo se muestra el rediseño de las dimensiones del cojinete y el árbol, se aplican los cálculos de optimización para determinar la zona de clarencia diametral óptima, además de comprobar la resistencia al agarramiento.

3.2 Factores de diseño en los cojinetes de deslizamiento.

En el diseño de cojinetes de deslizamiento se distinguen dos grupos de variables (Shigley, 1985). En el primer grupo están aquellos cuyos valores son predeterminados o están bajo control del diseñador. Estas son:

1. El diámetro nominal del cojinete – d
2. La longitud del cojinete – L
3. El ángulo de abrace del muñón por el cojinete -- β
4. La velocidad de giro del muñón -- η
5. La carga por unidad de área proyectada del cojinete--
6. La viscosidad del lubricante -- η

La holgura diametral entre cojinete y muñón -- Δ

En el caso de la reparación de máquinas no se pueden controlar ninguna de las primeras cinco variables ya que estas están predeterminadas en el diseño del equipo. La viscosidad está recomendada por el fabricante, aunque se pudieran realizar cambios en el aceite siempre que esto fuese factible y aconsejable. La séptima variable si está bajo control absoluto del diseñador y de ella dependerán fundamentalmente los parámetros de operación, los cuales constituyen las variables del segundo grupo.

En este segundo grupo se hallan las variables dependientes, cambiando algunas de las variables del primer grupo se pueden modificar éstas. El diseñador no tiene otra forma de control sobre las mismas. Estas variables son:

7. El espesor mínimo de la película -- h_0
8. El coeficiente de fricción -- f
9. La elevación de la temperatura del lubricante -- Δt
10. El flujo de lubricante que mueve el cojinete -- Q

Estas variables son los factores de diseño ya que al diseñar un cojinete de deslizamiento se hace necesario establecer cuáles son los valores o rangos satisfactorios para estas variables de segundo grupo y después decidir qué valores de las variables de primer grupo emplear para garantizar esas condiciones de operación.

3.3 Empleo de técnicas de optimización en el diseño.

Como se explicó las variables del primer grupo determinan la magnitud de las variables de segundo grupo o parámetros de operación. Una selección inadecuada de las primeras, o un inadecuado control de ellas durante la explotación (velocidad, viscosidad, etc.), o la fabricación (diámetro, clarencia diametral, etc.) pueden dar como resultado una película de lubricante demasiado delgada que condicione el contacto metálico de las irregularidades de la superficie del metal del cojinete y el del muñón y por lo tanto el excesivo desgaste, en este caso el flujo de aceite arrastrado por el cojinete será muy pequeño, insuficiente para disipar el calor que se genera producto de la fricción y el cojinete se sobrecalentará y finalmente podrá fallar por agarramiento.

Una de las variables del primer grupo que más influye en el comportamiento del cojinete es la clarencia diametral, de aquí que durante la optimización de los cojinetes se plotee el comportamiento de las variables del segundo grupo, en dependencia del valor de la clarencia diametral del cojinete.

En la Figura 3.1 se muestra a modo de ejemplo las formas de estas gráficas para un intervalo completo de clarencias diametrales.

La gráfica muestra que si la clarencia es pequeña, la temperatura será muy alta y muy pequeño el espesor de la película. Las temperaturas altas pueden condicionar la falla por fatiga del cojinete. En este caso al ser la película de aceite muy fina, las partículas extrañas no podrán pasar sin causar ralladuras o quedar encajadas en el cojinete. En este caso habrá gran desgaste y fricción excesiva, resultando un calentamiento intenso y posiblemente se produzca el agarramiento del cojinete.

En el caso de una holgura grande el espesor de la película también cae y no se excluye el contacto metálico, además de volverse ruidoso el trabajo del conjunto.

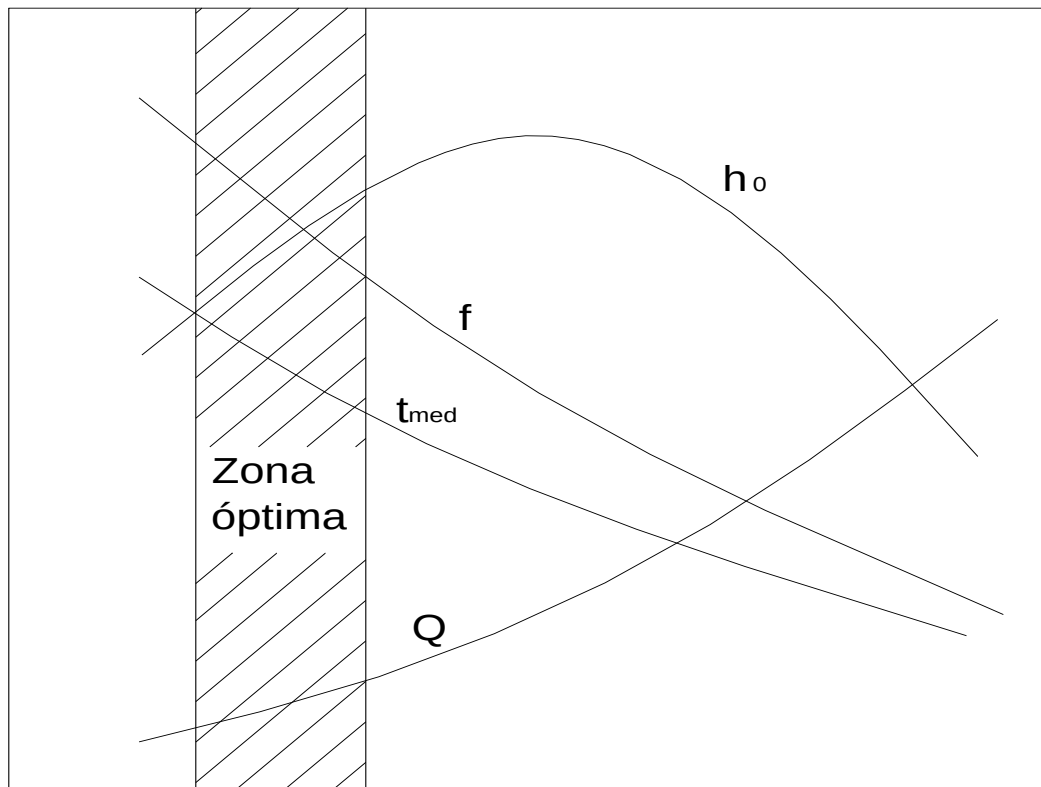


Figura 3.1 Comportamiento de los parámetros de funcionamiento de los cojinetes en función de la clarencia diametral.

Cuando se toman en cuenta las tolerancias de producción y el desgaste futuro, la zona de clarencias diametrales óptimas se ubica a la izquierda del punto del diagrama donde se produce la película de mayor espesor. De esta manera, el futuro desgaste correrá el punto de operación hacia la derecha, incrementará el espesor de la película y descenderá la temperatura de operación. De esta, manera se logra una vida de servicio mucho más prolongada.

3.4 Rediseño del árbol y el cojinete.

Del análisis de la falla se concluyó la necesidad de rediseñar el cojinete de manera que al ser recuperados tenga las condiciones dimensionales requeridas para que trabaje en un régimen de lubricación hidrodinámica.

Para lograr esto es imprescindible en primer lugar restablecer las condiciones de trabajo del muñón, por lo que si el diámetro se rebajará hasta 69 mm y se rectificara para alcanzar una rugosidad superficial de $R_z = 1,4 \mu m$. Para grado de exactitud 6 ó 7 se recomienda el rectificado fino de las superficies, o sea, quedando el árbol como se muestra en la figura 3.2.

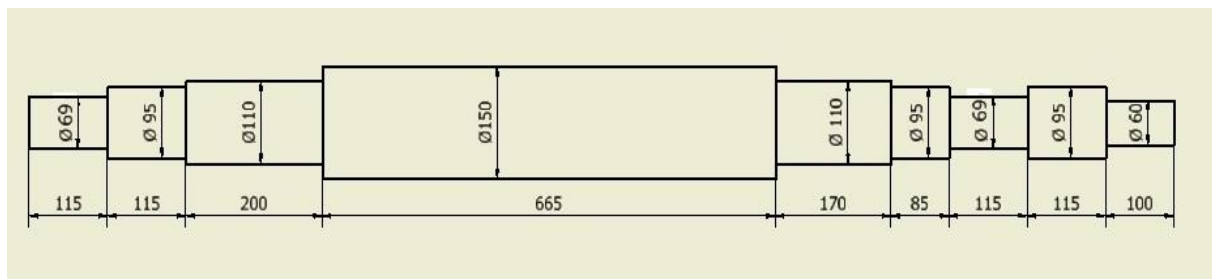
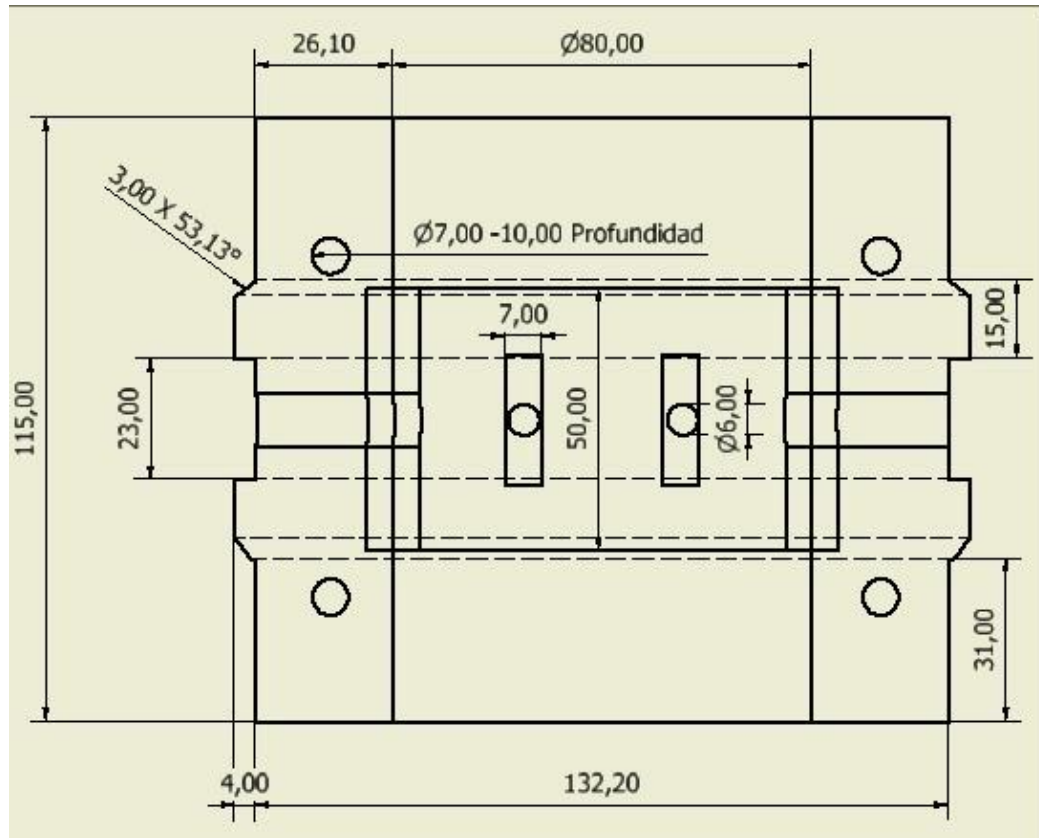
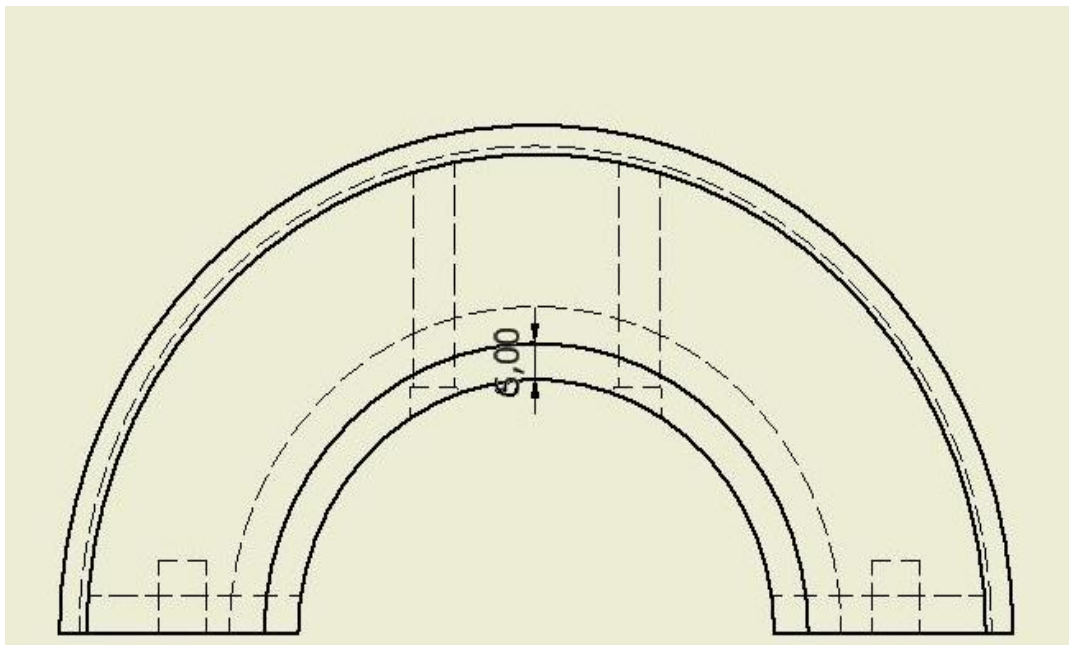


Figura 3.2 Dimensiones del árbol

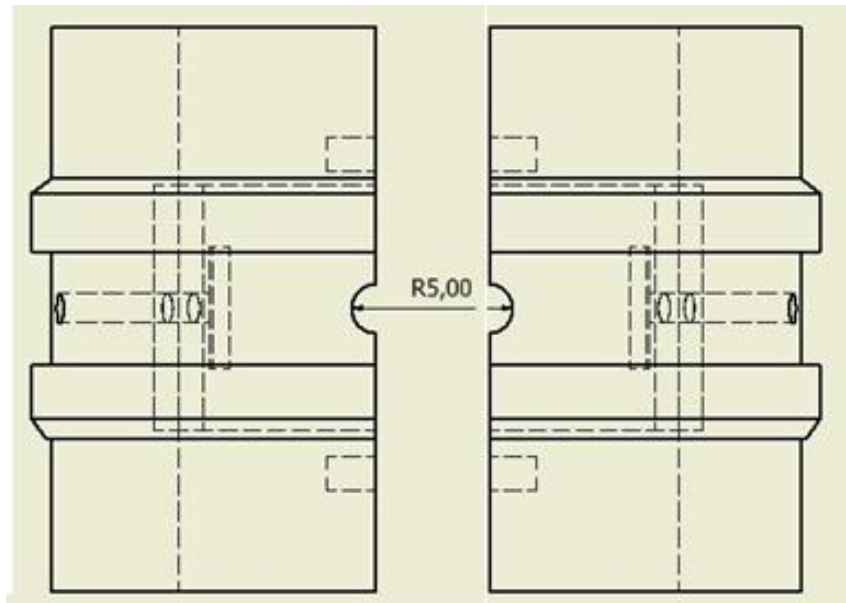
La teja se fabricará con la dimensión recomendada como se muestra en la figura 3.3 y se realizará el rediseño y optimización del cojinete para determinar la tolerancia entre el muñón y el casquillo de manera que se asegure la película hidrodinámica de aceite en el cojinete.



(a) Vista frontal



(b) Vista lateral



(c) Vista superior

Figura 3.3 Dimensiones reales del cojinete de deslizamiento.

3.5 Cálculos de optimización.

3.5.1 Datos del aceite empleado en los cojinetes de deslizamientos.

El aceite empleado es Circulación 46, el cual ha sido diseñado como lubricante y fluido hidráulico para la lubricación de cojinetes de deslizamiento para aplicaciones en sistemas de circulación de baño.

- Viscosidad a 40°C en CSt 46
- Viscosidad a 100°C en CSt 6.65
- Punto de inflamación en °C.....222
- Índice de viscosidad 95
- Densidad a 15°C 0.875
- Coeficiente de transmisión de calor del aceite α en (kcal/m² · s · 0,033

1. Calor específico del aceite C en (kcal/kg) 10278
2. Peso específico del aceite γ en (kg/m³) 8583,75

La temperatura de trabajo del aceite en la bomba debe estar alrededor de los 60°C.

La densidad del aceite a esta temperatura es:

$$\rho = \rho_{15} - 0.00063 \cdot (60 - 15) \quad (3.1)$$

$$\rho = 0.875 - 0.00063 \cdot (60 - 15)$$

$$\rho$$

La viscosidad en Segundos Saybolt Universales (SSU) se calcula por la expresión:

$$SSU^2 - \frac{V_{CSt}}{0.22} \cdot SSU - 818.2 = 0 \quad (3.2)$$

Llevando estas dos viscosidades al diagrama viscosidad - temperatura de la ASTM se puede obtener que la viscosidad es: $SSU_{60} = 40$

4-Determinación de la viscosidad en CSt a 60°C

$$\nu_{60} = 0.22 \cdot SSU_{60} - \frac{180}{SSU_{60}} \quad (3.3)$$

$$\nu_{60} = 0.22 \cdot 40 - \frac{180}{40} = 4.3 \text{ Cst}$$

Para obtener la viscosidad dinámica del lubricante en centipoises a la temperatura de trabajo, se calcula por la expresión:

$$\eta_{60} = \rho_{60} \cdot \nu_{60} \quad (3.4)$$

$$\eta_{60} = 0.846 \cdot 4.3 = 3.64 \text{ cP}$$

Llevado al sistema de unidades MKS

$$\eta_{60} = 1.02 \cdot 10^{-4} \cdot \eta_{cP} = \text{Kg} \cdot \text{s} / \text{m}^2$$

$$\eta_{60} = 3.71 \cdot 10^{-4} \text{ Kg} \cdot \text{s} / \text{m}^2$$

3.5.2 Datos del cojinete.

Los datos del cojinete objeto de estudio en esta investigación son:

Diámetro nominal del cojinete – d

$$d = 69 \text{ mm}$$

Longitud del cojinete – l

$$l = 115 \text{ mm}$$

Relación $\frac{l}{d}$

$$\lambda = \frac{l}{d} = \frac{115}{69} = 1.66$$

Angulo de abrace β

$$\beta = 360^\circ$$

Velocidad periférica.

Los cálculos se realizarán para la velocidad de giro del eje. $n = 3500 \text{ r/min}$ y la velocidad periférica para esa velocidad.

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60\,000} \text{ m/s} \quad (3.5)$$

Para $d = 69 \text{ mm}$ y $n = 3500 \text{ rpm}$

$$V = \frac{\pi \cdot 0.069 \cdot 3500}{60\,000} = 12,64 \text{ m/s}$$

3.5.3 Determinación de las cargas que actúan sobre el cojinete de deslizamiento.

El árbol está sometido a fuerzas radiales que ejerce el peso de los impelentes y a fuerzas tangenciales producto del torque consumido por la impulsión de aire para crear el vacío (figura 3.4).

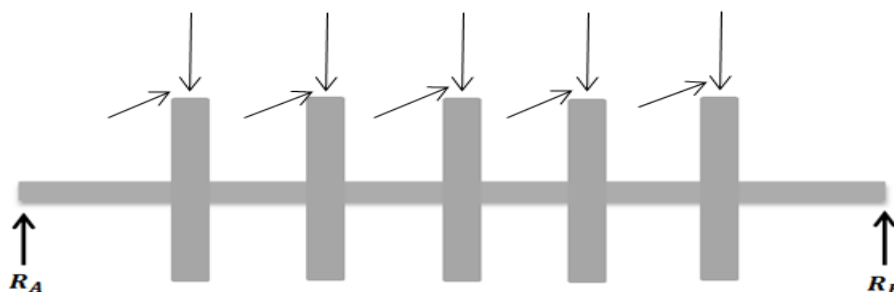


Figura 3.4 Esquema de las fuerzas.

En la figura 3.5 se muestra un esquema de las fuerzas tangenciales producidas por el momento torsor de los impelentes.

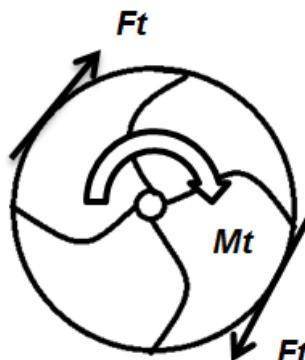


Figura 3.5 Fuerza tangencial.

Momento Torsor:

(3.6)

Dónde:

.

Fuerza Tangencial:

$$\frac{F_t}{r} = \frac{F_r}{r} \quad (3.7)$$

Para la carga radial que actúa sobre el cojinete de deslizamiento como se observa en la figura 3.6 se aplican los siguientes cálculos.

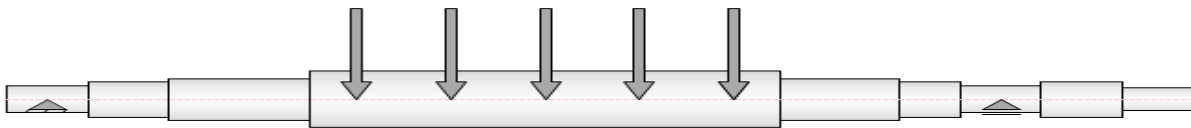


Figura 3.6 Fuerzas radiales en el árbol.

Datos: Masa de un impelente: 40 kg.

Nota: Como F_r es el peso que ejerce el impelente sobre el árbol, se determinará cuál es la fuerza ejercida por este peso por la ecuación.

$$(3.8)$$

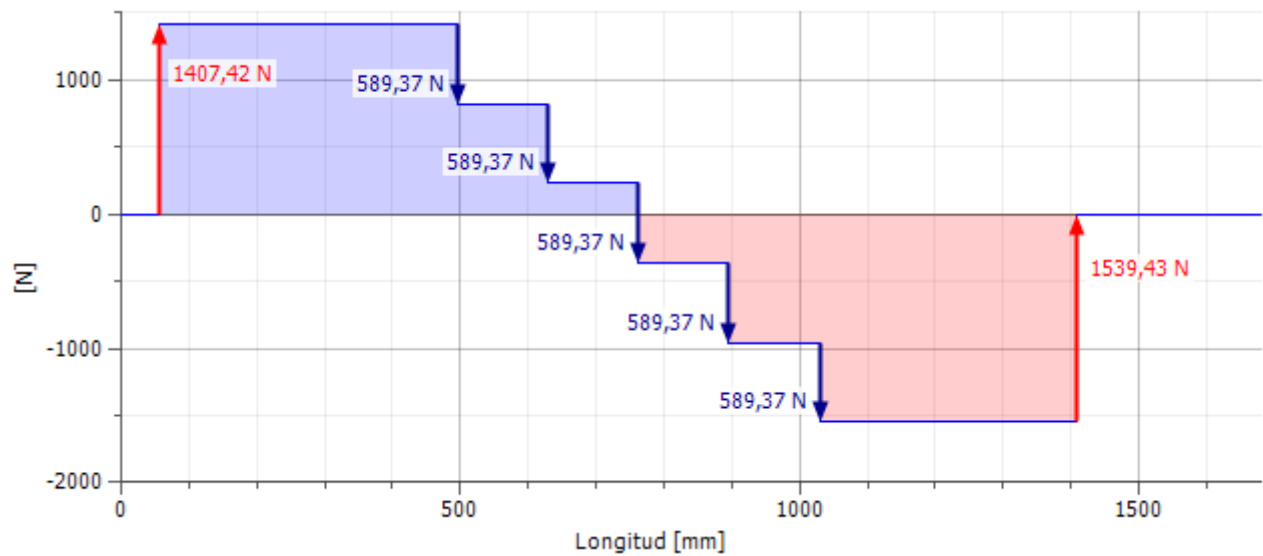
Dónde:

m : masa del impelente.

g : Fuerza de gravedad

En la figura 3.3 se muestran los diagramas de cortante para las fuerzas tangenciales y radiales, donde se determinara cual es el cojinete que va a soportar más cargas.

Fuerza de corte, Plano XZ. Cargas tangenciales.



Fuerza de corte plano, XY. Cargas radiales

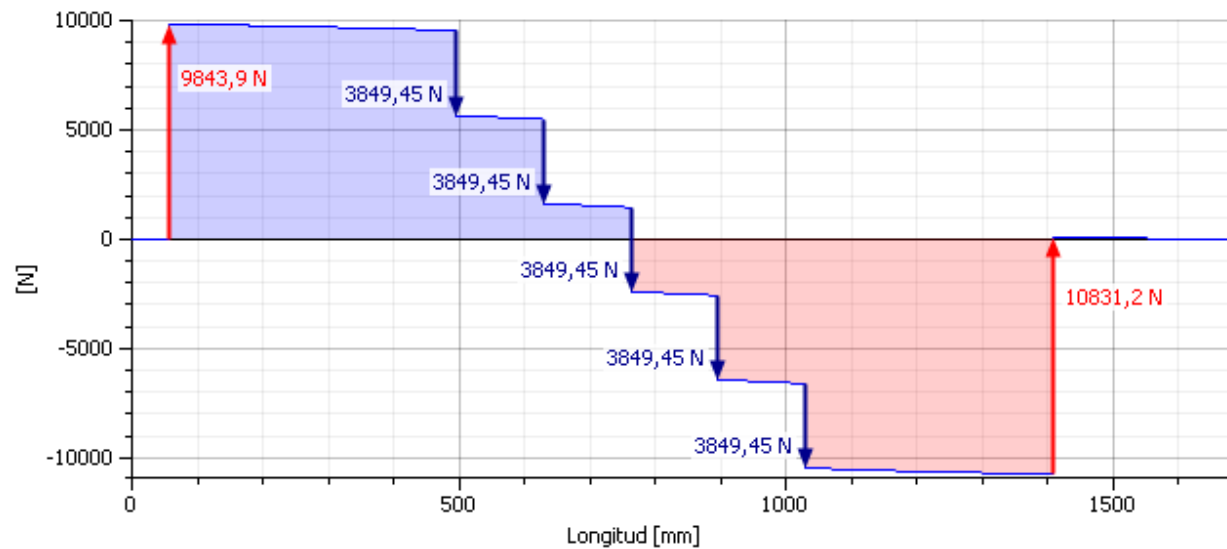
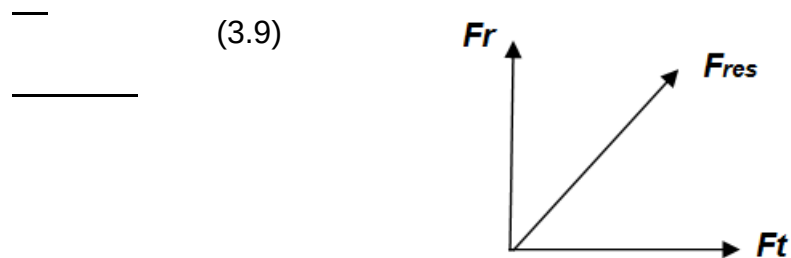


Figura 3.7 Diagramas de cortante para fuerzas tangenciales y radiales.

Fuerza resultante que actúa sobre el cojinete más cargado (R_B).



Nota: Se utilizará para el cálculo la reacción $R_B =$.

3.5.4 Carga por unidad de área proyectada (p).

La carga por unidad de área proyectada se calcula por la expresión:

$$p = \frac{R}{l \cdot d} \quad (3.10)$$

Para $R = 1115 \text{ kgf}$, $l = 0.115 \text{ m}$ $d = 0.069 \text{ m}$

$$p = \frac{1115}{0.115 \cdot 0.069} = 140500 \text{ kgf/m}^2 = 14.0500 \text{ kgf/cm}^2$$

3.5.5 Cálculo de la clarencia diametral.

Según la ecuación de (Reshetov, 1985). Reshetov propone la siguiente ecuación para estimar una clarencia diametral en el cojinete para iniciar el tanteo.

$$\psi = \frac{\Delta}{d} = 0.8 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{V} \quad (3.11)$$

$$\psi = 0,00150858$$

$$\Delta = 0.0008 \cdot d \cdot \sqrt[4]{V}$$

Dónde:

d- diámetro del cojinete (mm)

V- velocidad periférica (m/s.)

$$\Delta = 0.0008 \cdot 69 \cdot \sqrt[4]{V}$$

$$\Delta = 0.104 \text{ mm} , \text{ o sea, } 104 \mu\text{m}$$

3.5.6 Dependencia entre los parámetros de operación del cojinete y la clarencia diametral.

Para optimizar la operación del cojinete se varió el valor de la clarencia diametral desde (15 μm hasta 140 μm) y se calculó para cada valor de Δ el número característico del cojinete o número de Sommerfeld.

$$S = \left(\frac{d}{\Delta} \right)^2 \cdot \frac{\eta_{60} \cdot n}{p} \quad (3.12)$$

Dónde:

$S \rightarrow$ Numero de Sommerfeld .

$d \rightarrow$ Diametro del cojinete (mm).

$\Delta \rightarrow$ Clarencia diametral (mm).

$\eta_{60} \rightarrow$ Viscosidad a 60° C en $\text{kgf} \cdot \text{seg} / \text{m}^2$

$n \rightarrow$ Velocidad de giro del cojinete (rps).

$p \rightarrow$ Carga por unidad de área proyectada (kgf / m²).

En dependencia de los valores del número de Sommerfeld se pueden obtener los valores de los números adimensionales.

$$\text{Variable de espesor mínimo de la película } \chi = \frac{h_{\min}}{c} \quad c = \frac{\Delta}{2} \quad (3.13)$$

$$\text{Variable de fricción} = \left(\frac{r}{c} \right) \cdot f \quad (3.14)$$

$$\text{Variable de flujo} = \frac{Q}{d \cdot \Delta \cdot n \cdot l} \quad (3.15)$$

Estas variables aparecen planteadas en función del número de Sommerfeld (S) en los gráficos (Shigley, 1985) para cojinete de diferentes valores de β y de $\lambda = \frac{l}{d}$.

3.5.7 Balance térmico del cojinete.

Conociendo el valor del cojinete de fricción f y el valor del flujo arrastrado por el cojinete se puede hallar Δt de la ecuación de balance térmico del cojinete, como sigue.

Para un régimen estacionario de trabajo, la cantidad de calor W que se genera por la fricción en el cojinete tiene que ser igual a la cantidad de calor total que se disipa a través del aceite y del metal del cojinete. O sea:

$$W = W_1 + W_2$$

Dónde:

$W \rightarrow$ calor generado por el cojinete (kcal / seg).

$W_1 \rightarrow$ calor disipado por el aceite (kcal / seg).

$W_2 \rightarrow$ calor disipado por el metal del cojinete (kcal / seg).

Estos valores se calculan por las expresiones:

$$W = \frac{R \cdot V \cdot f}{427} \quad (3.16)$$

Dónde:

$R \rightarrow$ carga radial sobre el cojinete (kgf).

$V \rightarrow$ velocidad de deslizamiento (m / s).

$f \rightarrow$ coeficiente de fricción

$$W_1 = C \cdot \gamma \cdot Q \cdot \Delta t \quad (3.17)$$

$$W_2 = \alpha \cdot \pi \cdot d \cdot b \cdot \Delta t \quad (3.18)$$

Dónde:

$\alpha \rightarrow$ coeficiente de transmisión de calor ($kcal / m^2 \cdot s \cdot ^\circ C$).

$C \rightarrow$ calor específico del aceite ($kcal / kg$).

$\gamma \rightarrow$ peso específico del aceite (kg / m^3).

$d \rightarrow$ diámetro del cojinete (m)

$b \rightarrow$ ancho del cojinete (m)

$Q \rightarrow$ flujo de aceite (m^3 / seg)

$f \rightarrow$ coeficiente de fricción

Sustituyendo y despejando Δt se obtiene:

$$\Delta t = \frac{R_B \cdot V \cdot f}{427 \cdot C \cdot \gamma \cdot Q + \alpha \cdot \pi \cdot d \cdot b} \quad (3.19)$$

Además, teniendo en cuenta que para todas las marcas de aceite $C \cdot \gamma \cong 405$ y según para cojinetes con intensiva derivación de calor, que es el caso analizado, producto de que todo el conjunto está bañado en aceite, $\alpha = 0.0033 \text{ kcal} / m^2 \cdot s \cdot ^\circ C$ se tiene que:

La temperatura media del aceite en el cojinete es según (Dobrovolski, 1975).

$$t_{med} = t_{ent} + \Delta t \quad (3.20)$$

Donde la temperatura de entrada del aceite en el cojinete se supone igual a la temperatura del medio ambiente $t_{ent} = 30^\circ C$.

El espesor mínimo permisible de la película se calcula por la expresión:

$$h_{min} = n \cdot (Rz_a + Rz_c) \quad (3.21)$$

Dónde:

Rz_a y $Rz_c \rightarrow$ son las alturas medias de las irregularidades de las superficies del árbol y del cojinete respectivamente.

$n \rightarrow$ Factor de seguridad. Para grado de exactitud 6 ó 7 se recomienda el rectificado fino de las superficies, o sea, $Rz = 0.8$ a $1.6 \mu m$, admitiendo $Rz = 1.6 \mu m$ y un factor de seguridad $n = 2$ se tiene que el espesor mínimo permisible de la película será:

$$h_{min} = 2 \cdot (0.8 + 1.6) = 4.8 \mu m$$

Como temperatura máxima admisible se tomará $t_{med} = 60^\circ C$.

En la tabla 3.3 se muestran los resultados del cálculo de los Parámetros de funcionamiento del cojinete en dependencia de la clarencia diametral para $n=3500$ rpm, obtenidos en Microsoft Excel y luego graficados para obtener la zona de clarencia diametral óptima.

Tabla 3.4 Parámetros de funcionamiento del cojinete en dependencia de la clarencia diametral para una velocidad de rotación de 3500 rpm.

$\Delta \text{ (} \mu \text{ m)}$	$\Psi = \left(\frac{\Delta}{d} \right)$	$S = \left(\frac{d}{\Delta} \right)^2 \frac{\eta \cdot n}{p}$	$\frac{h_o}{\Delta}$	$h_o \text{ (} \mu \text{ m)}$	$\left(\frac{d}{\Delta} \right) \cdot f$	f_o	$\frac{Q}{d \cdot \Delta \cdot n \cdot l}$	$Q \text{ (m}^3/\text{s)}$	$\Delta t \text{ (}^\circ \text{C)}$	$t_{med} \text{ (}^\circ \text{C)}$
15	$2,17 \cdot 10^{-4}$	3,262	0,6	4,5	71	0,015	4,6	$3,19 \cdot 10^{-4}$	3,915093616	63,91509362
30	$4,35 \cdot 10^{-4}$	0,815	0,45	6,75	34	0,015	4,95	$6,87 \cdot 10^{-4}$	1,748184065	61,74818407
45	$6,52 \cdot 10^{-4}$	0,362	0,35	7,875	21	0,014	5,1	$1,06 \cdot 10^{-3}$	1,049094017	61,04909402
60	$8,70 \cdot 10^{-4}$	0,204	0,29	8,7	13	0,011	5,4	$1,50 \cdot 10^{-3}$	0,613700805	60,6137008
75	$1,09 \cdot 10^{-3}$	0,130	0,22	8,4	9,5	0,010	5,6	$1,94 \cdot 10^{-3}$	0,432590487	60,43259049
90	$1,30 \cdot 10^{-3}$	0,091	0,18	8,2	7,5	0,010	5,7	$2,37 \cdot 10^{-3}$	0,335590746	60,33559075
105	$1,52 \cdot 10^{-3}$	0,067	0,15	7,875	6,8	0,009	5,8	$2,82 \cdot 10^{-3}$	0,260109607	60,26010961
115	$1,67 \cdot 10^{-3}$	0,055	0,12	7,8	4,7	0,008	5,85	$3,11 \cdot 10^{-3}$	0,209313428	60,20931343
125	$1,81 \cdot 10^{-3}$	0,047	0,1	7,7	4,5	0,007	5,7	$3,30 \cdot 10^{-3}$	0,172937738	60,17293774
135	$1,96 \cdot 10^{-3}$	0,040	0,9	7,5	4,4	0,005	5,68	$3,55 \cdot 10^{-3}$	0,114784549	60,11478455
140	$2,03 \cdot 10^{-3}$	0,037	0,7	6,4	3,8	0,004	5,8	$3,76 \cdot 10^{-3}$	0,086718813	60,08671881

3.6 Análisis de los resultados obtenidos.

En la figura 3.6 se muestra la zona de clarencia diametral óptima donde el cojinete soporta la carga radial máxima con una velocidad de giro de 3500 rpm. Para lograr un ajuste adecuado la clarencia debe ser mayor que el espesor mínimo permisible de la película $\Delta > 6.4$, la zona de clarencia seleccionada va a estar en un rango $30 < \Delta < 58 \mu\text{m}$ lo que permite que la película de lubricante sea mayor a medida que la clarencia diametral aumente por lo que la vida útil del cojinete será más prolongada. Si la película de aceite es muy grande, el muñón puede hacer contacto con la superficie debido a la caída de presión del aceite.

En el diagrama se puede observar además que el espesor máximo de la película se alcanza con una clarencia diametral de $60 \mu\text{m}$.

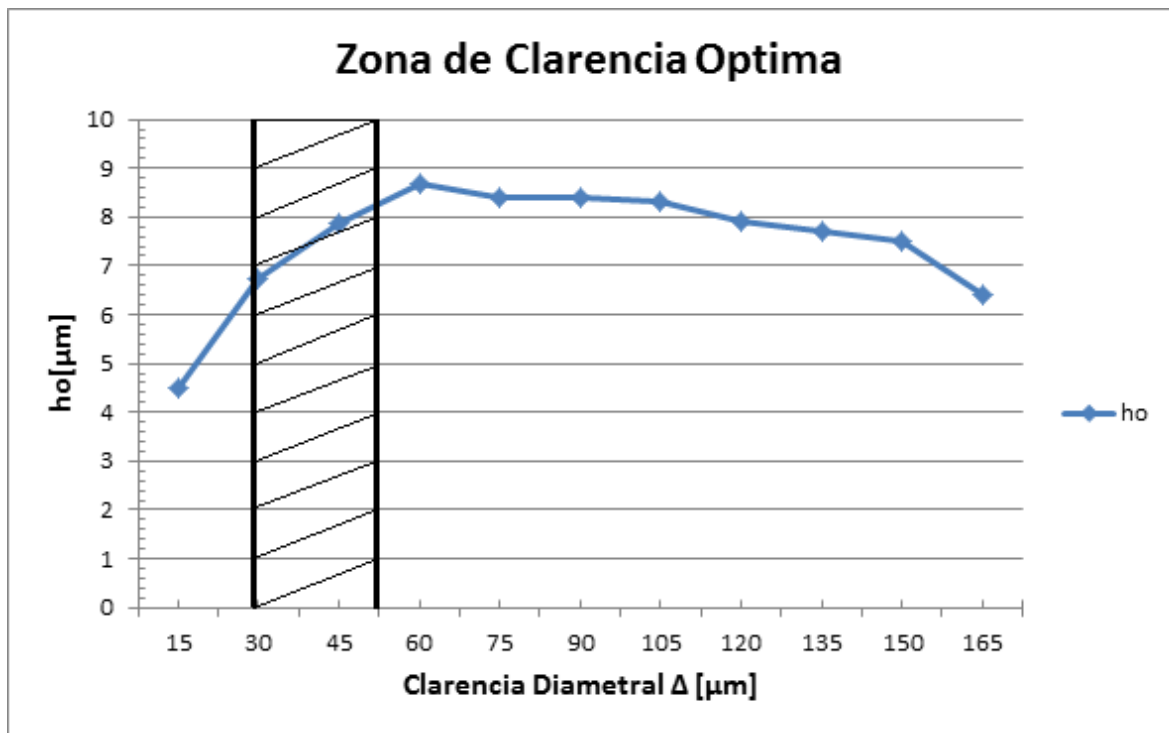


Figura 3.6 Zona de clarencia diametral óptima.

En la figura 3.7 se puede observar como el coeficiente de fricción en el cojinete va disminuyendo según aumenta su clarencia diametral, por lo que esto incide en que si aumenta el espesor de la película de aceite el coeficiente puede mejorar. Para el rango comprendido de $30 < \Delta > 58 \mu\text{m}$, el coeficiente de fricción $f < 0,016$ lo que garantiza que va a existir una mínima fricción entre el casquillo y el muñón por lo que las pérdidas de potencia en el árbol van a ser pequeñas y las probabilidades del contacto entre las superficies va a ser nulas.

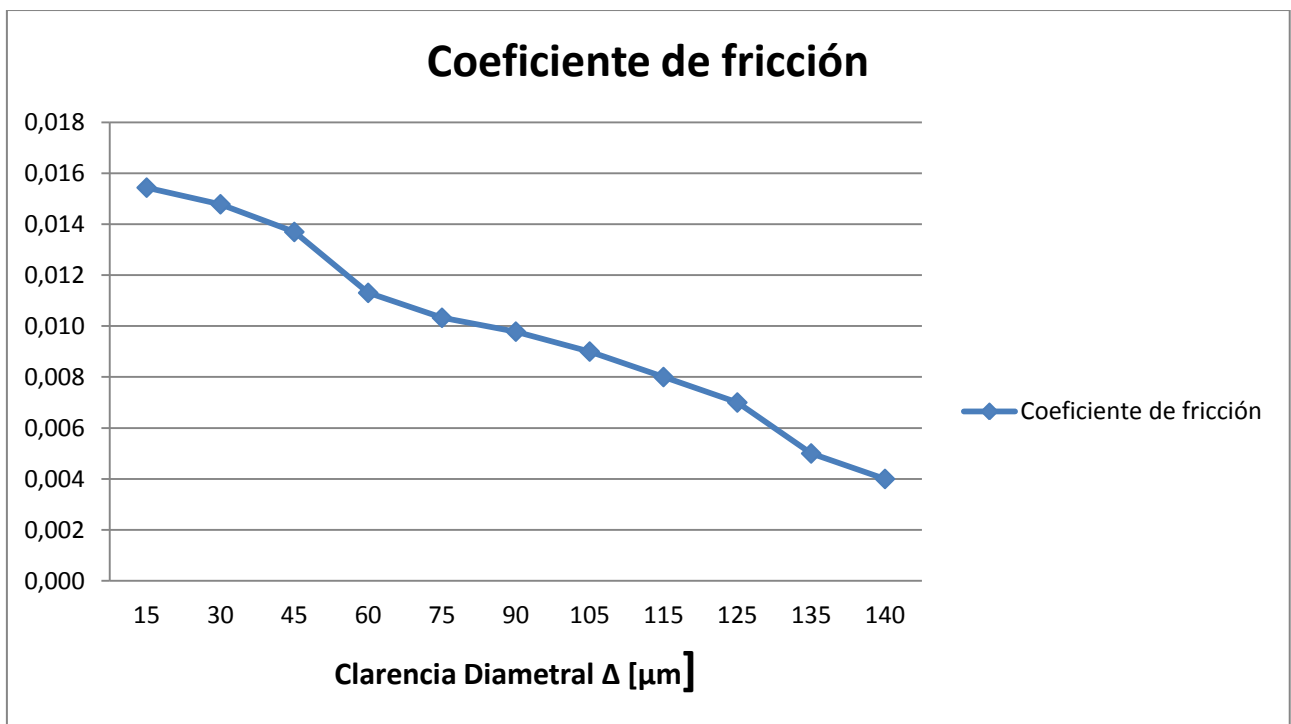


Figura 3.7 Coeficiente de Fricción en el Cojinete para 3500 rpm.

La figura 3.8 muestra el flujo de lubricante movido dentro del cojinete, como se puede observar para el rango comprendido en $30 < \Delta < 58 \mu\text{m}$ el flujo se va a comportar $0.0005 < Q < 0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ y va a ir en aumento según la clarencia diametral sea mayor. Si el flujo de lubricante arrastrado por el cojinete es muy pequeño, y no disipa el calor que se genera producto de la fricción, el cojinete se sobrecalentará y finalmente podrá fallar por agarramiento, este flujo va en aumento según se incrementa la clarencia diametral.

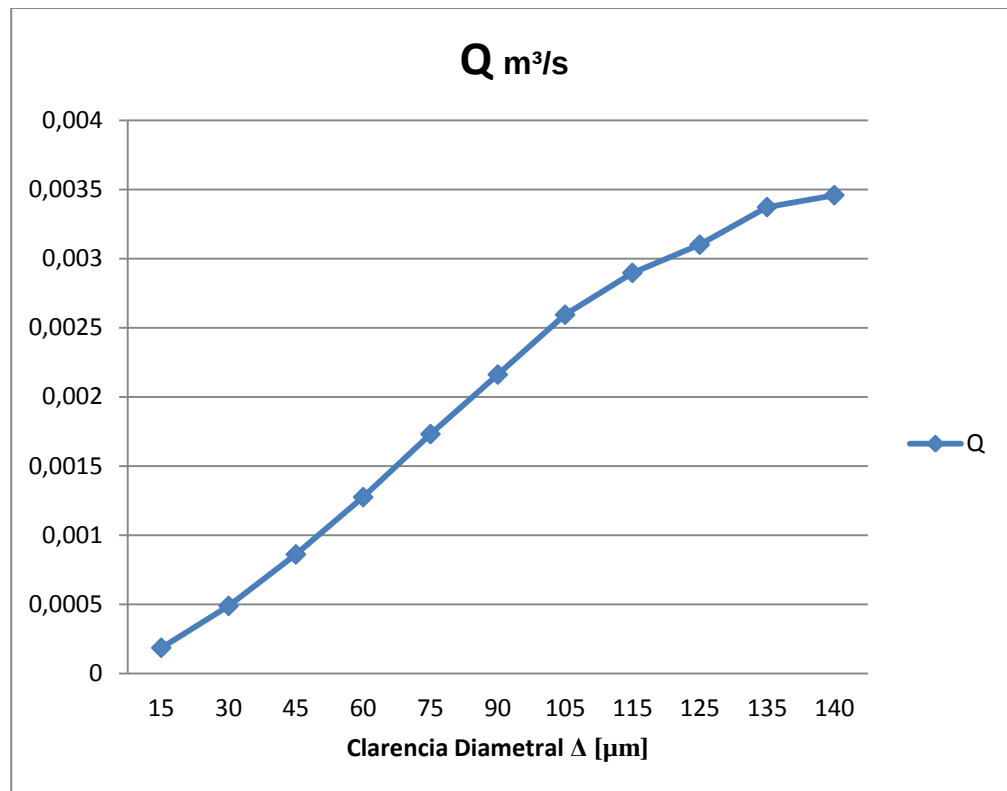


Figura 3.8 Flujo Movido por el Cojinete para Velocidad de Giro 3500 rpm.

La figura 3.9 muestra la temperatura media de trabajo a la cual va a operar el cojinete según las condiciones de explotación a la que es sometido con una velocidad de giro de 3500 rpm. La temperatura media se va a comportar a lo largo de la curva a la temperatura de trabajo del cojinete, según sea el flujo de lubricante en el cojinete, así será el comportamiento de la temperatura.

Para las condiciones de clarencia optima el cojinete trabajara bajo una temperatura media que oscilara entre 61 °C y 62°C .

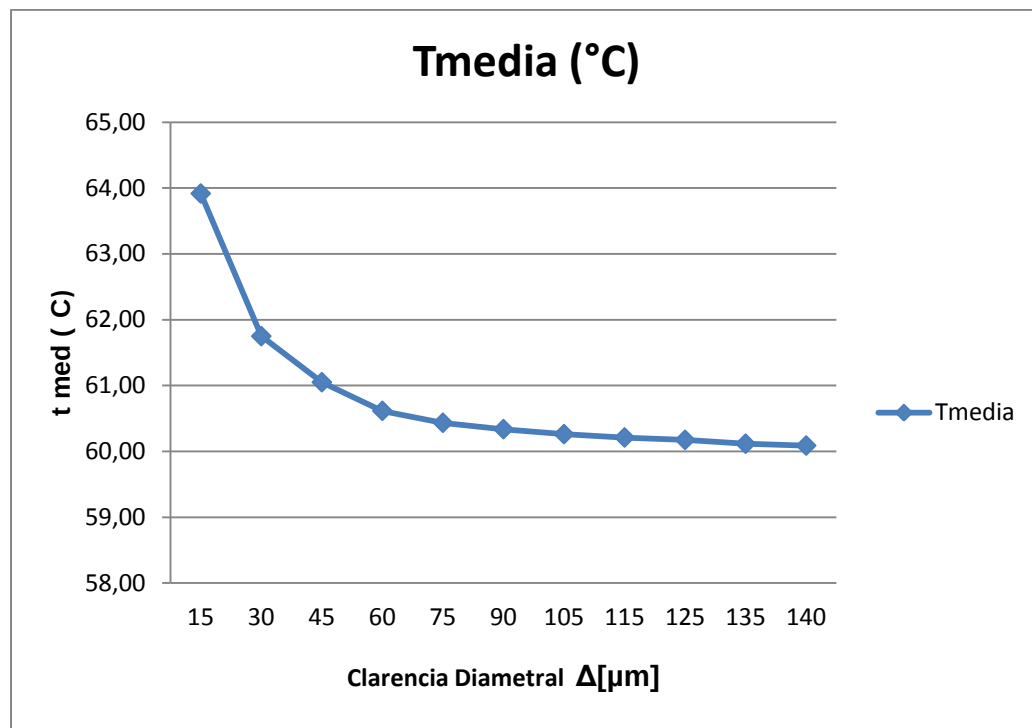


Figura 3.9 Temperatura Media del Cojinete.

De los resultados obtenidos se puede apreciar que el rediseño del cojinete permite que este trabaje bajo condiciones hidrodinámicas, que la zona de clarencia diametral óptima va a estar en un rango entre 30 μm y 58 μm , el espesor máximo de la película va a ser de 8.7 μm para una clarencia diametral de 60 μm , la película de aceite es mayor que la admisible desde $\Delta = 30 \mu\text{m}$ hasta 135 μm , la temperatura en el cojinete va a oscilar alrededor de lo 60 ° C y según vaya en aumento la clarencia diametral, la temperatura disminuirá lo que permite que el aceite conserve su viscosidad y se mantenga bajo el coeficiente de fricción y no exista el contacto entre las superficies.

3.7 Ajuste recomendado.

El ajuste, H_6/f_7 se usa en los cojinetes de deslizamiento con una alta frecuencia de rotación, con la longitud grande de conjugación o con gran distancia entre los apoyos.

3.7.1 Selección de la tolerancia del cojinete.

En la tabla 3.4 se observan las desviaciones y tolerancias del ajuste seleccionado, para este caso se empleará un ajuste móvil 69 H_6/f_7

Tabla 3.4 Tolerancias y desviaciones del ajuste.

Agujero	Eje
T: 19 μm	T:30 μm
E _i : 0	e _i :-60 μm
E _s :19 μm	e _s : -30 μm

Selección de la tolerancia del Cojinete.

Para $\downarrow 69 H_6$

T: 19 μm

E_i : 0

$E_s = T + E_i = 19 \mu\text{m}$

$e_i = -60 \mu\text{m}$

Para $\downarrow 69 f_7$

T: 30 μm

e_s : -30 μm

$e_i = -e_s - T$

3.7.2 Determinación del juego máximo

$$\Delta_{\max} = J_{\max} = E_s - e_i = 49 \mu\text{m}$$

$$\Delta_{\min} = J_{\min} = E_i - e_s = -30 \mu\text{m}$$

3.7.3 Determinación del diámetro mínimo.

$$D_{\max} = D + E_s \quad D_{\min} = D + E_i \quad E_i = 0$$

$$D_{\max} = 69 + 0.049 \quad D_{\min} = 69 + 0$$

$$D_{\max} = 69.049 \text{ mm} \quad D_{\min} = 69 \text{ mm}$$

La figura 3.10 muestra las dimensiones del árbol rediseñado con sus tolerancias calculadas anteriormente.

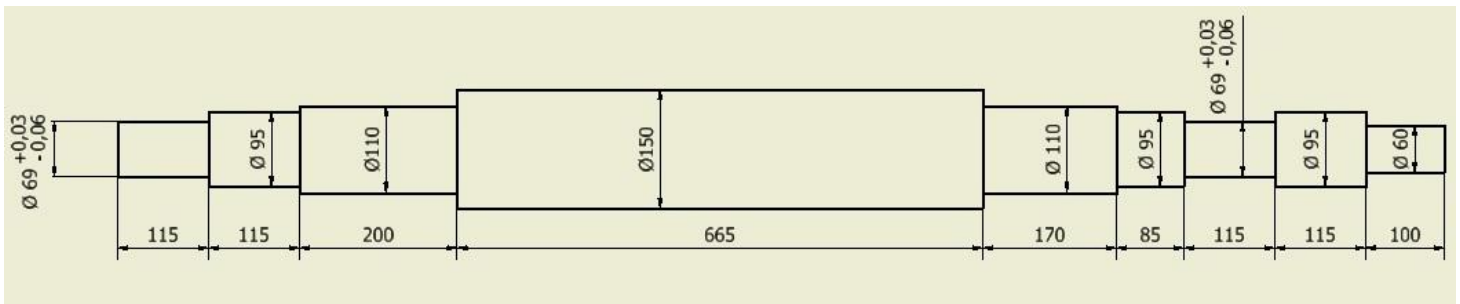


Figura 3.10 Dimensiones y tolerancias del árbol rediseñado.

La tolerancia del casquillo para el diámetro interior hay que seleccionarla de manera que la holgura con relación al árbol sea menor que $\delta_{m\acute{a}x} = 49 \mu m$ y no debe ser menor que $\delta_{m\acute{i}n} = 30 \mu m$.

El diámetro del árbol es $d_a = 69 \text{ mm}$:

$$\downarrow 69^{+0.049}_{-0.030}$$

3.7.4 Selección de la tolerancia del árbol.

T: $30 \mu m$

e_s : $-30 \mu m$

$T = e_s - e_i$

$e_i = e_s + T$

$e_i = -60 \mu m$

La tolerancia del árbol va a ser:

$$\downarrow 69 \begin{matrix} + 0.030 \\ - 0.060 \end{matrix}$$

3.7.5 Determinación del diámetro mínimo.

$$d_{\max} = d + e_s \qquad d_{\min} = d + e_i$$

$$d_{\max} = 69 + (0.030) \qquad d_{\min} = 69 + (-0.060)$$

$$d_{\max} = 69.03 \text{ mm} \qquad d_{\min} = 68.94 \text{ mm}$$

3.8 Comprobación de la resistencia al agarramiento.

Aun cuando el cojinete esté optimizado y se garantice una lubricación hidrodinámica en condiciones normales de funcionamiento, esto no quiere decir que no se pueda producir contacto metálico entre las partes. Este contacto ocurre de hecho en los momentos de arranque y parada y puede ocurrir durante la operación en momentos de sobrecargas instantáneas. En los cojinetes de deslizamiento la falla por agarramiento es probable cuando $v > 0.1 \text{ m/s}$.

Como cálculo para evitar el agarramiento se utiliza el criterio de limitar las presiones de contacto, la velocidad y el producto $p \cdot v$, o sea debe cumplirse que: (Dobrovolski 1975)

$$p = \frac{R}{l \cdot d} \leq [p]$$

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60000} \leq [v]$$

$$p \cdot v = \frac{R \cdot n}{1910 \cdot l} \leq [p \cdot v]$$

En el cojinete objeto de estudio, como se calculó anteriormente:

$$p = 14.052 \text{ kgf/cm}^2$$

$$v = 12.64 \text{ m/s}$$

$$p \cdot v = 177.6 \text{ kgf} \cdot \text{m/cm}^2 \cdot \text{s}$$

Para el metal Babbitt B-89 se da para los siguientes valores admisibles:

$$[p] = 25 \text{ Mpa} = 254 \text{ kgf/cm}^2$$

$$[v] = 60 \text{ m/s}$$

$$[p \cdot v] = 15240 \text{ kgf} \cdot \text{m/cm}^2 \cdot \text{s}$$

Se puede decir que cumplidas las condiciones, no va a existir agarramiento durante la explotación del cojinete de deslizamiento.

$$p \leq [p]$$

$$v \leq [v]$$

$$p \cdot v \leq [p \cdot v]$$

3.8.1 Consideraciones finales.

Como se puede apreciar la selección de un material para cojinetes equivale siempre a una solución de compromiso, pues no existe ningún material que reúna todas las exigencias expuestas en grado deseable. Una selección adecuada se obtendría después de realizado un trabajo experimental intenso. No siempre se dispone de recursos o tiempo para realizar el trabajo experimental.

Para una selección primaria se recomienda tomar en consideración los siguientes criterios:

1 - Presión específica permisible [p]

La cual se determina experimentalmente y caracteriza el deterioro catastrófico del material antifricción para una velocidad de deslizamiento constante.

2 - Velocidad de deslizamiento permisible [V]

Con el aumento de la velocidad de deslizamiento, la presión específica permisible de un material disminuye, por lo tanto la selección del material antifricción esta también limitada por la velocidad de deslizamiento permisible.

3 - El producto presión por la velocidad de deslizamiento $[p \cdot V]$

El cual caracteriza el incremento de la temperatura, a causa de la capacidad de transferencia de calor durante la fricción.

3.9 Conclusiones parciales.

1. El redimensionamiento del cojinete y el rectificado del árbol a 69 mm permitió obtener como resultado las dimensiones adecuadas para que el cojinete continuara su régimen de lubricación hidrodinámica.
2. Mediante los cálculos de optimización se determinó la zona de clarencia diametral óptima $30\mu\text{m} < \Delta < 58\mu\text{m}$ para que el cojinete opere bajo condiciones hidrodinámicas y así elevar su vida útil.
3. Los resultados obtenidos de los gráficos muestran cómo van a variar las variables, espesor mínimo de la película (h_0), el coeficiente de fricción (f), la temperatura del lubricante (Δt), y el flujo de lubricante que se mueve (Q) según aumenta la zona de clarencia diametral en el cojinete, lo que permite controlar estos parámetros a la hora de realizar el mantenimiento.
4. El ajuste recomendado se determinó a partir de la zona de clarencia óptima, las tolerancias entre el casquillo y el muñón están ubicada en la zona entre $30\mu\text{m}$ y $45\mu\text{m}$ para un ajuste H_6/f_7 , obteniendo una tolerancia para el casquillo $\downarrow 69 \begin{matrix} +0.049 \\ -0.030 \end{matrix}$ y para el árbol de $\downarrow 69 \begin{matrix} +0.030 \\ -0.060 \end{matrix}$

5. La resistencia al agarramiento arrojo que el metal babbit seleccionado para el revestimiento va a resistir en caso de que ocurra contacto metal- metal durante el arranque y la parada.

Se cumplieron las condiciones siguientes:

$$p \leq p_{\text{lim}}$$

$$v \leq v_{\text{lim}}$$

$$p \cdot v \leq p_{\text{lim}} \cdot v_{\text{lim}}$$

Conclusiones Generales

1. Se determinó que la baja vida útil de los cojinetes recuperados se debe a que no se asegura la holgura requerida para una lubricación hidrodinámica efectiva, produciéndose a corto plazo el contacto metal - metal y la falla.
2. Los materiales seleccionados para la recuperación de cojinete son el Babbitt (B-89) para el revestimiento el cual presenta buenas propiedades antifricción y es utilizado cuando se necesita este régimen de trabajo, para el buje de bronce se seleccionó un bronce al estaño empleado en cojinetes y bujes.
3. Se desarrolló una tecnología de recuperación para los cojinetes partiendo de que anteriormente no se realizaba correctamente.
4. Se rediseñó el conjunto muñón – casquillo de forma que la holgura diametral este en el rango de mejor desempeño del cojinete y pueda operar bajo condiciones hidrodinámicas.
5. Se seleccionó un ajuste que cumpliera las condiciones de la clarencia diametral seleccionada y se calcularon las tolerancias para el casquillo y el árbol.
6. Los cálculos de resistencia al agarramiento arrojaron que el metal antifricción va a resistir el contacto metal - metal en el arranque y la parada.

Recomendaciones

Se recomienda evaluar la durabilidad del cojinete una vez recuperado.

Bibliografía

Burgos, H. L. (2002). Evaluación de recubrimientos de babbitt depositados por arco eléctrico utilizados en cojinetes de turbinas. Caracas.

Cabello Juan J. Notas del Profesor. Dpto. de Mecánica Aplicada. Available from Y:\Disciplinas\Pregrado\Mecanica\Mecanica Aplicada\Elementos de Maquina I\Notas del Profesor

Centro de investigaciones metalúrgicas. (1996). Recuperación de piezas por el método de soldadura, 365 pág.

Cherkasski, V.M. (1985). Bombas, Ventiladores y Compresores. Moscú: MIR.

Clasificación de las bombas. (Mayo 2009). Available from World Wide Web:

<<http://html.rincondelvago.com/bombas.html>>.

CUBALUB. CUPET. (1997). Cuba. Características de los aceites y grasas lubricantes. Catálogo Industrial.

Dobrovolsky V. (1975). Elementos de Máquinas. Moscú: Editorial MIR, 622p.

Feodosiev, V.I. (1979). Resistencia de Materiales. La Habana: Pueblo y Educación.

García, Francisco. (1976). Características, uso y aplicación de los lubricantes. Instituto Cubano del Libro.

Gilda Fernández Levy. (1983). Resistencia de Materiales. La Habana: Pueblo y Educación.

Goytisoló R. (1973). Tablas de Diseño de Elementos de Máquinas III, UCLV. Dpto. de Mecánica Aplicada, 60p.

Hugot, E. (1974). Manual para Ingenieros Azucareros, México: Continental.

Ivanov, M. (1991). Elementos de Máquinas, Moscú: Vischaya Schkola

Lusilievich, G. (1988). Elementos de Máquinas, Moscú: Mashinostroenie.

NC01-01. (1972). Selección de las desviaciones y ajustes de ISA, vigentes desde Marzo de 1972.

Nikolaev, Anatoli. (1972). Maquinas herramientas I Segunda Parte. Moscú: Editorial MIR, 860 pág.

Pisarenko G. S. (1989). Manual de resistencia de materiales. Moscú: Editorial MIR, 694p.

Pisarenko, G.F. (1979). Manual de Resistencia de Materiales, Moscú: MIR.

Ramos Páez, Néstor. (1995). Bombas, Ventiladores y Compresores. La Habana: ISPJAE.

Reshetov, D. (1985). Elementos de Máquinas, La Habana: Pueblo y Educación.

Reshetov, D. (1990). Elementos de Máquinas. La Habana: Pueblo y Educación.

Rodríguez Martínez, C. (2009, Febrero). Tribología y diseño de cojinetes de deslizamiento.

Shigley J, Mitchell L. (1985). Diseño en Ingeniería Mecánica. México: Editorial Mc Graw-Hill, 915p.

Shigley, J. (2001). Diseño en Ingeniería Mecánica, México: McGraw Hill Interamericana.

Stachowiak G. W. (1983). Batchelov A. W. Engineering Tribology Amsterdam: Editorial Elsevier, 872p.

Stiopin, P. (1985). Resistencia de Materiales, Moscú: MIR.

Troshenko, V. (1987). Resistencia a la fatiga de los metales y aleaciones, Moscú: Kiev Naukova Dumk.

Anexos

Anexos 1.

Tabla 1.1 Valores de tolerancias.

Tabla Valores de la tolerancia (NC 16-30) (μm)

<u>Grados de tolerancias</u> <u>Dimensión (mm)</u>	<u>IT</u>																		
	<u>0,1</u>	<u>0</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>7</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>10</u>	<u>11</u>	<u>12</u>	<u>13</u>	<u>14</u>	<u>15</u>	<u>16</u>	<u>17</u>
<u>Hasta 3</u>	<u>0,1</u>	<u>0,5</u>	<u>0,8</u>	<u>1,2</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>6</u>	<u>10</u>	<u>14</u>	<u>25</u>	<u>40</u>	<u>60</u>	<u>100</u>	<u>140</u>	<u>250</u>	<u>400</u>	<u>600</u>	<u>1000</u>
<u>Más de 3 hasta 6</u>	<u>0,4</u>	<u>0,6</u>	<u>1</u>	<u>1,5</u>	<u>2,5</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>8</u>	<u>12</u>	<u>18</u>	<u>30</u>	<u>48</u>	<u>75</u>	<u>120</u>	<u>180</u>	<u>300</u>	<u>480</u>	<u>750</u>	<u>1200</u>
<u>Más de 6 hasta 10</u>	<u>0,4</u>	<u>0,6</u>	<u>1</u>	<u>1,5</u>	<u>2,5</u>	<u>4</u>	<u>6</u>	<u>9</u>	<u>15</u>	<u>22</u>	<u>36</u>	<u>58</u>	<u>90</u>	<u>150</u>	<u>220</u>	<u>360</u>	<u>580</u>	<u>900</u>	<u>1500</u>
<u>Más de 10 hasta 18</u>	<u>0,5</u>	<u>0,8</u>	<u>1,2</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>5</u>	<u>8</u>	<u>11</u>	<u>18</u>	<u>27</u>	<u>43</u>	<u>70</u>	<u>110</u>	<u>180</u>	<u>270</u>	<u>430</u>	<u>700</u>	<u>1100</u>	<u>1800</u>
<u>Más de 18 hasta 30</u>	<u>0,6</u>	<u>1</u>	<u>1,5</u>	<u>2,5</u>	<u>4</u>	<u>6</u>	<u>9</u>	<u>13</u>	<u>21</u>	<u>33</u>	<u>52</u>	<u>84</u>	<u>130</u>	<u>210</u>	<u>330</u>	<u>520</u>	<u>840</u>	<u>1300</u>	<u>2100</u>
<u>Más de 30 hasta 50</u>	<u>0,6</u>	<u>1</u>	<u>1,5</u>	<u>2,5</u>	<u>4</u>	<u>7</u>	<u>11</u>	<u>16</u>	<u>25</u>	<u>39</u>	<u>62</u>	<u>100</u>	<u>160</u>	<u>250</u>	<u>390</u>	<u>620</u>	<u>1000</u>	<u>1600</u>	<u>2500</u>
<u>Más de 50 hasta 80</u>	<u>0,8</u>	<u>1,2</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>5</u>	<u>8</u>	<u>13</u>	<u>19</u>	<u>30</u>	<u>46</u>	<u>74</u>	<u>120</u>	<u>190</u>	<u>300</u>	<u>460</u>	<u>740</u>	<u>1200</u>	<u>1900</u>	<u>3000</u>
<u>Más de 80 hasta 120</u>	<u>1</u>	<u>1,5</u>	<u>2,5</u>	<u>4</u>	<u>6</u>	<u>10</u>	<u>15</u>	<u>22</u>	<u>35</u>	<u>54</u>	<u>87</u>	<u>140</u>	<u>220</u>	<u>350</u>	<u>540</u>	<u>870</u>	<u>1400</u>	<u>2200</u>	<u>3500</u>
<u>Más de 120 hasta 180</u>	<u>1,2</u>	<u>2</u>	<u>3,5</u>	<u>5</u>	<u>8</u>	<u>12</u>	<u>18</u>	<u>25</u>	<u>40</u>	<u>63</u>	<u>100</u>	<u>160</u>	<u>250</u>	<u>400</u>	<u>630</u>	<u>1000</u>	<u>1600</u>	<u>2500</u>	<u>4000</u>
<u>Más de 180 hasta 250</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4,5</u>	<u>7</u>	<u>10</u>	<u>14</u>	<u>20</u>	<u>29</u>	<u>46</u>	<u>72</u>	<u>115</u>	<u>185</u>	<u>290</u>	<u>460</u>	<u>720</u>	<u>1150</u>	<u>1850</u>	<u>2900</u>	<u>4600</u>
<u>Más de 250 hasta 315</u>	<u>2,5</u>	<u>4</u>	<u>6</u>	<u>8</u>	<u>12</u>	<u>16</u>	<u>23</u>	<u>32</u>	<u>52</u>	<u>81</u>	<u>130</u>	<u>210</u>	<u>320</u>	<u>520</u>	<u>810</u>	<u>1300</u>	<u>2100</u>	<u>3200</u>	<u>5200</u>
<u>Más de 315 hasta 400</u>	<u>3</u>	<u>5</u>	<u>7</u>	<u>9</u>	<u>13</u>	<u>18</u>	<u>25</u>	<u>36</u>	<u>57</u>	<u>89</u>	<u>140</u>	<u>230</u>	<u>360</u>	<u>570</u>	<u>890</u>	<u>1400</u>	<u>2300</u>	<u>3600</u>	<u>5700</u>
<u>Más de 400 hasta 500</u>	<u>4</u>	<u>6</u>	<u>8</u>	<u>10</u>	<u>15</u>	<u>20</u>	<u>27</u>	<u>40</u>	<u>63</u>	<u>97</u>	<u>155</u>	<u>250</u>	<u>400</u>	<u>630</u>	<u>970</u>	<u>1550</u>	<u>2500</u>	<u>4000</u>	<u>6300</u>

Para las dimensiones hasta 1mm se utilizan los grados de tolerancia del 14 hasta el 17

Tabla 1.2 Tabla de desviaciones.

Valores de las desviaciones principales (NC 16 – 30)

Intervalo de dimen siones (mm)	Desviación superior del eje -es (µm)											js
	a	b	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	
≤ 3	270	140	60	34	20	14	10	6	4	2	0	T/2
> 3 a 6	270	140	70	46	30	20	14	10	6	4	0	
6 a 10	280	150	80	56	40	25	18	13	8	5	0	
10 a 14	290	150	95	—	50	32	—	16	—	6	0	
14a 18												
18 a 24	300	160	110	—	65	40	—	20	—	7	0	
24 a 30												
30 a 40	310	170	120	—	80	50	—	25	—	9	0	
40 a 50	320	180	130									
50 a 65	340	150	140	—	100	60	—	30	—	10	0	
65 a 80	360	200	150									
80 a 100	380	220	170	—	120	72	—	36	—	12	0	
100 a 120	410	240	180									
120 a 140	460	260	200	—	145	85	—	43	—	14	0	
140 a 160	520	280	210									
160 a 180	580	310	230	—	170	100	—	50	—	15	0	
180 a 200	660	340	240									
200 a 225	740	380	260	—	190	110	—	56	—	17	0	
225 a 250	820	420	280									
250 a 280	920	480	300	—	210	125	—	62	—	18	0	
280 a 315	1050	540	330									
315 a 355	1200	600	360	—	230	135	—	68	—	20	0	
355 a 400	1350	680	400									
400 a 450	1500	760	440	—	230	135	—	68	—	20	0	
450 a 500	1650	840	480									
(mm)	A	B	C	CD	D	E	EF	F	FG	G	H	Js
AGUJ.	DESVIACIÓN INFERIOR DEL AGUJERO + EI											

Anexos 2. Características generales de los Babbitt.

Tabla 2.1 Composición y propiedades físico - mecánicas y características tribológicas de los Babbitt según norma GOST 1320-74 y 1209-73.

Denominación	Composición Química (%)					Densidad (g/cm ³)	Temperatura de Fusión (°C)	Coeficiente de dilatación lineal (10 ⁻⁶ /°C)	Elongación (δ) (%)	Reducción de Area(φ) (%)	Dureza (HB)			
	Sn	Sb	Cu	Pb	Otros						20°C	50°C	75°C	100°C
B-83	Resto	10 12	5.5 6.5	-	-	7.4	380	23	6	11.3	30	22.8	18.5	14.5
B-89	Resto	7.25 8.25	2.5 3.5	-	-	7.3	342	23	10.6	13.6	24.3	18.2	14.8	10.3
B-16	15 - 17	15 17	1.5 2.0	Resto	-	9.3	410	24	0.2	-	30	22.4	21.2	15
B-6	5 - 6.5	5.5 6.5	0.3	Resto	-	9.6	416	28	0.2	-	32	-	18.3	14
B-T	9 - 11	14 16	0.7	Resto	0.15 Te	-	-	25	1.8	0.5	-	22.4	-	-
B-N	9 - 11	13 15	1.5 2.0	Resto	1.25 Ni 1.75 Cd 0.05 As	9.5	400	25	1.7	0.4	29	-	16.4	13
BC	-	1.6 1.8	1.0 1.5	Resto	-	9.3	410	26	-	-	-	-	-	-

Anexo 2.2. Tabla de composición y propiedades físico - mecánicas y características tribológicas de los Babbitt según norma GOST 1320-74 y 1209-73

Denominación	E 10^4 MPa	Límite de fluencia (Mpa)	Límite de resistencia (Mpa)	Presión de trabajo admisible (MPa) [p]	Temperatura de trabajo admisible (°C) [T]	Velocidad de deslizamiento admisible (m/s) [V]	[P.V] (MPa-m/s)	Usos
B-83	4.8	67	90	10	100	60-80	15-20	Cojinetes de deslizamiento de turbinas de vapor, turbogeneradores y motores diesel.
B-89	5.7	62	80	20-25	80	60-80	15-20	
B-16	-	-	78	10	100	12	10	Cojinetes de turbinas de vapor de hasta 800 kW, reductores de hasta 1300 Kw.
B-6	-	-	68	5	90	6	5	Cojinetes de compresores, motores eléctricos de 100-200 kW.
B-T	-	58	60	15	70	30-40	6	No se recomienda utilizarlo en condiciones pesadas de trabajo.
B-N	-	60	70	10-15	100	15	15	Puede sustituir al B-82 en el rango de $p < 1.5 \text{ Mpa}$ $V < 15 \text{ m/s}$ y $p_v = 15 \text{ Mpa} \cdot \text{m/s}$
BC	-	-	-	10-15	100	10	15	-
BK	2.2	89	100	15	110	15	15	Cojinetes de deslizamiento de vagones de ferrocarril, máquinas herramientas, motores eléctricos con bajas revoluciones

Anexo 3. Características generales de los bronce antifricción.

Tabla 3.1. Composición y propiedades físico-mecánicas de los bronce.

Grupo	Denominación	Composición Química (%)	Densidad (g/cm ³)	Temperatura de Fusión (°C)	Coefficiente de dilatación lineal (10 ⁶ /°C)	Límite de Fluencia (MPa)	Resistencia a la Compresión (MPa)	Límite de Resistencia a la Fatiga (Mpa)
Bronces al Estaño	SAE 65	89 Cu – 11 Sn	8.78	1000	18.4	193-206	-	-
	SAE 63	87 Cu – 10 Sn – 1 Pb- 2 Zn	8.80	-	17	124-172	83-96	-
	SAE 622	88 Cu – 6 Sn – 1.5 Pb – 4.5 Zn	8.70	288-1027	18.5	110-138	103	76
	SAE 62	88 Cu – 10Sn – 2 Zn	8.70	1000	17.2	134-159	-	-
	SAE 620	88 Cu – 8 Sn – 4 Zn	8.80	1000	19.1	134-159	-	-
Bronces al Plomo	SAE 794	70 Cu- 5 Sn – 25 Pb	9.30	-	19.2	79-103	83-96	-
	SAE 67	78 Cu – 7 Sn – 15 Pb	9.25	-	19	137	89-110	-
Bronces al Plomo Estaño	SAE 64	80 Cu – 10 Sn – 10 Pb	8.95	-	19.2	117	-	89
	SAE 66	85 Cu – 5 Sn – 8 Pb – 1 Zn	8.87	955	18	83-103	90	-
	SAE 660	83 Cu – 7 Sn – 7 Pb – 3 Zn	8.93	9.55	18	117-145	-	-

Tabla 3.2. Composición y propiedades físico-mecánicas de los bronce de E.U.A. (continuación)

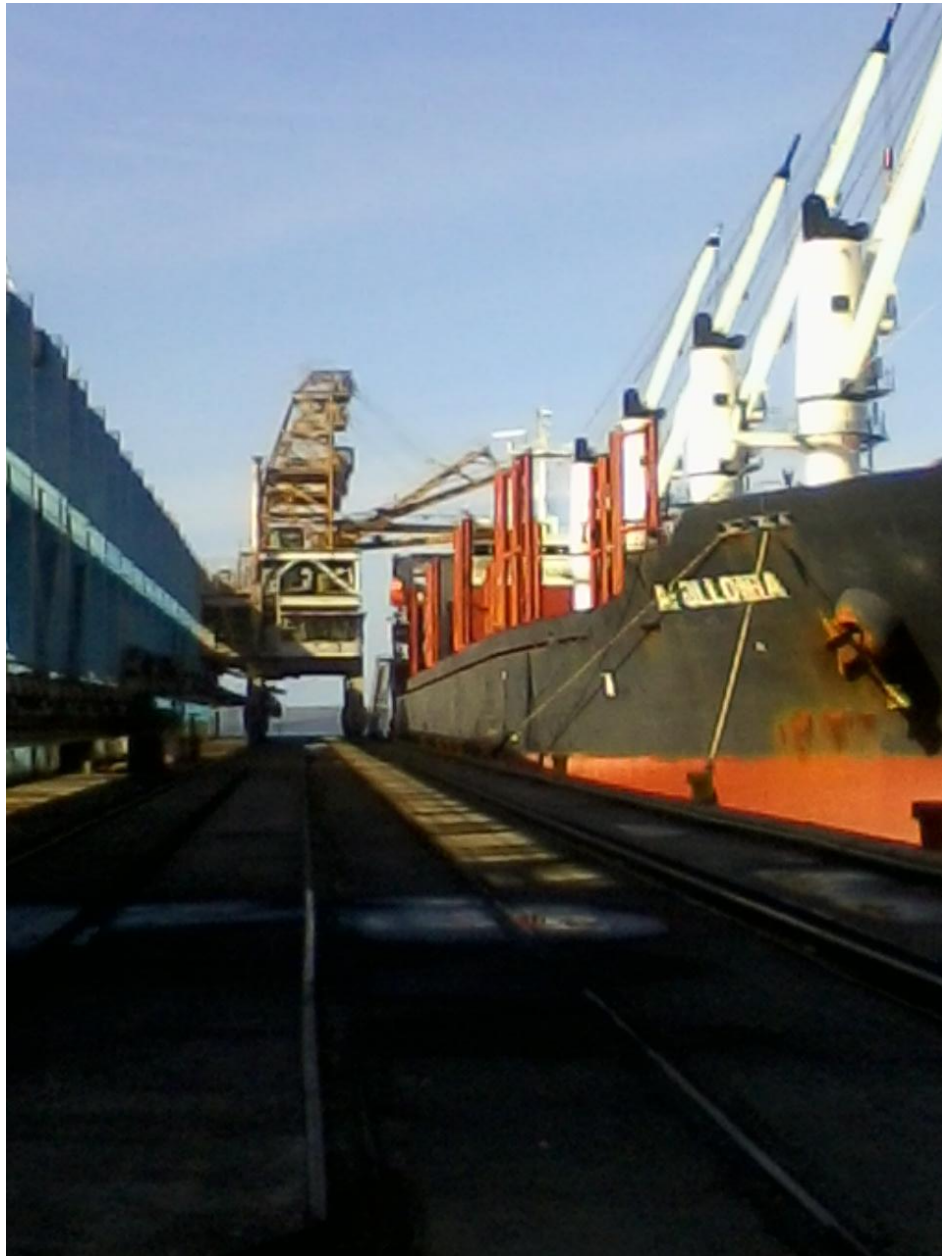
Grupo	Denominación	E (MPa)	Elongación (%)	Dureza (HB)	Presión de trabajo admisible (MPa) [p]	Temperatura máxima de trabajo (°C) [T]	Usos
Bronces al Estaño	SAE 65	-	15-40	85-105	29-45	250	Cojinetes con altas cargas y velocidades relativamente bajas
	SAE 63	93078	15-25	65-80	29-45	250	Cojinetes que trabajan con altas cargas donde la resistencia al desgaste es esencial
	SAE 622	89631	35-45	65-70	25-40	250	Cojinetes de deslizamiento
	SAE 62	103420	24-43	75-85	29-45	250	Cojinetes y bujes
	SAE 620	96526	24-43	68-72	25-40	250	Cojinetes de deslizamiento que trabajan en condiciones pesadas, buena resistencia al desgaste.
Bronces al Plomo	SAE 794	68497	7-16	48	25-40	250	Cojinetes que trabajan bajo la acción de cargas ligeras y altas velocidades
	SAE 67	72394	10-18	55	25-40	250	Cojinetes que trabajan con presiones moderadas y medias.
Bronces al Plomo Estaño	SAE 64	75842	26-34	65	30-40	240	Cojinetes que trabajan a altas velocidades y presiones.
	SAE 66	-	20-35	55-65	-	240	Cojinetes y bujes.
	SAE 660	99973	16-20	60-65	-	240	Cojinetes y bujes pequeños

Anexo 4. Propiedades Principales de los aceites industriales producidos por diferentes firmas comerciales.

Tabla 4.1. Aceites industriales de la firma Castrol S.A. homologables con los fabricados por la firma Cubalub.

Tipo de Aceite		Grado ISO	Viscosidad (cSt)		Índice de Viscosidad	Punto de Inflamación	Densidad a 20 °C (g/cm ³)	Usos
			40°C	100 °C				
Circulación	Hyspyn AWS-32	32	32	5.26	93	216	0.870	Lubricación de cojinetes de deslizamiento para aplicaciones en sistemas de circulación de baño
	Hyspyn AWS-46	46	46	6.65	95	222	0.875	
	Hyspyn AWS-68	68	68	8.60	95	228	0.875	
	Hyspyn AWS-100	100	100	11.10	95	222	0.880	
	Hyspyn AWS-150	150	150	14.50	95	222	0.885	
	Hyspyn ZN-220	220	220	18.60	95	228	0.890	
Turbo	Perfecto T-32	32	32	5.30	96	207	0.865	En turbocondensadores, etc. Tiene aditivos antioxidantes, anticorrosivos y antiespumante
	Perfecto T-68	68	68.8	8.60	96	225	0.875	

Anexos 5. Muelle de descarga de cereales.



Anexos 6. Bomba de vacío.



Anexos 7. Cojinetes de deslizamientos de la bomba de vacío.



Anexo 8. Cojinete averiado.



Anexo 10. Vista de una mitad del cojinete.

