

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

**SOLDADURA OXIACETILÉNICA DE UN BABBIT
BRONCE EMPLEADO COMO COJINETE
ANTIFRICCIÓN**

Tesis en opción al título de ingeniero mecánico

Autor: Andrés Laffita Urrutia

Tutor: Dr. C. Tomás Hernaldo Fernández Columbié

Moa- 2017



Declaración de autoridad:

Yo: Andrés Laffita Urrutia

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.

Andrés Laffita Urrutia

Dr. C. Tomás H. Fernández Columbié



Agradecimientos:

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

*A mi tutor, el Dr. C. Tomás Heraldó Fernández Columbié por su
precioso tiempo, conocimiento y dedicación sin la cual no hubiese
sido posible la realización de este trabajo.*

*A mis familiares por su constante preocupación y por haberme
apoyado en los momentos de mi vida en que más lo necesitaba.*

*A mis compañeros de estudio, por la ayuda mostrada en la
realización de este trabajo.*

*A la Revolución y especialmente a Fidel por darme la oportunidad
de superarme.*

A todos

Muchas Gracias.

Dedicatoria:

Quiero dedicar este trabajo a mis padres Odalis Urrutia Leyva y Andrés Laffita Turro por haber sido los principales promotores de mi superación.

A mi hermana Annie María Laffita Urrutia con la seguridad de que este éxito será un motivo de inspiración para su futura formación profesional.

A la gente del barrio, quienes siempre soportaron mis descargas técnicas.

A Tomás por su incondicional apoyo y a su familia por soportarnos.

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 trabajo tiene como objetivo establecer el comportamiento microestructural del bronce fosfórico del tipo ASTM B143-1A perteneciente a un ventilador centrífugo y recuperado por el proceso de soldadura con llama oxiacetilénica. El proceso de deposición se realizó entre pases para evitar tensiones críticas en el cojinete. Se determinó que con una llama neutra la cantidad de calor que recibe la superficie de trabajo, donde se consideró como el área de la longitud de una cicloide, es de 1 164,16 J/s. Las microestructuras obtenidas están precedidas por transformaciones de fases del tipo dendritas de fase α primaria (Cu_3Sn), cristales en forma de aguja o estrella, solución sólida β (SnSb), debido al contenido de los elementos presentes en la aleación. Se determinó que para un número de revoluciones del árbol de 3 600 rev/min y una carga de 11 536 N, las tensiones de Von Mises máximas generadas son de 17 046, 1 N/m^2 , donde los esfuerzos más altos se presentan en la zona de contacto entre el árbol y el cojinete. Finalmente se establece la valoración económica, así como las incidencias medio ambientales.



Abstract

The work has as objective to establish the behaviour microstructure of the phosphoric brass of the type ASTM B143-1A belonging to a centrifugal fan and recovered by the welding process with flame oxyacetylene. The deposition process was carried out among passes to avoid critical tensions in the bearing. Was it determined that with a neuter flame the quantity of heat that receives the work surface, where it was considered as the area of the longitude of a cycloid, is it of 1 164,16 J/s. is The obtained microstructures preceded by transformations of phases of the type phase dendrites? primary (Cu₃Sn), glasses in needle form or does it shatter, solid solution? (SnSb), due to the content of the present elements in the alloy. It was determined that for a number of revolutions of the tree of 3 600 rev/min and a load of 11 536 N, the tensions of Von Mises generated maxims is of 17 046, 1 N/m², where the highest efforts are presented in the contact area between the tree and the bearing. Finally, the economic valuation settles down, as well as the half environmental incidences.

| ÍNDICE | Pág. |
|--|----------|
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPITULO I. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS. | |
| 1.1. Introducción..... | 4 |
| 1.2. Proceso de soldadura de los babbitt..... | 4 |
| 1.2.1. Generalidades del proceso de soldadura oxiacetilénica..... | 6 |
| 1.3. Materiales babbitt..... | 8 |
| 1.3.1. El babbitt en el campo industrial..... | 12 |
| 1.3.2. Desgastes en pares tribológicos árbol – cojinete..... | 13 |
| 1.4. Bronces al estaño y bronce al estaño emplomadas..... | 14 |
| 1.4.1. Metalurgia de la aleación bronce al estaño..... | 16 |
| 1.5. Cojinetes de deslizamiento..... | 17 |
| 1.6. Comportamiento rotodinámico de turbomaquinaria..... | 19 |
| 1.7. Dinámica del desgaste en pares tribológicos..... | 22 |
| 1.8. Simulación por el método de elementos finitos..... | 24 |
| 1.9. Conclusiones del capítulo 1..... | 26 |
| CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS | |
| 2.1. Introducción..... | 27 |
| 2.2. Composición química del babbitt base estaño del ventilador..... | 27 |
| 2.3. Caracterización del cojinete de deslizamiento..... | 28 |
| 2.3.1. Parámetros de trabajo del cojinete..... | 29 |
| 2.4. Parámetros de soldadura..... | 29 |
| 2.4.1. Control de precalentamiento y temperatura entre pases..... | 30 |
| 2.5. Análisis microestructural..... | 30 |
| 2.6. Preparación metalográfica..... | 32 |
| 2.6.1. Área para la selección de las muestras..... | 32 |
| 2.6.2. Corte de las muestras..... | 33 |
| 2.6.3. Desbastes de las muestras..... | 33 |
| 2.6.4. Pulido y ataque de las muestras..... | 34 |
| 2.6.5. Observación con microscopio óptico..... | 34 |
| 2.6.6. Ensayos de microdureza..... | 35 |



| | |
|--|----|
| 2.7. Metodología de cálculo para el proceso de soldadura..... | 35 |
| 2.7.1. Generación de calor en la soldadura oxiacetilénica..... | 36 |
| 2.8. Métodos de los elementos finitos. Módulo de ensamble..... | 37 |
| 2.8.1 Mallado del modelo..... | 38 |
| 2.9. Conclusiones del capítulo 2..... | 41 |

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

| | |
|---|----|
| 3.1. Introducción..... | 42 |
| 3.2. Análisis de la composición química de la aleación con base de estaño | 42 |
| 3.2.1. Análisis de la composición química del bronce al estaño..... | 42 |
| 3.3. Análisis del proceso de soldadura del cojinete..... | 43 |
| 3.4. Análisis microestructural del cojinete recuperado por soldadura..... | 44 |
| 3.5. Análisis de la microdureza..... | 48 |
| 3.6. Análisis por el método de los elementos finitos..... | 48 |
| 3.7. Valoración económica..... | 52 |
| 3.8. Valoración del impacto medio ambiental..... | 53 |
| 3.9. Conclusiones del Capítulo 3..... | 54 |

CONCLUSIONES GENERALES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍAS

INTRODUCCIÓN

En los últimos años en Cuba la demanda potencial y real en la recuperación por recargues resistentes al desgaste de piezas tipo eje, en particular árboles, ha crecido progresivamente en volumen y en los momentos actuales, con el incremento actual y futuro, en la adquisición y explotación de gran cantidad de equipamiento industrial se produce un incremento continuo en la demanda de la recuperación de árboles, piezas tipo eje y cojinetes de contacto plano, por tanto, en igual proporciones crece y crecerá la demanda de materiales especiales para este fin.

Los principales defectos de los árboles y su cuerpo de alojamiento pueden ser mecánicos y estructurales: los primeros son debido a la abrasión o desgaste excesivo por la presencia de partículas metálicas y suciedades, por 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 ocasionado por un árbol mal dimensionado que limita la entrada del lubricante en la unión; los segundos se deben a la fatiga por presiones y temperaturas excesivas, sobrecargas y corrosión por componentes ácidos en el lubricante.

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

Estos métodos de recuperación presentan sus limitaciones, primero por su alto costo y segundo porque en ocasiones se varía la estructura del metal base de la pieza objeto de la recuperación. Esto obliga a buscar otros métodos capaces de cumplir las exigencias técnicas requeridas sobre la base de mejorar las propiedades mecánicas de las piezas y buscar otras cualidades.

El desarrollo tecnológico a nivel internacional ha determinado importantes particularidades en la construcción de máquinas, una de ellas ha sido la de dividir las máquinas en partes, con el fin de facilitar su fabricación y montaje, mejorando de esta manera la economía de la producción y el funcionamiento de las mismas.

Esta necesidad de fabricar las máquinas en conjuntos independientes, exigió que las transmisiones mecánicas respondieran con un diseño confiable, de fácil montaje y normalización, que permitiera a los constructores y diseñadores mecánicos disminuir sus costos, garantizar fiabilidad en sus diseños y lograr intercambiabilidad entre las mismas.

Por tal motivo se muestra una demanda creciente de las maquinarias y técnicas que satisfagan la necesidad de cada una de estas industrias, en las cuales los cojinetes de contacto deslizante de la chumacera de los sopladores centrífugos de aires revisten gran importancia, en la producción de ácido sulfúrico, para el cumplimiento y desarrollo de los planes productivos en la empresa "Comandante Pedro Sotillo Alba" en Moa. Siendo este el producto químico principal para la lixiviación del mineral laterítico procedente de las minas. Industria que además tiene un gran peso en el comportamiento económico y social de nuestro país.

Situación problemática

Trabajos técnicos e investigaciones han dado como resultado, que los muñones del árbol del ventilador centrífugo 225 BL2, a pesar de las condiciones de trabajo severas, las magnitudes de los desgastes y su distribución, está determinado, en primer lugar, por ser un par duro – blando (liso – rugoso), donde el mayor desgaste ocurre en el elemento de menor dureza, o sea, el cuerpo de alojamiento del árbol (cojinete de contacto plano), en segundo lugar, por la propiedad de resistencia al desgaste superficial del material del árbol dada en su composición química, dureza, estructura y en tercer lugar y de gran importancia, por el cuidado y mantenimiento del régimen de lubricación; mecanismo de filtraje o limpieza del lubricante que hacen mínimo y muy ligero el efecto de abrasión en el par de fricción árbol y sus cojinetes de alojamiento.

El **problema** lo constituye: ¿se podrá realizar el proceso de recargue por soldadura oxiacetilénica del metal babbitt que compone el cojinete de contacto plano del ventilador centrífugo 225 BL2?

Como posible solución al problema se establece la siguiente **hipótesis**: con el depósito de un recubrimiento babbitt base bronce en el cojinete de contacto plano del ventilador centrífugo 225 BL2, se logrará una estructura y una dureza que permita el funcionamiento del par tribológico en condiciones de fricción rodadura y mitigar el efecto del desgaste.

Se establece como **objetivo general**: establecer el comportamiento microestructural, así como la dureza del recubrimiento babbitt base bronce en el cojinete de contacto plano del soplador centrífugo horizontal 225 –BL2 desgastado en condiciones de fricción rodadura.

Como **objeto de estudio**: cojinetes de contacto plano del ventilador centrífugo 225 BL2.

El **campo de acción** es la microestructura, dureza del recubrimiento base bronce en el cojinete de contacto depositado por soldadura oxiacetilénica.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar el comportamiento metalúrgico de los recubrimientos babbitt del tipo base bronce sometido a procesos de soldadura oxiacetilénica, así como las características de estas aleaciones expuestas a condiciones de fricción.
2. Establecer los procedimientos metodológicos relacionados con el proceso de deposición por soldadura del recubrimiento babbitt de bronce en cojinete de contacto plano, así como del proceso de simulación por el MEF.
3. Establecer a partir de las regularidades obtenidas como: comportamiento microestructural y dureza, las características del recubrimiento babbitt de bronce en el cojinete de contacto plano depositado por proceso de soldadura.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas de trabajo**:

1. Establecimiento del estado del arte relacionado con el objeto de estudio.
2. Análisis de los efectos de las variables empleadas para determinar el comportamiento del depósito del recubrimiento base bronce en el cojinete de contacto plano y su determinación a través del MEF.
3. Ejecución experimental para la determinación de la composición en la zona fundida y la zona de influencia térmica del depósito de soldadura en el cojinete de contacto plano.
4. Análisis de los resultados y fundamentación del comportamiento de la microestructura y la dureza obtenidas en el depósito de soldadura.
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

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

En el presente capítulo se establece como objetivo realizar un análisis de la bibliografía relacionada con el proceso de recuperación de los cojinetes de contacto plano por medio de soldadura oxiacetilénica.

1.2. Proceso de soldadura de los babbitt

El proceso de soldadura es una de las técnicas más antiguas de unión de dos o más materiales, generalmente metales. Existen diversos métodos para la realización de las uniones metalúrgicas. En algunos casos, los materiales involucrados son fundidos y se agrega un material de relleno en la interfase entre ambos compuestos; este proceso de soldadura se conoce como *welding*. Por otro lado, existen otros procesos llamados *soldering*, en los cuales los metales a unir no son fundidos, sino que la interfase entre ellos se rellena utilizando una aleación fundida de bajo punto de fusión (Strauss, 1998).

Strauss (1998) plantea que existen diversos métodos para la realización de las uniones metalúrgicas, en algunos casos los materiales involucrados son fundidos y se agrega un material de relleno en la interfase de ambos compuestos. Por otro lado, existen procesos llamados soldadura blanda y soldadura fuerte, en donde los metales a unir no son fundidos, sino que la interfase entre los metales es llenada por una aleación fundida. Por consiguiente, la aleación utilizada debe presentar una temperatura de fusión por debajo de la de los metales a unir y también debe ser capaz de mojar ambas superficies en contacto. En la etapa de enfriamiento, durante el proceso de solidificación, un enlace fuerte y durable se debe formar entre el material base y el material de aporte (la soldadura); esta etapa es crítica en términos de fiabilidad de la soldadura.

Criterios de este mismo autor (Strauss, 1998), los productos de la reacción son los llamados compuestos intermetálicos, los cuales se forman en la interfase entre el metal (substrato

sólido) y la soldadura fundida tiene un gran efecto sobre las propiedades mecánicas de la unión y sobre su comportamiento a lo largo del ciclo de vida de la pieza soldada.

En este tipo de soldadura, el sustrato no puede presentar ningún tipo de contaminantes en su superficie, por más delgadas que sean las capas, por ejemplo, de óxidos o cualquier otro tipo de compuestos. Esto se debe a que estas no permiten que se lleve a cabo la reacción antes mencionada, ya que no existirá contacto entre la soldadura fundida y el sustrato y por consiguiente el proceso de soldadura se verá impedido (Strauss, 1998 y Hetschel *et al.*, 2008).

En estudios realizados por Rodríguez (1983) y Burgos (1983) concluyen que la soldadura para reconstrucción, como su nombre lo indica, tiene como fin fundamental el devolver las características geométricas y dimensionales a la pieza desgastada. Por esta razón, se trata de establecer la mayor similitud entre el material de aporte y el material base, buscando mantener, lo más uniforme posible, sus propiedades, el régimen de trabajo preferente persigue una buena dilución y penetración, lo que se logra con la mayor cantidad de calor sobre la pieza que se va a recuperar.

Rowe y Jeffeys (2008) manifiestan que en dependencia del volumen de la pieza y cuando la magnitud del desgaste es muy grande, se hace necesaria, en ocasiones, la combinación del recargue y la reconstrucción en una misma solución de recuperación, esto puede estar determinado por fines económicos o tecnológicos ya que de ordinario los materiales para el recargue son de un costo superior o presentan limitaciones en el número de capas en que pueden ser aportados, en estos casos, deberán ser ajustados los parámetros del régimen dentro de cada proceso de acuerdo con los fines seleccionados.

En otras ocasiones, cuando la magnitud del desgaste es muy pequeña se logra tanto la reconstrucción como la protección de la superficie ante un deterioro dado, con el mismo material de recargue (Maratray, 2000). La reparación por soldadura puede caer en una de las tres categorías generales: la reparación de los defectos de soldadura, reparación de piezas defectuosas y la reparación de piezas desgastadas.

Plantea Moya (2002) que, para poder seleccionar el método de soldadura a emplear, conociendo el material base del elemento a reparar, es necesario, determinar el tipo de desgaste que predomina en el elemento. En segundo lugar, es importante tener en cuenta el

material de aporte que se va utilizar, principalmente materiales metálicos féreos, materiales metálicos no féreos y materiales no metálicos, como carburos o cerámicos.

La selección del material vendrá condicionada por las características y propiedades finales deseadas en el elemento en cuestión, tales como: adherencia, dureza, permeabilidad, densidad, limitaciones de espesor, dificultades del mecanizado. La adherencia en soldadura se conoce como grado de soldabilidad (Gómez *et al.*, 1999). La reconstrucción de piezas por medio de soldadura es uno de los procedimientos ingenieriles más completos y complejos, ya que este implica muchos factores que dependen de las características propias del material y de la aplicación del mismo.

Según Maroef *et al.* (2002) el proceso de recargue sirve como herramienta práctica para poder reacondicionar piezas o elementos que han sido dañados durante su uso y permite funcionalizar superficies vírgenes con el fin de ampliar su rango de vida útil. Actualmente la ciencia de la soldadura ha cimentado en la terminología su filosofía de optimizar el uso de los recursos no renovables, de esta forma se viene motivando la tecnología del reprocesamiento y reconstrucción para enfrentar el presente drama industrial de escasez y alto costo de los materiales.

1.2.1. Generalidades del proceso de soldadura oxiacetilénica

La importancia de la soldadura oxiacetilénica (en inglés oxyacetylene welding, OAW), (figura 1.1). La soldadura puede ser autógena, si las piezas a unir son del mismo material y no se utiliza ningún otro material de unión o mediante metal de aportación, si para la unión se utiliza un material metálico diferente al que forma las piezas (Ignoto, 2001).



Figura 1.1. Proceso de soldadura oxiacetilénica en el automóvil.

El proceso con la llama oxiacetilénica, presenta, además, otras ventajas como: la suficiente flexibilidad y fácilmente regulable, ya sea con exceso de oxígeno o de acetileno, en función

de los metales a unir. La composición de los productos de la llama corresponde a unas propiedades típicamente reductoras. No es un producto derivado del petróleo y, por tanto, no está sujeto a oscilaciones de producción y precios.

De forma general estos materiales tienen puntos de fusión bajos, como ocurre con el plomo y el estaño, basta con una lámpara de butano para conseguir la suficiente energía calorífica. Pero cuando se trata del hierro y del acero, la cantidad de energía necesaria es mucho mayor. Se precisan métodos más complejos, con las herramientas apropiadas para ese fin. La soldadura oxiacetilénica se basa en la fusión del material base y/o el material de aportación por el calor producido por la oxidación del acetileno durante su combustión.

El proceso se realiza mediante el empleo de un soplete (1) que mezcla el oxígeno proveniente de un botellón (2), modificada su presión por el regulador (3), a través de la manguera (4) y el acetileno proveniente de un botellón (5), modificada su presión por el regulador (6), a través de la manguera (7). En la figura 1.2 se muestran los elementos antes relacionados.

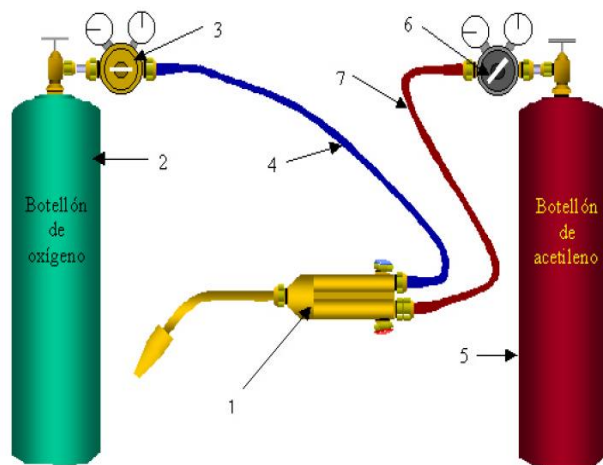


Figura 1.2. Esquema general de la instalación para la soldadura oxiacetilénica.

Se emplea para la soldadura de aceros, cobre y sus aleaciones, entre otros metales. El equipo completo forma un conjunto que se coloca en una carretilla especialmente diseñada al efecto, que incluye una cadena o sogas en buen estado para atar los botellones a la misma.

En los procesos de oxigas la fuente de energía calorífica para lograr la soldadura por fusión de los materiales, la constituye una llama que se obtiene como resultado de la reacción química durante la combinación o mezcla de un gas combustible y un gas carburante

(oxígeno). Esta reacción es fuertemente exotérmica y la llama a que da lugar, que se dirige, mediante un soplete, a los bordes de la pieza a unir, provoca su fusión y soldadura.

La llama oxiacetilénica, en dependencia de la proporción de oxígeno y acetileno que la conforma puede ser de tres tipos: neutra o normal, cuando el contenido de oxígeno y acetileno es aproximadamente el mismo; oxidante, cuando la proporción de oxígeno es mayor en 1,3 veces la de acetileno y carburante, cuando ocurre lo contrario.

1.3. Materiales babbitt

El metal babbitt o metal de cojinete, es una de las distintas aleaciones utilizadas para la superficie de apoyo en un cojinete de fricción. El original de metal Babbitt fue inventado en 1839 por Isaac Babbitt (Hellemans, 1988) en Taunton, Massachusetts, EE.UU. Más tarde se desarrollaron otras composiciones (la formulación exacta de Isaac Babbitt no se conoce con certeza). Es preferible al término "metal blanco", que también se refiere al metal de cojinete, porque "metal blanco" es un término ambiguo con significado polisémico.

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

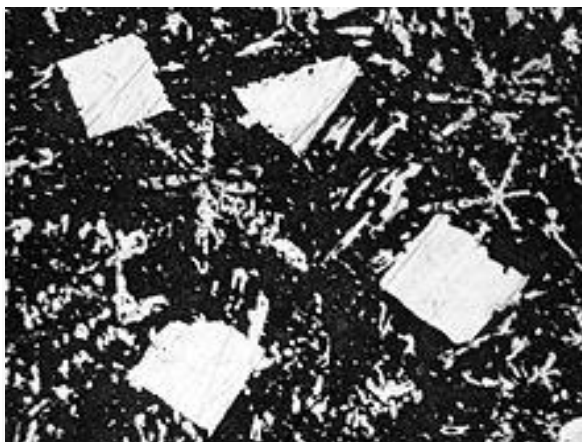


Figura 1.3. Microestructura del metal Babbitt

De acuerdo con la estructura obtenida en la figura 1.1, la misma es la encargada de garantizar la resistencia al par tribológico, pero cuando el cojinete se desgasta, el metal más

blando se erosiona tanto que crea rutas para el lubricante entre los puntos duros que proporcionan la superficie de apoyo real. Cuando el estaño se utiliza como el metal más suave, la fricción hace que este se funda y funciona como un lubricante, que protege el cojinete contra el desgaste cuando otros lubricantes están ausentes.

Microestructuralmente, las aleaciones antifricción están formadas por un constituyente de 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.

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

- 90 % estaño, 10 % cobre
- 89 % estaño, 7 % antimonio, 4 % cobre
- 80 % plomo, 15 % antimonio, 5 % estaño
- 76 % cobre, 24 % plomo
- 75 % plomo, 10 % estaño
- 67 % cobre, 28 % estaño, 5 % plomo

Según Rivas *et al.* (2006), como el metal babbitt es un término genérico que se usa para designar la aleación antifricción de bajo punto de fusión (como la relacionada anteriormente), se funden como superficies de cojinete o apoyo en tapas o respaldos de acero, bronce o hierro fundido. El babbitt es uno de los metales denominados como antifricción cuyas aleaciones principales son estaño, plomo, antimonio y cobre. Existen 2 tipos de metales babbitt; el primero tiene base de estaño con más de un 50 % de este material y presenta buena adherencia sobre una base de hierro y tienen buena dureza en temperatura ambiente. El segundo tipo, es a base de plomo y también posee más del 50 % de este material. En la tabla 1.1 se muestran algunas de las aleaciones comerciales en base de Sn según norma ASTM.

Tabla 1.1. Clasificación de los babbitt base estaño. Fuente: ASTM

| Nombre industrial | ASTM B 23 | Sn % estaño | Sb % Antimonio | Pb % Plomo | As % Arsénico |
|----------------------|--------------|----------------|-------------------|---------------|------------------|
| Marina 11 D | | 90,0-92,0 | 4,5-5,5 | 3,5-4,5 | 0,35 máx |
| Número 1 | Grado 1 | 90,0-92,0 | 4,0-5,0 | 4,0-5,0 | 0,35 máx |
| Marina 11 R | | 89,0-89,5 | 7,5-8,5 | 2,5-3,0 | 0,35 máx |
| Ni genuino | Grado 2 | 88,0-90,0 | 7,0-8,0 | 3,0-4,0 | 0,35 máx |
| Marina 11 R | | 88,0-90,0 | 5,5-6,0 | 5,0-5,5 | 0,35 máx |
| 4 x Ni genuino real | | 87,5-89,5 | 7,2 -7,7 | 3,2 -3,7 | 0,35 máx |
| Gasóleo especial | | 87,5-88,0 | 6,5-7,0 | 5,0-6,0 | 0,35 máx |
| Número 11 | Grado 11 | 86,0-89,0 | 6,0-7,5 | 5,0-6,5 | 0,35 máx |
| SAE 11 | | 85,0-87,0 | 7,0-8,0 | 6,0-7,0 | 0,35 máx |
| Imperial genuino | | 85,0-87,0 | 6,5-7,5 | 6,5-7,5 | 0,35 máx |
| Turbina | | 84,0-86,0 | 6,5-7,5 | 7,5-8,5 | 0,35 máx |
| Amateur real | | 83,5-84,0 | 8,0-8,5 | 7,5-8,5 | 0,35 máx |
| Estupendo resistente | Grado 3 | 83,0-85,0 | 7,5-8,5 | 7,5-8,5 | 0,35 máx |

Otra clasificación de los babbitt empleados en las industrias son los que se muestran en la tabla 1.2, pero estos se clasifican según las normas ASTM como base de plomo.

Tabla 1.2. Clasificación de los babbitt base plomo. Fuente: ASTM

| Nombre industrial | ASTM B 23 | Sn % estaño | Sb % Antimonio | Pb % Plomo | As % Arsénico |
|----------------------|--------------|----------------|-------------------|---------------|------------------|
| Número 13 | Grado 13 | 5,5-6,5 | 9,5-10,5 | Balance | 0,25 máx |
| Ancla fresca | | 4,0-6,0 | 11,5-12,5 | Balance | 0,25 máx |
| Durite | Grado 15 | 0,8-1,2 | 14,5-17,5 | Balance | 0,8-1,4 |
| Estrella | | 5,0-5,5 | 13,5-14,5 | Balance | 0,30-0,60 |
| Magnolia* | | 2,0-4,0 | 13,0-15,0 | Balance | 0,30-0,60 |
| Plata tono | | 1,0-3,0 | 17,5 -18,5 | Balance | 0,25 máx |
| Real | Grado 8 | 4,5-5,5 | 14,0-16,0 | Balance | 0,30-0,60 |
| Presión pesado | Grado 7 | 9,3-10,7 | 14,0-16,0 | Balance | 0,30-0,60 |
| Sierra guía especial | | 9,0-11,7 | 18,5-19,5 | Balance | 0,25 máx |

El nombre magnolia se hizo popular en el léxico de los mecánicos debido a la gran fama que adquirió un proveedor de este metal Babbitt el cual le puso su nombre comercial "magnolia" esto sucede en la época en que se necesita mucho de este metal en la industria naval y de ferrocarriles y con ello nace la confusión, para despejar cualquier duda citamos al metal blanco llamado "magnolia" el cual es solo en base de plomo y no consta en las normas Norteamericanas ASTM B23, SAE J460e ni QQ-T-390, su composición química en base de Pb es la que consta en la tabla y se compara con otras marcas conocidas internacionalmente.

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

- + Babbitt No. 1. Para cojinetes de motores de combustión interna. Es plástica y no se agrieta, pero debe usarse una capa delgada vaciada sobre un respaldo de bronce o acero.
- + Babbitt No.2. Contiene más antimonio siendo un poco más duradero presenta menos probabilidades de formar rebordes.
- + Babbitt No.3. Es una aleación más dura siendo la de mejor comportamiento cuando se ha asentado, no debe usarse para ejes de acero dulce.
- + Babbitt No.4. Es un metal antifricción para usos generales en maquinaria, el precio es económico.
- + Las aleaciones número 5 y 6 contienen mayor porcentaje de plomo, por lo tanto, no son recomendadas para trabajar como cojinetes en donde se eleve demasiado la temperatura.
- + Las aleaciones del No.7 al No.12 son todas en base de plomo siendo los metales antifricción más barato su aplicación es para servicio ligero y velocidades medias.

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

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

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

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

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

1.3.1. El babbitt en el campo industrial

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

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

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

Investigaciones recientes en ciertos campos han demostrado, aunque parezca extraño, que materiales muy duros pueden tener características adecuadas para cojinetes en aplicaciones especiales. Se utilizan materiales como stellite, 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.

En muchas piezas para la construcción de maquinarias se emplean ampliamente aleaciones de deslizamiento, en particular los babbitts. Por sus propiedades antifricción los babbitts 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 babbitts 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).

1.3.2 Desgastes en pares tribológicos árbol - cojinete

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 rasantes, 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 Jóvaj (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 rectificados. 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).

1.4. Bronces al estaño y bronce al estaño emplomadas

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 (Mangonon, 1999).

Como la estabilidad química de los bronce es alta, se utilizan para ser accesorios para tuberías (de vapor, de agua). Así, pues, las aplicaciones principales de los bronce son para piezas de fundición complejas, para casquillos de cojinetes y para accesorios de tuberías. En ciertas ocasiones, se utiliza zinc para sustituir una parte del estaño, logrando una mejora en las propiedades y en la tenacidad, casi sin afectar su resistencia al desgaste (Avner, 1988). Una ventaja de utilizar zinc es un abaratamiento en la producción de bronce industriales.

Con el fin de mejorar la maquinabilidad y la resistencia al desgaste de los bronce al estaño, se añade a esta aleación plomo, obteniéndose aleaciones conocidas como bronce al estaño emplomadas. El bronce al estaño al alto plomo contiene hasta un 25 % de plomo. Estas aleaciones se utilizan para la producción de bujes y cojinetes que estarán sometidos a cargas ligeras o moderadas (Avner, 1988).

Plantea Mangonon (1999) que en la producción de bronce al estaño es necesario evitar la oxidación del estaño en SnO_2 . Si se llega a formar este elemento, aparecerá como manchas en la superficie, debilitando al material y volviéndolo frágil. Por ello es necesario el uso de fósforo, para desoxidar la mezcla al momento de fundir. El contenido normal de fósforo en los bronce al estaño está entre 0,01 y 0,5 %. A parte de evitar la oxidación de estaño, el fósforo mejora las propiedades del material.

Estos tipos de bronce se caracterizan por una buena tenacidad, alta resistencia a la corrosión y un bajo coeficiente de fricción. Sus usos principales son en diafragmas, arandelas de sujeción, seguros, bujes, discos de embrague y resortes (Mangonon, 1999).

El más común de los bronce no tratables al calor es el bronce fosfórico que es una aleación de cobre y estaño desoxidada con fósforo. Esta aleación sobresale por su elevada resistencia, buena elasticidad y buena resistencia al desgaste y a la fatiga. Se le usa principalmente para resortes, ejes, bujes y bocines.

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 Cu_3Sn (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 babbitts 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.

1.4.1. Metalurgia de la aleación bronce al estaño

Es un material que puede maquinarse con gran facilidad, tiene un 80 % de maquinabilidad en comparación al latón UNS C36000. Con respecto a su soldabilidad, tiene una buena característica de soldadura, pero las partes no deben ser tensadas durante el proceso de soldadura o el enfriamiento posterior a este proceso, porque la soldadura se lleva a cabo en rangos cortos de alta temperatura. No se recomienda el proceso de soldadura por oxicorte y todo tipo de soldadura por arco (ASM, 1992).

La aleación descrita en la figura 1.4 es parte de los bronce al estaño. Se puede apreciar la porción rica en cobre en la misma.



Figura 1.4. Metalografía de bronce fosforoso con una composición química de 90 % de cobre y 10 % de estaño moldeado en arena.

Fuente: (Morral *et al.* (1985)

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 base β se forma como resultado de una reacción peritética a 798 °C. A 586 °C, la fase β tiene una reacción eutectoide para formar la mezcla ($\alpha + \gamma$). A 520 °C, γ también sufre una transformación eutectoide a ($\alpha + \gamma$). El diagrama indica la descomposición de la fase δ , la que se da por una reacción eutectoide a 350 °C, formando ($\alpha + \epsilon$). La reacción es muy lenta, haciendo que la fase ϵ 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 α .

La precipitación de la fase δ o ϵ 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 α sólida). Pero en la mayor parte de las aleaciones que poseen más del 7 % de estaño, se puede encontrar algo de la fase δ (Avner, 1988).

1.5. Cojinetes de deslizamiento

El empleo de cojinetes de fricción supone una solución más económica respecto de aquella que emplea cojinetes de rodadura. Los cojinetes de fricción no pueden ser utilizados para elevadas revoluciones, a menos que la carga que soporten sea pequeña. Excepcionalmente, se pueden emplear los cojinetes de fricción, utilizando lubricación a presión, para soportar fuertes cargas y elevadas velocidades; por ejemplo, semicojinetes de biela y de cigüeñal de un motor alternativo (Artaki *et al.*, 1995).

La fabricación de este tipo de cojinetes se realiza según la figura 1.5, a partir de chapa de acero recubierta en su cara interna, la superficie de trabajo, con una aleación antifricción que le proporciona un rozamiento suave y evita el desgaste del árbol.

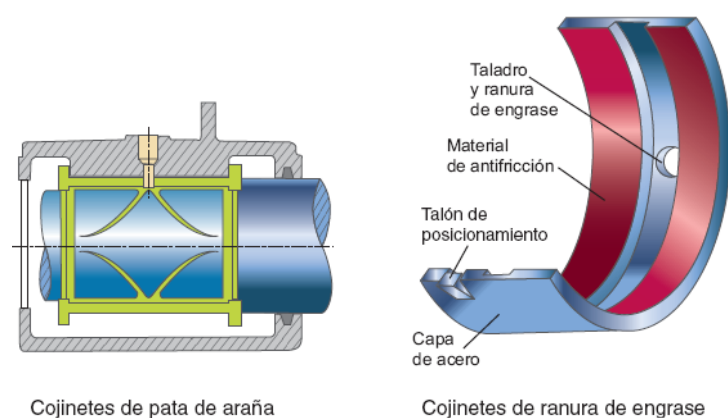


Figura 1.5. Cojinetes de deslizamiento.

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.

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.

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) plantea 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 qué 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.

Autores en los que se encuentran Dobrovolski (1981); Reshetov (1985); Orlov (1985) y González *et al.* (2004) ratifican que a diferencia de los cojinetes de rodamiento que trabajan con fricción por rodadura y los cojinetes de contacto plano trabajan con fricción por deslizamiento, 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.

En estudios realizados por Goksenli y Eryurek (2009); Gujar y Bhaskar (2013) coinciden en plantear que los árboles y ejes para garantizar un buen funcionamiento del cojinete, deben tener alta dureza y buen acabado superficial. Los aceros de medio carbono, con un adecuado tratamiento térmico, garantizan esas propiedades y son muy usados en la construcción de árboles y ejes (pueden tener una dureza de 40 a 50 HRC). Para algunas

aplicaciones puede emplearse hierro fundido de alta resistencia. Cuando se necesitan árboles del menor diámetro posible, pueden emplearse aceros aleados, que, con tratamiento térmico o termoquímico, puede alcanzar una dureza superficial de 55 a 60 HRC.

1.6. Comportamiento rotodinámico de turbomaquinaria

El rotor se diseña como una viga horizontal sobre la cual actúan cargas transversales y torsionales soportadas en sus extremos por cojinetes de amortiguamiento (garantizada por la película lubricante). La carga torsional límite es conocida y corresponde al torque máximo de entrada suministrada por un motor eléctrico de velocidad controlable. El modelo se presenta en función de un número flexible y seleccionable de hasta siete etapas, lo cual permite emular un número amplio de condiciones ó aplicaciones industriales. Mediante el empleo de las matrices de transferencia se da solución (utilizando *Matlab*) a las ecuaciones del comportamiento dinámico del sistema; lo que permite obtener los autovalores del rotor.

Todo sistema rotodinámico tiene un número discreto de frecuencias naturales e igual número de formas modales. Cuando una frecuencia natural es excitada por la fuerza de desbalance a la velocidad de rotación del eje estamos ante una o varias condiciones de velocidad crítica del rotor (figura 1.6). Bajo esta condición el rotor no vibra, sino que se flexa dentro de su forma modal asociada a la frecuencia natural y gira alrededor de la línea central de los cojinetes en los cuales está apoyado (Vance, 1998).

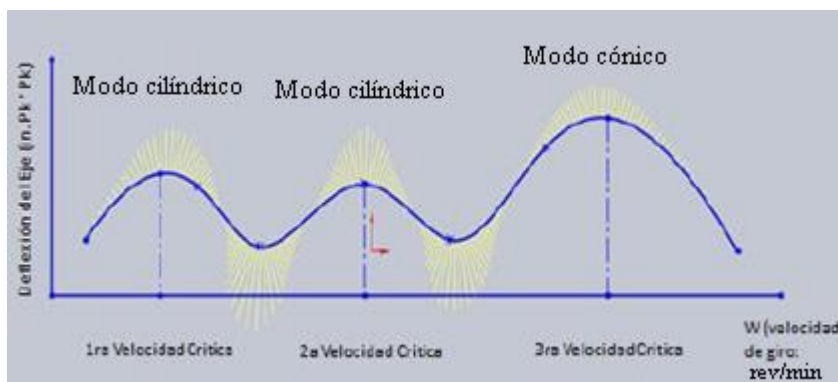


Figura 1.6. Gráfica de deflexión vs velocidades de giro.

A medida que se introduce una cierta cantidad de amortiguamiento, el comportamiento sincrónico del rotor a su velocidad de giro permitirá visualizar los niveles de amplitud de vibración de cada punto (los cuales por practicidad se miden en los apoyos). Estos niveles de amplitud son originados por las fuerzas de desbalance y están en función de la velocidad

de giro del rotor. En la operación de una máquina, el objetivo es que el rotor pase de forma rápida las regiones de velocidades críticas (en las diferentes formas modales) para evitar la coincidencia (estar en fase) del punto pesado y el punto alto del rotor lo cual genera amplificación de los niveles de vibración del sistema (Adams, 2012).

Vollan y Komzsik (2012) estudiaron con elementos finitos la dinámica de un sistema rotor-bearings (rotor en voladizo de una turbina de viento) mediante el concepto básico de la viga de Timoshenko, calcularon las respuestas al desbalance a diferentes velocidades de giro considerando dos casos: usando rodamientos no amortiguados isotrópicos y rodamientos amortiguados ortotrópicos.

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.

Muszinska (2005) estudió y modeló mediante el método de los elementos finitos la respuesta en estado estable de un rotor rígido asimétrico (de un solo eje y un solo impulsor); el resultado de su investigación le permitió concluir que las respuestas del rotor en estado estable a la velocidad sincrónica e incluso a velocidades superiores pueden ser estimadas de forma muy precisa.

Schwibinger y Norman (1998) evaluaron con la metodología de matrices de transferencia la estabilidad rotodinámica de un sistema de transmisión de potencia (caja de velocidades) soportado en cojinetes. En su investigación, Schwibinger y Norman, encontraron que al ignorar el análisis clásico de autovalores la combinación de vibración lateral y torsional en un sistema de caja de engranajes puede causar serios errores en la predicción de estabilidad de un rotor.

Al-Beedor (2001) mediante esta misma metodología estudió el comportamiento rotodinámico y térmico de una aleta típica (elástica) montada en un eje flexible en la dirección torsional. Los resultados del modelamiento y la simulación efectuada por Al-Beedor exhibieron fuerte dependencia y una interacción energética entre las deformaciones torsionales del eje y las deformaciones flexibles de la aleta. Adicionalmente y empleando la misma metodología de matrices de transferencia,

Al-Beedor (1999) presentó un modelo rotodinámico para interpretar la combinación de vibración transiente lateral y torsional del rotor elemental de Jeffcott. Los resultados de su modelamiento demostraron la existencia débil de combinación inercial e interacción no lineal entre la vibración lateral y torsional del rotor.

Kenneth *et al.* (1985) analizaron las velocidades críticas en una bomba centrífuga multietapas considerando las variaciones en amortiguación y rigidez tanto de los cojinetes de película fluida como en los sellos de laberinto. Los investigadores efectuaron cálculos teóricos de predicción de respuesta al desbalance y compararon los resultados con los datos experimentales; llegando a la conclusión que la alta diferencia en los resultados (teóricos vs. experimentales) de velocidades críticas conllevaba a realizar investigaciones adicionales y más profundas sobre cómo afecta el amortiguamiento y la rigidez de los sellos de película fluida en la estimación de velocidades críticas laterales.

También, concluyeron que, dependiendo de los métodos usados para calcular las propiedades de los sellos, existirán diferencias en los cálculos de la región de velocidades críticas laterales.

Crawford *et al.* (2004) estudiaron y analizaron, mediante el cambio y control de la primera velocidad crítica en un ventilador centrífugo en voladizo (overhung), el comportamiento dinámico del rotor de un ventilador. El ventilador objeto de su investigación perteneciente a una cadena de varios sistemas similares durante varios años operó a 1 900 rev/min, pero por condiciones operacionales y con el consentimiento de su fabricante (quien confirmó que su primera velocidad crítica estaba en el orden de los 3 000 rev/min) se llevó a operar a 2 080 rev/min. Después de realizado el cambio se evidenció por parte del usuario final (ingenieros de la planta de dióxido de titanio en New Johnsonville, Tennessee) altos niveles de vibración, mayor sensibilidad al desbalance y en algunos casos en particular se evidenció falla catastrófica por daños prematuros en los rodamientos del rotor.

Los análisis realizados por los investigadores les permitieron concluir que la primera velocidad crítica, de varios de los ventiladores centrífugos de la planta, oscilaba entre 1 700 y 2405 rev/min. También concluyeron que la rigidez del volante (aspa) en un ventilador centrífugo en voladizo cambia en mayor medida el rango de frecuencias en la que se puede presentar la primera velocidad crítica en estos sistemas. Adicionalmente, los autores concluyeron que el efecto giroscópico y las fuerzas de momento actuando en una rueda de

ventilador centrífugo en voladizo (Overhung) pueden llegar a variar en un 37 % el rango de frecuencias en donde se presenta la primera forma modal.

Finalmente, Murphy *et al.* (1984) estudiaron las velocidades críticas en turbomaquinaria, su predicción computacional y su contraste con mediciones experimentales. Los investigadores concluyeron que la exactitud en la predicción computacional de las velocidades críticas depende de tres factores: en primer lugar, de la exactitud del modelo de vibración libre del rotor, el cual es función del modelo elástico de este último. En segundo lugar, depende de la precisión en la estimación de los coeficientes de amortiguación y rigidez de los cojinetes, los cuales son dependientes de la velocidad de giro en el caso de los cojinetes de deslizamiento de película fluida. En tercer lugar, la precisión en la estimación es dependiente de las propiedades dinámicas de los soportes del rotor, las cuales se determinan de forma experimental.

Los investigadores llegaron a la conclusión que las primeras dos o tres velocidades críticas en cualquier máquina industrial pueden ser confiablemente predeterminada con errores no mayores a 7 %; siempre y cuando se utilicen métodos de estimación lineal en la predicción computacional y se incluyan apropiadamente las propiedades de rigidez de los cojinetes y la impedancia de la fundación en donde se soporta el rotor. El análisis se efectuó por parte de los investigadores considerando que el rotor utiliza cojinetes tiltin-pad. Para el caso de la presente investigación se utilizará como referencia el estudio realizado por Murphy *et al.* (1984), pero considerando cojinetes de deslizamiento planos.

1.7. Dinámica del desgaste en pares tribológicos

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 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. En la figura 1.7 se muestra este tipo de defecto.



Figura 1.7. Desgaste por fatiga superficial

Fuente: Delrio (2005).

El fisuramiento ocurre cuando la resistencia al corte en la región sub-superficial es muy baja con respecto al esfuerzo cortante. En muchas ocasiones, esto puede ser solucionado incrementando la profundidad de la cáscara, endurecida o endureciendo el corazón o ambos.

Martínez y García (2011) exponen que un tipo de daño superficial que ocurre en tambores de frenos o superficies de volantes de fricción, es la fatiga por esfuerzos térmicos, desarrollada en la superficie de metales deslizantes bajo presión u otras partes sujetas a

calentamientos repetidos y ciclos de enfriamiento. El calor generado, bajo repetición, causa fisuramiento superficial y aún fractura grosera. Cuando se calienta una superficie, las leyes de expansión, frecuencia y compresión superficial se cumplen, cuando se enfría la superficie se encoge y el metal se contrae debido a la fluencia compresiva, entonces la superficie es solicitada, en tensión por la masa de metal que no cambia bajo la misma. Las superficies en tensión pueden fisurarse debido a la acción cíclica de esfuerzos alternados de tensión y compresión.

En investigaciones anteriores (Rivas *et al.*, 2006 y Coronado *et al.*, 2004) se encontró que el coeficiente de fricción entre bronce comerciales y acero SAE 1045 resultó ser menor para el aceite en comparación con la grasa, aunque la diferencia entre ellos no fue muy marcada, recomiendan utilizar aceite para estos pares tribológicos, además, con este lubricante se logró menor pérdida de masa de los materiales evaluados. Al evaluar el bronce SAE 67 y SAE 64 con aceite encontraron menor coeficiente de fricción para el bronce SAE 67.

1.8. 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 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).

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) los ángulos 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) 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.

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 cojinetes, excentricidades y profundidades microsurco muestran que el microsurco produce una caída de presión y 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 del ventilador centrífugo.

1.9. Conclusiones del capítulo 1

- ❖ Según la revisión bibliográfica encontrada, se pudo establecer que la combinación de diferentes mecanismos, en forma acumulativa, produce las fallas encontradas en servicio y cuando el problema deriva en una falla catastrófica, es muy difícil determinar cuál de los mecanismos fue el iniciador.
- ❖ Se determinó que lo importante para diagnosticar la solución de un problema de desgaste es detectar cuál fue el mecanismo que originó el inicio del problema para localizar las soluciones.
- ❖ Dentro de los elementos que provocan defectos en los cojinetes de contacto plano se encuentra la contaminación del lubricante, que genera trabajo mecánico sobre el cojinete (desgaste abrasivo) deformando al material que produce la adhesión de los picos así creados (desgaste adhesivo), concentración de cargas (fatiga) y partículas de desgaste que contaminan al lubricante (desgaste erosivo).

Capítulo 2

Materiales y métodos

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

En el mundo que vivimos, tan acelerado, la tecnología está haciendo que la productividad alcance niveles cada vez mayores. Hoy en día, las técnicas y procedimientos adecuados para soldar los aceros están mejorando, ya que el proceso de soldadura oxiacetilénica se está desarrollando, lo que permite depósitos de soldadura con capilaridad, reduce el tiempo necesario para soldar, con un rendimiento mejor y uniforme y ofrece a la vez mayor seguridad y ergonomía.

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

El objetivo del capítulo es establecer los métodos y procedimientos a tener en cuenta para la aplicación de la soldadura oxiacetilénica en el recargue de un babbitt bronce.

2.2. Composición química del babbitt base estaño del ventilador

La composición química estándar del babbitt base estaño según Alloy Casting Institute (ACI), muestra la designación adoptada por la AISI y SAE, de la American Society for testing Materials - ASTM B 23 y la SAE, se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composición química del babbitt base estaño, en %

| UNS | Sn | Sb | Cu | Fe | Zinc | Al |
|-------|-----------|---------|---------|------|-------|-------|
| 55189 | 83,0-85,5 | 7,5-8,5 | 7,5-8,5 | 0,08 | 0,005 | 0,005 |

Las aleaciones con base de estaño, también conocidas como metales blancos, generalmente contienen cobre, antimonio y plomo. Estas aleaciones tienen diferentes propiedades mecánicas, dependiendo de su composición. El babbitt base de estaño con más de un 50 % de éste material, presenta buena adherencia sobre una base de hierro y tienen buena dureza en temperatura ambiente.

La composición química estándar del babbitt bronce según Alloy Casting Institute (ACI), muestra la designación adoptada por la AISI y SAE, de la American Society for testing Materials, ASTM E 255 y la SAE, se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Composición química del babbitt base bronce fosfórico

| SAE | ASTM | DIN | Cu | Sn | Pb | Zn | Ni | Fe | Al |
|-----|---------|----------|-------|------|-----|-----|-------|------|-------|
| 62 | B143-1A | 1705Rg10 | 86-89 | 9-11 | 0,3 | 1-3 | 1 máx | 0,15 | 0,005 |

Las características más sobresalientes de este material es que se utiliza en cojinetes y piezas de fricción que soportan grandes esfuerzos y elevada temperatura. Anillos de empuje, discos de fricción, manguitos de bomba, anillos colectores: bujes de pasadores de pistón y balancines, guías de válvulas, cojinetes, rodillos, cuerpos de válvulas para elevadas presiones, prensaestopas.

2.3. Caracterización del cojinete de deslizamiento

Para el proceso de recuperación se tuvo en cuenta la función del elemento mecánico en la máquina. En la figura 2.1 se muestra el cojinete de deslizamiento del ventilador y la zona de rodamiento que se daña, el babbitt empleado es el base estaño.

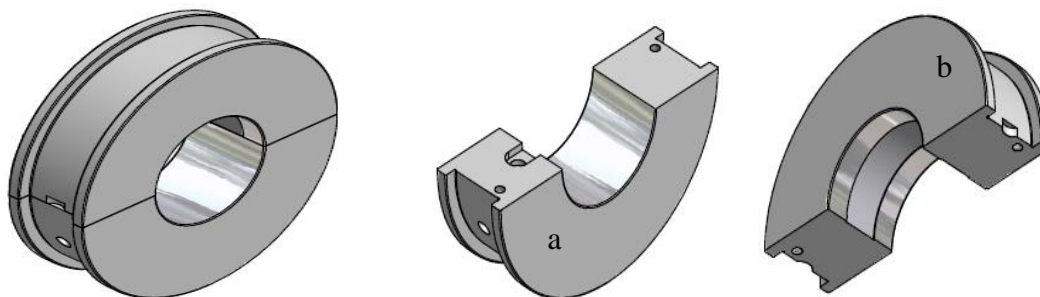


Figura 2.1. Cojinete de deslizamiento, a) tapa inferior; b) tapa superior.

Es un cojinete de deslizamiento compuesto por dos casquillos y tiene un movimiento en contacto directo, realizándose un deslizamiento por fricción, con el fin de que este sea el menor posible. Al unirse las dos partes, el desgaste en las superficies de contacto limita su vida útil. La generación de una película lubricante que separe las dos piezas del mecanismo mediante una lubricación completa, requiere un sistema adicional para elevar la presión del lubricante. La selección de este tipo de cojinete se justifica ya que se usa sólo en máquinas de gran tamaño, con grandes cojinetes de deslizamiento.

El desgaste del cojinete se produjo debido a que la película lubricante es demasiado delgada como para separar las microirregularidades de las dos piezas, las cuales al tocarse 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 el proceso de desgaste.

2.3.1. Parámetros de trabajo del cojinete

El ventilador centrífugo es un equipo de vital importancia en el proceso productivo, encargado de extraer a la atmósfera todo el aire que demandan las unidades para la producción de ácido sulfúrico como la del horno ductos, calderas, sistema de catálisis y sopladores. En la tabla 2.3 se muestran los parámetros de trabajo del cojinete.

Tabla 2.3. Parámetros de trabajo del cojinete

| No | Parámetros | Datos |
|----|---------------------------------------|----------------------|
| 1 | Carga sobre el cojinete | 11 536 N |
| 2 | Deflexión del árbol | 0,1013 mm |
| 3 | Longitud del cojinete | 110 mm |
| 4 | Longitud del árbol | 819,5 mm |
| 5 | Rugosidad superficial del árbol | 0,08 μm |
| 6 | Rugosidad superficial del cojinete | 1,25 μm |
| 7 | Diámetro del árbol | 125 mm |
| 8 | Número de revoluciones del árbol | 3 600 rev/min |
| 9 | Densidad relativa del aceite | 89 g/dm ³ |
| 10 | Temperatura de entrada del lubricante | 50 °C |
| 11 | Temperatura de trabajo del lubricante | 55,43 °C |

El ventilador está ubicado en la planta de ácido sulfúrico, unidad que funciona con fuertes agentes químicos y que tiene entre sus complejidades que no debe ser parada con frecuencia, ni por período relativamente largos, porque al detener las mismas disminuyen la temperatura de los gases corrosivos que quedan en el interior del sistema. Estas características afectan el sistema tribológico ya que al menos, muchos de estos elementos se introducen entre el par y aceleran el desgaste.

2.4. Parámetros de soldadura

Las variables que se consideraron como esenciales fueron aquellas que pueden afectar las propiedades mecánicas del conjunto soldado, siguiendo las recomendaciones del código de la AWS A 5.2.

En el área, dentro y alrededor de la soldadura, se realizó la limpieza hasta dejar libre de grasa, suciedad, marcador no volátil y óxido visible, el procedimiento fue el cepillado de raspado con un cepillo de bronce (no de acero), antes de la soldadura.

En la tabla 2.4 se muestran los parámetros de soldadura empleados para la deposición del relleno de bronce en el cojinete de deslizamiento.

Tabla 2.4. Parámetros para la soldadura oxiacetilénica

| Revestimiento | Orificio de la boquilla | Presión de los gases | | Flujo del acetileno |
|---------------|-------------------------|----------------------|---------|---------------------|
| Espesor | Diámetro | Acetileno | Oxígeno | |
| μm | mm | Pa | Pa | l/min |
| 30 | 1 | 0,07 | 0,15 | 0,50 |

La aplicación de la micropelícula en la superficie de trabajo de los cojinetes fue una capa de espesor de 30 micrones (los espesores mínimos en aplicaciones de servicio pesado se encuentran de 15 a 30 micrones). Para la fusión se empleó la llama neutra, relación 1:1 de oxígeno y de acetileno con temperatura de 183 °C aproximadamente.

Para seleccionar el proceso de soldadura y el metal de relleno se consideró las características básicas de las aleaciones, además se tuvo en cuenta su forma y su historia, como fue desde la fabricación hasta momentos antes de la determinación de reparación.

2.4.1. Control de precalentamiento y temperatura entre pases

Ocasionalmente es necesario emplear un precalentamiento mayor que 150 - 200 °C y en la mayoría de los casos es suficiente calentar el material base sólo lo suficiente para quitar la humedad y asegurar que no haya más condensación. Un precalentamiento excesivo puede ocasionar una mayor zona afectada por el calor, con un mayor volumen de metal expuesto al riesgo de agrietamiento en caliente y con problemas de distorsión. Igualmente, la temperatura entre pases debe mantenerse limitada en forma similar, si fuese necesario, permitiendo que la zona de trabajo se enfríe entre los pases que siguen, se recomienda el uso de un cepillo de raspado para remover el óxido entre los pases y reducir el riesgo de una soldadura porosa.

El proceso se realizó con precalentamiento del metal base entre 70 y 80 °C y la temperatura entre pases 120 - 180 °C.

2.5. Análisis microestructural

Para determinar el comportamiento microestructural de los materiales objeto de estudio, se consideró la microestructura de una muestra patrón del babbitt UNS 55189 y otra del babbitt ASTM B143 - 1A. Las aleaciones de bronce son extremadamente susceptibles al endurecimiento por trabajo, es por ello que, en lo posible, la cara que se va a usar para ser

examinada debe ser la que menos ha sufrido cortes. En las figuras 2.2 (a) y 2.2 (b) se muestran ambas microestructuras.

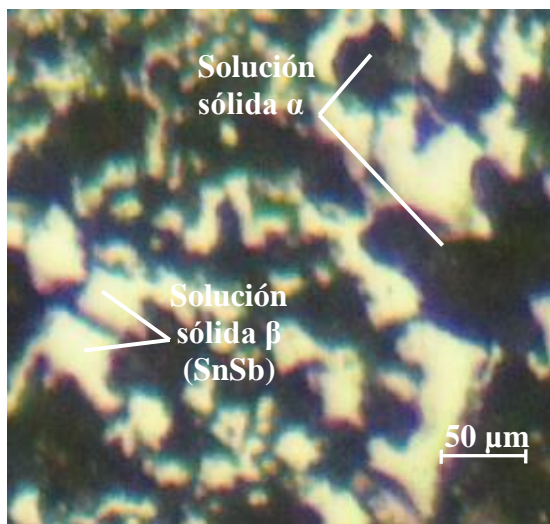


Figura 2.2 (a). Babbitt UNS 55189.

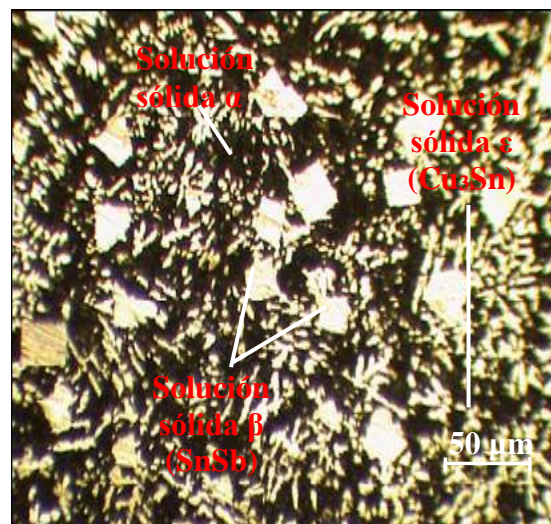


Figura 2.2 (b). Babbitt ASTM B143 - 1A

La microestructura del babbitt UNS (figura 2.2 (a)) se caracteriza por presentar compuestos intermetálicos del tipo α y del tipo β (SnSb), siendo estos últimos puntiagudos y afilados, sin embargo, los mismos son bastante uniforme en toda la matriz. 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. La 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.

En la figura 2.2 (b) se observa una microestructura de cristales en forma de estrella, (cobre antimonio) y en forma granular (estaño antimonio). El cobre forma con el antimonio una combinación química del tipo (Cu_3Sn) . Estas combinaciones poseen una temperatura de fusión más alta y se cristaliza en primer lugar, formando dendritas ramificadas que dificultan la licuación de los cristales cúbicos β , los cristales (Cu_3Sn) , forman en el Babbitt incursiones sólidas que aumentan complementariamente la resistencia al desgaste del casquillo. Los cristales en forma granular forman una base de estaño antimonio (SnSb), la matriz granular estaño antimonio es tenaz y plástica y su tendencia a la rotura por fatiga es menor.

El campo negro que se observa en ambas microestructuras, representa la masa plástica de solución sólida α de antimonio en el estaño. La matriz de la estructura por el diagrama SnSb se obtiene a 232 °C.

2.6. Preparación metalográfica

La preparación defectuosa de las probetas puede arrancar las inclusiones importantes, destruir los bordes de grano, revenir un acero templado o en general, originar una estructura superficial distorsionada que no guarda ninguna relación con la superficie representativa y características del metal. Las operaciones se resumen en el siguiente orden, según la norma NC 10 - 56:86 y ASTM E 3 - 95.

1. Selección de la muestra.
2. Toma o corte de la muestra.
3. Montaje y preparación de la muestra.
4. Ataque de la muestra.
5. Análisis microscópico.
6. Obtención de microfotografías.

2.6.1. Área para la selección de las muestras

La localización de la parte que va a ser estudiada se realizó de forma tal que la misma representaba el sitio de la falla de la pieza. El tamaño adecuado de la probeta fue de forma tal que permitió sostenerse con la mano durante su preparación y en función del área de trabajo del microscopio a utilizar. Las figuras 2.3 (a) y 2.3 (b) muestran el cojinete de deslizamiento, considerados para la selección del área.

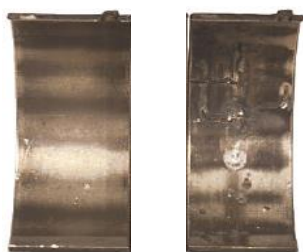


Figura 2.3. Área de selección de las muestras, (a) cojinete nuevo; (b) dañado.

Se seleccionó un cojinete nuevo, en que se muestra en la figura 2.3 (a) y otro cojinete dañado, donde se puede observar el efecto del desgaste abrasivo. La ausencia total de lubricación del sistema eje-cojinete conduce al gripado del cojinete, normalmente con la destrucción total de la pieza.

2.6.2. Corte de las muestras

Las operaciones de corte para la toma de las probetas, se realizaron con una segueta manual, se garantizó abundante refrigeración por las características que presenta el bronce y garantizar en lo posible eliminar las rebabas que quedan después del corte y las mismas puedan influir en la calidad de la preparación metalográfica. En la figura 2.4 se observan las muestras consideradas para realizar el proceso de corte.



Figura 2.4. Muestras consideradas para realizar el proceso de corte.

2.6.3. Desbaste de las muestras

Se realizó después del corte y al montaje de la probeta y se realizó en una desbastadora de cinta rotativa sobre papeles abrasivos de diferentes grados, colocados sobre discos giratorios. La figura 2.5 muestra las probetas desbastadas y pulidas.



Figura 2.5. Muestras desbastadas y pulidas

Se giró al pasar de un abrasivo a otro para borrar por completo las huellas del abrasivo anterior, se utilizaron la serie de abrasivos: 150, 220, 280, 320, 400, 500 y 600, luego se lavaron con agua abundante. Las características de la máquina son las siguientes:

Voltaje: 250 V

Corriente: 2,5 Amp

Número de revoluciones: 300 - 1 000 rev/min

Potencia del motor: 3,7 kW

2.6.4. Pulido y ataque de las muestras

Se realizó para eliminar las rayas finas producidas en la última operación de desbaste hasta que se consiguió una superficie sin rayas y con alto pulimento a espejo. Se pulió con el apoyo de la cara desbastada de la probeta sobre un paño embebido con una suspensión acuosa de óxido de cromo, el cual se aplicó sobre el disco de la pulidora, el paño utilizado fue de fieltro, luego del pulido se lavaron las probetas con alcohol y fueron secadas finalmente con aire seco y caliente. Antes de realizar el ataque químico a las muestras se desengrasaron con alcohol y secaron con aire caliente. En la tabla 2.5 se muestran los reactivos químicos.

Tabla 2.5. Reactivos químicos empleados.

| Reactivos | Proporción |
|---|------------|
| Cloruro de hierro (FeCl_2) | 10 g |
| Ácido clorhídrico (HCl) | 2 cc |
| Agua destilada (H_2O) | 95 cc |

Para el ataque, se tomó la probeta con la pinza y se sumergió con la cara pulida hacia abajo en el reactivo de ataque contenido en el cristizador. Se mantuvo sumergida un segundo, se extrajo, se lavó con alcohol, se secó y se observó al microscopio, se registró el campo observado a diferentes aumentos. Se volvió a pulir y se repitió la operación descrita anteriormente manteniendo sucesivamente la probeta sumergida durante 1 - 5 minutos a la temperatura ambiente, registrando el campo observado después de cada ataque.

El ataque se realizó para poner de manifiesto el tamaño, forma y distribución del grano (fases o microconstituyentes), las heterogeneidades en la estructura y las segregaciones.

2.6.5. Observación con microscopio óptico

Para la observación de las probetas se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM - 100 como se muestra en la figura 2.6.



Figura 2.6. Microscopio óptico NOVEL modelo NIM - 100.

Está ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, está dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. Para colocar las probetas en el microscopio y evitar una observación distorsionada de las imágenes, se montaron en un dispositivo con plastilina que permitió la nivelación adecuada de las muestras.

2.6.6. Ensayos de microdureza

En este trabajo se ha utilizado el procedimiento de dureza Vickers (Callister, 2000; Askerland, 1998). Para el ensayo se utilizó un microscopio modelo: PMT - 3 No 168, del Laboratorio de microscopia de minas del ISMM Moa.

Para determinar la microdureza (HVN) de las probetas de análisis se realizaron dos ensayos, el primero para una carga de 10g, donde se midió los diámetros de la huella de la punta de diamante penetrada en un tiempo de 15 segundos, las medidas se tomaron para dos puntos de prueba seleccionados aleatoriamente en la superficie de las probetas.

La microdureza (VHN) se calculó por la ecuación siguiente:

$$VHN = 1,58 \cdot \frac{P}{d^2} \quad (2.1)$$

Donde:

VHN - número de dureza Vickers; kgf/mm^2

1,58 - constante

P - peso; kgf

$$\text{Diámetro medio} = \frac{d^2}{2} \text{ (mm)} \dots \bar{d} = \frac{(d_1 + d_2) + (d_3 + d_4)}{2} \quad (2.2)$$

$$\text{Microdureza promedio: } \overline{VHN} = \frac{\sum VHN_1 + VHN_2}{2} \quad (2.3)$$

2.7. Metodología de cálculo para el proceso de soldadura

El régimen de soldadura depende de diversos factores: tipo de material base, tipo de alambre, fundente, tipo de unión. Este proceso ocurre en tiempos muy cortos y con una variación de temperaturas extremas que van desde la fusión hasta aquellas que no afectan la estructura del metal base. En general la velocidad del arco a lo largo de la pieza de trabajo es mucho mayor que la velocidad de difusividad térmica. En estos procesos, el flujo de

calor en la dirección del trabajo es pequeño comparado con el de la dirección perpendicular de avance.

En este proceso se emplean tres tipos de llama (figura 2.7). La temperatura máxima se alcanza en la punta del cono interno; las temperaturas de la segunda etapa son, de algún modo, menores que las del cono interno. Durante la soldadura, la cubierta externa se extiende y protege de la atmósfera circundante las superficies de trabajo que se unen.

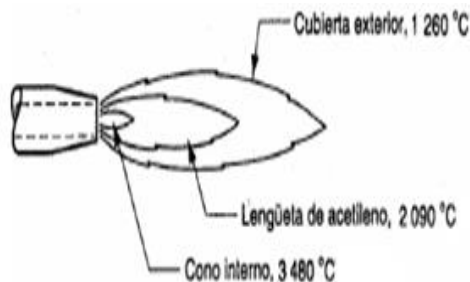


Figura 2.7. Tipos de llamas empleadas en el proceso de soldadura oxiacetilénica.

Para lograr la capilaridad durante el depósito del babbitt, se empleó la llama neutra, relación 1:1 de oxígeno y de acetileno con temperatura de 2 090 °C aproximadamente.

En el caso de la soldadura fuerte (oxiacetilénica) también conocida en la terminología inglesa como *brazing*, es un proceso de unión térmica en el que el metal de aporte, se calienta hasta su fusión fluyendo por capilaridad entre la holgura que existe entre los materiales a soldar y uniendo sus superficies por atracción atómica y mediante difusión. El material de aporte tiene un punto de fusión por encima de los 450 °C, pero siempre por debajo del punto de fusión de los componentes que va a unir.

2.7.1. Generación de calor en la soldadura oxiacetilénica

El soplete de oxiacetilénico proporciona 0,5 mm³ de acetileno por hora y una razón igual de volumen de oxígeno para una operación de soldadura oxiacetilénica sobre acero de 1 mm. El calor generado mediante combustión se transfiere a la superficie de la pieza con una eficiencia $\eta_1 = 0,25$. Durante el proceso la concentración es del 75 % del calor de la llama en un área circular sobre la superficie de trabajo con un diámetro de 10 mm.

La razón de calor generado por la llama es el producto de la razón de volumen de acetileno por el calor de combustión y se determina como:

$$Q_g = V_a (C_c) \quad (2.4)$$

Donde:

Q_g - calor generado; J/s

V_a - volumen de acetileno, mm³/h

C_c - calor de combustión; J/mm³

El calor de combustión específico a considerar es de $55 \cdot 10^6 \text{ J/mm}^3$

Con una eficiencia de transferencia de calor $fl = 0,25$ la cantidad de calor que recibe la superficie de trabajo es:

$$Q_t = fl \cdot Q_g \quad (2.5)$$

Donde:

Q_t - cantidad de calor que recibe la superficie de trabajo; J/s

fl - eficiencia de transferencia de calor

El área del círculo en la cual se concentra el 75 %, de calor de la llama se calcula como:

$$A = 3\pi r^2 \quad (2.6)$$

Donde:

A - área del círculo en la cual se concentra el calor, mm²

La densidad de energía en el círculo se encuentra al dividir el calor disponible por el área del círculo por la ecuación siguiente:

$$D_E = \frac{\%_{CLL} \cdot Q_t}{A} \quad (2.7)$$

Donde:

D_E - energía específica; J/s-mm²

$\%_{CLL}$ - por ciento del área de calor de la llama; %

2.8. Métodos de los elementos finitos. Módulo de ensamble

El modelo del cual se partió presenta las características siguientes; un modelo compuesto de dos partes, un cojinete al cual se aplica una carga cuyo diámetro es de 125 milímetros y que cuenta con un radio de curvatura de 62,5 milímetros. El material utilizado para el respaldo es acero, el cual se idealizó como un material elástico. La segunda placa consistió de un material tribológico conocido comercialmente como la aleación ASTM B143 - 1A y que se consideró como un material isotrópico elástico lineal con endurecimiento.

En el módulo de ensamble se consideró las características fundamentales del elemento como: una masa de 18,46 kg, un volumen de $0,0022 \text{ m}^3$, la densidad del material de $8\,300 \text{ kg/m}^3$ y un peso de 180,914 N. En la figura 2.8 se muestra el ensamble del modelo visto desde el plano XY.

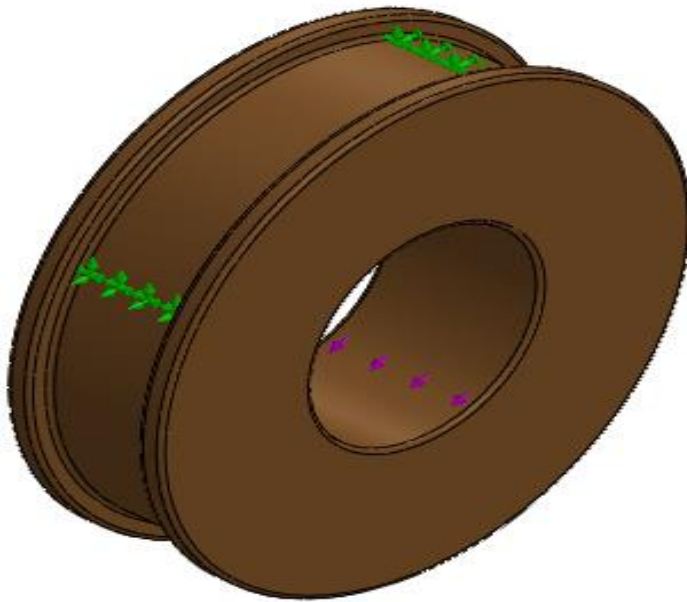


Figura 2.8. Ensamble del modelo desde el plano XY.

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

2.8.1. Mallado del modelo

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

El software permite realizar un mallado más fino en las zonas de interés, es decir en las zonas donde el gradiente de temperatura es mayor, lo que permitirá una mayor definición y detalle. En la tabla 2.6 se muestran los detalles del mallado del modelo.

Tabla 2.6. Detalles del mallado del modelo.

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

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

Una vez que se establecieron las geometrías, propiedades, interacciones y condiciones en cada uno de los módulos anteriores, se definió el tipo y la geometría de los elementos finitos que compondrán la malla del modelo. La figura 2.9 muestra el modelo mallado.

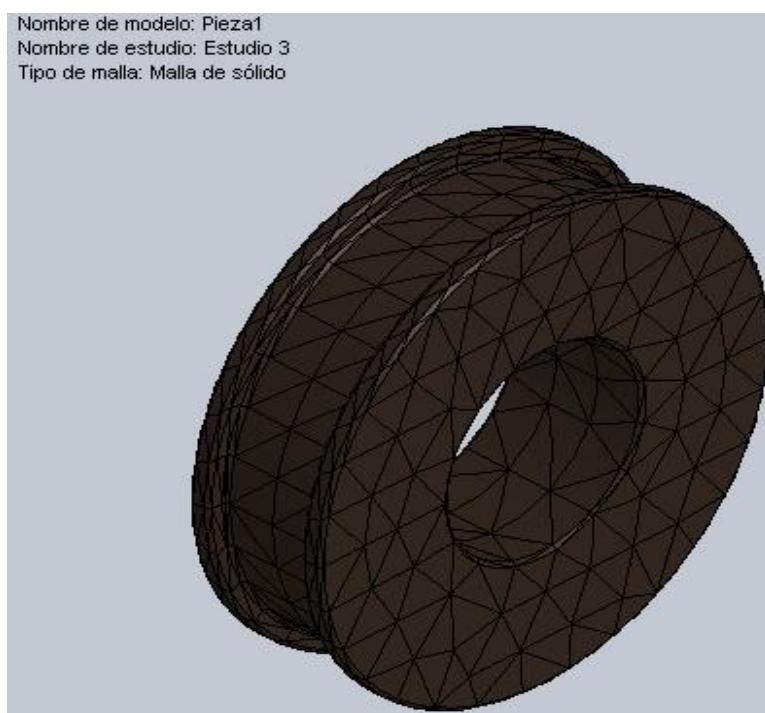





Figura 2.9. Modelo mallado.

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

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

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

2.9. Conclusiones del capítulo 2

-  Se estableció el comportamiento microestructural de las muestras patrón, el babbitt UNS 55189 y el babbitt ASTM B143 - 1A, la primera caracterizada por presentar compuestos intermetálicos del tipo α y del tipo β (SnSb), siendo estos últimos puntiagudos y afilados y la segunda presentar estructura de cristales en forma de estrella (cobre antimonio) y en forma granular (estaño antimonio).
-  Se establecieron las técnicas experimentales, así como la caracterización de las máquinas, equipos y medios a emplear en la determinación de las propiedades microestructurales de las aleaciones luego de realizado el proceso de soldadura oxiacetilénico.
-  A través del método de los elementos finitos (MEF) considerando las condiciones reales del cojinete, se realizará la solicitud de los esfuerzos equivalentes (Von-Mises), las deformaciones totales, factor de seguridad y análisis modal (primera velocidad crítica).

Capítulo 3

Análisis de los resultados

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

La soldadura para reconstrucción, tiene como fin fundamental el devolver las características geométricas y dimensionales a la pieza desgastada. Por esta razón, se trata de establecer la mayor similitud entre el material de aporte y el material de base, buscando mantener, lo más uniforme posible, sus propiedades, el régimen de trabajo preferente persigue una buena dilución y penetración en el material base, lo que se logra con la mayor cantidad de calor sobre la pieza que se va a recuperar.

En dependencia del volumen de la pieza y cuando la magnitud del desgaste es muy grande, se hace necesaria, en ocasiones, la combinación del recargue y la reconstrucción en una misma solución de recuperación, esto puede estar determinado por fines económicos o tecnológicos ya que de ordinario los materiales para el recargue son de un costo superior o presentan limitaciones en el número de capas en que pueden ser aportados.

El objetivo del capítulo es establecer los cambios microestructurales que ocurren durante el proceso de soldadura oxiacetilénica de un babbitt bronce empleado como cojinete antifricción

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.

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).

3.3. Análisis del proceso de soldadura del cojinete

En la reconstrucción de piezas de maquinarias es esencial el poder determinar la mejor opción en cuanto a material depositado por soldadura para recuperación de geometrías perdidas. Para la soldadura del cojinete se tuvo en cuenta tres factores: material depositado, temperatura de precalentamiento y de sostenimiento y número de pases depositados, que afectan las características finales de los recubrimientos aplicados por soldadura.

Por la ecuación 2.4 se determinó la razón de calor generado por la llama, donde para un volumen de acetileno de $76,2 \text{ mm}^3/\text{h}$ y un calor de combustión de $55 \cdot 10^6 \text{ J/mm}^3$, se tiene que la cantidad de calor generado sea de $1\,164,16 \text{ J/s}$.

La cantidad de calor generado es para la llama neutra, entre sustrato se debe aplicar esta cantidad de calor, independientemente de que el bronce al estaño tiene una buena característica de soldadura, estas partes no deben ser tensadas durante el proceso de soldadura o el enfriamiento posterior a este proceso, porque la soldadura se lleva a cabo en rangos cortos de alta temperatura.

Por la ecuación 2.5 se determinó la cantidad de calor que recibe la superficie de trabajo, para una eficiencia de transferencia de calor de 0,25 y cantidad de calor generado por la llama neutra de 1 164,16 J/s, por lo que la superficie está expuesta a un calor de 291,04 J/s.

Para un área de círculo donde se concentra el 75 % de la llama y que se consideró como la longitud de una cicloide, donde el radio del cojinete es de 63 mm se tiene calculado por la ecuación 2.6, que el área que recibe la mayor cantidad de calor es de 37,3 mm².

La densidad de energía en el círculo donde se concentra la llama se determinó por la ecuación 2.7, para un 0,75 % del calor concentrado de la llama, un calor generado de 1 164,16 J/s y un área de 37,3 mm² se tiene que esta energía es de 23,40 J/s- mm².

3.4. Análisis microestructural del cojinete recuperado por soldadura

Para observar los cambios microestructurales obtenidos del proceso de soldadura del babbitt, se han analizados los perfiles obtenidos en los depósitos. Las figuras 3.1 (a) y 3.1 (b) se corresponden con el pase de soldadura realizado. El análisis metalográfico consistió en la observación e identificación de las características de las estructuras metalográficas.

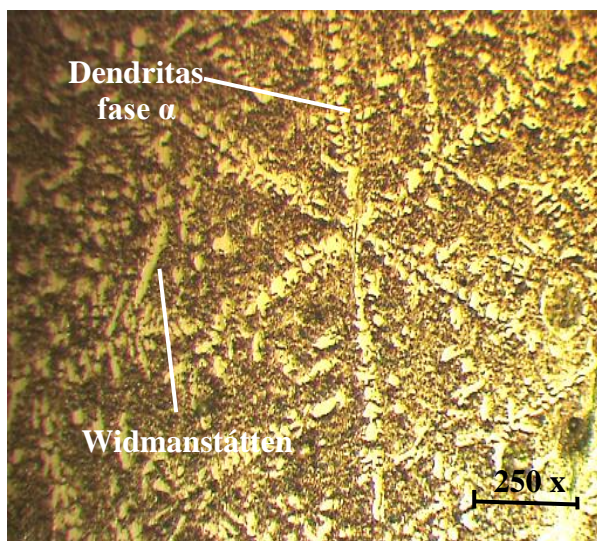


Figura 3.1(a). 1er pase de soldadura.

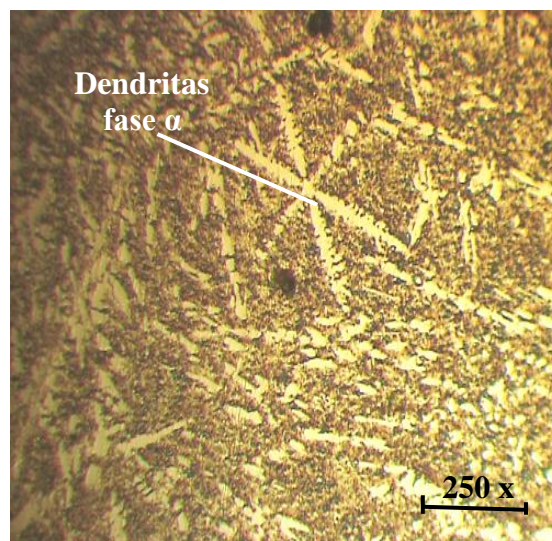


Figura 3.1(b). 1er pase de soldadura.

En las microestructuras se observan dendritas de fase α primaria y estructura Widmanstätten, no se observan con claridad los límites de grano ya que en esta sección son más equiaxiales. No se observa la presencia del elemento plomo, el bajo contenido de plomo aumenta la dureza en el cojinete y disminuye las propiedades lubricantes del bronce.

Al realizar el análisis metalográfico de las muestras, se encontró una distribución no uniforme del plomo sobre la matriz.

La aleación descrita es parte de los bronce al estaño. La base β se forma como resultado de una reacción peritética a 798 °C. A 586 °C, la fase β tiene una reacción eutectoide para formar la mezcla $\alpha + \beta$. A 520 °C, γ también sufre una transformación eutectoide a $\alpha + \delta$. El diagrama indica la descomposición de la fase δ , 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 ϵ 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 α . La precipitación de la fase δ o ϵ 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 α sólida). Pero en la mayor parte de las aleaciones que poseen más del 7 % de estaño, se puede encontrar algo de la fase δ , reportado por Avner (1988).

Las figuras 3.2 (a) y 3.2 (b) se corresponden con el análisis microestructural del 2do pase de soldadura en el cojinete.

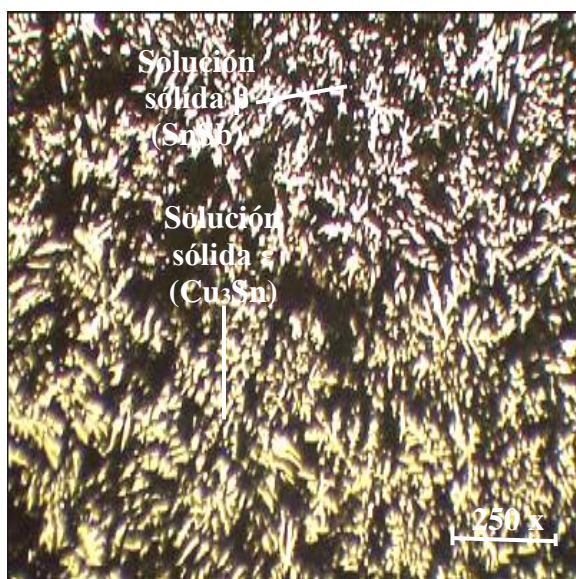


Figura 3.2 (a). 2do pase de soldadura.

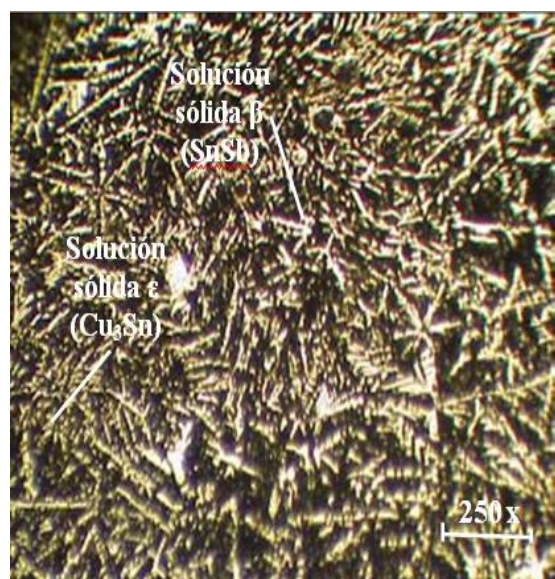


Figura 3.2 (b). 2do pase de soldadura.

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_3Sn), 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.

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 α y las aleaciones con mayor contenido de Zn se constituyen por fase α secundaria de estructura Widmanstätten. Así mismo en aumentar el contenido de Zn aumenta el contenido de fase β' , de mayor dureza.

En las figuras 3.3 (a) y 3.3 (b) se observan estructuras con matriz estrellada, producto del calentamiento por encima de 630 °C, al exceder el límite de temperatura en estos tipos de aleaciones, su resistencia decae considerablemente, ya que los cristales se estiran en formas de agujas (estructura acicular) hace menos resistente el material a la fricción.

La figura 3.3 es la microestructura de la tercera deposición de soldadura.

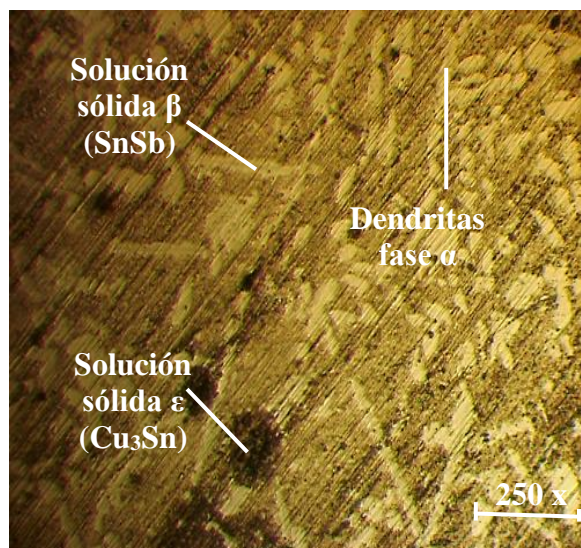


Figura 3.3 (a). 3er pase de soldadura.

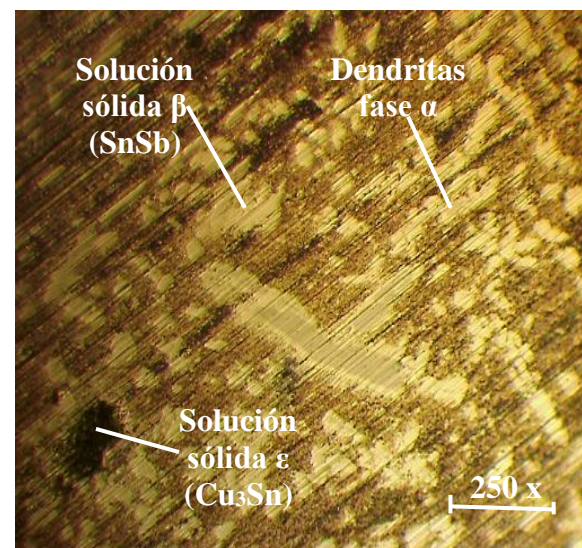


Figura 3.3 (b). 3er pase de soldadura.

En estas figuras se observa el predominio de dendritas en forma de estrella característico de un metal que ha sufrido una tercera transformación por temperatura y disminución de su espesor. La estructura es consistente en una estructura de granos columnares, concéntricos a los granos equiaxiales que se observan en el interior. Se obtiene menor cantidad de

agregado eutectoide, lo cual indica que esta probeta tiene menos contenido en estaño que la anterior, cabe señalar que en el centro de la probeta aparece más cantidad de fase δ que en la periferia; es decir, que hay un progresivo enriquecimiento de Sn desde la periferia al núcleo.

Luego del proceso de soldadura, el cojinete fue sometido a proceso de maquinado con el objetivo de restablecer sus parámetros geométricos y ponerlo en funcionamiento. Las figuras 3.4 (a) y 3.4 (b) son las muestras del cojinete soldado y maquinado.

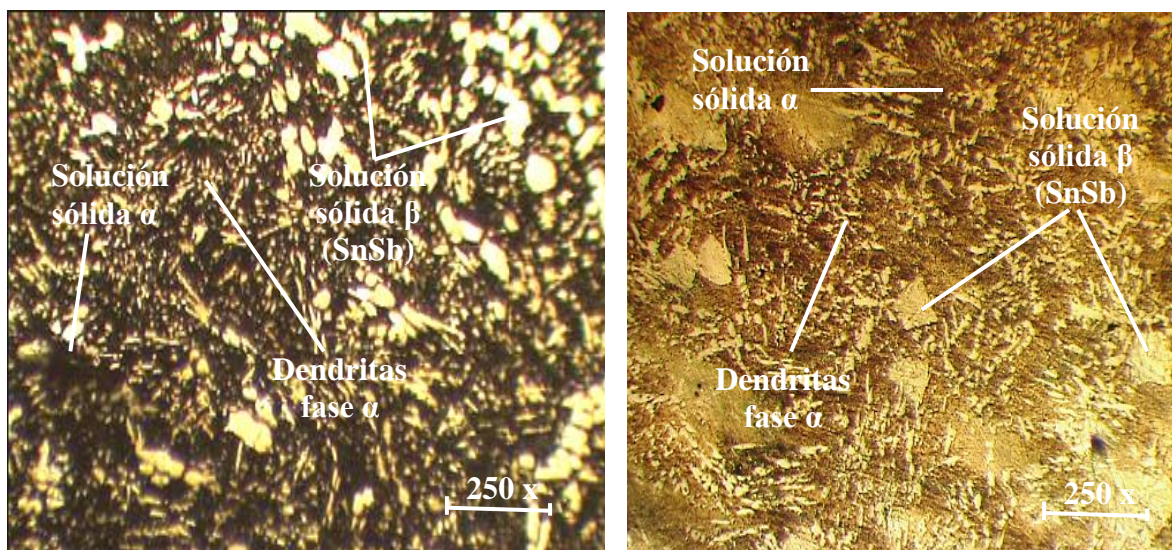


Figura 3.4 (a) y 3.4 (b). Microestructuras del cojinete soldado y maquinado.

Al realizar el análisis metalográfico se puede observar en ambas figuras (luego del proceso de soldadura y maquinado), muestran una estructura similar a la muestra patrón (figura 2.2 (b)) presentada en el capítulo 2, la diferencia está dada que luego de realizar sucesivos pases de soldadura, se ha obtenido la solución sólida β (SnSb) de granos casi esferoidizado, pero además la presencia de dendritas fase α .

En los espacios interdendríticos, aparecen puntos que presumiblemente sea la presencia del constituyente δ , que son el agregado eutectoide ($\alpha + \delta$). Dada la tendencia a estados de no equilibrio, a segregación dendrítica, que el Cu – Sn presenta, el resultado de ello es un desplazamiento hacia la izquierda de la línea del sólido. La tendencia a estado de no equilibrio se advierte en el interior de los granos una diferencia de coloración producida con un mismo ataque químico, el del reactivo empleado para detectar esta estructura

micrográfica. En correspondencia con este resultado se puede plantear que se trata de un bronce de 9 - 11 de Sn.

3.5. Análisis de la microdureza

Para determinar la dureza luego de aplicado el ciclo térmico de soldadura, se analizaron las muestras en cada una de las pasadas realizadas. Se realizaron como mínimo tres mediciones en cada zona. En la tabla 3.1 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3.1. Resultados de la microdureza

| Muestra | HV1 | HV2 | HV3 | HVT |
|---------|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 103 | 101 | 101 | 102 |
| 2 | 99 | 99 | 100 | 99 |
| 3 | 97 | 96 | 95 | 96 |

En los perfiles de dureza realizados y según los resultados que se muestran en la tabla 3.1, se puede plantear que, para un primer proceso de soldadura, hay una dureza de 102 HV, la cual disminuye hasta 96 HV para el último depósito. El material se afecta térmicamente debido al calor de aporte generado por el proceso y como varía la zona afectada térmicamente de acuerdo al proceso, además de que la soldadura multipasadas realiza un efecto de tratamiento térmico sobre el cordón anterior por lo que disminuye la dureza en la zona de dicho cordón.

3.6. Análisis por el método de los elementos finitos

El cambio que sufre la microestructura de las superficies en aleaciones tribológicas dúctiles es fundamental para lograr una reducción en el coeficiente de fricción y el desgaste de componentes tales como cojinetes de deslizamiento. Estos parámetros determinan en gran medida el desempeño y la vida útil de elementos mecánicos en movimiento relativo. Se observa que, aun trabajando con cargas bajas y tiempos cortos, existe una deformación plástica severa alcanzando varios micrómetros de profundidad. Esta tribocapa se forma bajo condiciones extremas de operación estableciéndose una estructura metaestable lograda por las altas presiones de contacto.

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. Se determinó la Tensión de Von Mises, para un mínimo de 35,9574 N/m² y un máximo de 17 046,1 N/m². La figura 3.5 muestra estas tensiones obtenidas.

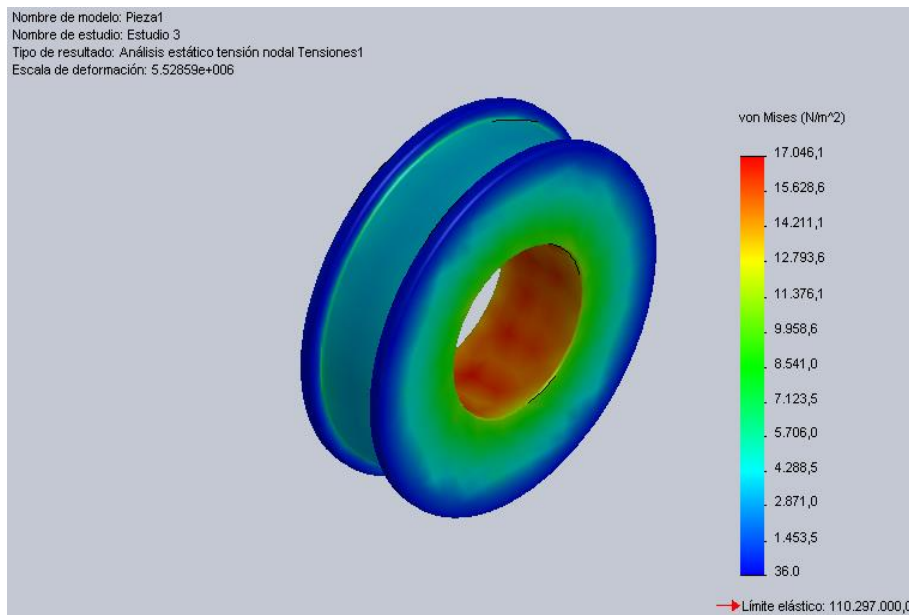


Figura 3.5. Tensiones de Von Mises.

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 en la pista de deslizamiento. Se pueden observar que las tensiones de Von Mises máximas generadas son de 17 046, 1 N/m² en la zona interior del anillo, mientras en la zona de transición las tensiones disminuyen considerablemente.

En la figura 3.5 se indican los esfuerzos que se generan con la carga de 11 536 N que el árbol ejerce sobre el cojinete, suficientes para alcanzar la deformación plástica en el cojinete desde el instante en que comienza la presión. Se observa que los esfuerzos más altos se presentan en la zona de contacto entre el árbol y el cojinete, la cual se da en el centro del área de contacto del cojinete, 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.

Se establecieron los desplazamientos a los que está sujeto el par tribológico como se observa en la figura 3.6. El número de revoluciones del árbol es de 3 600 rev/min, todo el

movimiento alrededor del eje z. Debido a que se permitió el desplazamiento en el eje z durante los giros del árbol, este se desplazará por efecto de la carga de 11 536 N.

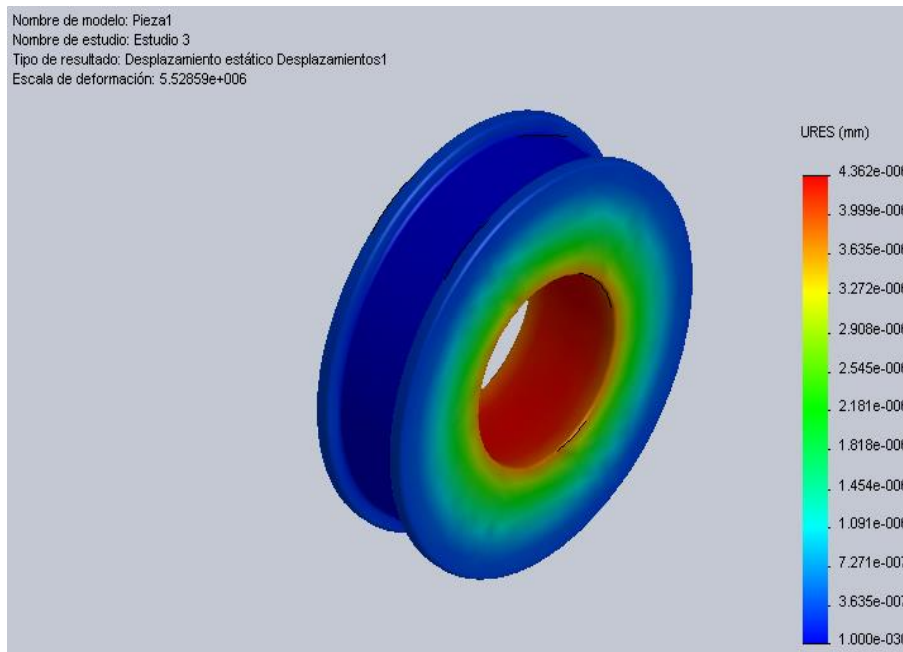


Figura 3.6. Desplazamientos del sistema árbol - cojinete.

Los colores en la figura muestran la magnitud de la deformación de contacto del árbol sobre la pista interna con un desplazamiento de $4,36 \cdot 10^{-6}$ mm. 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.

El código de elementos finitos utilizado condiciona un control de giro solo sobre elementos tipo viga, porque son elementos de dos nodos, uno de ellos rota de forma controlada con respecto al otro. A esta estructura se le aplicará la condición de desplazamiento prescrito en la unión de sus eslabones.

La frecuencia natural es la frecuencia de vibración libre para el sistema. En la frecuencia natural de un sistema no amortiguado, que tiende a vibrar continuamente, con un solo grado de libertad oscilará después de un desplazamiento momentáneo.

Según el resultado obtenido de los desplazamientos, se establece que las superficies son continuas y no conformes y que cada sólido se considera como un semiplano infinito para el cálculo elástico, lo que implica que las dimensiones del área de contacto son pequeñas en

comparación con las dimensiones de cada cuerpo y, además, en relación con los radios de curvatura de las superficies.

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

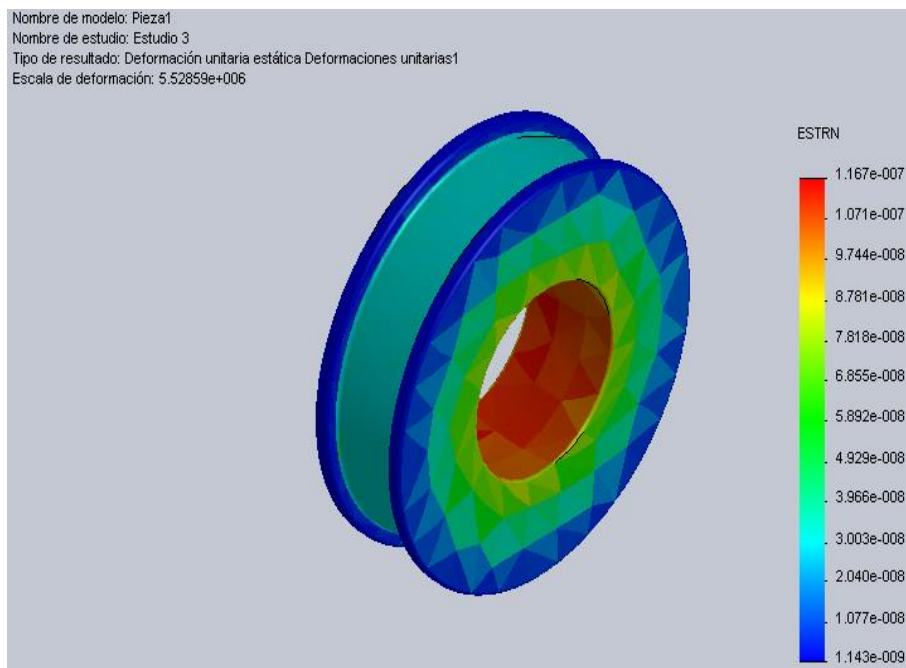


Figura 3.7. Deformación del par tribológico.

En la figura 3.7 se muestra cuando dos cuerpos sólidos entran en contacto en un único punto, bajo la acción de la fuerza que cada uno de ellos ejerce sobre el otro (que suele denominarse “carga”) se deforman en la región del primer contacto. De esta manera, el área de contacto es finita, aunque pequeña comparada con las dimensiones de los dos cuerpos.

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.

3.7. Valoración económica

Para efectuar este análisis debemos resaltar que el desbalance de masa constituye una de las causas principales de fallos que se presentan en la maquinaria industrial provocados por el desgaste desigual que ocurre en piezas y accesorios y que trae consigo altas vibraciones, donde esta es una de las afectaciones más comunes en estos ventiladores.

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 3.2 se muestran los resultados del análisis económico.

Tabla 3.2. Resultados del análisis económico, en CUC

| Gastos de materiales | | | | |
|----------------------|---------------|-------------------------|--------------|--------------|
| No | Materiales | Cantidad | Costos x U | Costos total |
| 1 | Metal babbitt | 2,5 kg | 28,91 | 72,27 |
| 2 | Oxígeno | 76,2 mm ³ /h | 0,07 | 5,05 |
| 3 | Acetileno | 25 mm ³ /h | 0,07 | 1,75 |
| 4 | Electrodo | 0,05 kg | 12,25 | 0,61 |
| Sub total | | | 51,30 | 79,68 |

A esto se le añaden los gastos por concepto de mano de obra directa. La tabla 3.3 muestra estos costos.

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

| Costos de mano de obra | | | | |
|------------------------|-----------------------|----------|---------------|---------------|
| No | Especialidad | \$/horas | Horas trabajo | Costos total |
| 1 | Mecánico taller "A" | 12,08 | 4 | 48,32 |
| 2 | Soldador Homol "A" | 10,75 | 6 | 64,50 |
| 3 | Operador de máquina | 10,75 | 2 | 21,50 |
| 4 | Electricista mtto "A" | 12,58 | 1 | 12,58 |
| Sub total | | | | 146,90 |

Luego de realizado el análisis económico del proceso de recuperación por soldadura oxiacetilénica del cojinete babbitt base bronce fosfórico del tipo ASTM B143-1A, donde se consideró gastos de materiales y gastos de mano de obra, se incurre en un gasto de 226,58

CUC. Por concepto de mantenimiento se incurre en un costo de 440,04 CUC, para un total general de 666,62 CUC.

3.8. Valoración del impacto medio ambiental

En la Industria del Níquel en Cuba resulta de gran aplicación el transporte hidráulico y neumático, diferenciándose la tecnología ácida y la amoniacal. Entre los impactos permanentes causados por la industria en los años de explotación, se encuentra el ácido sulfúrico, que contamina el entorno y en muchos casos contiene componentes tóxicos.

El ácido sulfúrico tiene un alto poder corrosivo, particularmente a concentraciones por debajo de 78 %, además de atacar a muchos metales, este ácido, en su forma concentrada, es un fuerte agente oxidante y puede causar la ignición, al contacto con materiales orgánicos y productos tales como nitratos, carburos, cloratos y reacciona exotérmicamente con agua. Debido a sus propiedades corrosivas, oxidantes y sulforantes, este ácido produce rápida destrucción de los tejidos y graves quemaduras al contacto con los tejidos corporales de cualquier clase.

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. Al ponerse en contacto con la piel o los ojos, el ácido sulfúrico produce graves quemaduras. La inhalación de vapor o rocío concentrado del ácido caliente puede ser dañina para los pulmones. Ingerirlo puede causar graves lesiones o la muerte.

En todos los tipos 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. 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.

3.9. Conclusiones del capítulo 3

- ❖ Al analizar la composición química de la aleación babbitt base estaño se determinó que la red cristalina generada entre el antimonio y el cobre ayuda considerablemente a aumentar la resistencia de la aleación y en el bronce al estaño, es este último el que incrementa la resistencia.
- ❖ Las microestructuras obtenidas han permitido establecer los cambios metalúrgicos del babbitt bronce al estaño (bronce fosfórico) luego de ser soldado mediante el proceso de soldadura con llama oxiacetilénica y proceso de maquinado con arranque de virutas.
- ❖ Se estableció mediante el método de los elementos finitos (MEF) las tensiones de Von Mises, los desplazamientos y las deformaciones que se originan en el par tribológico árbol - cojinete, donde se considera que el primero presenta mayor dureza que el segundo.

Conclusiones generales

- ❖ Durante el proceso de soldadura con llama oxiacetilénica del bronce fosfórico del tipo ASTM B143-1A, la cantidad de calor que recibe la superficie de trabajo, considerado como el área de la longitud de una cicloide, es de 1 164,16 J/s, lo cual fusiona los elementos químicos transformando su microestructura.
- ❖ En los pases sucesivos de soldadura que se realizó en el babbitt bronce, se obtuvo transformaciones de fases del tipo dendritas de fase α primaria (Cu_3Sn), cristales en forma de aguja o estrella, solución sólida β (SnSb), debido al contenido de 86-89 % de cobre, del 9-11 % de estaño y al 0,3 % de plomo, siendo la segunda morfología la que menos resistencia ofrece al cojinete.
- ❖ Se determinó que para un número de revoluciones del árbol de 3 600 rev/min y una carga de 11 536 N, las tensiones de Von Mises máximas generadas son de 17 046, 1 N/m^2 , donde los esfuerzos más altos se presentan en la zona de contacto entre el árbol y el cojinete.
- ❖ Al realizar el análisis económico del proceso de recuperación mediante soldadura oxiacetilénica del cojinete babbitt base bronce fosfórico del tipo ASTM B143-1A, donde se consideró gastos de materiales, gastos de mano de obra y por mantenimiento se incurre en un costo total de 666,62 CUC.



Recomendaciones

- ❖ En caso de establecer otro procedimiento de soldadura, considerar no emplear una aleación babbitt que contenga un 20 % de estaño, ya que si se supera este valor la resistencia se verá afectada y disminuirá, el recomendado es que contenga hasta un 15 % de este elemento.
- ❖ Realizar el proceso de soldadura entre pases de calentamiento y de enfriamiento, ya que la soldadura se lleva a cabo en rangos cortos de alta temperatura y un calor excesivo puede provocar tensiones críticas en el depósito.
- ❖ Considerar en próxima investigación analizar el sistema de lubricación del par tribológico de acuerdo a las condiciones de soldadura realizada en la recuperación del cojinete y las propiedades antifricción que presenta este.

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, 2006 [en línea] mayo 2006, Disponible en: www.ingenierosdelubricación.com
3. Albarracín, A. Tribología y lubricación industrial y automotriz, 976 pp., Tomo I, 3ra. Edición, Colombia, 1996.
4. Al-Beedor, B. Dynamic model of coupled shaft torsional and blade bending deformations in rotors. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Pag:177-190, de 169, College Statio, Texas, 1999.
5. Al-Beedor, B. Modeling the coupled torsional and lateral vibrations of unbalanced rotors, Dynamic model of coupled shaft torsional and blade bending deformations in rotors. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Pag: 5999-6008, de 190, College Station, 2001.
6. Álvarez, G. Tribología, Fricción, Desgaste y Lubricación, 253 pp., Universidad Central de Las Villas (UCLV), monografía, 2002.
7. Artaki, I., Ray, U., Gordon, H. M., & Gervasio, M. S. (1992). Thermal degradation of rosin under high temperature solder reflows. Thermochimica Acta, 7-20.
8. Arzamasov, B.; Brostem, V.; Buche, N. Materiales de construcción. Manual. Bajo la redacción general de B. N. Arzamasov. Moscú. Mashinoestraenie, 1990, 688 páginas.
9. ASM Handbook. Friction, lubrication and wear technology. Ed. Ciudad Vol. 18. 1992. pp. 25-37.
10. Avner, S. Introducción a la metalurgia física. México. McGraw Hill. 1988.
11. Baranov, I. Recuperación de los elementos de máquinas, 2da Edición, Construcción de maquinaria, (en ruso), Moscú, 1999.
12. Barykin, N.; Sadikov, F.; Danilenko, V.; Aslanian, I. Acerca del problema de la estructura del babbit B83. Ciencia de Materiales. 2001. № 8, páginas 24-27.
13. Bhushan, B. Nanotribology and Nanomechanics. An Introduction. Springer, pp. 70-74, 119-120, 315-317, 2005.

14. Chichinadze, A.; Berliner, A.; Berliner, E.; Braun, E. Fricción, desgaste y lubricación (tribología y tribotécnica); Bajo la redacción general de A.V. Chichinadze. Moscú. Mashinoestroyeniye, 2003, 576 páginas.
15. 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 (2008) 970-980.
16. Coronado, J.; Rivas, J.; Gómez, A. Estudio tribológico en chumaceras y ejes de molino de caña de azúcar. Dyna. Vol. 144. 2004. pp. 1-8.
17. Crawford, W.; Myrick, J.; Schumpert, G. Changing and Controlling the "First Critical Speed" of Overhung Centrifugal Fans, de 34th Turbomachinery Symposium, Houston, Texas, 2004.
18. 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.
19. Daquinta, G. Mantenimiento y reparación de la máquina agrícola, Editorial Félix Varela, La Habana, 2008.
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. Dobrovolski. Elementos de Máquinas. Editorial MIR. 1981.
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. Goksenli, A.; Eryurek, I. Failure analysis of an elevator drive shaft, engineering failure analysis 16, 1011-1019, 2009.



27. Gómez, F.; Martínez, R. Cálculo y estudio estructural de las uniones realizadas en Guijos fracturados. Propuesta Tecnológica. UCLV 1999.
28. González, R. 2006. Elementos de Maquinas: Cojinetes de Deslizamiento. Facultad de Ingeniería Mecánica ISPJAE, 2006.
29. 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, Jul-Aug 2013, pp.1061-1066. www.ijera.com.
30. Hellemans, A.; Bunch, B. The timetables of science. Simon & Schuster. pp. 305. 1988.
31. Hetschel, T., Wolter, K.-J.; Phillipp, F. Wettability effects of immersion tin final finishes with lead free solder. 2nd Electronics Systemintegration Technology Conference, (págs. 561-566). Greenwich. 2008.
32. Holguín, C. Caracterización tribológica del par bronce acero AISI 1045 recubierto con soldaduras utilizadas en la recuperación de ejes de molienda. Trabajo de grado. Universidad del Valle. Santiago de Cali. pp. 88-120.
33. Jóvaj, M. Motores de automóvil, Editorial Mir, Moscú, 1987.
34. Jóvaj, M.; Máslov, S. Motores de automóvil, Ed. Pueblo y Educ, La Habana, 1977.
35. Kazanski, V.; Yasikov, A.; Belikova, N. Cojinetes y sistemas de lubricación de turbinas de vapor. 3ra edición corregida y aumentada Cheliabinsk. Tsitsero, 2004, 484 p.
36. Kenneth, A.; James, T.; Wachel, J. Critical Speed Analysis of an Eight - Stage Centrifugal Pump, Second International Pumps Symposium, Houstons, Texas, 1985.
37. Linares, O: Tribología y mantenimiento proactivo, Fundamentos de la lubricación, fricción y el desgaste. Boletín ASME, USA, 2005.
38. Mangonon, P. Ciencia de los materiales selección y diseño. México. Pearson. 1999.
39. Manikov, J. Reparación de automóviles, Segunda Edición Editorial. Construcción de maquinaria, (en ruso), Moscú, 1998.
40. Maratray, F., Recargues por soldaduras resistentes a la abrasión. Disponible en Web World Wide en www.soldadura.com. Consultado en marzo de 2000.
41. Maroef, I.; Olson; D.; Eberhart; M.; Edwards; G. Hidrógeno atrapado en la soldadura de un acero ferrítico. Revisión Internacional de materiales. 47 (4), 191-223. 2002.
42. Martínez, F.; García, A. Algunas recomendaciones en la enseñanza de la Tribología. Revista Cubana de Ingeniería, 2 (2): 11-15, 2011.



43. Moaveni, S. Finite element analysis: theory and application with ANSYS. Pearson Education India. 2003.
44. Moya, L. Algunas Consideraciones Sobre el Diseño, Recuperación y Explotación de los elementos de los Molinos de caña de azúcar. UCLV 2002.
45. Murphy, B. Tripp, H. Vance, J. Critical Speeds of Turbomachinery. Computer Predictions vs Experimental Measurements, de 13th Turbomachinery Symposium, College Station, Texas., 1984.
46. Muszinska, A. Rotordynamics. Chapter 3. Pag: 147-159, Columbus, Ohio. Published by Taylor & Francis, May, 2005.
47. Nikolakopoulos, P.; Papadopoulos, C. A study of friction in worn misaligned journal bearings under severe hydrodynamic lubrication. Tribology International, 41 (6), 461-472, 2008.
48. Orlov, Ingeniería de Diseño, Editorial MIR, Moscú, 1985.
49. Pérez, F. La tribología: ciencia y técnica para el mantenimiento. Ed. Limusa. México D. F., 2002, pp. 9-23.
50. 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.
51. Potekhin, B.; Glushenko, A.; Iliushin, V. Propiedades del babbit marca B83. Tecnología de los Metales. 2006. № 3, páginas 17-22.
52. Reshetov. Elementos de Máquinas. Editorial Pueblo y Educación. 1985.
53. Rivas, J.; Coronado, J.; Gómez, A. Tribological Aspects for the Shafts and Bearings of Sugar Cane Mills. Wear. Vol. 261. 2006. pp. 779-784.
54. Rowe, R.; Jeffeus, L. Manual de Soldadura GMAW (MIG – MAG). Paraninfo Ediciones. España. 2008.
55. Schwibinger, P.; Nordmann, R. The influence of torsional-lateral coupling on the stability behavior of geared rotor systems, Journal of Engineering for gas Turbines and Power 110. Pag: 563-571, College Station, Texas: Published by Turbolab, 1998.
56. Strauss, R. SMT Soldering Handbook. Manchester, Great Britain: Newnes. 1998.



57. Takemoto, T.; Takemoto, M. Reaction of Iron-based Alloys with molten Lead-free Solder. Transactions of JWRI, 131-135, 2004.
58. Vance, J. Rotordynamics of Turbomachinery. Methods of analysis and the equations of rotor motion. Pag: 120-123., College Station, Texas: Published by John Wiley & Sons, Inc, May 1988.
59. Volland, A.; Komzsic, L. Computational techniques of rotor dynamics with the finite element method. Pag: 149-166, Boca Raton, FL.: Published by Taylor & Francis Group. March, 2012.
60. Wasilczuk, M., & Rotta, G. Modeling lubricant flow between thrust-bearing pads. Tribology International, 41(9), 908-913, 2008.
61. 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.