



**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO  
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”  
FACULTAD METALURGIA – ELECTROMECAÁNICA**

**CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DE  
COJINETES DE CONTACTO PLANO EMPLEADOS EN  
UNA TURBINA DE VAPOR PARA GENERACIÓN  
ELÉCTRICA**

**Tesis en opción al título de ingeniero mecánico**

**Autor:** Reynel Mendez Aranda

**Tutor:** Dr. C. Tomás Hernaldo Fernández Columbié

**Moa- 2018**



**Declaración de autoridad:**

Yo: Reynel Mendez Aranda

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

\_\_\_\_\_  
Reynel Mendez Aranda

\_\_\_\_\_  
Dr. C. Tomás H. Fernández Columbié



## *Agradecimientos:*

*A Dios por darme vida y permitirme vivir esta experiencia.*

*A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el transcurso de la carrera.*

*A mi tutor, el Dr. C. Tomás Heraldo Fernández Columbié por su paciencia, tiempo, conocimiento y dedicación para que fuese posible la realización de este trabajo.*

*A mis familiares especialmente a mi madre por apoyarme en los momentos que más me hicieron falta y su constante preocupación.*

*A mis compañeros de aula, por soportarme durante todo este período de estudio y ayudarme a seguir hacia adelante.*

*A mis amigos Luis Daniel Cardero Leyva y Roberto Méndez Cortina, por el apoyo brindado.*

*A la Revolución por darme la oportunidad de superarme y convertirme en profesional.*

*A los que de una forma u otra me ayudaron y apoyaron.*

*A todos Muchas Gracias.*



## *Dedicatoria:*

*Quiero dedicar este trabajo a mi padre Nelquis Mendez Frometa a pesar de reunirse con dios cuando más lo necesité.*

*A mi madre Reina Aranda Hernández y mi padraastro Francisco Matos Batista por haber sido los principales promotores de mi superación.*

*A mis hermanos Orlys, Nelsi, Neli, Normelvis y Orleydis por apoyarme y confiar en mí.*

*A mi novia Carmen Beatriz Fonseca Anache, mis abuelos, mis tíos y primos por estar siempre para mí.*

*A mis sobrinos con la esperanza de que este éxito sea motivo de inspiración para su futura formación profesional.*

*A Tomás por todo su incondicional apoyo.*

*A mis compañeros de aula y amigos que siempre se preocuparon por mis estudios.*

*A nuestra revolución, por las posibilidades que nos ofrece.*



## RESUMEN

El objetivo del trabajo es establecer la caracterización microestructural de cojinetes de contacto plano empleados en una turbina de vapor para generación eléctrica de contrapresión con toma regulada de 12 MW de rendimiento. Se relacionan las incidencias estadísticas de las causas de fallas en los cojinetes de fricción de esta turbina. Al caracterizar el cojinete de contacto plano se determinó que el mismo es de base estaño compuesto por dos casquillos. Para determinar el comportamiento microestructural se consideró tres áreas del cojinete: las zonas del cojinete de deslizamiento A, B y C. Se determinó que el espesor del recubrimiento es de 2,3 mm y el mismo se desgastó por efecto de la fricción hasta un 1,07 mm; que representa el 46 % del desgaste y que la causa del defecto posiblemente sea a deficiencias en la lubricación. Las microestructuras obtenidas en el babbitt sin estar sometido a trabajo y en el retirado de servicio están constituidas por dendritas de fase  $\alpha$  primaria ( $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ), solución sólida  $\beta$  ( $\text{SnSb}$ ). Las tensiones determinadas por el método de los elementos finitos entre el árbol y el cojinete, la pérdida de material genera tensiones máximas de 9 264  $\text{N/m}^2$  y mínima de 7 720  $\text{N/m}^2$  en el interior de la pista de deslizamiento. Finalmente se establece la valoración económica, así como las incidencias medio ambientales.



---

## ABSTRACT

The objective of the work is to establish the characterization microstructural of bearings of contact plane employees in a turbine of stem for electric generation of contra presion with regulated taking of 12 MW of yield. They are related the statistical incidences of the causes of flaws in the bearings of friction of this turbine. When characterizing the bearing of contact plane it was determined that the same one is of base tin composed by two cases. To determine the behavior microestructural it was considered three areas of the bearing: the areas of the slip bearing TO, B and C. were determined that the thickness of the clap is of 2.3 mm and the same one wore away for effect of the friction until a 1.07 mm; that it represents 46 % of the waste and that the cause of the defect is possibly to deficiencies in the lubrication. The microestructuras obtained in the babbitt without being subjected to work and in the retired of service they are constituted by phase dendrite  $\alpha$  primary ( $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ), solid solution  $\beta$  ( $\text{SnSb}$ ). The stress determined by the method of the finite elements between the tree and the bearing, the material loss generates maximum tensions of 9 264  $\text{N/m}^2$  and minimum of 7 720  $\text{N/m}^2$  inside the slip hint. Finally the economic valuation settles down, as well as the half environmental incidences.



<b>ÍNDICE</b>	<b>Pág</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>CAPITULO I. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS</b>	
1.1 Introducción	4
1.2. Generalidades relacionadas con las turbinas	4
1.3. Generalidades sobre los Babbitt	6
1.4. Cojinetes de deslizamientos	12
1.4.1. Cargas que soportan los cojinetes de fricción	14
1.5. Estructura de los cojinetes antifricción	17
1.6. Desgastes en pares tribológicos	18
1.7. Simulación por el método de elementos finitos	22
1.8. Conclusiones del capítulo 1	24
<b>CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	
2.1. Introducción.	25
2.2. Composición química del babbitt base estaño de la turbina.	25
2.3. Características de la turbina	26
2.3.1. Etapas de las turbinas de vapor	27
2.3.2. Detalles de mantenimiento	29
2.4. Caracterización del cojinete de deslizamiento	30
2.4.1. Parámetros de trabajo del cojinete	31
2.5. Análisis microestructural	32
2.6. Preparación metalográfica	34
2.6.1. Área para la selección de las muestras	34



2.6.2. Corte y encapsulado de las muestras	35
2.6.3. Propiedades de la resina epoxi ROYAPOX – 5050	36
2.6.4. Desbaste de las muestras	36
2.6.5. Pulido y ataque de las muestras	37
2.6.6. Observación con microscópica óptica	37
2.6.7. Ensayos de dureza	38
2.7. Métodos de los elementos finitos. Módulo de ensamble	39
2.7.1. Mallado del modelo	40
2.8. Conclusiones del capítulo 2	42
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	
3.1. Introducción	43
3.2. Análisis de la composición química de la aleación con base de estaño	43
3.2.1. Análisis de la composición química del bronce al estaño	43
3.2.2. Determinación del espesor del cojinete	44
3.3. Comportamiento microestructural del cojinete	46
3.3.1. Comportamiento microestructural de las secciones del cojinete	47
3.4. Análisis por el método de los elementos finitos	49
3.4.1. Comportamiento de los desplazamientos	50
3.4.2. Comportamiento de las deformaciones	51
3.5. Análisis de la dureza	53
3.5.1. Procesamiento estadístico de los datos	53
3.6. Valoración económica	55
3.7. Valoración del impacto medio ambiental	56
3.8. Conclusiones del capítulo 3	57



**Conclusiones Generales**

**Recomendaciones**

**Bibliografías**

## **INTRODUCCIÓN**

Desde nuestros principios el hombre se ha interesado por desarrollar sus técnicas de subsistencia para lograr una mejor calidad de vida. Con el pasar de los años fueron ganando desarrollo debido a la necesidad de innovar en varios problemas ocasionados que dieron inicio a la industria moderna, abriendo puertas a la revolución industrial, situación económica, de gran escala, que consiste en la creciente comunicación e interdependencia entre los distintos países del mundo unificando sus mercados. En los últimos años la recuperación de piezas defectuosas debido a desgastes, como ejes y cojinetes de contacto plano ha tenido gran demanda en Cuba creciendo progresivamente con la explotación de los distintos equipos industriales provocando a su vez un aumento en la demanda de materiales para estos fines.

Por lo general los defectos de los árboles tipo ejes y sus alojamientos, son estructurales y mecánicos: estos primeros se deben a la fatiga debido a presiones, temperaturas excesivas, sobrecargas y corrosión por componentes ácidos en su lubricante, mientras que los segundos se generan por abrasión o desgaste excesivo al apreciar partículas metálicas y suciedades, las temperaturas elevadas, holguras incorrectas, desalineaciones, separación del metal antifricción del cuerpo de los cojinetes y deposición en los muñones de apoyo del árbol por excesivo ajuste, a consecuencia de un árbol mal dimensionado que limite la entrada del lubricante en la unión.

En Cuba se trabaja en la implantación de nuevos métodos para la recuperación de las piezas desgastadas que a su vez permitan disminuir el costo de reparación de las máquinas y de esta forma dar respuesta a las demandas de piezas de repuesto. En los talleres del país especializados en reparación se aplican métodos de restauración de piezas desgastadas como el recargue con soldadura eléctrica, manual y mecanizada, los procesos de proyección térmica y los de recubrimientos electrolíticos.

El alto costo de los métodos de recuperación y la variación del metal base de las piezas a recuperar representan limitaciones para la aplicación de algunos métodos, lo que obliga a innovar y buscar nuevas vías capaces de cumplir las exigencias técnicas requeridas para mejorar las propiedades mecánicas de las piezas. A nivel internacional se ha determinado dividir las maquinas en partes para lograr facilitar su fabricación y montaje, mejorando así

la economía de la producción y el funcionamiento de las mismas. La necesidad de que las máquinas sean fabricadas en conjuntos independientes exige un diseño confiable de las transmisiones mecánicas que permita garantizar la fiabilidad en los diseños y disminuir costos.

Debido a esto es creciente la demanda de las máquinas y los métodos que satisfagan a las industrias en sus necesidades. En el desarrollo productivo de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" los cojinetes de contacto plano de la turbina de vapor de la planta eléctrica poseen gran importancia para la producción de energía ya que esta UEB es la encargada de suministrar la energía necesaria a las demás plantas de la empresa para la producción.

### **Situación problemática**

Debido a trabajos investigativos realizados a la turbina de vapor se han determinado como resultados que a pesar de las condiciones de trabajo la magnitud de los desgastes y su distribución se determina por ser un par duro – blando (liso – rugoso), donde el desgaste de mayor dimensión ocurre en el elemento de menor dureza, el cojinete de contacto plano, cuerpo de alojamiento del árbol; además está la propiedad de resistencia al desgaste superficial del material del árbol debido a su composición química, estructura y dureza; y la atención y mantenimiento al régimen de lubricación; que hacen mínimo el efecto de abrasión en el par de fricción.

### **Problema**

El estudio de la relación de las propiedades mecánicas/metalúrgica del cojinete de contacto plano perteneciente a la turbina de vapor de la planta eléctrica en la empresa "Comandante Che Guevara", aún no es suficiente para determinar el efecto del desgaste entre el par tribológico eje-chumacera.

### **Hipótesis**

Considerando la geometría de un cojinete de contacto plano empleado en una turbina de vapor antes de su puesta en explotación y otro retirado de servicio a través de los mismos se podrá determinar las propiedades mecánicas/metalúrgica de los mismos y predecir el efecto del desgaste que se origina en el par tribológico.

### **Objetivo general**

Establecer el comportamiento microestructural y la dureza de los cojinetes de contacto planos empleados en la turbina de vapor desgastado en el par tribológico por efecto de la fricción rodadura.

**Objeto de estudio:** cojinetes de contacto plano de la turbina de vapor.

**Campo de acción:** microestructura y dureza del recubrimiento babbitt base estaño del cojinete de contacto plano de la turbina de vapor.

### **Objetivos específicos**

1. Definir las variaciones que se originan en los cojinetes de contacto plano empleados en la turbina de vapor y desgaste por el efecto de la fricción en el par tribológico.
2. Establecer el procedimiento metodológico relacionado con el efecto del desgaste del cojinete de contacto plano perteneciente a una turbina de vapor para generación eléctrica.
3. Fundamentar las variaciones microestructurales, así como la dureza derivadas del análisis de los cojinetes de contacto plano empleados en la turbina de vapor para la generación eléctrica, así como del efecto del desgaste generado por la fricción rodadura.

### **Tareas de trabajo:**

1. Establecimiento del estado del arte y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Análisis de los efectos de las variables empleadas para determinar el comportamiento microestructural, así como la dureza de los cojinetes de contacto plano empleados en una turbina de vapor.
3. Ejecución experimental para la determinación de la composición en la zona de unión entre el babbitt y el metal base de los cojinetes de contacto plano, así como el efecto del desgaste generado por la fricción.
4. Análisis de los resultados y fundamentación del comportamiento de la microestructura y la dureza obtenidas en los cojinetes de contacto plano empleados en la turbina de vapor.
5. Planteamiento de las ventajas económicas de la aplicación de la metodología propuesta, así como del efecto medio ambiental.

# **Capítulo 1**

## **Marco teórico. Antecedentes investigativos**

## CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

### 1.1. Introducción

Los desastres en ingeniería con frecuencia están causados por un mal uso de los materiales. La innovación en ingeniería a menudo significa el uso inteligente de un nuevo material para una aplicación determinada, pero no necesariamente nuevo en el sentido de desarrollo recientemente. En los tiempos actuales el régimen de calidad en los distintos procesos de producción trae consigo el manejo adecuado de indicadores de gestión tales como; confiabilidad y disponibilidad de los equipos, estos garantizan un menor tiempo perdido en la elaboración de un producto determinado. Bajo estas premisas se hace indispensable prolongar la vida útil de las diferentes partes y elementos que constituyen una maquina, optimizando su ciclo de vida para lo cual se utilizan técnicas de reconstrucción.

En el presente capítulo se establece como objetivo realizar un análisis de la bibliografía relacionada con el proceso de desgaste de los cojinetes de contacto plano en máquinas tipos turbinas.

### 1.2. Generalidades relacionadas con las turbinas

Las turbinas de vapor han ido evolucionando y desarrollándose cada vez más a lo largo de los años con el objetivo de obtener una mayor eficiencia energética, alcanzando las turbinas actuales rendimientos de entre un 40 y un 52%. La principal aplicación de las turbinas de vapor modernas es la de hacer girar el rotor del generador situado en una central de producción de electricidad (Loboda *et al.*, 2009).

El mercado de la electricidad en el mundo está de cara a la competencia global causada por la privatización y la desregulación, de éste modo cada productor de energía debe tener plantas eléctricas competitivas para darse abasto en el suministro energético del país. Las plantas generadoras nacionales han sido operadas por años y es muy probable que el deterioro de cada componente por envejecimiento proceda gradualmente. Para evitar éstos problemas por adelantado, es importante establecer la estrategia de mantenimiento y mantener la confiabilidad y disponibilidad de las plantas termoeléctricas (Roemer *et al.*, 2000; Loboda *et al.*, 2009).

Expone Romessis *et al.* (2007) que la gran demanda de energía que se ha necesitado día a día lleva a la necesidad de instalar en las nuevas plantas generadoras turbinas de vapor cada

vez más eficientes, ofreciendo confiabilidad y adaptabilidad. En donde quiera que se mire, se están incorporando avances tecnológicos en las turbinas modernas de vapor; a través de planeación, se han creado: máquinas de diferentes tamaños, escapes de flujos múltiples, los cojinetes de alta velocidad, los álabes más altos de la última etapa, el mecanismo de distribución por válvulas accionadas por levas y sus controles, así como otros sistemas de control muy complicados.

Refiere Roemer *et al.* (2000) que, en la potencia total de una red de un país cualquiera, se requiere que no exista una dependencia total de las turbinas de vapor no mayor al 50 % de la máxima capacidad. Las ventajas de las turbinas de vapor son su alta potencia y su excelente realización dentro del ciclo Clousus-Rankine. Así mismo, pueden operara a altas r/min y la instalación puede ser pequeña. Además de que la potencia de la turbina puede ser muy regulada, lo que es positivo cuando se utiliza para accionar equipos mecánicos.

De acuerdo con Shankar y Yedavalli (2006) y Rodríguez-Rodríguez (2017), la energía eléctrica se produce fundamentalmente mediante el uso de turbinas de vapor, turbinas de gas, turbinas hidráulicas, motores diesel. La turbina de vapor como se muestra en la figura 1.1, permite alcanzar la mayor capacidad de generación. Debe quedar claro que éste empleo no es el único de las turbinas de vapor, también existen aplicaciones en donde una planta de proceso tiene necesidad de grandes cantidades de calor, las industrias petroquímicas. Actualmente en la producción de energía eléctrica se encuentran turbinas con capacidad hasta de 1 300 MW en una instalación.

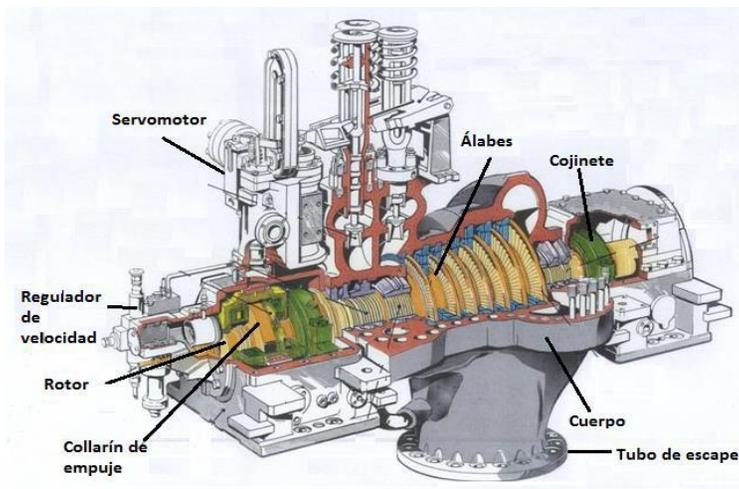


Figura 1.1. Sección de una turbina de vapor de condensación con extracción de vapor. Fuente: Rodríguez-Rodríguez (2017).

Ha sido establecido por Kazanski *et al.* (2004) y Domínguez-García (2017) que en las turbinas de vapor se llevan a cabo paradas forzadas, paradas diferidas y paradas planeadas, de las cuales las primeras se originan en la mayoría de los casos por no llevar a una inspección adecuada y periódica a las máquinas, observando que cuando se realiza el mantenimiento propio, tanto a la turbina como al sistema en general, se participa de esta manera para aumentar el rendimiento de la planta.

La inspección de integridad a la turbina de vapor forma parte del mantenimiento a plantas generadoras, éstas se realizan en diferentes periodos, conforme a recomendaciones del fabricante, cuando ocurren fallas internas y externas, con el propósito que las turbinas de vapor se encuentren en excelentes condiciones de operación y así contribuir a la confiabilidad y disponibilidad de la planta generadora para suministrar la energía eléctrica necesaria (Kazanski *et al.*, 2004).

La inspección de integridad es un recurso para un mantenimiento preventivo contribuyendo a las mejoras de rendimiento del equipo para aumentar la calidad de operación. Esta inspección de integridad es necesaria porque una planta de energía eléctrica que ha operado por un largo plazo (100 000 horas) presenta las siguientes clases de deterioro:

- ✚ Por envejecimiento de los componentes,
- ✚ Del material de fabricación,
- ✚ Del comportamiento de la calidad.

Se pudo establecer en el trabajo de Rodríguez-Rodríguez (2017) que la inspección de integridad por las turbinas de vapor analiza las fallas presentadas en las turbinas de vapor y en base a estas experiencias (estadísticas) se trata de prevenir la aparición de las mismas. Las plantas de generación de energía eléctrica, no siempre se encuentran trabajando al 100 % de su capacidad y entre otras razones, esto se debe a las fallas que presentan sus componentes; tal es el caso de las turbinas de vapor. Si las fallas no son detectadas a tiempo, esto ocasionará las salidas forzadas de las unidades y por ello se verá afectado e interrumpido el Sistema Eléctrico Nacional y por lo tanto las industrias y población.

Las turbinas de vapor hoy día se diseñan con mayor grado de confiabilidad y adaptabilidad, con ellas se sigue el mantenimiento adecuado, periódico y programado en las mejores condiciones; ya que de lo contrario se tendrán fallas inesperadas (Domínguez-García,

2017). Dentro de las causas principales de paradas de las turbinas de vapor se consideran las paradas forzadas, las paradas diferidas y paradas planeadas.

Según Casanova (2013), las turbinas de vapor (TV) son uno de los motores más versátiles en cuanto a sus aplicaciones, cuya finalidad es la de transferir energía para impulsar una máquina. La máquina acoplada a la turbina puede ser accionada *directamente* o *indirectamente*, a través de un reductor de velocidad. Desde el punto de vista de su aplicación, las turbinas de vapor se pueden dividir en tres grupos (Siemens AG, 2009): TV industriales, TV para centrales eléctricas y TV marinas. Estas últimas empleadas en la propulsión de barcos, en competencia con los motores diesel.

Exponen Chenchu-Deepa y Jayachandriah (2012), las TV de las centrales eléctricas son siempre de accionamiento directo con el generador eléctrico. En cambio, las TV industriales son frecuentemente de accionamiento indirecto y las TV marinas son siempre de accionamiento indirecto. Estas máquinas posibilitan una generación eficiente de electricidad y mejoran la rentabilidad de procesos industriales. Entre los diferentes sectores que cubre se encuentran: empresas energéticas, productores independientes de electricidad, industria química, petroquímica/refinerías, madereras, papeleras, minería, metalurgia y siderurgia, acerías, industria procesadora, cementera, industria azucarera, de etanol y de aceite de palma, industria de alimentos y bebidas.

Las ventajas más importantes que presentan las turbomáquinas son: alto rendimiento mecánico y eficiencia ya que son capaces de hacer que el generador produzca electricidad a gran escala, gran fiabilidad y disponibilidad, diseño compacto, y puesta en servicio y mantenimiento sencillos. La gama de turbinas de vapor disponibles en el mercado es muy amplia. Su tamaño dependerá de la potencia capaz de producir, habiendo turbinas de 0,75 kW hasta de 1 500 MW (Casanova, 2013).

El registro de las fallas, según expone Villarreal *et al.* (2009), en las turbinas de vapor a través del tiempo, es una estadística para evaluar el comportamiento y asegurar cada vez con mayor certeza la solución a la falla que se puede originar. La vibración en una turbina de vapor no es una avería en sí misma, sino un síntoma de un problema que existe en la turbina y que puede derivar en graves consecuencias.

Las fallas, paros forzados o cualquier condición anormal de funcionamiento en las turbinas de vapor, pueden evitarse por medio de inspecciones a las máquinas. Para detectar éstas fallas es necesario realizar una inspección integral en las turbinas de vapor, lo cual permite identificar la vida útil del material de sus componentes y con esto programar la sustitución de éstos materiales en programas de mantenimiento preventivo y de ésta forma garantizar el suministro de energía dentro del Sistema Eléctrico Nacional (Villarreal *et al.*, 2009).

La turbina a vapor dentro de sus elementos constitutivos como lo son el eje, el rotor, los elementos de sello y lubricación, los cojinetes de apoyo del eje, los mismos que se tornan uno de los elementos más importantes de este equipo.

### 1.3. Generalidades sobre los Babbitt

A los efectos de brindar un apoyo entre los elementos móviles y los estacionarios de una máquina, se pueden emplear diversos elementos mecánicos que deberán proporcionar puntos de apoyo y que a su vez permitan el movimiento relativo entre los mismos. El metal Babbitt se utiliza fundamentalmente como una delgada capa superficial depositada en una estructura multi-metal compleja, pero su uso original era como un rústico cojinete fundido en el sitio (Daquinta, 2010).

Los Babbitt tienen excelente capacidad embebedora (o sea, de encerrar o enclavar dentro de sí las partículas extrañas) y conformabilidad (capacidad para deformación plástica y compensar las irregularidades del cojinete). Estas aleaciones permiten un trabajo satisfactorio para la rotación de ejes de acero blando (Dionicio, 2003). En la figura 1.2 se puede observar la tapa de un cojinete con metal Babbitt fundido en el cuerpo.

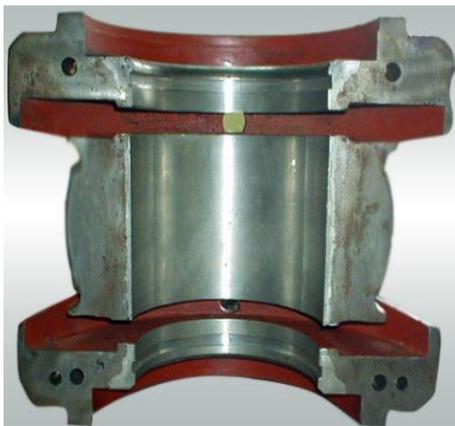


Figura 1.2. Tapa de un cojinete con metal Babbitt fundido en el cuerpo.

Fuente: Daquinta (2010).

El Babbitt es un término genérico para designar aleaciones con base de estaño y plomo, que se funden en las superficies de los cojinetes de apoyo y en tapas o respaldos de diferentes materiales como pueden ser: acero, bronce o hierro fundido (Laffita, 2017). Los materiales babbitt se emplean preferencialmente de los bronce por que puedan servir de apoyo a árboles o ejes que giran a altas velocidades. Presentan excelente capacidad de penetración, muy buena condición de conformabilidad.

Para reducir a un mínimo las fugas de aceite de los cojinetes, existe un canal en los casquillos de los cojinetes del lado de los deflectores. El aceite que recoge dicho canal es conducido al colector general de drenajes de aceite. Los cojinetes se clasifican en cojinetes de fricción y de rodamiento. En los cojinetes de fricción, los árboles giran con deslizamiento en sus apoyos. En los de rodamiento, entre el árbol y su apoyo se interponen esferas, cilindros o cono, logrando el rozamiento sea solo de rodadura cuyo coeficiente es notablemente menor (García *et al.*, 2013).

Según Hellemans (1988) y Rivas *et al.* (2006), el Babbitt es uno de los metales denominados como antifricción cuyas aleaciones principales son estaño, plomo, antimonio y cobre. Existen 2 tipos de metales Babbitt; el primero tiene base de Estaño con más de un 50 % de éste material y presenta buena adherencia sobre una base de hierro y tienen buena dureza en temperatura ambiente. El segundo tipo, tiene base plomo y también posee más del 50 % de éste material. Éste tiene poca adherencia sobre la base de hierro y tiene menor dureza a temperatura ambiente, pero conforme se eleva su temperatura el descenso de sus propiedades físicas no es tan acentuado como el que tiene base estaño.

La capa de plomo y estaño tiene un grosor aproximado de un milésimo de milímetros (o sea la mitad del grosor de una hoja de papel); es muy blanda y tiene buena capacidad de lubricación, de absorción y adaptabilidad. El baño de estaño es apenas de unos millonésimos de pulgada, protege contra la corrosión y da buena apariencia.

La fórmula original para rodamientos de metal de Babbitt fue 89,3 % estaño, 7,1 % de antimonio y 3,6 % de cobre y esta fórmula todavía se comercializa hoy por algunos fabricantes como ASTM B-23 Grado 2 Babbitt o como "Babbitt genuino". Más tarde se desarrollaron otras composiciones. El metal Babbitt se utiliza fundamentalmente como una delgada capa superficial depositada en una estructura multi-metal compleja, pero su uso original era como un rústico cojinete fundido en el sitio. El metal blanco (como se le

conoce también) se caracteriza por su resistencia a la excoiación, es suave y puede dañarse fácilmente, por lo que pudiera parecer inapropiada como superficie de apoyo, sin embargo su estructura se compone de pequeños cristales duros dispersados en un metal más blando, lo que hace que sea un compuesto de matriz metálica (Rivas *et al.*, 2006).

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

El mejor conjunto de propiedades antifricción las poseen los babbitts en base a estaño (B88, B83, B83S). Debido a su alto contenido de estaño, elemento que permanece caro, los mismos se usan preferentemente para cojinetes de alta responsabilidad, empleados en turbinas de vapor, piezas, ejes de distribución de motores de baja potencia, compresores, que trabajan a grandes velocidades y sometidos a altas cargas (Arzamasov *et al.*, 1990 y Kazanski *et al.*, 2004). Sin embargo, su estructura (figura 1.3) está hecho de pequeños cristales duros dispersados en un metal más blando, lo que hace que sea un compuesto de matriz metálica.

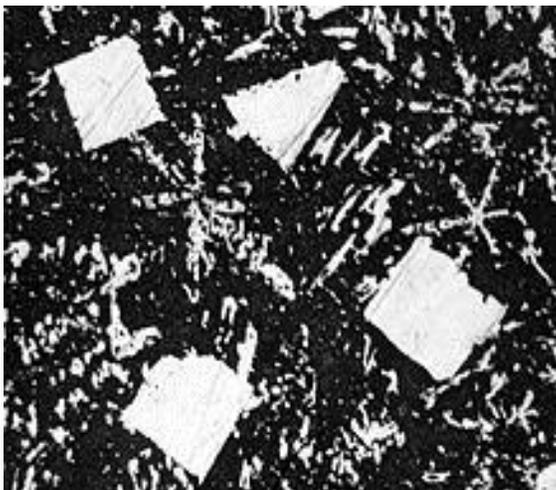


Figura 1.3. Microestructura del metal Babbitt. Fuente: Laffita (2016).

De acuerdo con la estructura mostrada en la figura 1.3, la misma es la encargada de garantizar la resistencia al par tribológico, pero cuando el cojinete se desgasta, el metal más blando se erosiona tanto que crea rutas para el lubricante entre los puntos duros que proporcionan la superficie de apoyo real. Cuando el estaño se utiliza como el metal más suave, la fricción hace que este se funda y funciona como un lubricante, que protege el cojinete contra el desgaste cuando otros lubricantes están ausentes (Potekhin *et al.*, 2006).

Microestructuralmente, comenta García *et al.* (2013), las aleaciones antifricción están formadas por un constituyente de gramos duros que está englobado en la masa plástica formada por el otro constituyente. El constituyente duro resiste el desgaste con un coeficiente de rozamiento reducido y el constituyente blando permite el ajuste automático del cojinete al eje y asegura un reparto equitativo de las cargas, además, debe tener la capacidad de adherir a él partículas extrañas (polvo y suciedad del aceite) y soltar su lubricación, para que no produzca el desgaste natural de la matriz blanda.

El metal Babbitt de acuerdo con Dionicio (2003) se emplea habitualmente como una capa superficial fina en un complejo, una estructura multimetal, pero su uso original se realizaba la colada en lugar del material de cojinete. El metal babbitt se caracteriza por su resistencia a la corrosión por frotamiento, es blando y se daña fácilmente, lo que sugiere que podría no ser adecuado para un cojinete de superficie.

La microestructura de un bronce emplomado muestra incrustaciones en color negro que son el plomo y la parte blanca de la misma es el cobre. Estos dos elementos son inmiscibles, es decir, no se mezclan entre sí. La fase  $\beta$  se forma como resultado de una reacción peritética a 798 °C. A 586 °C, la fase  $\beta$  tiene una reacción eutectoide para formar la mezcla ( $\alpha + \gamma$ ). A 520 °C,  $\gamma$  también sufre una transformación eutectoide a ( $\alpha + \gamma$ ). El diagrama indica la descomposición de la fase  $\delta$ , la que se da por una reacción eutectoide a 350 °C, formando ( $\alpha + \epsilon$ ). La reacción es muy lenta, haciendo que la fase  $\epsilon$  no exista en las aleaciones comerciales. La pendiente de la línea solvus por debajo de 520 °C muestra una pérdida de solubilidad del estaño en la fase  $\alpha$ .

La precipitación de la fase  $\delta$  o  $\epsilon$  es lenta debido al cambio de solubilidad que se da en la etapa antes mencionada. Es por ello que las fundiciones de bronce al estaño que se enfrían lentamente y que contienen menos del 7 % de estaño, solo muestran una fase (solución  $\alpha$

sólida). Pero en la mayor parte de las aleaciones que poseen más del 7 % de estaño, se puede encontrar algo de la fase  $\delta$  (Avner, 1988).

#### 1.4. Cojinetes de deslizamientos

Los cojinetes que entran dentro de la categoría de deslizamiento, generalmente son construidos en una base metálica revestidos con una aleación de base estaño. Dentro de las características que debe poseer este recubrimiento son: tener una buena adherencia al metal, libre de porosidades y depositado de una forma homogénea y con un coeficiente de fricción sumamente bajo y un buen acabado superficial. Cuando se presentan incidentes ya sea falla de lubricación o claros muy ajustados o desgaste en el tiempo, se suelen reconstruir estos cojinetes en forma artesanal aplicando una nueva capa de magnolia manualmente, la misma que a pesar de tener todas las precauciones, queda con macro porosidades que crea grandes irregularidades y muchas veces baja durabilidad del cojinete (Sawalhi y Randall, 2008).

Los cojinetes de fricción o deslizamiento, como se observa en la figura 1.4, son elementos de máquina construidos en forma de casquillos o bujes que tienen un movimiento en contacto directo, realizándose un deslizamiento con fricción. La reducción del rozamiento se consigue con la adecuada selección de materiales (diferentes al material del árbol o eje) y lubricantes. Al poder construirse partidos en dos se consigue hacer un montaje/desmontaje radial (Liaño-Gómez, 2016).



Figura 1.4. Cojinetes de deslizamiento o fricción. Fuente: Liaño-Gómez (2016).

Según Liaño-Gómez (2016), tienen la ventaja de su marcha silenciosa y tranquila pero el inconveniente de ser contraindicados con altas revoluciones a no ser que la carga que

gravita sobre ellos sea mínima. Tienen muchas aplicaciones debido a la amplia gama de condiciones de carga y temperaturas bajo las que pueden trabajar.

En virtud de que la trayectoria que describen los puntos sobre la superficie del eje en la zona que se apoya es cilíndrica, los cojinetes se fabrican en forma cilíndrica, aunque también se suelen construir en forma cónica, especialmente cuando se presentan cargas axiales en la operación del sistema o cuando se quiere que sean ajustables. Los cojinetes también tienen la función de evitar el desgaste de los puntos de apoyo o bancada de la máquina, efecto que se generaría si los ejes rodaran directamente sobre la estructura de la máquina. La parte del árbol que hace contacto con el cojinete de fricción recibe el nombre de gorrón o muñón. Los cojinetes de fricción son piezas fácilmente desmontables que se adaptan entre el eje y el soporte de la máquina (Hernández *et al.*, 2011).

Refiere Cupillard *et al.* (2014) que comúnmente, para permitir el movimiento relativo entre el eje y la estructura de la máquina y funcionar como punto de apoyo se suelen emplear los rodamientos, pero en algunos casos su aplicación es restringida por algunas variables que finalmente convierten al cojinete de fricción en la opción más adecuada. Es importante tener en cuenta que, a diferencia de los rodamientos, en los cojinetes de fricción no existe un deslizamiento por rodadura, por lo que el movimiento se genera por deslizamiento entre las superficies en contacto. Esta condición produce que se presente fricción entre las superficies y se genere un desgaste entre las mismas, tanto del eje como del cojinete. Esta variable es muy importante, lo cual lleva a que el cojinete de fricción siempre se construya de un material más blando que el material del eje, dado que es preferible que se desgaste el cojinete y no el eje.

La fricción consume energía inútilmente y el desgaste altera las dimensiones y el ajuste de las piezas hasta la inutilización de la máquina. Para evitar dicho desgaste tanto en el eje como en el cojinete de fricción y alargar así su vida útil, se suelen emplear materiales que técnicamente se conocen como materiales antifricción o materiales con trazas o recubrimientos de grafito, lo cual incluye un deslizamiento suave entre las superficies en contacto. En la práctica también es común el uso de materiales no metálicos como por ejemplo el teflón, que poseen buena adaptabilidad, los desechos generados son blandos y poco abrasivos, y pueden ser lubricados con gran diversidad de fluidos (Adams, 2012).

Un pequeño desgaste o una deficiente instalación de los cojinetes ocasionarán daños costosos e inactividad del motor. Los cojinetes defectuosos producen daños severos en los muñones del cigüeñal y en los apoyos del árbol de levas y como consecuencia de ello pueden arruinarse otras piezas del conjunto móvil (Adams, 2012).

#### 1.4.1. Cargas que soportan los cojinetes de fricción

Es del criterio Albarracín (2006) que los cojinetes tienen que soportar diferentes cargas a la que están sometidos. Los arrastres más pequeños de micro partículas, la sobrealimentación y los más altos rangos de potencia hacen que el cigüeñal y los cojinetes de biela se sometan a cargas muy pesadas. Esto ha llevado al desarrollo de algunas nuevas aleaciones y recubrimientos de cojinetes que permiten a estas partes sobrevivir a tantos esfuerzos.

García *et al.* (2013) considera que los fabricantes de cojinetes ofrecen una gama de materiales con diferentes índices de resistencia y de resistencia a la fatiga para maniobrar con todo tipo de aplicaciones, ya sean los motores de serie o los de rendimiento. La película de aceite (figura 1.5) también ayuda a distribuir la carga en el rodamiento y para protegerla contra el golpeteo constante.

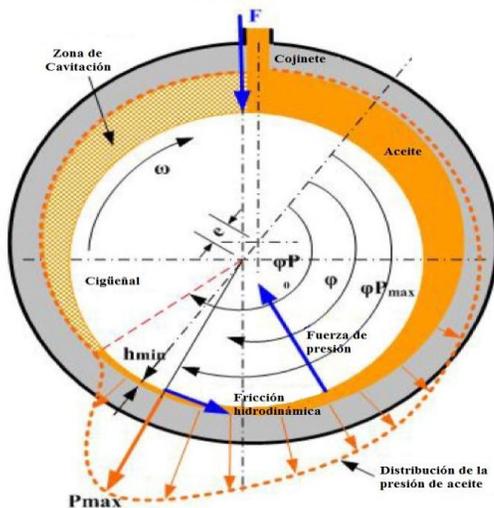


Figura 1.5. Lubricación de un cojinete. Fuente: García *et al.* (2013)

El lubricante en las máquinas tendrá que sustituirse cuando su envejecimiento haga que no mantenga sus variables, sobre todo la viscosidad y tendrá que reponerse periódicamente si hay pérdida o consumos, para mantener la capacidad del conjunto de evacuar el calor por pérdidas generado internamente por el rendimiento lógico menor de 1 siempre, y que para

su nivel garantice permanentemente el flujo de lubricación preciso por el diseño: barboteo, presión inducida por bomba de engrase (Chichinadze *et al.*, 2003).

En la zona de acoplamiento entre el gorrón y el cojinete existe un rozamiento por deslizamiento cuya magnitud puede medirse por medio de un coeficiente, que es función de la velocidad periférica del gorrón, del estado de las superficies, de la temperatura y de la naturaleza de los dos cuerpos en contacto. Cada una de estas capas ayuda al cojinete a cumplir una función. El refuerzo de acero es casi 90 % del grosor del cojinete, le da la resistencia estructural necesaria para calzar en su alojamiento, es el sostén de la capa de aluminio que soporta las cargas y conduce el calor con rapidez del aluminio al alojamiento (Espitia y Toro, 2010).

Criterios de estos autores (Espitia y Toro, 2010) al referir que la capacidad reductora de fricción de un cojinete de motor, se basa en el fenómeno de que los materiales diferentes se deslizan uno contra otro con menor desgaste y menos fricción que los materiales similares. Por la anterior razón las aleaciones de metales como cobre, estaño o plomo sostienen una pieza de acero móvil mejor que una cubierta accesoria de acero o hasta de hierro fundido.

En el trabajo de Gujar *et al.* (2013) se pudo determinar que otro aspecto a considerar en los cojinetes es la conductividad térmica (figura 1.6), es decir la facultad para absorber calor y transferir este desde la superficie del cojinete hasta la cubierta. Esta característica es importante pues cuando más frío funcione un cojinete, mejor es su rendimiento.

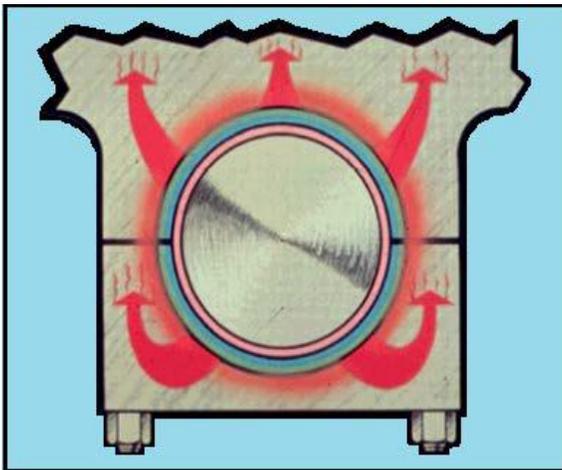


Figura 1.6. Disipación calorífica en un cojinete de apoyo. Fuente: Gujar *et al.* (2013).

El aceite se lleva la mayoría del calor que se genera, pero una buena conductividad térmica del cojinete constituye una ayuda valiosa. Durante el arranque, el calor que se genera por

fricción se transmite por conducción al árbol, a través del cojinete. Esta pieza está, por lo tanto, diseñada y fabricada para transmitir muy bien el calor (Gujar *et al.*, 2013).

Los cojinetes se deben instalar en alojamientos limpios y secos. Esto permite la máxima conducción de calor del cojinete al alojamiento, evita que se produzcan puntos candentes (causados por depósitos de residuos bajo el cojinete) y mejora también el coeficiente de fricción entre cojinete y alojamiento para impedir deslizamiento. Este ajuste de fricción entre la parte posterior del cojinete y el alojamiento (y no la lengüeta de colocación) impide que el cojinete se mueva y patine. La lengüeta sirve para alinear el cojinete como se debe, durante la instalación (Martínez y García, 2011).

Después de instalar las mitades en alojamientos limpios y secos, será necesario lubricar las superficies antes de instalar los cigüeñales, las tapas y los pernos de retención. Siempre conviene verificar visualmente el alineamiento de los orificios de lubricación durante la instalación (Martínez y García, 2011).

Los cojinetes deben estar lubricados durante su funcionamiento, normalmente por barboteo o a presión, por lo que disponen de unas ranuras de engrase comunicadas con un orificio, por donde entra el aceite a presión. Otras veces, las ranuras son curvas para facilitar la distribución de la lubricación. A estas ranuras se les llama patas de araña. Al mismo tiempo, gracias a su bajo punto de fusión, si se calienta excesivamente por falta de engrase, el cojinete se funde y así se evita el agarrotamiento o gripado de las partes en movimiento. El material antifricción es más blando que el del eje que gira, por lo que el desgaste se produce en el cojinete, que es el que se sustituye en las reparaciones (Albarracín, 2006).

En el trabajo realizado por Zappalorto *et al.* (2011) se pudo contactar que este autor plantea que cuando una superficie metálica se desplaza con respecto a otra, por esmerado que sea el trabajo de pulimentación, aunque parezca lisa y suave a simple vista, en realidad está formada por rugosidades y asperezas casi microscópicas, las cuales entran en contacto, se enganchan, desgarran y trituran, originándose así el rozamiento, por el cual el material se desgasta, la temperatura sube y las piezas se calientan, se dilatan y llegan incluso a fundirse, pudiendo producirse el denominado gripado.

Los cojinetes de aluminio de producción en serie que se utilizan en muchos motores de último modelo por lo general pueden llegar hasta 375 kW de potencia antes de que se vean

comprometidos, pero una vez que sobrepase estos niveles de potencia, la fatiga de los cojinetes podría tener lugar. Llegados a este punto, es necesario actualizar las aleaciones de los cojinetes ya sea a un aluminio más resistente o una aleación trimetálica (Kazanski *et al.*, 2004 y Mesa, 2007).

### **1.5. Estructura de los cojinetes antifricción**

Habitualmente, la estructura del cojinete está construida de acero, fundición o bronce, y la parte donde existe fricción por deslizamiento se recubre con el metal antifricción más apropiado para cada aplicación, en consonancia con el metal base del cojinete. El elemento rotatorio está separado del cojinete por una película de aceite, que lo mantiene flotando en él, impidiendo el contacto metal-metal. El metal blanco tiene elevada resistencia a la fricción con el aceite a presión, y en caso de que, debido a una mala manipulación de la máquina, se rompa la película y el eje caiga sobre el metal antifricción, el eje no se daña y la capa de metal blanco es fácil de reparar (Comas, 2011).

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

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

Se plantea por Herrera (2005) y Comas (2011), que una aleación de metal blanco debe asegurar una baja fricción y capacidad para soportar la carga sin gripar, distorsionarse, fallar mecánicamente o sufrir corrosión. Investigaciones recientes (Laffita, 2016) en ciertos campos han demostrado, aunque parezca extraño, que materiales muy duros pueden tener características adecuadas para cojinetes en aplicaciones especiales. Se utilizan materiales como stellite, carboloy, colmonoy, hastelloy y alundum, a causa de su dureza, estos

cojinetes deben ser extremadamente suaves y su geometría perfecta, pues existen pocas posibilidades de que se corrijan faltas de alineación por desgaste.

Algunas de las mejores aleaciones bimetálicas (recubrimiento de aluminio en una carcasa de acero) pueden encargarse con seguridad de los picos de carga de alrededor de los 49 033,26 kPa, mientras que muchos de los cojinetes trimetálicos son buenos para soportar más de 68 646,56 kPa. Algunos materiales de cojinetes especiales, como los que han sido desarrollados para motores de muy alto rendimiento y para los grandes motores turbodiesel, equipados en los mayores buques del mundo, son idóneos hasta los 137 293,13 kPa.

La estructura del recubrimiento es heterogénea y está condicionada a la técnica que se usó para realizar el trabajo y al material que se utilizó. La estructura es debida a variaciones en la condición de las partículas individuales en el momento del impacto. Es imposible asegurar que todas las partículas son del mismo tamaño y alcanzan la misma temperatura y velocidad (Suárez-Bustamante *et al.*, 2012).

### **1.6. Desgastes en pares tribológicos**

Los cojinetes presentan dos cualidades muy importantes, una es que la capacidad de soportar carga la cual logran produciendo una resistencia pequeña al movimiento relativo de las superficies y la otra es que tienen la capacidad de amortiguar cargas dinámicas en una amplia gama de condiciones.

Los materiales sometidos a movimiento relativo bajo condiciones de contacto sufren cambios tanto físicos como mecánicos y químicos en sus superficies, consecuencia de la deformación y adhesión a las que están expuestos los semiplanos del par tribológico. La fricción está íntimamente ligada a los fenómenos de adhesión y desgaste, los cuales deben de ser estudiados a un nivel molecular para comprender lo sucedido a un nivel macroscópico. Dado que el contacto real entre cuerpos es discreto, las presiones pueden variar de 1 Pa hasta 1 GPa en cuestión de microsegundos (Urbakh *et al.*, 2004). Los cojinetes de deslizamiento fabricados, entre otros materiales compatibles, han sido caracterizados de diversas maneras, buscando el equilibrio idóneo entre algunas de las propiedades mecánicas más significativas, como lo son dureza, ductilidad y tenacidad.

Todas las máquinas en sus piezas móviles sufren fricción y desgaste, la tribología es la ciencia que se encarga del estudio de superficies en contacto y movimiento relativo y de los

fenómenos de fricción, desgaste y lubricación que se producen por la interacción de las mismas (Bhushan, 2013). En la figura 1.7 se muestra un sistema tribológico.

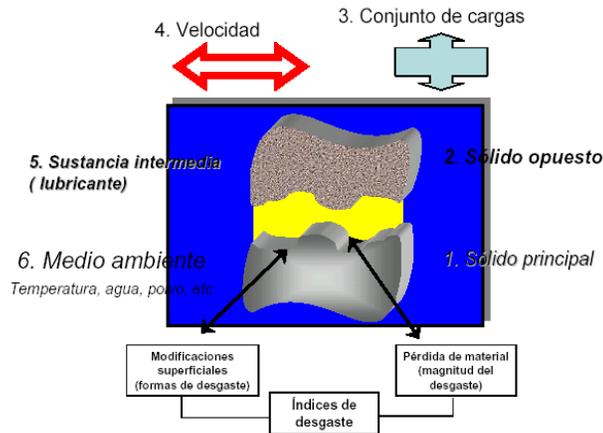


Figura 1.7. Sistema tribológico. Fuente: Bhushan (2013).

El 30 % de la energía que se genera en el mundo se gasta para vencer los efectos de la fricción (Pérez, 2002). Una forma directa de disminuir el consumo de energía es reducir el coeficiente de fricción entre los elementos en contacto y la tribología es una de las ramas de ingeniería que permite evaluar el comportamiento a la fricción para el ahorro de energía e incrementar la durabilidad de los componentes de un sistema mecánico.

Un par de fricción está formado por dos materiales que presentan movimiento relativo entre sí y el material lubricante, el cual evita el contacto metal - metal. Debido a que las superficies son irregulares ocurren contactos localizados que aumentan las presiones, razón por la cual se presenta el desgaste de la superficie (ASM, 1992).

Según Daquinta (2008) y Manikov (1998) las investigaciones realizadas y controles estadísticos en algunas plantas de reparación confirman, que el desgaste de los muñones en los árboles, constituye la causa que determina, en más del 95 % de los casos, su salida definitiva de explotación, al sobrepasar los límites de la última dimensión de reparación, momento en que ha perdido el espesor de la capa superficial o zona con las propiedades físico - mecánica acorde a las condiciones de trabajo.

Diferentes autores como Albarracín (2006); Álvarez (2002) y Linares (2005), coinciden en que el mecanismo de desgaste y su severidad entre dos superficies rozantes, depende esencialmente de la forma en que ocurren los contactos entre las superficies, características y propiedades físico - mecánicas, de los materiales del par tribológico e interacciones entre

las irregularidades y las partículas contaminantes que pueden intervenir entre dichas superficies, concepto estos, que se consideran de importancia para definir, junto con otros factores, las características y composición del sistema metalúrgico del par de fricción de una unión mecánica.

Los pares de deslizamiento muñón - cojinete en el árbol, por sus características y durezas relativas entre ambos materiales, clasifican como un par duro - blando (liso rugoso) según Álvarez (2002); trabajan todo el tiempo bajo condiciones de lubricación hidrodinámica, favorecida por un efecto hidrostático, como describen Baranov (1999) y Jójvaj (1987 y 1977). Tales condiciones sufren cambios en el proceso de explotación con los cambios del régimen de trabajo del motor, dando lugar en diferentes momentos a otros regímenes de lubricación básicos como la lubricación parcialmente hidrodinámica o mixta y lubricación fronteriza o límite y con ello la modificación del coeficiente de fricción entre las superficies, aspectos abordados por Albarracín (1996 y 2006).

Los árboles con desgaste en los muñones de apoyo, se rectifican, obteniéndose un diámetro menor hasta una de las dimensiones de reparación, después de la rectificación los muñones se pulimentan con cinta abrasiva o pasta y se ensamblan con un cuerpo recuperado con casquillos recubierto con metal babbitt B 83 mediante el proceso de escariado o mandrilado a una dimensión igual a la de los muñones rectificadas. Los apoyos del árbol que sobrepasan las dimensiones de reparación pueden recuperarse mediante el cromado, acerado, recargue bajo fundente o la proyección térmica con polvos auto fundentes (Baranov, 1999 y Daquinta, 2008).

Debido a que los cojinetes tienen piezas móviles estas sufren fricción y desgaste. La fricción es la fuerza de rozamiento o fuerza de fricción entre dos superficies en contacto a la fuerza que se opone al movimiento de una superficie sobre la otra (fuerza de fricción cinética) o a la fuerza que se opone al inicio del movimiento (fuerza de fricción estática). Toda fuerza de fricción se opone a la dirección del movimiento relativo (Álvarez, 1992; Ludema, 2010). El desgaste es una pérdida de material de la interfase de dos cuerpos, cuando se les ajusta a un movimiento relativo bajo la acción de una fuerza (Mesa, 2007). En general, los sistemas de ingeniería implican el movimiento relativo entre componentes fabricados a partir de metales y no metales.

Una de las principales insuficiencias de los babbitt en base a estaño lo constituye su baja deformabilidad a causa de las formas afiladas, puntiagudas y aciculares de los compuestos intermetálicos SnSb y Cu<sub>3</sub>Sn (Barykin *et al.*, 2001). Esta forma de los cristales los convierte en fuertes concentradores de tensiones durante las cargas mecánicas y excluye la obtención de cojinetes de deslizamiento por la vía de la deformación del babbitt en base a estaño y esto, a su vez, estrecha su región de aplicación racional.

Otra insuficiencia de los babbitt en base a estaño es su inhomogeneidad estructural que aparece especialmente durante la fundición por el método centrífugo y que está relacionada, en primer lugar, con la segregación por densidad de los componentes. Las anteriormente mencionadas deficiencias estructurales están ausentes en el babbitt B83, vaciado por el nuevo método turbulento de fundición (Potekhin *et al.*, 2006), desarrollado por los autores.

A diferencia de los cojinetes de rodamiento, que trabajan con fricción por rodadura, los cojinetes de contacto plano trabajan con fricción por deslizamiento. Por eso las pérdidas por fricción para los cojinetes de deslizamiento, que trabajan con frecuentes arranques y paradas o en régimen de lubricación límite o semi - límite, son mayores que las de los rodamientos (Cicero *et al.*, 2008).

Reshetov (1985) refiere que si se quiere evitar el deterioro prematuro del cojinete este debe ser diseñado cuidadosamente. Para esto es importante analizar las condiciones de trabajo y con ello decidir que criterio emplear para diseñar el cojinete o comprobarlo. En los cojinetes que trabajan en lubricación límite y semi - límite se debe garantizar la resistencia a las cargas a que estará sometido y prevenir el desgaste adhesivo. A los cojinetes que trabajan en condiciones de lubricación hidrodinámica, se les verifica que no exista el contacto entre las superficies del árbol y cojinete, y que la temperatura del lubricante no exceda la admisible.

Genta (2009) estudió las respuestas al desbalance y las velocidades de giro de un rotor multietapas con múltiples apoyos (cojinetes); en la cual concluyó que cualquier amortiguamiento inherente al material del eje no afecta la respuesta al desbalance del mismo si los rodamientos son isotrópicos, pero caso contrario ocurre cuando los rodamientos son ortotrópicos causando órbitas sincrónicas elípticas.

De acuerdo con los criterios de Bhushan (2005) el coeficiente de fricción es uno de los parámetros más importantes que estudia la tribología porque permite evaluar las pérdidas de energía que se generan, tomar las acciones correctivas orientadas a mejorar la eficiencia y lubricación del sistema para aumentar la vida útil de los componentes del par tribológico. Entre las principales consecuencias de la fricción están: el desgaste, el calentamiento y la pérdida de energía y potencia.

Espitia y Toro (2010) consideran que de todas las fallas por fractura que ocurren en la industria, aproximadamente el 95 por ciento se deben a problemas de fatiga en los materiales, esta es la principal causa de fractura de piezas de máquinas empleadas principalmente en los sectores automotriz y metalmecánico.

Delrio (2005) considera que el desgaste por fatiga, también llamada "sub caso de fatiga" en partes carburadas, la fisuración por fatiga se caracteriza por cavidades grandes y se inician comúnmente en el límite corazón-cáscara de partes endurecidas, fisuras similares ocurren en cáscaras endurecidas de dientes de engranes.

### **1.7. Simulación por el método de elementos finitos**

El uso de software computacional como ANSYS evita la necesidad de estar construyendo prototipos experimentales para pruebas de fricción y desgaste en el caso de los cojinetes de hidrodinámicos, ya que aparte de tener un elevado costo en cuanto a la construcción de los modelos físicos se consume tiempo importante en la realización de las pruebas y no siempre se pueden replicar las condiciones reales de operación. Si bien las pruebas en el software consumen demasiados recursos computacionales ofrecen grandes ventajas debido a que se pueden probar distintos modelos para ser comparados y así obtener conclusiones sobre un prototipo final (Moaveni, 2003, Laffita, 2016).

García *et al.* (2013) realizaron una investigación numérica del comportamiento del campo de presión, el flujo axial, el espesor de película y la fricción viscosa, considerando el desalineamiento del eje por el efecto del peso y la flexibilidad del rotor. El campo de presión hidrodinámica lo resuelven utilizando la ecuación de la lubricación de Reynolds junto con una expresión modificada del espesor de película que incluye el desalineamiento del eje. También se presentan una expresión para calcular el máximo desalineamiento permitido por una chumacera, en función del punto de equilibrio de estado estable. Los

resultados muestran que a medida que el desalineamiento del eje se incrementa el espesor de película se reduce, causando el incremento de la presión máxima y del flujo axial del lubricante, así como pequeños cambios en la fricción viscosa.

El método de elemento finito (FEM) es empleado en la solución de modelos Nikolakopoulos y Papadopoulos (2008) desarrollaron un modelo analítico con el fin de determinar la relación entre la fuerza de fricción (y en consecuencia el coeficiente de fricción) el ángulo de desalineación, y la profundidad de desgaste en los cojinetes lisos circulares. La ecuación de Reynolds se resolvió, usando FEM en la región hidrodinámica, con el mínimo espesor de la película de 5-10 veces el acabado de la superficie que está cerca del límite inferior de la lubricación hidrodinámica.

Wasilczuk y Rotta (2008) referenciado en Laffita (2016), utilizaron la dinámica de fluidos computacional (CFD) para estudiar el flujo entre las zapatas de un cojinete de carga con esta técnica se mejoraron las entradas de aceite al cojinete, ya que los modelos actuales trataban el flujo entre las zapatas de cojinete de una manera muy simplificada, a pesar de su gran influencia en el rendimiento del cojinete. Aunque se está aplicando una variedad de diseños con un mejor abastecimiento de aceite en el cojinete se puede mejorar aún más con el uso de análisis de CFD.

Se determinó en el trabajo de Laffita (2016) que Cupillard *et al.* (2014) analizaron el rendimiento termo hidrodinámico de un cojinete con un microsurco creado en el eje, el cojinete de deslizamiento se modeló mediante (CFD) el paquete de software resuelve las ecuaciones de energía, Navier-Stokes, así como los patrones de flujo. El efecto inducido por un microsurco en la distribución de presión explica diferentes configuraciones de cojinete, excentricidades y profundidades microsurco se muestra que el microsurco produce una caída de presión disminuye la capacidad de transporte de carga.

En las literaturas consultadas no se pudo determinar que se realizará el análisis por el método de elementos finitos de la falla del cojinete de una turbina de vapor.

## **1.8. Conclusiones del capítulo 1**

- ✚ Se pudo establecer en las fuentes bibliográficas que, una de las vías empleadas para la generación de electricidad puede ser a través de turbinas de vapor, ya que las mismas pueden operara a altas r/min y la instalación puede ser pequeña con potencia regulada, lo que es positivo cuando se utiliza para accionar equipos mecánicos.
- ✚ En las turbinas a vapor dentro de sus elementos constitutivos está el eje, el rotor, los elementos de sello y lubricación, los cojinetes de apoyo del eje, los cuales se tornan elementos importantes de este equipo, al presentar problemas de desgaste o desalineación, provoca desastres catastróficos.
- ✚ El desgaste es un fenómeno presente en los pares tribológicos al estar expuesto a un movimiento relativo bajo la acción de una fuerza, donde el metal más blando (cojinete) cede antes el de mayor dureza (árbol), fenómeno que ocurre independientemente del sistema de lubricación.

# **Capítulo 2**

## **Materiales y métodos**

# **Capítulo 3**

## **Análisis de los resultados**

## **CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

### **3.1. Introducción**

A los efectos de brindar un apoyo entre los elementos móviles y los estacionarios de una máquina, se pueden emplear diversos elementos mecánicos que deberán proporcionar puntos de apoyo y que a su vez permitan el movimiento relativo entre los mismos. En virtud de que la trayectoria que describen los puntos sobre la superficie del eje en la zona que se apoya es cilíndrica, los cojinetes se fabrican en forma cilíndrica, aunque también se suelen construir en forma cónica, especialmente cuando se presentan cargas axiales en la operación del sistema o cuando se quiere que sean ajustables. Los cojinetes también tienen la función de evitar el desgaste de los puntos de apoyo o bancada de la máquina, efecto que se generaría si los ejes rodaran directamente sobre la estructura de la máquina.

El objetivo del capítulo es establecer los cambios microestructurales que ocurren durante el desgaste de un babbitt empleado como cojinete antifricción, así como las deformaciones, tensiones y desplazamientos a través del método de los elementos finitos.

### **3.2. Análisis de la composición química de la aleación con base de estaño**

Esta aleación está constituida por: un 89,3 % de estaño (Sn), 8,9 % de antimonio (Sb) y un 1,8 % de cobre (Cu), su punto de fusión es de 232 °C, algunas veces se agrega plomo a estas aleaciones, con el fin de abaratar su costo. Este porcentaje de adición está especificado en valores muy bajos. La red cristalina generada entre el antimonio y el cobre ayuda considerablemente a aumentar la resistencia de la aleación, para lo cual, ésta debe ser continua, es decir, totalmente interconectada. Para esto se requiere un 2,5 % de cobre como mínimo. Al aumentar el contenido de cobre sobre el 7 % se obtiene una aleación excesivamente frágil, y en particular en aquellos metales que trabajan a una temperatura mayor a 75° C, reportado por Laffita (2016).

#### **3.2.1. Análisis de la composición química del bronce al estaño**

Es conocido como bronce al estaño de alto plomo, por su alto contenido de ambos elementos; o también como bronce fosforoso al plomo. La composición química de la aleación varía en porcentajes de los elementos principales contenidos según la norma y

tienen un rango de aceptación con un mínimo y un máximo de cada uno de ellos y otros elementos de aleación, que le dan las propiedades específicas a este tipo de bronce.

Las aleaciones de cobre - estaño se denominan bronce al estaño. Se refieren a los bronce al fósforo, ya que siempre está presente como agente desoxidante en la fundición (Avner, 1988). Al añadir estaño en una aleación de cobre, lo que se pretende es ir aumentando la resistencia del material, la cual llega a su punto máximo al 20 % de Sn. Si se supera este valor, la resistencia se verá afectada y disminuirá. De todas maneras, es difícil llegar a un contenido del 20 % de Sn, ya que la solubilidad máxima del mismo en cobre es alrededor del 15 % en peso. Los bronce que contienen entre el 9 y el 11 % de estaño presentan una gran resistencia mecánica y tenacidad, pero moderada ductilidad. Comparados a los latones, los bronce al estaño son más resistentes a la corrosión y al agrietamiento por corrosión con esfuerzo, según el criterio de Pérez (2011) y Laffita (2016).

### 3.2.2. Determinación del espesor del cojinete

A partir de los resultados del espesor del casquillo de acero exterior del cojinete y las dimensiones generales de este (diámetro exterior y diámetro interior de alojamiento del muñón), obtenidas del manual de explotación y mantenimiento de la turbina se determinó el espesor de la capa de metal antifricción Babbitt. Según las zonas establecidas en la figura 2.7 del capítulo 2. En la figura 3.1 se muestran los resultados de las mediciones realizadas en el cojinete, para un espesor inicial de babbitt de 2,3 mm.



Figura 3.1. Mediciones realizadas en el cojinete.

En la tabla 3.1 se muestran los resultados obtenidos de estas mediciones.

Tabla 3.1. Espesor del material antifricción a lo largo del cojinete

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

De los resultados de las mediciones se determinó que el cojinete de fricción en la muestra estudiada tiene un espesor promedio en la zona del babbitt (material con desgaste) de 1,07 mm, con un valor máximo de espesor en dicha zona de 1,28 mm y un valor mínimo de 0,63 mm. Estos resultados muestran una gran irregularidad del desgaste del cojinete, lo que muestra la posibilidad de que en explotación haya existido una lubricación deficitaria o un exceso de contaminantes sólidos en el lubricante, o un lubricante ya fuera de parámetros en sus propiedades por excederse en la explotación, considerando en este caso que la calidad del metal babbitt del cojinete es la adecuada. El desgaste del cojinete de la turbina fue del 46 %.

Los cojinetes de deslizamiento de la turbina, tienen un diámetro exterior de  $127,3^{+0,005}_{-0,005}$  mm y 125 mm de diámetro interior. La falla fundamental que presentan es el desgaste adhesivo por fricción con un componente de abrasión no despreciable debido presumiblemente a la contaminación en el lubricante. El desgaste límite permisible en explotación es hasta diámetro 123,93 mm (1,07 mm en desgaste).

El desgaste en los cojinetes se refiere a situaciones en las cuales un área de contacto insuficiente, una caída en la velocidad de la superficie móvil, una reducción en la cantidad de lubricante suministrado al cojinete, un incremento en la carga del cojinete o un aumento en la temperatura del lubricante, provoca disminución de la viscosidad y evitan la acumulación de una película suficientemente gruesa para impedir el contacto metal a metal. La lubricación marginal es la situación menos deseable porque permite que entren en

contacto las asperezas superficiales y se desgasten con rapidez, criterio que además ha sido expuesto por Daquinta (2010).

### 3.3. Comportamiento microestructural del cojinete

Ciertas características microestructurales como es el caso del tamaño de grano, tienen una influencia tanto en el mecanismo de deformación como en la relación de fluencia. Esto último permite mejorar la resistencia a la fluencia de un material. Se analizó el comportamiento microestructural del babbitt del cojinete sin estar sometido a proceso de trabajo. La figura 3.1 (a) se corresponde con el babbitt en la sección longitudinal del cojinete y la 3.1 (b) se corresponden con la sección transversal del cojinete.

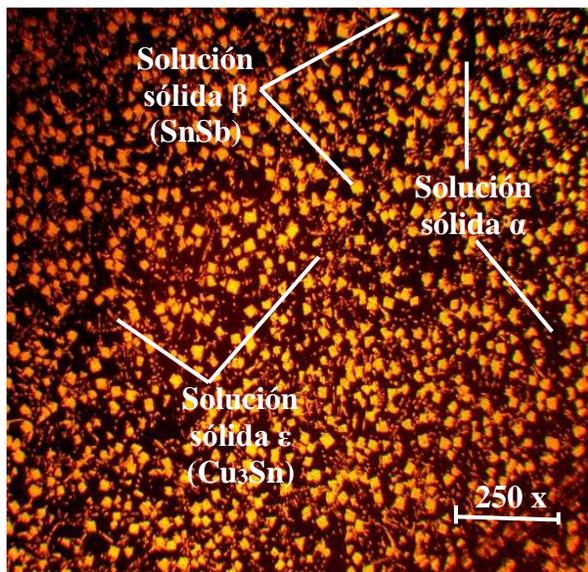


Figura 3.1 (a). Sección transversal.

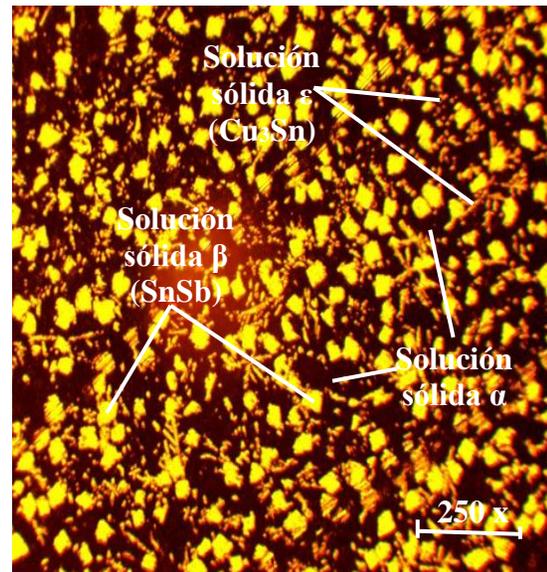


Figura 3.1 (b). Sección longitudinal.

La muestra del cojinete sin estar expuesto a condiciones de trabajo consta de una matriz relativamente blanda de solución sólida de antimonio y cobre en estaño (fase  $\alpha$ ) y cristales sólidos de los compuestos intermetálicos SnSb (fase  $\beta$ ) y  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  (fase  $\epsilon$ ) distribuidos en dicha matriz. En la sección transversal, la presencia de los granos es más pequeña, presumiblemente asociado al ancho del cojinete, lo cual, durante el vaciado que, al hacerlo de forma lenta, existe un proceso de cristalización más rápida.

Una de las principales insuficiencias de los babbitts en base a estaño lo constituye su baja deformabilidad a causa de las formas afiladas, puntiagudas y aciculares de los compuestos intermetálicos SnSb y  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  (Barykin *et al.*, 2001). Esta forma de los cristales los convierte en fuertes concentradores de tensiones durante las cargas mecánicas y excluye la

obtención de cojinetes de deslizamiento por la vía de la deformación del babbitt en base a estaño, y esto, a su vez, estrecha su región de aplicación racional, según Kazanski *et al.* (2004). La aleación descrita es parte de los bronce al estaño. La base  $\beta$  se forma como resultado de una reacción peritética a 798 °C. A 586 °C, la fase  $\beta$  tiene una reacción eutectoide para formar la mezcla  $\alpha + \beta$ . A 520 °C,  $\gamma$  también sufre una transformación eutectoide a  $\alpha + \delta$ . El diagrama indica la descomposición de la fase  $\delta$ , la que se da por una reacción eutectoide a 350 °C, donde se forma  $\alpha + \epsilon$ . Esta reacción es muy lenta, hace que la fase  $\epsilon$  no exista en las aleaciones comerciales.

La pendiente de la línea solvus por debajo de 520 °C muestra una pérdida de solubilidad del estaño en la fase  $\alpha$ . La precipitación de la fase  $\delta$  o  $\epsilon$  es lenta debido al cambio de solubilidad que se da en la etapa antes mencionada. Es por ello que las fundiciones de bronce al estaño que se enfrían lentamente y que contienen menos del 7 % de estaño, solo muestran una fase (solución  $\alpha$  sólida). Pero en la mayor parte de las aleaciones que poseen más del 7 % de estaño, se puede encontrar algo de la fase  $\delta$ , reportado por Avner (1988).

### 3.3.1. Comportamiento microestructural de las secciones del cojinete

Para observar los cambios microestructurales obtenidos del desgaste en el cojinete babbitt, se analizaron las microestructuras en la sección longitudinal y transversal. La figura 3.2 (a) se corresponde con la sección longitudinal del cojinete en el extremo derecho y la 3.2 (b) se corresponden con la sección longitudinal del extremo izquierdo.

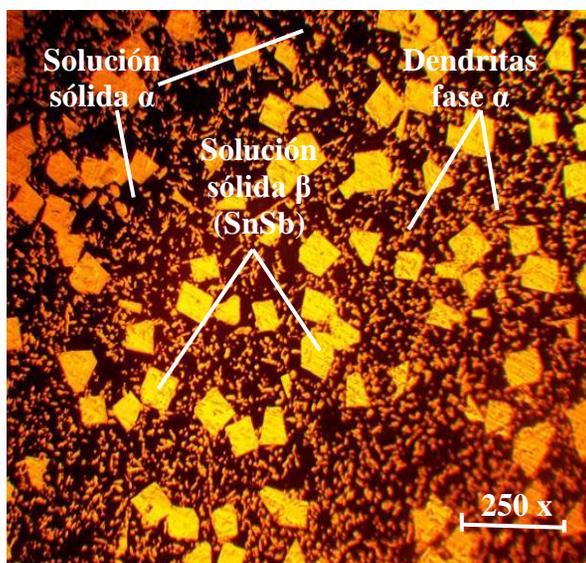


Figura 3.2 (a). Sección longitudinal

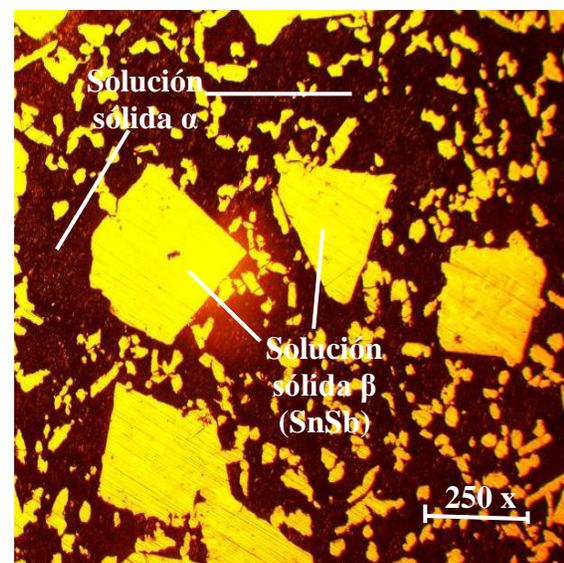


Figura 3.2 (b). Sección longitudinal

En las microestructuras se observa el predominio de cristales en forma de aguja o estrella, propio de la combinación (cobre estaño) en la aleación, se atribuye el predominio de estos cristales a que la combinación de (Cu<sub>3</sub>Sn), entre sus propiedades tiene mayor resistencia a la fricción y temperatura, de ahí que los cristales de estaño antimonio (Sn - SB) en esta probeta de metal fusionado por el trabajo aparezcan disminuido o mezclado cristales de estaño con la masa plástica negra que no es más que la combinación de estaño en el antimonio.

El tamaño de las fases obtenidas en la figura 3.2 (a) presumiblemente esté asociado al sentido de giro del rotor de la turbina, el cual es en el sentido de movimiento de las agujas del reloj situado el observador con la cara hacia el alternador, esto provoca que, durante las paradas y arrancadas, al iniciar el giro realice mayor apoyo el eje en esta área y por efecto de la acritud exista menor tamaño del grano.

A escala microscópica se observan espacios interdendríticos, sin la presencia de discontinuidades que son producidas por sopladuras, por desprendimientos gaseosos o por contracción. A bajas concentraciones de Zn las aleaciones están constituidas por dendritas primarias de fase  $\alpha$  y las aleaciones con mayor contenido de Zn se constituyen por fase  $\alpha$  secundaria de estructura Widmanstätten. Así mismo en aumentar el contenido de Zn aumenta el contenido de fase  $\beta'$ , de mayor dureza.

La aleación descrita es parte de los bronce al estaño. Según el diagrama expuesto en la figura 2.5 del capítulo 2, la base  $\beta$  se forma como resultado de una reacción peritética a 798 °C. A 586 °C, la fase  $\beta$  tiene una reacción eutectoide para formar la mezcla  $\alpha + \beta$ . A 520 °C,  $\gamma$  también sufre una transformación eutectoide a  $\alpha + \delta$ . El diagrama indica la descomposición de la fase  $\delta$ , la que se da por una reacción eutectoide a 350 °C, donde se forma  $\alpha + \epsilon$ . Esta reacción es muy lenta, hace que la fase  $\epsilon$  no exista en las aleaciones comerciales.

La pendiente de la línea solvus por debajo de 520 °C muestra una pérdida de solubilidad del estaño en la fase  $\alpha$ . La precipitación de la fase  $\delta$  o  $\epsilon$  es lenta debido al cambio de solubilidad que se da en la etapa antes mencionada. Es por ello que las fundiciones de bronce al estaño que se enfrían lentamente y que contienen menos del 7 % de estaño, solo muestran una fase (solución  $\alpha$  sólida), reportado por Avner (1988).

### 3.4. Análisis por el método de los elementos finitos

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

La simulación hecha por medio del MEF consistió en modelar una multicapa compuesta por la aleación tribológica blanda y un respaldo de acero. En los cojinetes de deslizamiento es este respaldo el que proporciona la rigidez a la estructura. La contraparte del tribopar se modeló como una superficie analítica idealmente rígida. En la figura 3.3 se muestran las tensiones obtenidas.

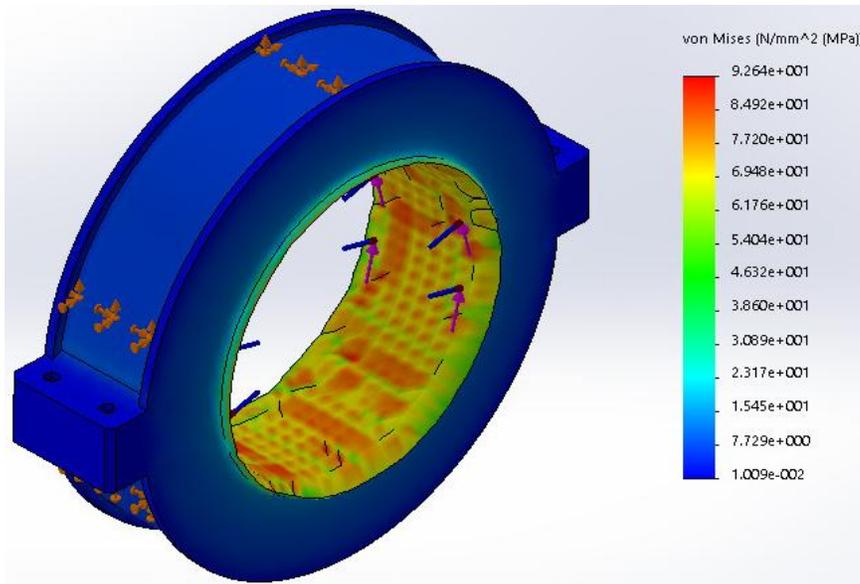


Figura 3.3. Tensiones de Von Mises.

Para una velocidad nominal de  $3\ 600\ \text{min}^{-1}$ , un árbol de acero y que según la cinemática de los cuerpos del par tribológico, formado por pares de materiales de diferentes dureza, se considera un par directo, ya que el elemento del par de mayor dureza ( $\text{HB}_2$ ) se mueve con respecto al par más blando ( $\text{HB}_1$ ), provoca sobre la superficie del cojinete alteraciones superficial como se observa en la figura, generado por el deslizamiento del babbitt. Este defecto que trae consigo la pérdida de material, también genera tensiones máximas de  $9\ 264\ \text{N/m}^2$  y mínima de  $7\ 720\ \text{N/m}^2$  en el interior de la pista de deslizamiento, luego las

mismas se distribuyen por la superficie de trabajo y por efecto de la fricción y en el espesor que alcanza el babbitt (2,3 mm) se alcanzan valores de hasta  $6\,176\text{ N/m}^2$ .

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

### 3.4.1. Comportamiento de los desplazamientos

Se determinaron los desplazamientos que ocurren en el par tribológico. En la figura 3.4 se observa el comportamiento de dichas tensiones.

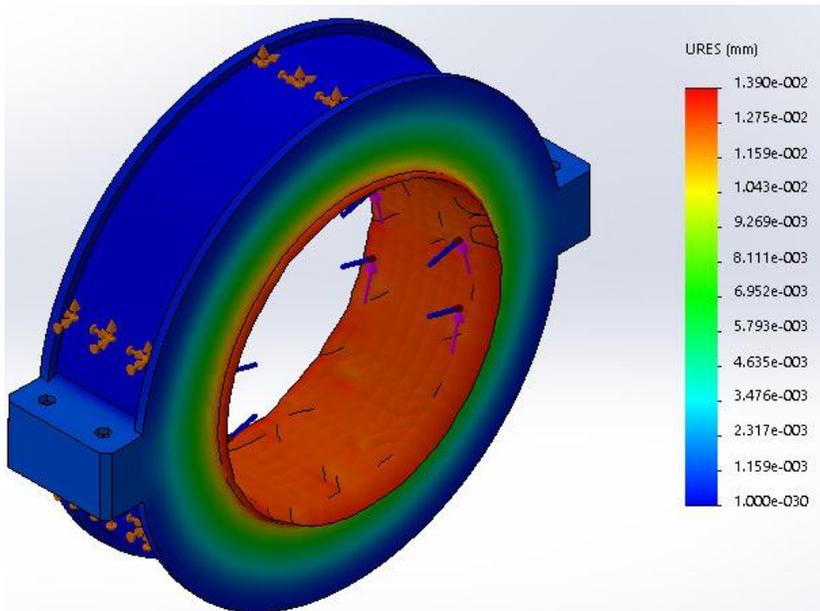


Figura 3.4. Desplazamientos del sistema árbol - cojinete.

Para establecer el comportamiento de los desplazamientos en el sistema árbol-cojinete se parte de la matriz de rigidez del sistema, que relaciona el vector de esfuerzos y el de los desplazamientos. En correspondencia con la figura, existe variación en los desplazamientos

a lo largo del eje X, es decir, el estrechamiento que se produce en la pieza, lo cual está en el rango de valores desde 1,3 hasta 1,15 mm.

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

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

### 3.4.2. Comportamiento de las deformaciones

La figura 3.5 muestra la deformación del tribopar. Las simulaciones se realizan con tipo de elementos cinemáticas interpretándolos como elementos rígidos sin presentar deformación durante el contacto.

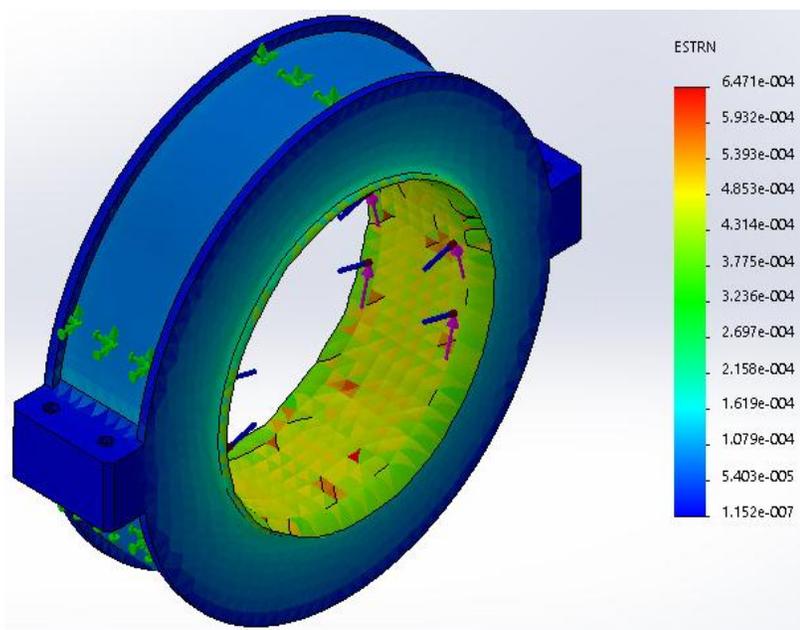


Figura 3.5. Deformación del par tribológico.

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

Esta dependencia geométrica origina algunos efectos cruzados entre las tensiones tangencial y radial. Algunos son favorables, por ejemplo, la fuerza centrífuga, que es radial, genera también tensión tangencial, pero otros son perjudiciales, por ejemplo, una tensión tangencial que no sea proporcional al radio genera tensión radial. Esta dependencia complica el comportamiento de giro del árbol, criterios expuestos por Suárez-Bustamante *et al.* (2012) y Liaño-Gómez (2016).

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

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

hace que ambos cuerpos estén en contacto en una superficie pequeña y finita, criterio expuesto por Sawalhi y Randall (2008).

### 3.5. Análisis de la dureza

El análisis de la dureza del cojinete se realizó siguiendo el mismo procedimiento empleado en la medición del espesor del cojinete. En la tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de dureza Brisnell.

Tabla 3.2. Resultados de la dureza

Medición	Ángulo	Longitud	HB1	HB2	HB3	HBT
0	0	0	24	24	24	24
1	- 96,63	0,63	26	25,5	25,5	26
2	- 90	0,88	27	27	26,7	27
3	- 98,13	1,02	29	29	28,5	29
4	- 94,82	1,21	31	31	31,2	31
5	- 93,9	1,28	31	31,2	31	31
6	- 92,83	1,18	29	28,8	29	29
7	- 92,79	1,19	26,5	26	26	26
8	- 92,15	1,16	24	24	24	24
Media		1,07				

La mayor dureza medida en el cojinete se corresponde con el centro del mismo, con un valor de 31 HB y todo el diámetro de este, esta disminuye hasta 24 HB, dureza inicial del babbitt estaño, lo cual es indicativo que, por efecto de la carga del árbol, las condiciones de fricción y el desgaste, es mayor en esta área.

El desgaste del cojinete se produce cuando esta película es demasiado delgada como para separar las microirregularidades de las dos piezas, las cuales al estar en contacto generan un fuerte frotamiento con desprendimiento de partículas que erosionan las partes. Este proceso de desgaste ocurre en estas microirregularidades que conforman el área real de contacto, la cual es mucho menor que el área aparente (área geométrica). En esos puntos de contacto real la presión específica es muy alta, ocurriendo deformaciones y temperaturas que aceleran los procesos de desgaste.

#### 3.5.1. Procesamiento estadístico de los datos

Se realizó el procesamiento estadístico para evaluar las variaciones de las variables involucradas en el experimento. En la figura 3.6 se muestran el comportamiento de las tensiones en relación a la dureza y las distancias medidas en el cojinete

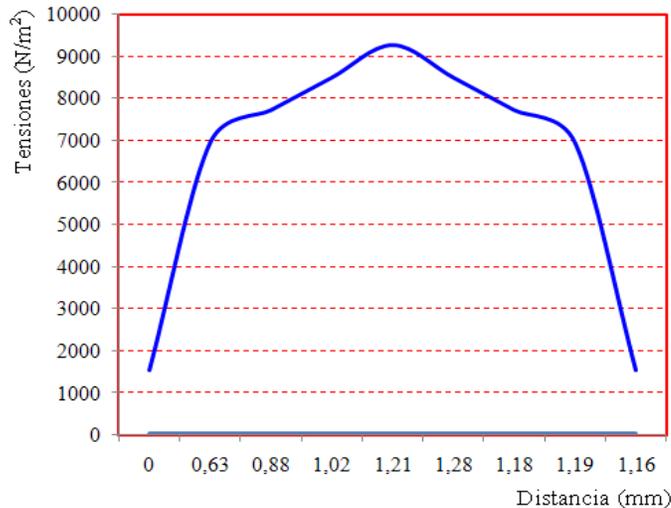


Figura 3.6. Comportamiento de las tensiones vs dureza.

Según el comportamiento de la curva se puede observar que las mayores tensiones y dureza ocurren en el centro del cojinete, aspecto este que provoca el mayor desgaste en esta zona y a su vez que quede obstaculizado el movimiento del árbol de la turbina.

Se realizó el análisis de regresión para estimar la significancia de las variables. En la tabla 3.3 se muestran los resultados del análisis.

Tabla 3.3. Resultados del análisis de regresión

Variable dependiente: Tensiones					
Error estadístico					
Parámetro	Estimación	estándar	T	P-Valor	
CONSTANTE	-18250,5	6747,92	-2,70462	0,0354	
Distancia	510,526	1823,2	0,280016	0,0889	
Dureza	884,874	277,192	3,19227	0,0188	
Análisis de Varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	5,06912E7	2	2,53456E7	8,76	0,0166
Residuo	1,73635E7	6	2,89391E6		
Total (Corr.)	6,80547E7	8			
R-cuadrado = 94,486 porcentaje					
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 95,9814 porcentaje					
Error estándar de est. = 1701,15					
Error absoluto medio = 1254,36					
Estadístico de Durbin-Watson = 1,82759 (P=0,1097)					
Autocorrelación residual en Lag 1 = -0,092719					

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre las tensiones y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Tensiones} = -18\,250,5 + 510,52 \cdot \text{distancia} + 884,87 \cdot \text{dureza}$$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0,05; existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 95 %. El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 94,486% de la variabilidad en las tensiones. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 95,9814 %. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 1 701,15. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones relacionadas con las tensiones. El error absoluto medio (MAE) de 1 254,36 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es superior a 0,05; no hay indicio de autocorrelación serial en los residuos.

### 3.6. Valoración económica

Para realizar esta valoración debemos tener en cuenta las pérdidas económicas generadas por fallos y pérdidas a la producción por la necesidad de poner fuera de servicio este equipamiento para su intervención. En la tabla 3.4 se muestran los resultados del análisis económico, relacionado con los gastos por concepto de mano de obra directa.

Tabla 3.3. Resultados de los costos de la mano de obra, en CUC

Costos de mano de obra				
No	Especialidad	\$/horas	Horas trabajaj	Costos total
1	Mecánico taller "A"	2,96	4	11,84
2	Soldador Homol "A"	2,85	6	17,1
3	Operador de máquina	2,75	2	5,5
Costo del material				
No	Material	kg	Costo total	
1	Mat. Babbit	0,5	180,575	
Sub total				215,015

Luego de realizado el análisis económico del proceso de mantenimiento del cojinete de la turbina de vapor, donde se consideró gastos de materiales y gastos de mano de obra, se incurre en un gasto de 215,015 CUC.

### **3.7. Valoración del impacto medio ambiental**

En la Industria del Níquel en Cuba se generan grandes cantidades de residuales líquidos y gaseosos que contaminan el medio ambiente, el contaminante fundamental es el ácido sulfúrico, la contaminación del ácido está asociado a las características que presenta, con un alto poder corrosivo, particularmente a concentraciones por debajo de 78 %, además de atacar a muchos metales, en su forma concentrada, este ácido es un fuerte agente oxidante y puede causar la ignición, al contacto con materiales orgánicos y productos tales como nitratos, carburos y cloratos.

Debido a sus propiedades corrosivas, oxidantes y sulforantes, este ácido produce rápida destrucción de los tejidos y graves quemaduras. Los efectos sintomáticos debido a la continua ingestión de pequeñas cantidades de ese material no han sido notados, hay efectos sintomáticos secundarios para daños a tejidos en contacto con él, no obstante, el contacto repetido, con soluciones diluidas puede causar una dermatitis y la inhalación repetida y prolongada de niebla de ácido sulfúrico, puede causar una inflamación del conducto respiratorio superior que lleva a una bronquitis crónica. La inhalación de vapor o rocío concentrado del ácido caliente puede ser dañina para los pulmones. Él ingerirlo puede causar graves lesiones o la muerte.

En todo tipo de soldadura es esencial que el soldador se proteja de las radiaciones ultravioletas e infrarrojas invisibles y de la poderosa luz azul visible. Estas radiaciones pueden causar distintas afectaciones a la vista y otros órganos. Los gases más comunes que aparecen como componentes del humo de soldadura son: el ozono, los gases nitrosos y el dióxido de carbono, aunque existen otros que se presentan en ocasiones particulares y en dependencia de las características específicas del proceso que se está realizando, como por ejemplo el gas fosgeno y los fluoruros. Las enfermedades oftálmicas más comunes debido a estas radiaciones son la queratitis, la conjuntivitis y las cataratas. La queratitis es una inflamación de la córnea caracterizada por infiltración con matidez de la superficie y disminución de la transparencia.

### **3.8. Conclusiones del capítulo 3**

- ❖ Se determinó que, para diferentes ángulos, medidos en el cojinete de fricción, existen variaciones en el desgaste del mismo según la zona donde tiene mayor incidencia el efecto del árbol sobre este.
- ❖ El análisis del comportamiento microestructural evidencia diferencias notables en cuanto al tamaño de los granos al comparar la muestra sin estar sometida a condiciones de trabajo, con la muestra retirada de servicio.
- ❖ En el par tribológico árbol-cojinete, donde ambos materiales presentan diferente dureza y el movimiento es del tipo radial, el primero ejerce influencia sobre el 2do por presentar más elevada esta propiedad mecánica, provocando alteraciones superficiales.



## CONCLUSIONES GENERALES

- ❖ En las mediciones efectuadas en el cojinete babbitt de la turbina de vapor, se determinó que el espesor del recubrimiento es de 2,3 mm y el mismo se desgastó por efecto de la fricción hasta un 1,07 mm; que representa el 46 % del desgaste y que la causa del defecto posiblemente sea a deficiencias en la lubricación.
- ❖ Las microestructuras obtenidas en el babbitt sin estar sometido a trabajo y en el retirado de servicio están constituidas por dendritas de fase  $\alpha$  primaria ( $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ), solución sólida  $\beta$  ( $\text{SnSb}$ ), siendo en la segunda el tamaño de los granos más pequeños por efecto de la fricción.
- ❖ En las tensiones, las deformaciones y el desplazamiento determinado por el método de los elementos finitos entre el árbol y el cojinete, se pudo determinar que las direcciones tangencial y radial no son independientes entre sí. La pérdida de material genera tensiones máximas de 9 264  $\text{N/m}^2$  y mínima de 7 720  $\text{N/m}^2$  en el interior de la pista de deslizamiento.
- ❖ Al realizar el análisis económico del efecto de la rotura por concepto de gastos de materiales, gastos de mano de obra y por mantenimiento se incurre en un costo total de 215,015.



## **RECOMENDACIONES**

- ❖ Sugerir a la empresa el análisis del sistema de lubricación en este equipo, ya que una de las posibles causas que hayan generado el desgaste en el par tribológico, esté asociada a una deficiente lubricación.
- ❖ Independientemente de que el cojinete babbitt estaño resiste el efecto de la fricción y su estructura no es causa del desgaste en el par tribológico, sugerir a la empresa otro material antifricción, teniendo en cuenta que una de las principales insuficiencias de estos babbitts, lo constituye su baja deformabilidad a causa de las formas afiladas, puntiagudas y aciculares de los compuestos intermetálicos SnSb y Cu<sub>3</sub>Sn.

## **Referencias bibliográficas**



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Adams, M. Rotating Machinery Vibration. Second Edition. Lateral Rotor Vibrations Analyses Models, Boca Raton, Florida: Published by Taylor & Francis Group, August, 2012.
2. Albarracín, A. Impacto del desgaste sobre los mecanismos lubricados, Ingenieros de lubricación, 4 (4): mayo, [en línea] mayo 2006, Disponible en: [www.ingenierosdelubricación.com](http://www.ingenierosdelubricación.com), 2006.
3. Álvarez, G. E. Tribología, Fricción, Desgaste y Lubricación. *Ediciones UCLV*, 1992.
4. Álvarez, G. Tribología, Fricción, Desgaste y Lubricación, 253 pp., Universidad Central de Las Villas (UCLV), monografía, 2002.
5. Arzamasov, B.; Brostem, V.; Buche, N. Materiales de construcción. Manual. Bajo la redacción general de B. N. Arzamasov. Moscú. Mashinoestraenie, 688 páginas, 1990.
6. ASM Handbook. Friction, lubrication and wear technology. Ed. Ciudad Vol. 18. pp. 25-37, 1992.
7. Avner, S. Introducción a la metalurgia física. México. McGraw Hill. 1988.
8. Baranov, I. Recuperación de los elementos de máquinas, 2da Edición, Construcción de maquinaria, (en Ruso), Moscú, 1999.
9. Barykin, N.; Sadikov, F.; Danilenko, V.; Aslanian, I. Acerca del problema de la estructura del babbitt B83. Ciencia de Materiales. Nº 8, páginas 24-27, 2001.
10. Bhushan, B. Nanotribology and Nanomechanics. An Introduction. Springer, pp. 70-74, 119-120, 315-317, 2005.
11. Bhushan, B. *Principles and applications of tribology*. John Wiley & Sons, 2013.
12. Casanova Kindelan, J. Estudio bidimensional del flujo en turbomáquinas. *Motores Térmicos*. Madrid, España, 2013.
13. Cicero, S.; Cicero, R.; Lacalle, R.; Diaz, G.; Ferreno, D. Failure analysis of a lift gear shaft: application of the FITNET FFS procedure fatigue module, Engineering fracture analysis 15. 970-980, 2008.
14. Chenchu Deepa, A., & Jayachandriah, B. CFD Analysis for Estimation of Efficiency of Low Pressure Steam Turbine. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, págs. 71-74, Agosto de 2012.



15. Chichinadze, A.; Berliner, A.; Berliner, E.; Braun, E. Fricción, desgaste y lubricación (tribología y tribotécnica); Bajo la redacción general de A.V. Chichinadze. Moscú. Mashinoestraenie, 576 páginas, 2003.
16. Comas, G., (2011) “Cojinetes-de-metal-antifricción”. *Interempresas* [En línea], disponible en: [http://www.interempresas.net/Componentes\\_Mecanicos/Articulos/46726-Cojinetes-de-metal-antifriccion.html](http://www.interempresas.net/Componentes_Mecanicos/Articulos/46726-Cojinetes-de-metal-antifriccion.html), Accesado el día 10 de enero del 2017.
17. Cupillard, S.; Cervantes, M.; Glavatskih, S. Thermohydrodynamic analysis of a journal bearing with a microgroove on the shaft. *Computational Thermal Sciences: An International Journal*, 6 (1), 2014.
- 18.C. Romessis, A. Kyriazis, K. Mathioudakis. “Fusion of gas turbine diagnostic inference – the Dempster-Schafer approach”. *IGTI/ASME Turbo Expo 2007*, May 14-17, Montreal, Canada, 9p., ASME Paper GT2007-27043, 2007.
- 19.Daquinta, A. “Durabilidad del par de fricción compuesto por el árbol de levas y el cuerpo de los cojinetes del motor VAZ de fabricación Rusa”. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* [En línea], Vol 19, No. 4, oct.-dic, pp. 67-73, 2010.
20. Delrio, F. The role of van der Waals forces in adhesion of micromachined surfaces. *Nature Mater.* 4, 629–634, 2005.
21. Dionicio, E. Influencia de los microaleantes en la aleación de los bronce, *Revista Facultad de IIGMMG*, 6 (12): 2003.
22. Domínguez-García, V. Diagnóstico de daño en turbinas de vapor. Trabajo Fin de Grado. Grado Ingeniería de las tecnologías Industriales, 2017.
- 23.Espitia, L.; Toro, A. Cavitation resistance, microstructure and surface topography of materials used for hydraulic components, *Tribol. Int.* 43 2037–2045, 2010.
24. García, A., Linares-Flores, J., Arias-Montiel, M. Investigación numérica de las condiciones de lubricación en chumaceras hidrodinámicas con el efecto del desalineamiento del eje. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 14 (1), 89-98, 2013.
25. Genta, G. Dynamics of Rotating Systems. Chapter 15. Three-Dimensional Modeling of Rotors based on FEM, Torino, Italy: Published, by Springer, December, 2009.



26. Gujar, R.; Bhaskar, S. Shaft Design under Fatigue Loading By Using Modified Goodman Method. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) Vol. 3, Issue 4, pp.1061-1066. [www.ijera.com](http://www.ijera.com). Jul-Aug 2013.
27. Hellemans, A.; Bunch, B. The timetables of science. Simon & Schuster. pp. 305. 1988.
28. Hernández Arcelio A., Potekhin Boris A., Castellanos Luís M., Khristolyubov Alexei S. Propiedades especiales del babbit b-83, obtenido por el método de fundición turbulento. 9th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, 2011.
29. Herrera, A. Reparación de Motores y elementos de transmisión. Universidad Popular de Nicaragua (UPONIC), Managua, 2005.
30. Jóvaj, M.; Máslov, S. Motores de automóvil, Ed. Pueblo y Educ, La Habana, 1977.
31. Jóvaj, M. Motores de automóvil, Editorial Mir, Moscú, 1987.
32. Kazanski, V.; Yasikov, A.; Belikova, N. Cojinetes y sistemas de lubricación de turbinas de vapor. 3ra edición corregida y aumentada Cheliabinsk. Tsitsero, 484 p, 2004.
33. Laffita.; Soldadura oxiacetilénica de un Babbitt bronce empleado como cojinete antifricción. Tesis en opción al título de ingeniero mecánico, ISMMM, 2017.
34. Liaño-Gómez, R. Diseño y comportamiento de cojinetes. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Cantabria, 2016.
35. Linares, O: Tribología y mantenimiento proactivo, Fundamentos de la lubricación, fricción y el desgaste. Boletín ASME, USA, 2005.
36. Loboda I., Yepifanov S., Feldshteyn Y. "Diagnostic analysis of maintenance data o fault gas turbine for driving an electric generator". ASME Turbo Expo 2009: International Technical Congress "Power for Land Sea & Air", Orlando, Florida, USA, 12p., ASME Paper No. GT200-6 0176, June 8-12, 2009.
37. Ludema, K. C. Definition of friction. *CRC Handbook of Lubrication: Theory and Practice of Tribology, Volume II: Theory and Design*, 2, 31, 2010.
38. Manikov, J. Reparación de automóviles, Segunda Edición Editorial. Construcción de maquinaria, (en Ruso), Moscú, 1998.
39. Martínez, F.; García, A. Algunas recomendaciones en la enseñanza de la Tribología. Revista Cubana de Ingeniería, 2 (2): 11-15, 2011.



40. Mesa, D. H. Principios de Tribología con énfasis en desgaste. *Universidad Tecnológica de Pereira*, 305, 2007.
41. Moaveni, S. Finite element analysis: theory and application with ANSYS. Pearson Education India. 2003.
42. Moreno, J.; Alhama, F.; Gómez de León, F. Campo de temperaturas en cojinetes deslizantes. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 9 (3): 49-55, 2005.
43. M. Urbakh, J. Klafter, D. Gourdon, J. Israelachvili. The nonlinear nature of friction. *Nature*, 430:525-528, 2004.
44. Nikolakopoulos, P.; Papadopoulos, C. A study of friction in worn misaligned journal bearings under severe hydrodynamic lubrication. *Tribology International*, 41 (6), 461-472, 2008.
45. Pérez, J. Influencia de la microestructura en el comportamiento a desgaste abrasivo evaluado bajo norma ASTM G-65 de depósitos de soldadura antidesgaste aplicados sobre sustratos de acero de baja aleación y bajo carbono. (Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica Bogotá D.C. Colombia). 2011.
46. Potekhin, B.; Glushenko, A.; Iliushin, V. Propiedades del babbitt marca B83. *Tecnología de los Metales*. № 3, páginas 17-22, 2006.
47. Reshetov. Elementos de Máquinas. Editorial Pueblo y Educación. 1985.
48. Rivas, J.; Coronado, J.; Gómez, A. Tribological Aspects for the Shafts and Bearings of Sugar Cane Mills. *Wear*. Vol. 261. pp. 779-784, 2006.
49. Roemer, M.; Kacprzyński, J.; Gregory J. Advanced diagnostics and prognostics for gas turbine engine risk assessment. IGTI/ASME Turbo Expo, May 8-11, Munich, Germany, 10p., 2000-GT-30. 2000.
50. Rodríguez-Rodríguez, A. Análisis CFD de un álabe del último paso de una turbina de vapor. Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico. Universidad Politécnica de Madrid, 2017.
51. SAWALHI, N. and RANDALL, R.B. Simulating gear and bearing interactions in the presence of faults Part I. The combined gear bearing dynamic model and the simulation of localised bearing faults. *Mechanic Systems and Signal Processing* 22 1924-1951, 2008.



52. Suárez-Bustamante, F. A., Toro-Botero, F. M., & Vélez-Restrepo, J. M. Efecto de la textura superficial en el desempeño a fricción de cojinetes de empuje. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 13(1), 97-103, 2012.
53. Takemoto, T.; Takemoto, M. Reaction of Iron-based Alloys with molten Lead-free Solder. *Transactions of JWRI*, 131-135, 2004.
54. Villarreal González C.F., Loboda I., Trahyn Amescua I.K. "Análisis de una red neuronal en la aplicación a la función de referencia de una turbina de gas". Congreso de Instrumentación SOMI XXIV, Mérida, Yucatán, 11 p, 274-CVG, 14-16 octubre de 2009.
55. Wasilczuk, M., & Rotta, G. Modeling lubricant flow between thrust-bearing pads. *Tribology International*, 41(9), 908-913, 2008.
56. Zappalorto, M.; Berto, F.; Lazzarin, P. Practical expressions for the notch stress concentration factors of round bars under torsion, *International fatigue journal* 33 382-395, 2011.