



**RECUPERACIÓN DE COJINETES DESLIZANTES O CASQUETES
POR MEDIO DE REBABITADO CON APORTE DE SOLDADURA
PARA EQUIPOS ROTATIVOS DE EMPRESAS PETROLERAS**

Duvan Felipe Valencia Vera

Informe de prácticas para optar por al título de
Ingeniero Mecánico

Asesor externo
Ingeniero Luis Gabriel Henríquez Castro

Asesor interno
Profesor Edwar Andrés Torres López

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita

(Valencia Vera, 2024) [1]

Referencia [1] D.F. Valencia Vera, “Recuperación de cojinetes deslizantes o casquetes por medio de rebabitado con aporte de soldadura para equipos rotativos de empresas petroleras”, trabajo de grado profesional, pregrado, Universidad de Antioquia, Medellín, 2024.

Estilo IEEE
(2020)



Centro de documentación de ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes
Decano/ director: Julio César Saldarriaga Molina
Jefe Departamento: Pedro León Simanca.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi amada familia, cuyos abrazos han sido mi refugio y sus sonrisas han iluminado mi camino en los momentos más difíciles. Su confianza inquebrantable han sido mi mayor motor para superar cualquier desafío. Cada logro es testimonio de nuestra unión y respaldo incondicional. Este logro no solo es mío, sino nuestro, y lo dedico con todo mi corazón a cada uno de ustedes: mi valiente padre, mi dulce madre y mi extraordinaria hermana.

Agradecimientos

Mi profundo agradecimiento se extiende a la Universidad de Antioquia por brindarme las herramientas para mi formación académica. Agradezco enormemente a mis profesores cuyo conocimiento y orientación fueron fundamentales en mi desarrollo. Además, mi reconocimiento especial a Serviturbinas S.A.S., donde tuve el privilegio de realizar mis prácticas durante seis meses. El apoyo y experiencia proporcionados por este equipo fueron invaluable, permitiéndome aplicar mis conocimientos teóricos en un entorno laboral real. A todos, mi más sincero agradecimiento por su contribución fundamental a este proyecto de grado.

Contenido

| | |
|--|-----------|
| RESUMEN | 7 |
| ABSTRACT | 8 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 9 |
| 2. OBJETIVOS | 11 |
| 2.1. Objetivo general | 11 |
| 2.2. Objetivos específicos | 11 |
| 3. MARCO TEÓRICO..... | 12 |
| 3.1. Máquinas rotativas..... | 12 |
| 3.2. Funcionamiento del babbitt en los componentes..... | 19 |
| 3.3. Aspectos metalúrgicos..... | 21 |
| 3.4. Técnicas de fabricación de cojinetes..... | 22 |
| 3.5. Control de calidad | 25 |
| 3.6. Procedimiento de recuperación Serviturbinas | 28 |
| 4. METODOLOGÍA..... | 30 |
| 4.1. Recopilación de información | 30 |
| 4.2. Tipos de cojinetes | 30 |
| 4.3. Supervisión de pruebas destructivas | 31 |
| 4.4. Recuperación de cojinete | 36 |
| 5. RESULTADOS..... | 45 |
| 5.1. Análisis de pruebas destructivas..... | 45 |
| 5.2. Análisis de recuperación de los cojinetes | 46 |
| 6. CONCLUSIONES..... | 48 |
| 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 49 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Ciclo Brayton. | 12 |
| Figura 2. Álabes guías de entrada (SVT). | 13 |
| Figura 3. a) Ejemplo de álabes fijos y b) montaje en una turbina (SVT). | 13 |
| Figura 4. Discos de turbina. | 14 |
| Figura 5. Álabes rotatorios. | 14 |
| Figura 6. a) Cojinetes de deslizamiento, b) casquete y c) cojinete para turbina (SVT). | 14 |
| Figura 7. Acople Turbina - Generador. | 15 |
| Figura 8. Eje de turbina (SVT). | 15 |
| Figura 9. a) Turbina de gas y b) turbina de vapor. | 15 |
| Figura 10. a) Motor CI Waukesha y b) componentes mecánicos de motores a CI. | 16 |
| Figura 11. a) Biela y b) casquete de biela (SVT). | 17 |
| Figura 12. Cigüeñal. | 17 |
| Figura 13. Cojinetes de motor eléctrico (SVT). | 18 |
| Figura 14. Esquema del motor eléctrico. | 18 |
| Figura 15. Comportamiento del lubricante. | 19 |
| Figura 16. Microestructuras de un cojinete presentando la capa intermedia. | 21 |
| Figura 17. Fundición vertical. | 23 |
| Figura 18. Colada horizontal. | 23 |
| Figura 19. Laser cladding. | 24 |
| Figura 20. Cojinete recuperado por aporte de soldadura. | 24 |
| Figura 21. Proyección térmica. | 25 |
| Figura 22. Pruebas de ultrasonido realizadas en SVT. | 28 |
| Figura 23. Probetas de casquete original. | 34 |
| Figura 24. Probetas de casquete recuperado Serviturbinas. | 35 |
| Figura 25. Inspección inicial de los cojinetes. | 36 |
| Figura 26. Aplicación de líquido colorante a) Cojinete #1 b) Cojinete #2. | 36 |
| Figura 27. Aplicación de revelador a) Cojinete #1 b) Cojinete #2. | 37 |
| Figura 28. Referencia de cojinete elíptico. | 37 |
| Figura 29. Cojinete sin babbitt. | 39 |
| Figura 30. Estañado de los cojinetes. | 39 |
| Figura 31. a) Soldadura por oxiacetile y b) resultado de rebabitado bruto. | 40 |
| Figura 32. Inspección por LP del rebabitado bruto a) Líquidos colorantes b) revelador. | 40 |
| Figura 33. Centrado de cojinetes. | 41 |
| Figura 34. Mecanizado de cojinetes. | 41 |
| Figura 35. Cojinete radial 1 a) LP b) Revelador. | 42 |
| Figura 36. Cojinete radial 2 a) LP b) Revelador. | 42 |
| Figura 37. Prueba de ultrasonido. | 43 |
| Figura 38. Medición de cojinetes. | 43 |
| Figura 39a-b) Liberación de cojinetes y c) embalaje de cojinetes. | 44 |
| Figura 40. Resultado final de los cojinetes. | 45 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Clases según el estándar ISO 4386-3..... | 26 |
| Tabla 2. Tipo de inspección por ultrasonido..... | 27 |
| Tabla 3. Grupos de cojinetes para ultrasonido..... | 27 |
| Tabla 4. Descripción de las partes. | 32 |
| Tabla 5. Composición química de casquete original. | 32 |
| Tabla 6. Dureza casquete original..... | 32 |
| Tabla 7. Dureza de casquete recuperado por Serviturbinas..... | 33 |
| Tabla 8. Análisis metalográfico. | 34 |
| Tabla 9. Prueba de adherencia de casquete original | 35 |
| Tabla 10. Prueba de adherencia de casquete recuperado Serviturbinas. | 35 |
| Tabla 11. Dimensiones de los cojinetes..... | 37 |
| Tabla 12. Medidas finales del cojinete. | 44 |

RESUMEN

El mantenimiento eficiente de maquinaria en la industria petrolera es crucial para prevenir interrupciones no planificadas en las operaciones, generando pérdidas financieras. La compañía Serviturbinas S.A.S., con más de 35 años de experiencia, se especializa en mantenimiento, reparación y re-manufactura de equipos rotativos, aplicando técnicas de soldadura especializada para la recuperación de componentes mecánicos. Su enfoque en ingeniería inversa, y meticuloso control de calidad, garantiza la fidelidad dimensional y funcional de los elementos recuperados. Dentro de los procedimientos críticos, desarrollados por Serviturbinas, se destaca el proceso de recuperación de cojinetes deslizantes y casquetes, conocido como rebabitado. Aunque se emplean diversos métodos como vaciado o metalizado, la empresa es reconocida por utilizar un procedimiento de soldadura, reconocido en Colombia. Esto resuelve el problema de menor unión metalúrgica derivado del empleo de métodos tradicionales, ya que la soldadura proporciona una unión metalúrgica entre los materiales, superior al 95%, lo que conduce a menor riesgo de fallos catastróficos.

El proyecto de práctica en Serviturbinas busca participar en procesos de recuperación por rebabitado de conjunto de cojinetes para turbogeneradores, motores eléctricos o casquetes de biela para motores de combustión interna (según la demanda de la compañía), así como proporcionar recomendaciones y sugerencias de materiales de trabajo. La compañía Serviturbinas comparará, por medio de pruebas destructivas, los componentes recuperados con los componentes originales. El proyecto destacará la importancia de los cojinetes y casquetes, así como su relevancia en máquinas rotativas, tanto en turbinas como en motores de combustión interna y eléctricos. Complementariamente, otro de los ejes centrales de este ejercicio busca comprender los enfoques previos y los materiales utilizados en los casquetes de babbitt.

Palabras clave: Babbitt, confiabilidad, industria petrolera, recuperación, unión metalúrgica.

ABSTRACT

Efficient maintenance of machinery in the oil industry is crucial to prevent unplanned interruptions in operations, generating financial losses. Serviturbinas S.A.S., with more than 35 years of experience, specializes in maintenance, repair and remanufacturing of rotating equipment, applying specialized welding techniques for the recovery of mechanical components. Its focus on reverse engineering and meticulous quality control guarantees the dimensional and functional fidelity of the recovered elements. Among the critical procedures developed by Serviturbines, the recovery process of sliding bearings and bushings, known as reabbabing, stands out. Although several methods are used, such as casting or metallizing, the company is recognized for using a welding procedure, recognized in Colombia. This solves the problem of less metallurgical bonding derived from the use of traditional methods, since welding provides a metallurgical bond between materials, higher than 95%, which leads to less risk of catastrophic failures.

The internship project at Serviturbines aims to participate in recovery processes by regrinding bearing assemblies for turbogenerators, electric motors or connecting rod caps for internal combustion engines (according to the company's demand), as well as to provide recommendations and suggestions for working materials. Serviturbines will compare, by means of destructive testing, the recovered components with the original components. The project will highlight the importance of bearings and bushings, as well as their relevance in rotating machines, both in turbines and in internal combustion and electric engines. Complementarily, another focus of this exercise seeks to understand the previous approaches and materials used in babbitt sockets.

Keywords: Babbitt, reliability, oil industry, recovery, metallurgical jointing.

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la industria petrolera, se observa amplia diversidad de maquinaria, cada una desempeñando funciones específicas en distintas áreas y caracterizadas por diversos niveles de criticidad. Las entidades responsables del mantenimiento desempeñan un rol crucial al asegurar la preservación de dichos equipos. El propósito fundamental del mantenimiento radica en la prevención de interrupciones no planificadas en las operaciones, las cuales conllevan a pérdidas sustanciales en términos de tiempo y recursos financieros, así como una disminución de la eficiencia general de los procesos involucrados.

Con más de 35 años de experiencia, Serviturbinas S.A.S. se destaca por su excelencia en el mantenimiento, reparación y remanufactura de equipos rotativos. Su valor agregado se basa en la aplicación de técnicas de soldadura especializada, que permiten la recuperación de componentes mecánicos como rotores, impulsores, diafragmas, carcasas, entre otros. Más allá de restaurar la funcionalidad de estos elementos, estas técnicas prolongan la vida útil de turbinas a vapor o gas, bombas, compresores, turbocargadores y otros más, contribuyendo al incremento de la eficiencia y confiabilidad operativa de la maquinaria industrial.

Serviturbinas emplea ingeniería inversa para la recuperación de componentes, que culmina en la reconstitución de las piezas a sus dimensiones originales. Incluso, es posible la optimización del material, ya sea por recomendación de Serviturbinas o por petición del cliente. Este proceso se desarrolla a través de un riguroso análisis y control de calidad, para la reconstrucción de los elementos, lo cual asegura la fidelidad dimensional y funcional de las piezas recuperados, con garantías de funcionamiento iguales o mejores las de un componente original.

A lo largo de su trayectoria, la excelencia de sus procesos ha generado un notable reconocimiento por parte de empresas destacadas en Colombia, como Ecopetrol, John Crane, OMIA-SKF, SKF-OMIA, Bioenergy, Cerrejón, Frontera, Siemens, Confipetrol, Masa Stork, entre otras, las cuales permanecen como clientes de la organización. Esta preferencia es un respaldo a la calidad y potencial técnico de Serviturbinas.

Dentro del conjunto de procedimientos críticos de Serviturbinas se destaca el proceso de rebabitado de cojinetes deslizantes y casquetes. Este proceso se lleva a cabo en Colombia mediante diversos métodos como vaciado, *airspray* o metalizado. Sin embargo, en la ejecución del rebabitado, Serviturbinas es singular, ya que se destaca por emplear aporte por soldadura, el cuál es un procedimiento certificado y exclusivo en el país. Es de suma relevancia destacar que, si bien los métodos tradicionales ofrecen ventajas en términos de rapidez, se caracterizan por presentar niveles de unión metalúrgica del metal base y el material de recuperación (metal de aporte) inferiores al 65%. El vaciado, en particular, presenta una unión metalúrgica más baja, cifrada en aproximadamente 30%. Esta problemática en los niveles de unión es un aspecto crítico, ya que no sólo implica problemas en la integridad futura del componente, sino que además trae consigo el riesgo de un colapso

catastrófico en el equipo en caso de falla. La elección de un método de rebabitado, basado en el aporte de soldadura, como el implementado por Serviturbinas, aborda de manera directa este desafío. La soldadura garantiza la unión metalúrgica entre los materiales, asegurando una adherencia mayor al 95%. Esta característica se traduce en mayor longevidad del componente y, lo que es aún más destacado, reduce drásticamente el riesgo de fallos catastróficos.

Como todo proceso de recuperación de componentes críticos, incluyendo el caso de rebabitado por aporte de soldadura, se identifican una serie de retos que deben ser resueltos. Desafíos que serán objeto de análisis posterior y requieren soluciones técnicas complejas de todo el equipo de trabajo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Efectuar el proceso de recuperación de cojinetes deslizantes y/o casquetes con material babbitt especial, para equipos rotativos (Turbogeneradores, motores eléctricos y/o motores a CI), para empresas como Ecopetrol, Bioenergy, Cerrejón u otros clientes.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar una investigación de los procedimientos llevados a cabo por las principales empresas proveedoras y mantenedoras de cojinetes deslizantes.
- Participar activamente en los procesos de recuperación de componentes mecánicos, con un énfasis particular en el proceso de rebabitado de cojinetes deslizantes y/o casquetes.
- Realizar una identificación positiva de material (PMI) del componente de trabajo para emplear un babbitt de características similares durante el proceso de aplicación.
- Llevar a cabo un acompañamiento durante el proceso de soldadura, incluyendo la aplicación de líquidos penetrantes para verificar la calidad de las capas de babbitt resultantes.
- Participar en la verificación metrológica constante a lo largo de todo el procedimiento.
- Brindar apoyo al equipo técnico especializado en torneado durante la ejecución de las operaciones de torneado en los componentes, con el objetivo de llevarlos a las medidas adecuadas.
- Proporcionar un informe técnico para el cliente y para Serviturbinas que documente los procedimientos realizados para la recuperación del componente, con el propósito de construir una memoria histórica y facilitar el aprendizaje.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Máquinas rotativas

Se entiende por máquina rotativa al conjunto de mecanismos capaces de generar, aprovechar o transformar la energía por medio de su rotación. Si la máquina convierte energía mecánica en energía eléctrica se llama generador, mientras que si convierte energía eléctrica en energía mecánica se denomina motor. Esta relación se conoce como principio de conservación de la energía electromecánica.¹ Dentro del ámbito industrial, se emplean una gran variedad de máquinas rotativas. Los modelos aquí presentados proveerán un enfoque general, debido a que abordar cada una en particular sería una tarea que, en lugar de esclarecer, podría confundir al lector. Estos equipos se desempeñan en roles distintos como, por ejemplo, generación de energía con gas o vapor; transporte de petroquímicos; compresión de gases para descarga; movimientos rotatorios en motores reciprocantes; entre otros.²

3.1.1. Turbogeneradores

Un turbogenerador es un equipo que captura la energía cinética proveniente de un fluido específico, como vapor o gases, para convertirla en un movimiento rotativo del propio mecanismo. Las turbinas son máquinas (concretamente turbomáquinas), típicamente empleadas en el dominio de la generación eléctrica, pues transmiten y modifican la energía. La arquitectura elemental de una turbina engloba una serie de álabes -fabricados generalmente en acero- que intervienen en la entrada del fluido hacia la turbina, propulsando su trayectoria. En este proceso, los álabes adquieren un movimiento rotativo inducido por el flujo, capturando parte de su energía. A su paso por la turbina, el fluido pierde energía cinética y es expulsado con menor energía respecto a su estado inicial. Con el objeto de entender cómo se desarrolla el trabajo termodinámico de una turbina, a continuación, se hará una rápida descripción de los pasos básicos de operación de una turbina denominada Ciclo Brayton, el que se describe en la Figura 1.³

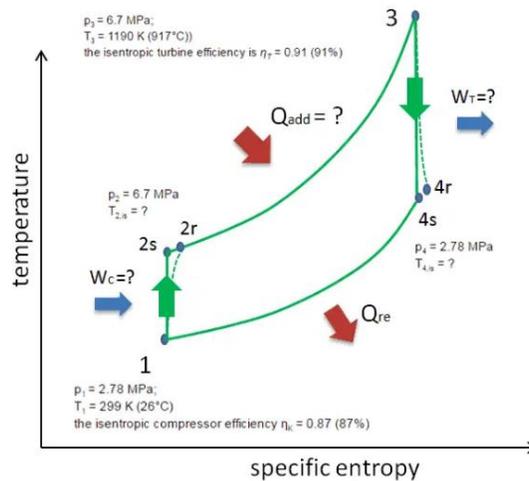


Figura 1. Ciclo Brayton.⁴

El ciclo consiste de cuatro fases: compresión, adición de calor, expansión y expulsión de calor. La cuantificación de la transferencia de calor que se desarrolla durante el ciclo indicará el trabajo que la turbina de gas puede producir.⁵

Pasando a la parte metalmecánica, que es el foco principal del proyecto, los componentes básicos de la turbina son los siguientes:

- **Álabes guías de entrada:** Un anillo de álabes guías (Figura 2) de entrada en turbina, el cual se monta entre la descarga de la sección de combustión y la primera etapa de turbinas. Deben convertir parte de la energía de los gases calientes en energía cinética, al acelerar el flujo cuando el gas incide sobre los álabes de rotor; luego cambia la trayectoria del flujo de gas de tal manera que las fuerzas engendradas en los álabes de la turbina se transformen en potencia para el eje.



Figura 2. Álabes guías de entrada (SVT).

- **Álabes de estátor:** Los álabes de estátor (Figura 3a) son las piezas en forma de perfil aerodinámico (coloquialmente conocidas como palas), las cuales, al interactuar con el gas caliente, producen el torque necesario para impulsar el eje. Los álabes fijos están localizados en el cárter de turbina de tal manera que puedan permitir la dilatación. Los álabes de estátor tienen como misión acelerar la corriente fluida, y canalizarla para descargar con el ángulo óptimo que exija la velocidad del rotor. La forma y posición de los álabes de estátor es tal que actúe en forma de tobera. Un ejemplo del montaje de estos sistemas se presenta en la Figura 3b.

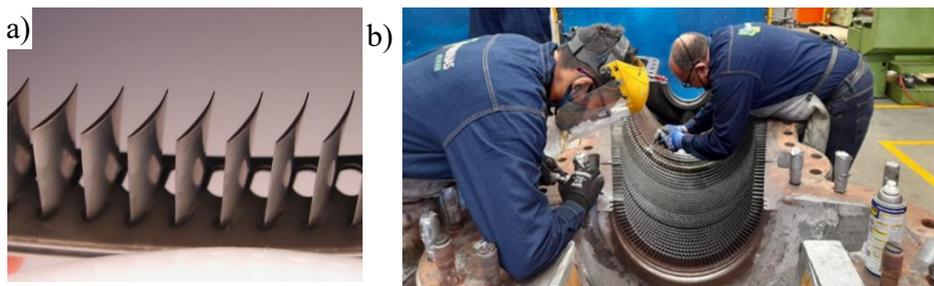


Figura 3. a) Ejemplo de álabes fijos y b) montaje en una turbina (SVT).

- **Discos de turbina:** Es el componente sobre el cual se alojan (instalan) los álabes. Cada etapa tiene un disco, que gira a altas velocidades por la acción del fluido. El método de anclaje más usado en la mayoría de los equipos es el llamado “copa de abeto”. Es importante aclarar que los discos de turbina y su eje están construidos separadamente con aceros de propiedades diferentes. Un ejemplo de estos elementos se observa en la Figura 4.



Figura 4. Discos de turbina.

- **Álabes rotatorios:** El rotor de una turbina axial consiste en una o varias cascadas de álabes unidos a un disco que gira a alta velocidad por la acción del fluido, transmitiendo la energía al compresor mediante el eje común turbina, como se presenta en la Figura 5.



Figura 5. Álabes rotatorios.

- **Cojinetes:** Los cojinetes son componentes que permiten el soporte del sistema rotacional y axial, el cual debe estar apoyado en al menos dos puntos, permitiendo el giro de sus ejes, impidiendo los desplazamientos indebidos. Estos son montados al interior del equipo y a los extremos del rotor. Existen dos tipos de cojinetes: los rodamientos y los cojinetes de deslizamiento (Figura 6a). Los cojinetes de deslizamiento presentan fricción entre una superficie móvil (eje) y otra fija (casquillo), separadas por lubricante. El sistema está compuesto por un soporte y un casquete de metal (Figura 6b), que sirve como elemento de apoyo y deslizamiento. La Figura 6c presenta un ejemplo de cojinete de deslizamiento empleado en turbinas.



Figura 6. a) Cojinetes de deslizamiento, b) casquete y c) cojinete para turbina (SVT).

- **Acoplamiento:** Es un dispositivo que se utiliza para conectar dos ejes en sus extremos con el fin de transmitir potencia. En la Figura 7, se presenta el eje de turbina conectado al eje del generador por medio de un acople.



Figura 7. Acople Turbina - Generador.

- **Eje de turbina:** El eje de turbina asegura la unión entre el rotor de la turbina y acople al generador, como se presenta en la Figura 8.⁶

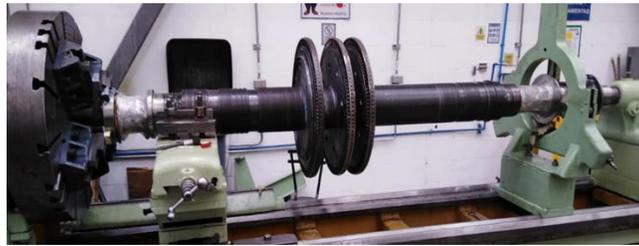


Figura 8. Eje de turbina (SVT).

En conclusión, la Figura 9 ilustra la vista general de cómo se ve una turbina de gas y vapor, destacando cómo estos elementos individuales hacen parte de una maquinaria de extraordinaria complejidad y eficiencia. A través de un análisis minucioso de estos componentes, se logró una comprensión profunda de la vista técnica detrás de estas obras de la ingeniería mecánica, que no solo generan energía, sino que también capturan la esencia misma de la ingeniería.

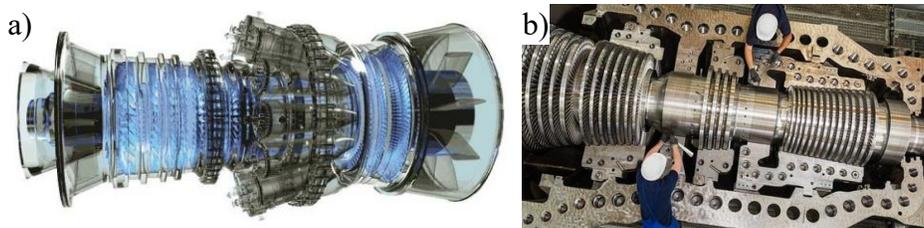


Figura 9. a) Turbina de gas y b) turbina de vapor.

3.1.2. Motores

Un motor es todo aquello que es capaz de generar un cambio en la energía transformando su alrededor. De aquí, que la definición de motor para la Ingeniería Mecánica sea la de equipo o bien parte de un sistema que, por medio de la inyección de cierta energía, ocasione el funcionamiento secuencial de todo el sistema. Desde la visión técnica, se distinguen dos tipos de motores:

- **Motores de combustión interna:** Los que reciben temperatura o explosión y la convierte en movimiento.
- **Motores eléctricos:** Aquellos que reciben electricidad y que la transforman en movimiento.

3.1.2.1. Motores de combustión interna

Los motores de combustión interna son caracterizados por su desplazamiento positivo (o volumétricos), en los que la generación de trabajo se obtiene del movimiento lineal del émbolo, de un mecanismo biela-manivela. La Figura 10a ilustra una vista general de un equipo de estos estilos, vistos en la industria petroquímica y en la Figura 10b el esquema básico de estos motores.

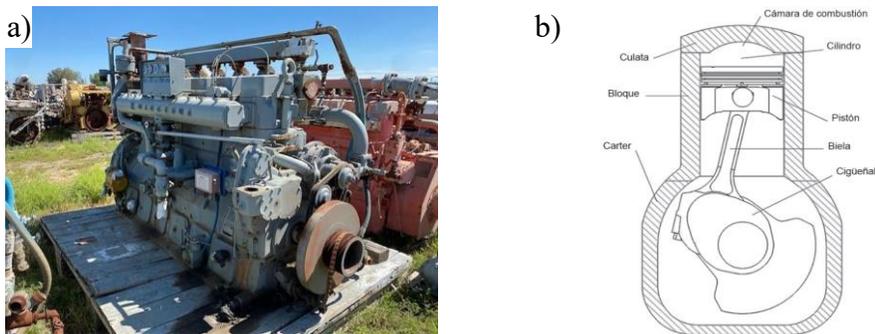


Figura 10. a) Motor CI Waukesha y b) componentes mecánicos de motores a CI.

Los elementos fundamentales que componen la estructura de los motores de combustión interna son los siguientes:⁷

- **El pistón:** Elemento con movimiento rectilíneo alternativo. Es el émbolo del mecanismo biela-manivela y aumenta o disminuye el volumen del cilindro.
- **La cámara de combustión:** Es el volumen que queda por encima del pistón al finalizar la compresión y donde básicamente tiene lugar la combustión de la mezcla.
- **La biela:** Elemento que convierte el movimiento lineal del pistón en el rotativo del cigüeñal (Figura 11a). El casquete de biela (Figura 11a-b) es el que permite el deslizamiento del eje del cigüeñal en la biela.

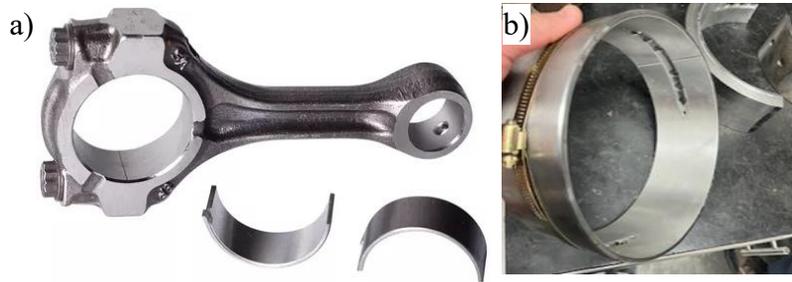


Figura 11. a) Biela y b) casquete de biela (SVT).

- **El cigüeñal:** Es el elemento que transforma el movimiento lineal en rotativo del motor (Figura 12). En él se integra la manivela del mecanismo.



Figura 12. Cigüeñal.

En este tipo de equipos, se pueden encontrar los casquetes de biela como una parte esencial. Estos casquetes también pasan por procesos de recuperación (rebabitado) para asegurar su buen desempeño y su capacidad de manejar las fuerzas y tensiones que surgen durante el funcionamiento.⁸

3.1.2.2. Motores eléctricos

La finalidad de los motores eléctricos es convertir la energía eléctrica, en forma de corriente continua o alterna, en energía mecánica, apta para mover los accionamientos de todo tipo de máquinas. Las eficiencias de los motores eléctricos son en general muy superiores a la de los motores de combustión interna equivalentes. Por ejemplo, un motor Diesel tiene un rendimiento aproximado al 40%, con respecto a un motor eléctrico de similar potencia; además, son mucho más adaptables, silenciosos y menos contaminantes que los motores de vapor o de explosión, gasolina o diésel.

Los motores eléctricos se componen principalmente de dos elementos esenciales: un estator fijo y un rotor móvil; El accionar de los motores se basa en la ley fundamental de los imanes: cargas opuestas se atraen e iguales se repelen. De esta manera, es posible identificar y caracterizar varios de los elementos mecánicos que los integran a continuación:

- **Estator fijo:** Es la parte externa del motor que no gira. está integrado por polos magnéticos (imanes) y un embobinado de alambres de cobre.
- **Rotor móvil:** Es la parte del motor que gira a gran velocidad, debido a la acción de los campos magnéticos creados en el motor, su velocidad de rotación expresada en revoluciones por minuto (r.p.m.).
- **Entrehierro:** Es el espacio constante comprendido entre el rotor y estator.
- **Cojinetes:** El rotor móvil se apoya en cojinetes de rozamiento (Figura 13).



Figura 13. Cojinetes de motor eléctrico (SVT).

En consecuencia, es factible constatar cómo los motores eléctricos incorporan cojinetes que, debido a la acción del tiempo y el deterioro, requieren de un proceso de recuperación para preservar y restaurar su funcionalidad y rendimiento óptimo a lo largo de su vida útil. En la Figura 14, se puede observar el conjunto total del motor eléctrico.⁹



Figura 14. Esquema del motor eléctrico.

3.2. Funcionamiento del babbitt en los componentes

Como explicado con anterioridad, los cojinetes fijos constan de una carcasa y dos casquetes, siendo estos últimos los responsables por soportar las solicitaciones transferidos desde el eje. Estos casquetes son fabricados en distintos materiales metálicos, siendo uno de ellos el denominado como babbitt. El principio básico de los cojinetes y casquetes con la aleación babbitt se basa en la presencia de dos superficies metálicas con diferentes niveles de dureza, las cuales interactúan durante el movimiento de deslizamiento, bajo condiciones de carga y velocidad. Este material, caracterizado por su menor dureza, encuentra su aplicación principal en la función mantener el eje en su posición y actuar como un elemento de sacrificio dentro del sistema, diseñado para identificar de manera evidente cualquier disfunción en el equipo. Este enfoque estratégico tiene como objetivo la prevención de posibles fallos catastróficos en la maquinaria, al permitir una detección temprana y efectiva de anomalías, salvaguardando así la integridad y el rendimiento operativo de la máquina en cuestión.

Las superficies en los cojinetes y casquetes (revestidas con babbitt) y en el eje están separadas por una película de lubricante (usualmente aceite) que se agrega, lo que permite que el componente de carga "flote" y evita el contacto directo entre metales, lo cual es la principal causa de desgaste (Figura 15). El fenómeno que se puede evidenciar en dicha situación es la presión oleostática. Sin embargo, durante el funcionamiento normal de un cojinete y casquete, la película lubricante puede romperse debido a diferentes razones, como desalineación, presencia de partículas extrañas, arranques y paradas en los que la velocidad inicial y final no son suficientes para mantener la presión hidrodinámica necesaria. Cuando ocurre el contacto directo entre metal y metal debido a cualquiera de las causas mencionadas, la superficie más suave tiende a desgastarse, lo que protege la vida útil del componente mecánico más importante, como ejes, bielas, entre otros.¹⁰

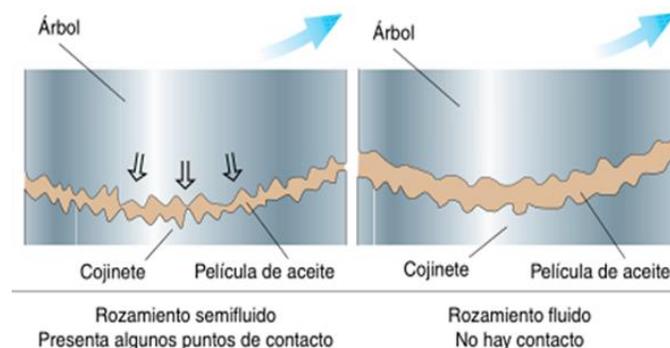


Figura 15. Comportamiento del lubricante.

Las propiedades mecánicas de un material antifricción pueden variar considerablemente según el tipo de aplicación, lo que dificulta la discusión sobre estas propiedades en dicho contexto. Por ende, es más apropiado enfocarse en la composición química del material, ya que esta determina las propiedades pertinentes de manera más precisa.

3.2.1. Babbitt al estaño

El babbitt es una aleación de estaño del cual existen tres variedades: aleaciones de estaño con plomo (menos del 1%), cobre (2 – 6%), níquel y antimonio (4 - 15%). Es relevante destacar que las aleaciones babbitt al estaño poseen propiedades específicas que les permiten satisfacer las necesidades del cliente de la siguiente manera.¹¹

- Temperatura de fusión 630 °C (1166 °F).
- Densidad relativa de 10,04 – 11,25 kg/m³.
- Dureza de 8 – 15 HB a 100 °C.
- Bajo coeficiente de fricción.
- Buena disipación de calor.
- Elevado límite elástico, que permite esfuerzos mayores sin deformación.

Aplicaciones del babbitt al estaño para rebabitado de cojinetes y casquetes son empleados en sectores como la industria de generación eléctrica, cementera y azucarera. Además, es utilizado principalmente para cojinetes de maquinaria grande, como máquinas de vapor de alta velocidad y turbinas de vapor.¹²

En la actualidad, el babbitt al plomo se encuentra desestimado a la producción y restauración de cojinetes antifricción, principalmente debido a consideraciones de índole ambiental y de salud. Estos compuestos solían conferir una mayor capacidad de carga estática, no obstante, su aplicación compleja ha motivado su desuso.

Por su parte, los cojinetes y casquetes con revestimiento de AlSn (babbitt al aluminio) son una alternativa a los cojinetes y casquetes de babbitt al estaño, proporcionando una mayor capacidad de carga a temperaturas elevadas y una mayor resistencia a la fatiga. Son especialmente diseñados para:¹³

- Temperatura de fusión 660 °C (1221 °F).
- Mucho más costosos que el babbitt al estaño.
- Buena disipación de calor.
- Alta conductividad eléctrica y térmica.
- Buena resistencia a la corrosión.
- Dureza 20 HB (100 °C).
- Temperatura máxima de operación de 160 °C.

Aplicaciones del babbitt al aluminio se observan en turbinas de gas para servicio pesado, compresores de alta densidad de rangos de temperatura alrededor de los 311 °F, equipos con cargas cíclicas y las aplicaciones que requieren materiales libres de cobre (lo cual descalifica los babbitts al estaño y al plomo).¹⁴

3.3. Aspectos metalúrgicos

Si la unión metalúrgica entre la capa de material antifricción y el metal base no es consistente, se corre el riesgo de desprendimiento del depósito. En este sentido, se reconocen dos mecanismos fundamentales de unión: el de naturaleza mecánica y el de carácter metalúrgico. En la industria, es común encontrar cojinetes y casquetes que presentan una unión principalmente de naturaleza metalúrgica. Por otro lado, los de unión mecánica carecen de una conexión química entre los metales, dependiendo, en su lugar, de un anclaje mecánico. La unión metalúrgica, la cual se obtiene por medio de procesos de soldadura, se considera más confiable en comparación.

Es esencial tener en cuenta que al soldar un material antifricción sobre el metal base, la unión metalúrgica no se alcanza, ya que el babbitt funde a temperaturas relativamente bajas, generalmente entre 400 y 600 °C, lo cual puede ser insuficiente para lograr la fusión del acero o la difusión atómica. En el proceso de unión metalúrgica se realiza un depósito preliminar, con una preparación superficial adecuada, la cual puede involucrar el uso de pasta, líquidos especiales o estaño puro. Esta capa intermedia es crucial para garantizar la unión metalúrgica apropiada, lo cual se logra gracias a la formación de un compuesto intermetálico entre el acero y el material antifricción, como se ilustra en la Figura 16.



Figura 16. Microestructuras de un cojinete presentando la capa intermedia.

Los casquetes de acero muestran una mayor afinidad con la unión metalúrgica, en gran parte debido a la presencia de ferrita, la cual facilita la formación de una capa de estaño. En consecuencia, se observa una correlación directa entre la presencia de ferrita en el acero y el grado de adhesión del material antifricción al casquete. Estas condiciones favorables tienden a manifestarse con mayor frecuencia en aceros de bajas aleaciones.

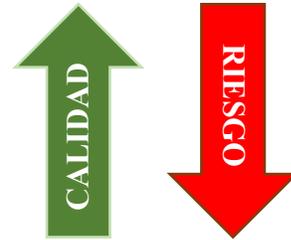
En contraste, los casquetes de bronce (presentes en algunas bombas) pueden ser recuperados, aunque su desempeño en términos de calidad tiende a ser ligeramente inferior al de los casquetes de acero, ya que la unión soldada no alcanza los estándares más altos. A su vez, los casquetes de fundición gris, a pesar de ser una opción más económica que mejoran

los niveles de vibraciones, presentan limitaciones en su proceso de recuperación debido a la dificultad para establecer una unión metalúrgica. Aunque es posible lograr cierto grado de anclaje que muestre un buen resultado en pruebas con líquidos penetrantes, su fiabilidad es cuestionable, situándolos en una categoría de calidad baja.¹⁵

3.4. Técnicas de fabricación de cojinetes

En la industria, se reconocen cinco técnicas para la fabricación de cojinetes, las cuales se describirán detalladamente en esta sección:¹⁶

- Colada centrifugada.
- Laser cladding.
- Soldadura.
- Proyección térmica (*airspray*).
- Colada por gravedad.



3.4.1. Colada centrifugada

El método ampliamente preferido para la fabricación de cojinetes implica un procedimiento de centrifugación. Este proceso envuelve la rotación del cojinete a altas velocidades dentro de una centrifugadora, seguido por el vertido de estaño fundido en el cojinete en rotación. Debido a la inercia generada por la rotación, el fluido se distribuye uniformemente a lo largo de las paredes internas del cojinete, logrando así una adherencia completa a la superficie cilíndrica antes de su posterior enfriamiento. Algunos parámetros importantes de la técnica de colada centrifugada son los siguientes:

- Precalentamiento del casquete (antes de la colada).
- Temperatura de la colada.
- Revoluciones de giro del casquete.
- Velocidad de enfriamiento.
- Posición de vertido.

En la industria se emplean dos técnicas para la colada centrifuga: la colada vertical y la colada horizontal, como se muestra en la Figura 17 y la Figura 18.

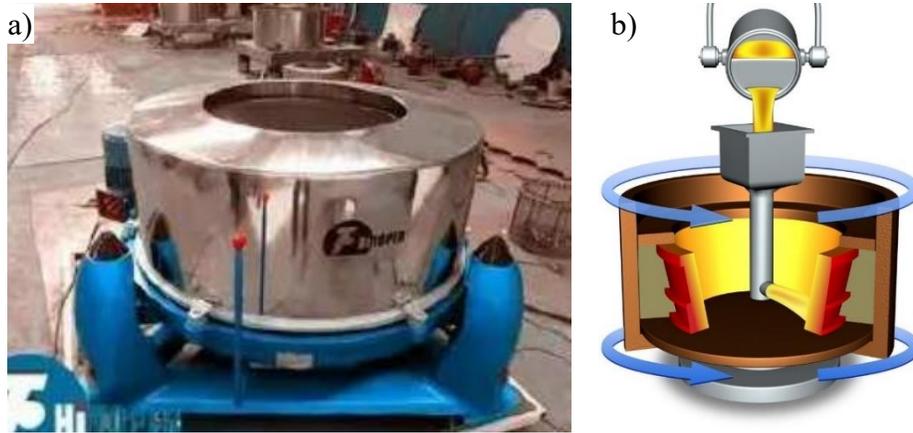


Figura 17. Fundición vertical.

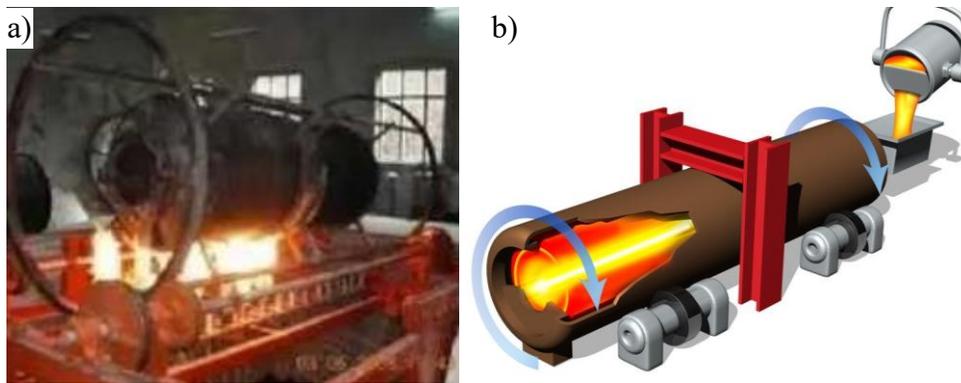


Figura 18. Colada horizontal.

Este método de fabricación se distingue por su capacidad para evitar los problemas típicos asociados con la colada por gravedad, tales como rechupes, burbujas y grietas. En consecuencia, se logra una estabilidad dimensional notable, lo que facilita en gran medida el proceso de mecanizado. Además, el material resultante exhibe una estructura más compacta, lo que contribuye a mejorar su resistencia y durabilidad.

3.4.2. Lase cladding

Esta técnica se reconoce como una técnica basada en soldadura, e implica la fusión efectiva del metal base y el material antifricción sin depósitos preliminares con estaño (Figura 19). Como resultado, se logra una unión metalúrgica robusta y una notable conexión química entre los materiales. Aunque esta tecnología relativamente nueva ha demostrado resultados homogéneos, su aplicación se ve limitada por la dificultad del proceso al fundir el cordón sobre otro cordón, debido a que se sigue fundiendo capa tras capa y para el soldador esto puede estorbar.

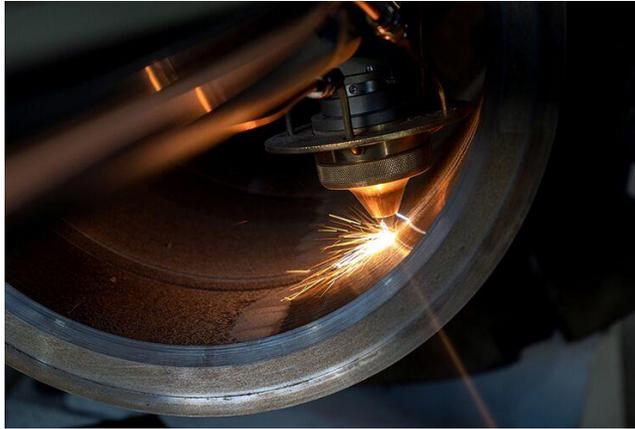


Figura 19. Laser cladding.

3.4.3. Soldadura de arco

Esta técnica es ampliamente empleada y, cuando es ejecutada por un profesional experimentado, puede resultar en una calidad comparable a la obtenida con el método de colada centrifugada, a pesar de requerir una inversión de tiempo mayor. Se recurre habitualmente a métodos de soldadura como SMAW, GTAW o GMAW. Con la elaboración de las pruebas no destructivas (NDT) y pruebas destructivas (DT), dicho proceso de recuperación muestra comportamientos de muy alta calidad (Figura 20).

En este contexto, los parámetros más relevantes para tener en cuenta para la técnica de fabricación de cojinetes por aporte de soldadura son la preparación previa con estañado, la preparación de la superficie, la selección adecuada de los parámetros de soldadura y el metal de aporte, el control de temperatura de deformación de casquetes.



Figura 20. Cojinete recuperado por aporte de soldadura.

3.4.4. Proyección térmica

Esta técnica se basa en el proceso de disposición por plasma no transferido, el cual encuentra una aplicación destacada en el ámbito de la hidroeléctrica, así como en la fabricación de cojinetes con paredes delgadas, ya que su proceso térmico no afecta ni deforma el material delgado (Figura 21). En situaciones donde se requiere anclar materiales delgados, se recomienda implementar colas de milano para garantizar un anclaje mecánico sólido. Aunque los resultados no siempre alcanzan el nivel de excelencia de calidad deseado, este enfoque constituye una solución rápida y funcional para resolver problemas específicos.



Figura 21. Proyección térmica.

Durante el procedimiento, se aplica inicialmente una capa de anclaje, como níquel-aluminio, sobre casquetes de acero, bronce o fundición gris, sin necesidad de recurrir a una capa de estaño previa. Posteriormente, se lleva a cabo el babitado con una rapidez notable, lo que minimiza la afectación térmica de la pieza durante el proceso.

3.4.5. Colada por gravedad

La técnica mencionada se encuentra actualmente en desuso debido a las dificultades inherentes al control de los defectos de la fundición, representando una práctica obsoleta. En esencia, este método implica la fusión del material babbitt, seguido de su vertido vertical en el cojinete en un entorno estático. Sin embargo, este enfoque de recuperación puede ocasionar deformaciones en los casquetes debido a la exposición térmica, además de generar imperfecciones en el material, tales como rechupes, porosidad y, en ciertos casos, grietas potenciales.

3.5. Control de calidad

El control de calidad para la fabricación y recuperación de cojinetes se lleva a cabo mediante el empleo de técnicas de ensayos no destructivos (NDT), como la aplicación de líquidos penetrantes y pruebas de ultrasonido.¹⁷

3.5.1. Líquidos penetrantes

Para asegurar la calidad de los cojinetes con material antifricción, se requiere realizar una inspección utilizando líquidos penetrantes. Esta práctica se rige por las directrices establecidas en la norma ASTM E 165-92: Método de Ensayo Estándar para Examen con Líquidos Penetrantes, así como en la norma ISO 4386-3. Ambos estándares definen pautas para la identificación y evaluación de indicaciones (discontinuidades o defectos), lo que define si el componente es apto para su uso o si debe ser rechazado, por medio de los denominados criterios de aceptación. En particular, la norma ISO clasifica los criterios de aceptación en cinco niveles de criticidad del elemento, siendo la clase A la categoría más rigurosa, detallada en la Tabla 1.

| Clase | Marcas redondeadas | Marcas lineales | Marcas alineadas | Marcas permitidas | Área total de marcas |
|-------|--------------------|------------------|-------------------|--|--|
| A | Ninguna a > 3 mm | Ninguna | Ninguna | 2 con un total de 6,3 mm ² | 10 mm ² por cada dm ² |
| B | Ninguna a > 4 mm | Ninguna | Ninguna | 4 con un total de 16 mm ² | 20 mm ² por cada dm ² |
| C | Ninguna a > 5 mm | Ninguna | Ninguna | 6 con un total de 40 mm ² | 50 mm ² por cada dm ² |
| D | Ninguna a > 6 mm | Ninguna | Ninguna l > 10 mm | 11 con un total de 100 mm ² | 125 mm ² por cada dm ² |
| E | Ninguna a > 8 mm | Ninguna a > 7 mm | Ninguna l > 16 mm | 20 con un total de 250 mm ² | 250 mm ² por cada dm ² |

Tabla 1. Clases según el estándar ISO 4386-3.

Anteriormente no era posible para un cliente exigir una rigurosidad de clase A, pues era esencial realizar una evaluación detallada del componente en cuestión para determinar la clasificación más adecuada en función de su tipo y características específicas como por ejemplo los siguientes parámetros:

- Tipo de cojinete.
- Cojinete nuevo o recuperado.
- Material del casquete.
- Material del antifricción.
- Grosor del casquete.

Este enfoque garantizaba una clasificación precisa y coherente, lo que conducía a una mayor fiabilidad en la evaluación de la calidad y el rendimiento del componente.

En la práctica actual, se establece un acuerdo claro y mutuo entre el cliente y el proveedor con respecto a la clasificación de calidad de los componentes. Esta comunicación fluida y colaborativa asegura que ambas partes comprendan y acepten los criterios de clasificación aplicables, lo que a su vez fomenta una evaluación precisa y consistente de la

calidad de los productos. Al promover la transparencia y la cooperación, se logra un proceso de clasificación más efectivo que se alinea con las expectativas y requisitos de todas las partes involucradas.

3.5.2. Prueba de ultrasonido

Para llevar a cabo pruebas de ultrasonido, es necesario seguir las pautas establecidas por las normas ASME, específicamente la sección V, artículo 5, así como la norma ISO 4386-1. La norma ISO define tres clasificaciones distintas para los cojinetes, que no se relacionan directamente con la calidad, sino con el tipo de inspección requerida. Estas clasificaciones se detallan en la Tabla 2.

| Clase de inspección | Característica |
|---------------------|---|
| Clase 1 | Inspección completa de todos los bordes de la zona de contacto, tanto en los extremos como en las mitades. Inspección por puntos en la zona de contacto |
| Clase 2 | Inspección completa de todos los bordes de la zona de contacto, tanto en los extremos como en las mitades. Además, inspección completa de las zonas de máxima carga (parte inferior, entre ángulos de 60° y 120°) |
| Clase 3 | Inspección completa en toda la superficie, Solapamiento entre pasadas del palpador del 20% |

Tabla 2. Tipo de inspección por ultrasonido.

En lo referente a los defectos, la Tabla 3 indica los límites permitidos de discontinuidades y la cantidad de desprendimiento de material. El grupo A permite 0% de desprendimiento, mientras que el grupo D permite hasta un 5% de desprendimiento. Estos parámetros son fundamentales para evaluar la integridad y la calidad de los cojinetes durante el proceso de inspección por ultrasonido.

| Grupos de defectos | Dimensiones máximas por defectos | Defect máximo total |
|--------------------|----------------------------------|---------------------|
| | mm^2 | % |
| A | 0 | 0 |
| B1 | $0.75a^a$ | 1 |
| B2 | $2a^a$ | 1 |
| C | $2a^a$ | 2 |
| D | $4a^a$ | 5 |

a. la anchura *a*, en milímetros, representa, en el caso de los cojinetes de deslizamiento, la longitud cilíndrica funcional y, en el caso de los segmentos o anillos de empuje, la distancia entre el diámetro interior y el exterior. La suma de los defectos individuales no puede superar el tamaño máximo total del defecto.

Tabla 3. Grupos de cojinetes para ultrasonido.

El ensayo de ultrasonido (Figura 22) desempeña un papel crucial en la verificación de discontinuidades internas en la estructura del babbitt. Este método utiliza ondas de sonido de

alta frecuencia para penetrar en el material y generar un registro visual en una pantalla, que revela la ubicación exacta de cualquier cavitación o porosidad presentes en el babbitt. Además de permitir la identificación de discontinuidades internas, el ensayo de ultrasonido también permite una evaluación precisa de la profundidad de estas imperfecciones, lo que resulta vital para determinar la integridad y la calidad del componente. Estos hallazgos proporcionan información crucial para tomar decisiones fundamentales sobre la liberación o el rechazo del componente, garantizando la seguridad y el rendimiento óptimo del cojinete reparado en su futura aplicación.



Figura 22. Pruebas de ultrasonido realizadas en SVT.

3.6. Procedimiento de recuperación Serviturbinas

Serviturbinas, con una trayectoria de 35 años, ostenta un dominio profundo en el ámbito de los procesos de recuperación de cojinetes y casquetes. Estas prácticas se encuentran certificadas por Bureau Veritas y con el respaldo de empresas de renombre como Ecopetrol, Bioenergy, Cerrejon, John Crane, entre otros actores destacados en la industria petrolera.

A continuación, se desglosa las fases del proceso de recuperación de los cojinetes y casquetes:

1. Limpieza meticulosa del componente mediante técnicas de abrasión como *sandblasting*, *glassblasting* u otro método abrasivo pertinente, según las directrices de los especialistas.
2. Identificación positiva del material (PMI) para determinar la composición química de los casquetes. En algunos casos, se realiza un análisis metalográfico que permite la identificación de la microestructura y la detección de posibles tratamientos térmicos previos. Estos análisis son aplicados tanto al casquete como al babbitt original.
3. Remoción del babbitt antiguo por extracción mecánica, aunque también es posible empleando calor, cuando es factible. En ciertos escenarios, se diseña un dispositivo a

medida para sujetar el cojinete o casquete al torno, lo cual puede estar motivado por la geometría del casquete o por deformaciones presentes en ese componente.

4. Aplicación de una base de estaño en el componente (enmantequillado), el cual es un paso fundamental, pues favorece la unión metalúrgica entre el babbitt y el acero.
5. Rehabitado mediante el proceso de depósito por soldadura, el cual restituye la capa antifricción (babbitt), cordón a cordón, sobre la superficie preparada del casquete. Se emplea el proceso de soldadura por arco de tungsteno con gas de protección (GTAW, gas tungsten arc welding) de modo autógeno o con aporte, empleando argón como gas protección. Para la aplicación de la recuperación por soldadura, se emplean procedimientos de soldadura calificados (WPS) y desarrollados a lo largo del tiempo, que han servido para cumplir con los procedimientos de recuperación de diferentes componentes. En caso de no contar con un WPS, que se pueda adaptar a un nuevo proyecto, Serviturbinas cuenta con la capacidad, el conocimiento y los recursos, para diligenciar y proporcionar un estándar de soldadura (WPS) adecuado.
6. Inspección a los depósitos mediante ensayos no destructivos (END), tanto durante como al final del proceso de recuperación (rehabitado). Se ejecutan los controles de calidad rigurosos, con el propósito de asegurar cero reprocesos por presencia de defectos derivados de la aplicación del revestimiento por soldadura, pero también por errores durante el mecanizado. Esto reduce los tiempos de reparación y aumenta la confiabilidad operativa, logrando así una “unión metalúrgica” superior al 95%. Para validar estos controles, se emplean pruebas recurrentes de inspección visual, líquidos penetrantes y ultrasonido.
7. Proceso de mecanizado, el cual apunta a llevar el componente a sus dimensiones y tolerancias precisas. Esta etapa, como la del depósito de recuperación, también es rigurosamente evaluada, para evitar errores de dimensionamiento o la generación de defectos que reduzcan la vida útil del componente recuperado.
8. Una vez que el componente ha sido restaurado en términos de dimensiones, tolerancias y acabados, se procede a la ejecución de ensayos no destructivos. Estos son realizados por inspectores de Serviturbinas calificados según los estándares AWS Welding Inspectors QC1-96 y NDT nivel II, y abarcan pruebas de líquidos penetrantes, ultrasonido, inspección dimensional, embalaje y verificación de salida.
9. Para finalizar con el proceso de entrega del componente recuperado de manera adecuada, se procede al desarrollo de un informe técnico dirigido al cliente. Este informe es fundamental tanto para el cliente, pues el necesita la documentación para sustentar el mantenimiento realizado; como para Serviturbinas, ya que desempeña un papel crucial en la construcción de una memoria histórica que documenta los procedimientos llevados a cabo. Además, facilita el aprendizaje y la corrección de posibles decisiones erróneas que pudieran haberse tomado en el transcurso del proyecto, en aras de mejorar aún más la eficacia y calidad operativa.

4. METODOLOGÍA

El enfoque de este proyecto, en el marco del semestre de industria, radica en la ejecución del proceso de rebabitado de cojinetes deslizantes aplicados a turbinas y motores o casquetes de biela. Por ende, se realizará el acompañamiento al proceso completo de recuperación de un sistema de cojinetes o casquetes, abarcando desde la identificación del proyecto, hasta la entrega formal de los componentes recuperados. Este proceso de recuperación ofrece a los clientes la ventaja de disminuir costos y tiempos de entrega, al recibir productos remanufacturados que mantienen la misma garantía que los componentes nuevos. Todos los desafíos adyacentes a estos proyectos serán exhaustivamente evaluados y analizados durante el desarrollo de esta iniciativa práctica.

En el contexto de este proyecto en particular, se llevaron a cabo pruebas de validación destructivas de un casquete de biela Waukesha con el objetivo de evaluar su resistencia y comportamiento bajo condiciones extremas. Posteriormente, en la etapa de recuperación del sistema, se optó por la implementación de un cojinete radial de turbina como componente de interés.

4.1. Recopilación de información

En las primeras fases del proyecto, se llevó a cabo una recolección de información. Esto incluye establecer un panorama de los tipos de cojinetes deslizantes y casquetes, así como las aleaciones babbitt utilizadas y los procesos de recuperación empleados.

4.2. Tipos de cojinetes

Seviturbinas está involucrado en el mantenimiento y recuperación de varios tipos de cojinetes deslizantes, cada uno con geometrías y características específicas. A continuación una breve descripción de los diferentes tipos de componentes que se manejan:

- Cojinetes de turbogeneradores: diseñados para soportar cargas pesadas y altas temperaturas.
- Bushings de turbinas: estos componentes de buje tienen la función de proporcionar un soporte y una superficie de deslizamiento para partes giratorias en turbinas, asegurando una operación suave y eficiente.
- Cojinetes de motores eléctricos: proporcionan soporte y reducen la fricción durante el funcionamiento, lo que garantiza un rendimiento óptimo y una vida útil prolongada del motor.
- Cojinetes de bombas grandes: se emplean en sistemas de bombeo de gran escala para facilitar el movimiento de las piezas giratorias y garantizar un funcionamiento eficiente y confiable de las bombas.

- Casquetes de biela de motores de combustión: estos casquetes desempeñan un papel vital en los motores de combustión al proporcionar un soporte de baja fricción para las bielas, permitiendo un movimiento suave y eficiente de las piezas móviles del motor.

4.2.1. Informes técnicos

Es valioso saber que Serviturbinas ha acumulado una extensa base de datos a lo largo de más de 100 proyectos de recuperación de cojinetes, abarcando una amplia variedad de tipos, cantidades y requisitos específicos. Esta valiosa colección de datos ha sido crucial para adquirir un entendimiento profundo y detallado del proceso, lo que a su vez ha facilitado una visión más clara y precisa de los procedimientos operativos. Al aprovechar esta sólida base de conocimientos, Serviturbinas ha logrado mejorar la eficacia y la precisión de sus actividades prácticas, lo que ha contribuido de manera significativa al éxito y la excelencia en sus proyectos de recuperación de cojinetes.

4.2.2. Apoyo en el equipo de trabajo

La colaboración estrecha con el equipo de trabajo resultó de gran importancia para este proyecto, dada la naturaleza multidisciplinaria de los especialistas involucrados, quienes aportaron su vasta experiencia acumulada a lo largo de los años. Este intercambio de conocimientos y experiencia fue fundamental para adquirir nuevos aprendizajes significativos, los cuales pudieron ser implementados de manera efectiva en el desarrollo y ejecución exitosa del presente proyecto.

4.3. Supervisión de pruebas destructivas

En esta etapa del proyecto, se procedió a revisar y analizar las pruebas destructivas (DT), recomendadas por el cliente (Ecopetrol), de la mano de un equipo experimentado de Serviturbinas, el cual se compone de especialistas certificados como inspectores de calidad nivel II y III. Aunque los cojinetes deslizantes y casquetes recuperados por Serviturbinas han sido previamente requeridos por el cliente y otras empresas petroleras, la validación de dicho proceso por una empresa tan importante como el cliente, confiere un significativo valor agregado a la empresa. Esta evaluación no solo respalda la calidad de los procesos llevados a cabo, sino que también facilita la presentación de los servicios de Serviturbinas ante potenciales nuevos clientes. Asimismo, esta validación otorga la posibilidad de considerar la implementación de componentes recuperados por Serviturbinas en equipos mucho más críticos, ampliando el portafolio de la empresa y consolidando la confiabilidad de los servicios proporcionados por la empresa en el ámbito de la industria petrolera.

Las pruebas destructivas subsiguientes se llevaron a cabo en un casquete de biela Waukesha original y en otro casquete recuperado por Serviturbinas, como se detallan en la Tabla 4.

| ítem | | Descripción | Imagen | Ensayos |
|------|--|-----------------------------------|--|--------------------------------------|
| 1 | | Casquete original |  | Adherencia Dureza Metalografía |
| 2 | | Casquete recuperado Serviturbinas |  | Adherencia Dureza Metalografía |

Tabla 4. Descripción de las partes.

Es fundamental resaltar que el casquete Waukesha no fue sometido a un análisis metalográfico ni a un análisis de identificación de material (PMI), dado que se contaba con información previa sobre su composición, la cual se identificó como una base de aluminio, tal y como se detalla en la Tabla 5.

| Al | Sn | Cu | Si | Fe | Ti | Zn | V | Cr | Pb | Cd | Zr |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|
| 94,8 | 3,715 | 0,587 | 0,438 | 0,046 | 0,045 | 0,02 | 0,019 | 0,015 | 0,011 | 0,01 | 0,001 |

Tabla 5. Composición química de casquete original.

4.3.1. Ensayo de dureza

Las mediciones se llevaron a cabo utilizando la escala Vickers, la cual es comúnmente empleada para evaluar la dureza de materiales metálicos. Los resultados del casquete original se presentan detalladamente en la Tabla 6 para su posterior análisis y comparación.

| Casquete original | | | | | | | |
|-------------------|----|----|----|----|------|-------|---------|
| Escala | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Prom. | Rango |
| HV0,5 | 43 | 42 | 43 | 39 | 41,6 | 41,6 | 39 - 43 |

Tabla 6. Dureza casquete original.

En el caso del casquete recuperado por Serviturbinas, se emplea babbitt de grado 3, el cual se caracteriza por su contenido de estaño, antimonio, cobre y trazas de plomo. Este material exhibe una dureza que oscila entre 27 y 32 HV, según la norma ASTM B23-20. De igual manera, luego de realizar los ensayos se obtuvieron los resultados observados en la Tabla 7.

| Casquete recuperado SVT | | | | | | | |
|-------------------------|----|----|----|----|----|-------|---------|
| Escala | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Prom. | Rango |
| HV0,5 | 37 | 36 | 35 | 36 | 37 | 36,2 | 35 - 37 |

Tabla 7. Dureza de casquete recuperado por Serviturbinas.

Por tanto, los valores alcanzados están ligeramente por debajo de los medidos en el casquete original, pero se encuentran en el rango definido en el estándar ASTM B23-20.

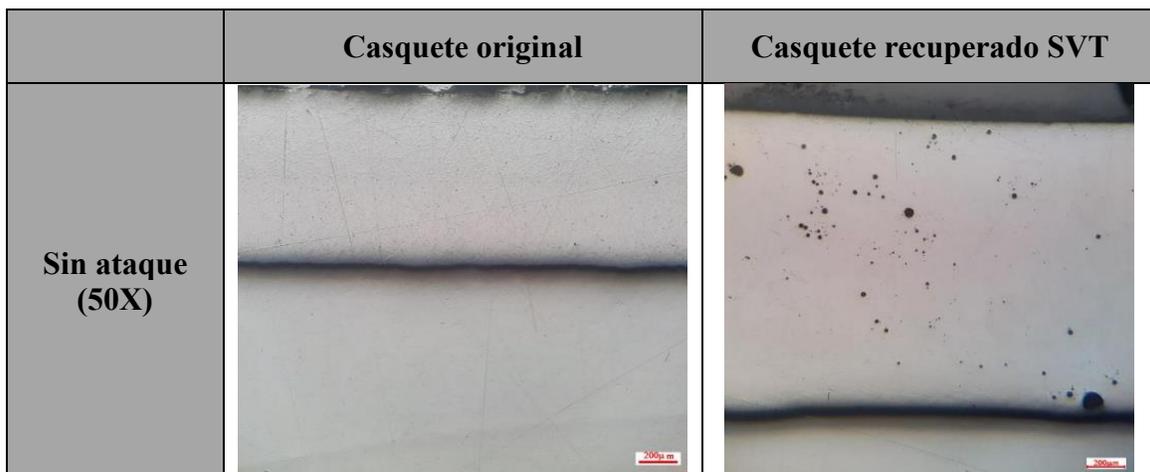
4.3.2. Análisis metalográfico

Se ejecuta un proceso de pulido y lapeado en los cortes de ambos casquillos con el fin de revelar y analizar la presencia de las distintas capas y su microestructura. Este procedimiento permite una visualización más detallada y clara de las características internas de los casquillos y esta detallado en la Tabla 8.

En las imágenes del casquete sin ataque en la pieza original se observa un metal homogéneo, sin discontinuidades lineales o volumétricas, mientras en el sistema reparada es clara la presencia de discontinuidades volumétricas del tipo porosidades.

En el análisis microestructural con ataque en el casquete original, se detecta la presencia de deformación, tanto en la estructura de perlita como en la de ferrita, lo cual puede explicar la diferencia en los resultados de dureza. Respecto al casquete recuperado por Serviturbinas, se identifica una microestructura granular, predominantemente compuesta por ferrita y con una proporción reducida de perlita.

En relación a ambos casquetes, se distinguen tres zonas distintas: una capa ubicada en la interfaz entre el acero y el babbitt, una capa central conformada por babbitt y otra capa en la superficie del material.



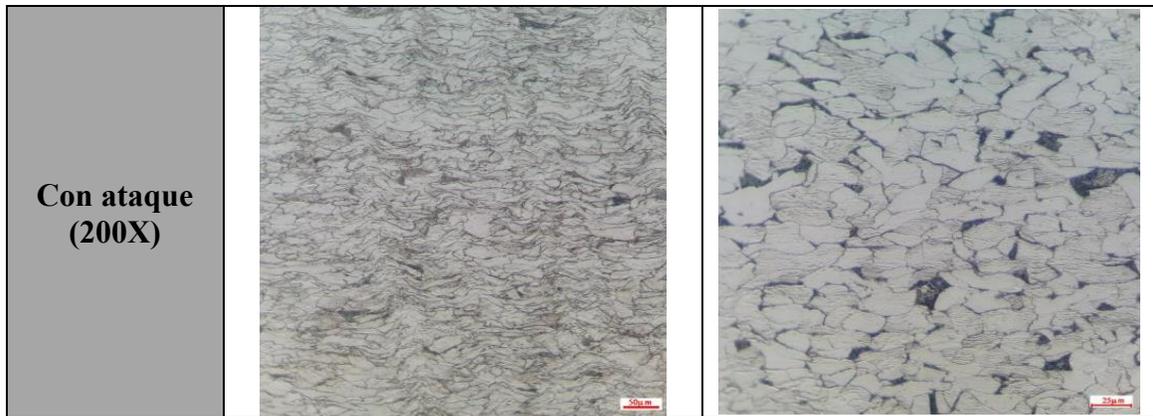


Tabla 8. Análisis metalográfico.

4.3.3. Pruebas de desprendimiento de material

Según datos técnicos, la tensión máxima del material oscila entre 2600 psi (18 MPa) y 13000 psi (90 MPa). Para precisar este valor, se requirió una evaluación distinta, sugiriéndose el ensayo presentado en el artículo de Wei (2018) titulado "Microestructura and bonding strength of tin-based babbitt alloy on ASTM 1045 steel by MIG arc Brazing, Journal of Adhesion Science and Technology". Este análisis somete la unión entre el babbitt y el casquete a tensiones de tracción para su medición y evaluación.

Previamente al ensayo de punzonado, el material se somete a un precalentamiento de aproximadamente 100 °C, alcanzando una temperatura cercana a los 90 °C durante la ejecución del ensayo. Esta medida tiene como objetivo simular las condiciones operativas del componente, garantizando que las condiciones térmicas reflejen de manera adecuada el entorno de trabajo al que estará expuesto.

Iniciando por el casquete original, donde las probetas usadas se pueden observar en la Figura 23, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 9.

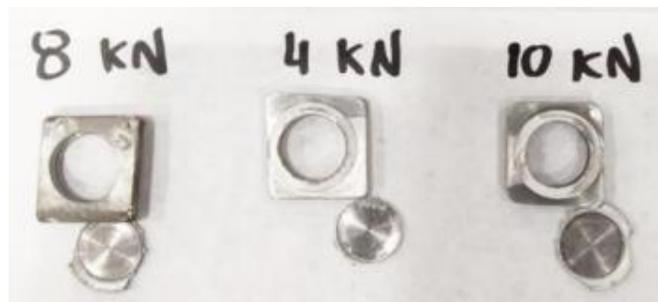


Figura 23. Probetas de casquete original.

| Casquete original | | | |
|--------------------------|------------------|-----------------------------------|---------------------|
| Probeta | Fuerza | Esfuerzo kN/mm² | Esfuerzo psi |
| 1 | 8 kN | 0,055 | 7977 |
| 2 | 4 kN | 0,028 | 3993 |
| 3 | 10 kN | 0,069 | 9978 |
| Promedio | 7.3 kN | 0,0504 | 7316 |
| Rango | 4 – 10 kN | 0,028 – 0,069 | 3993 - 9978 |

Tabla 9. Prueba de adherencia de casquete original

Se observa que la máxima adherencia o resistencia promedio registrada alcanzó los 7316 psi o 0,0504 kN/mm². Este valor representa la resistencia media de la unión entre los materiales evaluados.

Por otra parte, los casquetes recuperados de Serviturbinas, se sometieron a la misma prueba de punzonado, tres muestras del casquete recuperado (Figura 24), siguiendo el mismo procedimiento y empleando los parámetros y temperaturas idénticas a los utilizados en el tratamiento del casquillo original. Los resultados fueron registrados en la Tabla 10.



Figura 24. Probetas de casquete recuperado Serviturbinas.

| Casquete recuperado SVT | | | |
|--------------------------------|------------------|-----------------------------------|---------------------|
| Probeta | Fuerza | Esfuerzo kN/mm² | Esfuerzo psi |
| 1 | 13 kN | 0,0895 | 12981 |
| 2 | 6 kN | 0,041 | 5947 |
| 3 | 7 kN | 0,048 | 6962 |
| Promedio | 8.7 kN | 0,060 | 8702 |
| Rango | 6 – 13 kN | 0,041 – 0,0895 | 5947 - 12981 |

Tabla 10. Prueba de adherencia de casquete recuperado Serviturbinas.

Se observa que la máxima adherencia o resistencia promedio registrada alcanzó los 8702 psi o 0,06 kN/mm². Este valor representa la fortaleza media de la unión entre los materiales evaluados.

4.4. Recuperación de cojinete

Durante la fase de ejecución del proyecto, se tuvo en cuenta dos cojinetes radiales de turbina a gas proveniente del campo Cusiana de Ecopetrol. Esta iniciativa representó un desafío significativo para Serviturbinas, ya que se requirió llevar a cabo la recuperación de los componentes en un tiempo reducido, de menos de una semana. A pesar de las exigentes restricciones temporales, el equipo logró cumplir con éxito esta demanda, destacando así su capacidad operativa y eficiencia en la ejecución del proyecto.

4.4.1. Inspección inicial

Al recibir los cojinetes, se observó la presencia de marcas de fricción y rayaduras en las áreas internas de ambos cojinetes. Además, se identificó un desgaste en forma de erosión con pérdida de babbitt en las mitades inferiores como se puede observar en la Figura 25. Esta condición resultó en un desajuste en las dimensiones del cojinete, evidenciando la necesidad clara de intervención debido a la pérdida de tolerancia operativa del sistema.



Figura 25. Inspección inicial de los cojinetes.

4.4.2. Ensayos no destructivos

A continuación, se llevaron a cabo pruebas no destructivas (NDT). Bajo la recomendación del especialista, se consideró suficiente la aplicación de la prueba de líquidos penetrantes, dado el evidente deterioro de los cojinetes (Figura 26 y Figura 27).

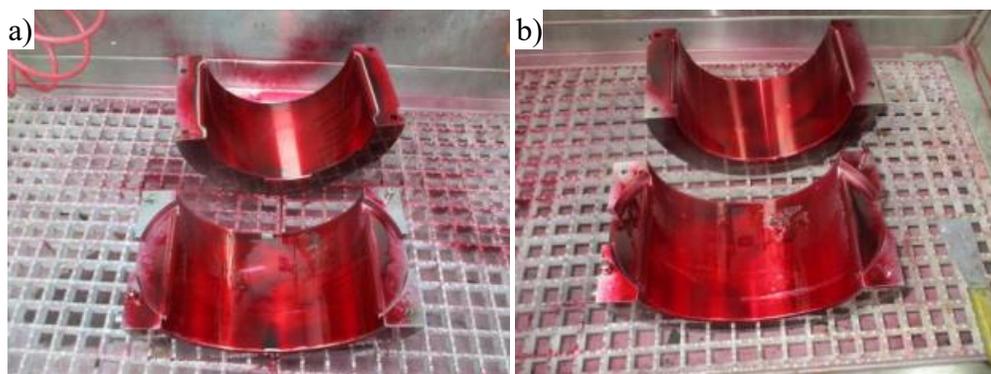


Figura 26. Aplicación de líquido colorante a) Cojinete #1 b) Cojinete #2

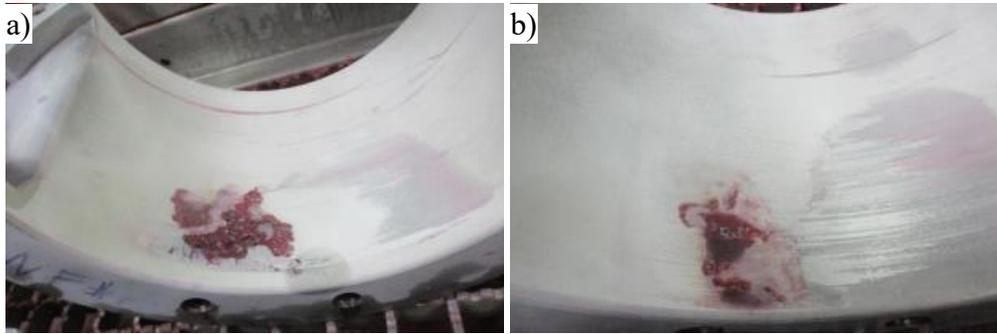


Figura 27. Aplicación de revelador a) Cojinete #1 b) Cojinete #2.

4.4.3. Verificación dimensional

En este punto del proceso, resulta crucial resaltar que se está tratando con un cojinete elíptico específico para aplicaciones en turbinas a gas. Este tipo de cojinete difiere notablemente de los convencionales cilíndricos comúnmente utilizados en la industria. Por lo tanto, es imperativo tomar las medidas necesarias utilizando la Figura 288, como referencia para garantizar la precisión y la adecuada reparación del componente.

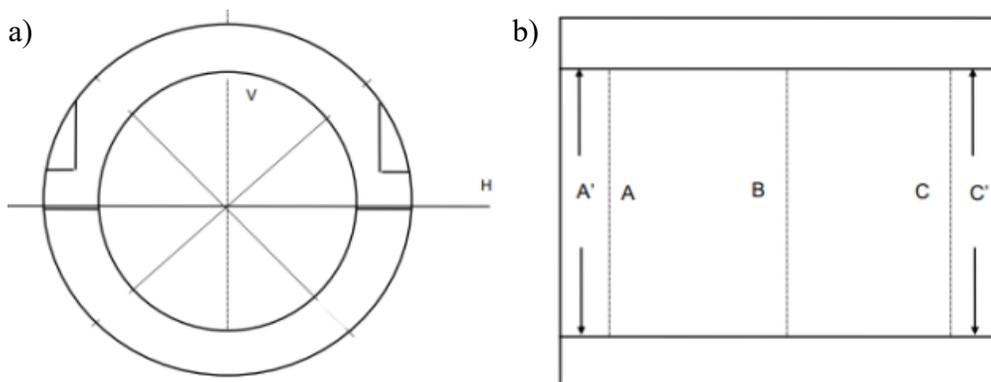


Figura 28. Referencia de cojinete elíptico.

En la Tabla 11 se encuentran detalladas las dimensiones de los cojinetes, que se pueden comparar con las especificaciones de diseño proporcionadas en los planos de diseño. Estas mediciones son fundamentales para determinar la desviación existente y para establecer las acciones correctivas necesarias en el proceso de reparación y ajuste del componente.

| Cojinete #1 | | | | | Cojinete #2 | | | | |
|--------------------|-------|--------|--------|--------|--------------------|-------|--------|--------|--------|
| Med. Plano | Línea | A | B | C | Med. Plano | Línea | A | B | C |
| 8,0165" /-0,002 | V | 8,016" | 8,019" | 8,017" | 8,0165" /-0,002 | V | 8,02" | 8,019" | 8,02" |
| 8,0325" /-0,002 | H | 8,032" | N/A | 8,028" | 8,0165"/- 0,002 | H | 8,031" | N/A | 8,026" |

Tabla 11. Dimensiones de los cojinetes.

4.4.4. Definición de alcance de reparación

En esta etapa, se contempla el alcance de las actividades emprendidas por Serviturbinas para restaurar los componentes, garantizando su funcionalidad y su pronta incorporación en el equipo correspondiente. El alcance de actividades para la recuperación de los cojinetes abarca las siguientes etapas:

- Recepción del componente: Registro e ingreso formal.
- Inspección visual de entrada: Evaluación visual inicial del componente para identificar posibles anomalías superficiales.
- Inspección NDT líquidos penetrantes de entrada: Realización de pruebas de líquidos penetrantes para detectar defectos ocultos en la superficie del componente.
- Chequeo dimensional de entrada: Verificación exhaustiva de las dimensiones del cojinete a fin de determinar cualquier desviación con respecto a las especificaciones de diseño.
- Remoción del babbitt de los cojinetes usados: Eliminación precisa y completa del revestimiento de babbitt de los cojinetes desgastados.
- Aplicar estañado: Este procedimiento se realiza con el fin de facilitar el anclaje del material antifricción al casquete
- Aplicar babbitt nuevo mediante aporte por soldadura: Proceso de aplicación controlada y uniforme de una nueva capa de babbitt utilizando técnicas de soldadura específicas.
- Montaje dispositivo para pre-mecanizado: Configuración de la maquinaria y dispositivos necesarios para el proceso de mecanizado preliminar.
- Inspección NDT en proceso (PT y UT): Realización de pruebas no destructivas, incluidas pruebas de líquidos penetrantes y ultrasonido, durante las etapas intermedias del proceso de recuperación.
- Mecanizado final según tolerancias de plano: Ajuste final y precisión de las dimensiones del cojinete de acuerdo con las especificaciones exactas establecidas en los planos.
- Inspección de líquidos penetrantes final: Última evaluación con líquidos penetrantes para asegurar la ausencia de defectos después del proceso de mecanizado.
- Inspección de ultrasonido final: Verificación final utilizando pruebas de ultrasonido para confirmar la integridad estructural y la ausencia de defectos internos.
- Inspección dimensional final: Verificación de las dimensiones finales del cojinete para confirmar la conformidad con los estándares de diseño y tolerancias aceptables.
- Embalaje: Proceso de protección cuidadosa del cojinete reparado para su almacenamiento y transporte seguro.

4.4.5. Remoción de babbitt antiguo

Durante esta fase del proceso, se lleva a cabo el trabajo en la sala de tornos para la extracción mecánica del babbitt antiguo hasta alcanzar el límite de la capa antifricción y el casquete, como se ilustra en la Figura 29.



Figura 29. Cojinete sin babbitt.

4.4.6. Estañado y aplicación de babbitt

Serviturbinas emplea específicamente el método de estaño puro para generar un intermetálico, es decir, una capa base que si crea una difusión química con el babbitt y facilita la unión de los materiales, como se puede observar en la Figura 30.



Figura 30. Estañado de los cojinetes.

Seguido al depósito de estaño, se procede con la aplicación del nuevo babbitt, de manera cuidadosa y meticulosa, en un proceso cordón por cordón. Este procedimiento requiere la participación de un experto en soldadura, como se mencionó previamente, debido a la necesidad de lograr una aplicación sin imperfecciones en cada capa del babbitt.

La aplicación del babbitt se llevó a cabo utilizando la técnica de aporte de soldadura por oxiacetileno, como se ilustra en la Figura 31a. Es importante destacar que, si bien este método fue utilizado en este caso específico, ocasionalmente se recurre a la soldadura GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) para la aplicación del babbitt, dependiendo de la evaluación y la decisión del especialista en soldadura, según las necesidades específicas del proyecto. El resultado del proceso se presenta en la Figura 31b.

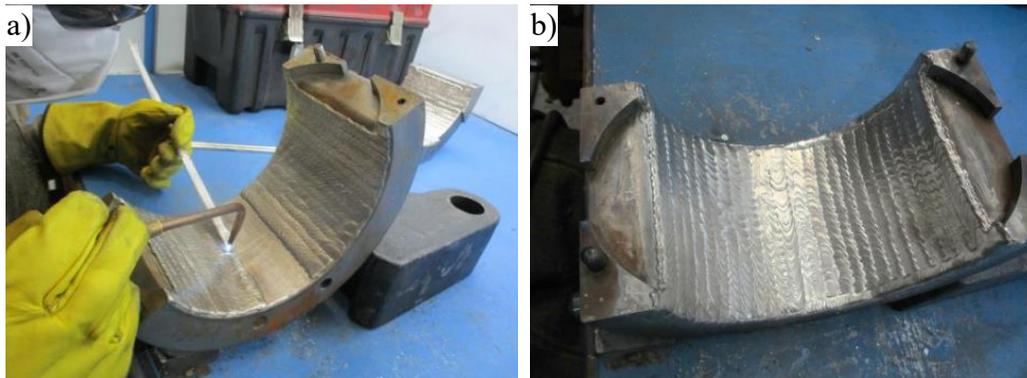


Figura 31. a) Soldadura por oxiacetileno y b) resultado de rebabitado bruto.

4.4.7. Control de calidad con líquidos penetrantes (babbitt bruto)

Durante esta etapa del proceso, Serviturbinas lleva a cabo una inspección no destructiva (NDT) adicional para asegurar la adecuada adherencia de la soldadura en los bordes de los cojinetes como se puede observar en la Figura 32. Este proceso de inspección adicional refuerza los estándares de calidad y seguridad aplicados por Serviturbinas en la realización de sus proyectos de recuperación.

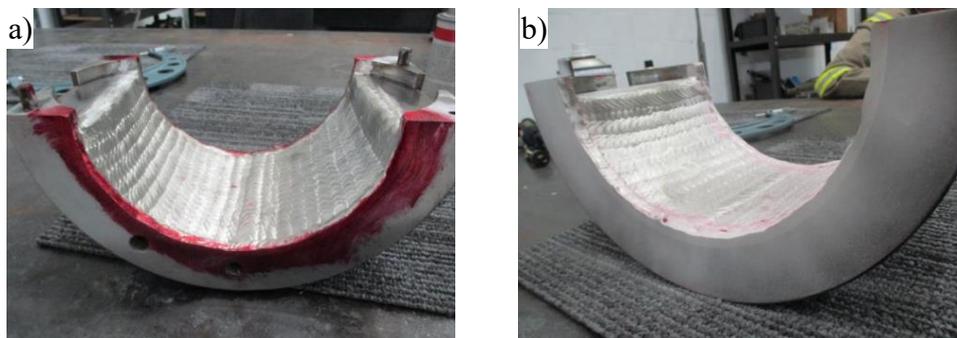


Figura 32. Inspección por LP del rebabitado bruto a) Líquidos colorantes b) revelador.

La inspección recibió la aprobación de los cojinetes, lo que indica la conformidad con los estándares de calidad establecidos y confirma la integridad estructural y la fiabilidad de la soldadura. Con el visto bueno de esta evaluación, el proceso de recuperación continúa con los procedimientos previstos.

4.4.8. Mecanizado de cojinetes

Se inicia con el centrado de los cojinetes en un torno equipado con un plato de cuatro mordazas independientes. Este proceso se realiza con la asistencia de instrumentos de medición, como comparadores, que permiten identificar y lograr el ajuste óptimo para el mecanizado, como se puede observar en la Figura 33. La precisión en el centrado es crucial para garantizar un mecanizado preciso y uniforme de los cojinetes, lo que contribuye a la conformidad con las especificaciones de diseño y las tolerancias requeridas para su correcto funcionamiento.

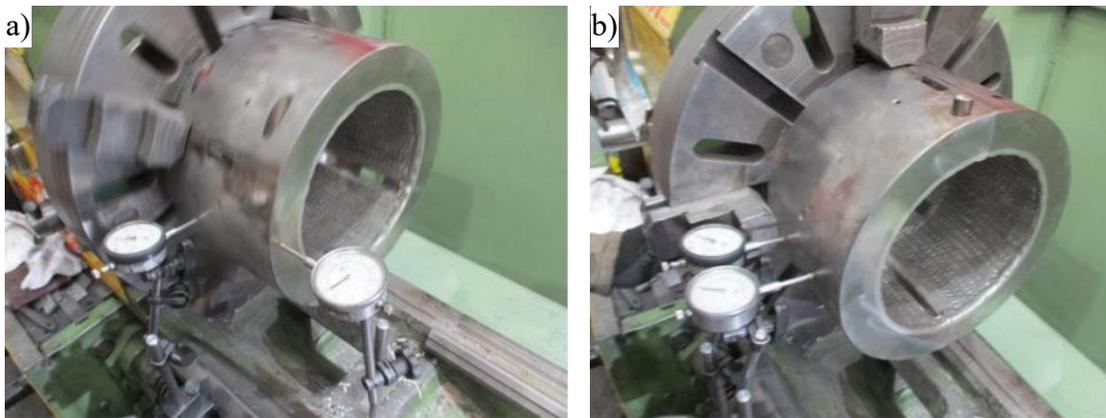


Figura 33. Centrado de cojinetes.

Luego del proceso de centrado, los cojinetes avanzan hacia la fase de mecanizado como se puede observar en la Figura 34, donde se lleva a cabo la rectificación y ajuste preciso de sus dimensiones finales de acuerdo con las especificaciones técnicas requeridas. Este paso garantiza la exactitud y la uniformidad necesarias para asegurar un funcionamiento óptimo y una larga vida útil de los cojinetes en su aplicación operativa.

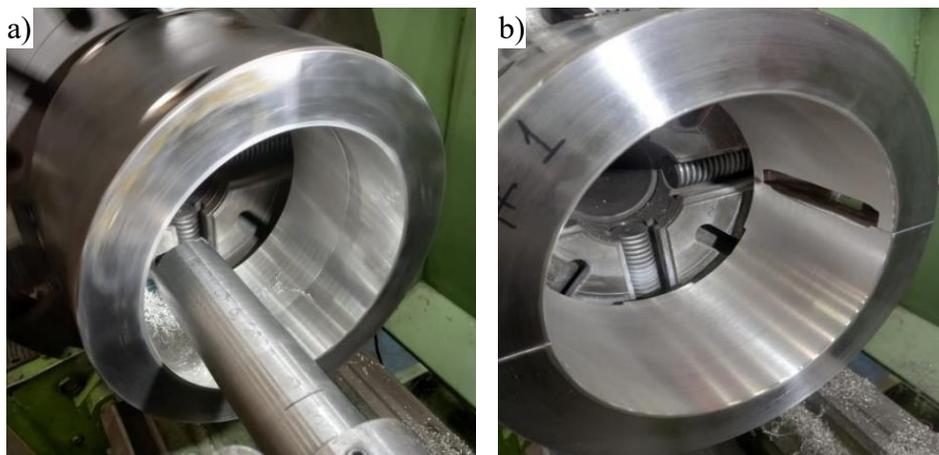


Figura 34. Mecanizado de cojinetes.

4.4.9. Control de calidad con líquidos penetrantes (babbitt mecanizado)

Luego del proceso de mecanizado, se llevó a cabo una inspección no destructiva (NDT) utilizando la técnica de líquidos penetrantes coloreados en los cojinetes 1 y 2. Los resultados de estas inspecciones, detallados en la Figura 35 y la Figura 36 respectivamente, mostraron resultados satisfactorios, lo que indica la ausencia de defectos y la conformidad con los estándares de calidad requeridos.

Serviturbinas usa casi en todos sus proyectos un criterio de aceptación clase A para las pruebas de líquidos penetrantes, esto da una confianza y tranquilidad de que la recuperación tiene una alta calidad y una solución eficiente para sus necesidades.

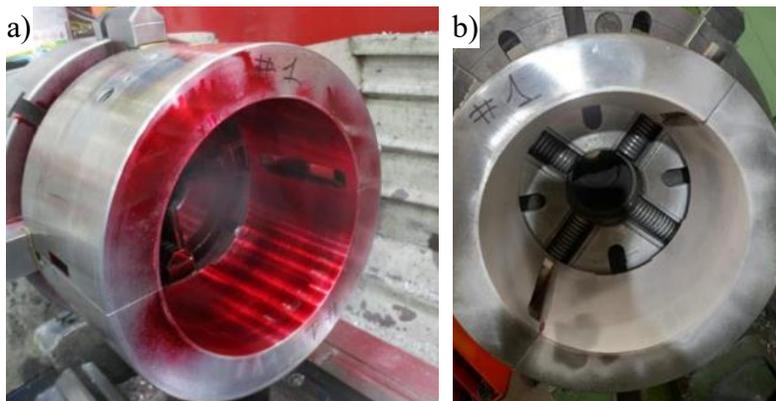


Figura 35. Cojinete radial 1 a) LP b) Revelador.

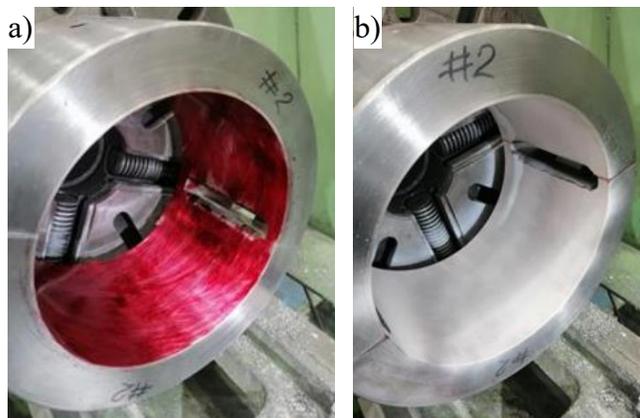


Figura 36. Cojinete radial 2 a) LP b) Revelador.

4.4.10. Control de calidad con ultrasonido (babbitt mecanizado)

Se llevó a cabo una inspección no destructiva (NDT) utilizando la técnica de ultrasonido, con el método pulso-eco, como se puede observar en la Figura 37. Los resultados de esta prueba fueron satisfactorios, lo que garantiza la integridad del componente y confirma la ausencia de defectos significativos. Con esta validación, los cojinetes están listos para su liberación, y solo resta llevar a cabo la inspección dimensional para completar el proceso de verificación de calidad.

Estas pruebas de ultrasonido son llevadas a cabo con un nivel de criticidad clase I, para garantizar un completo análisis del resultado final de los componentes recuperados.

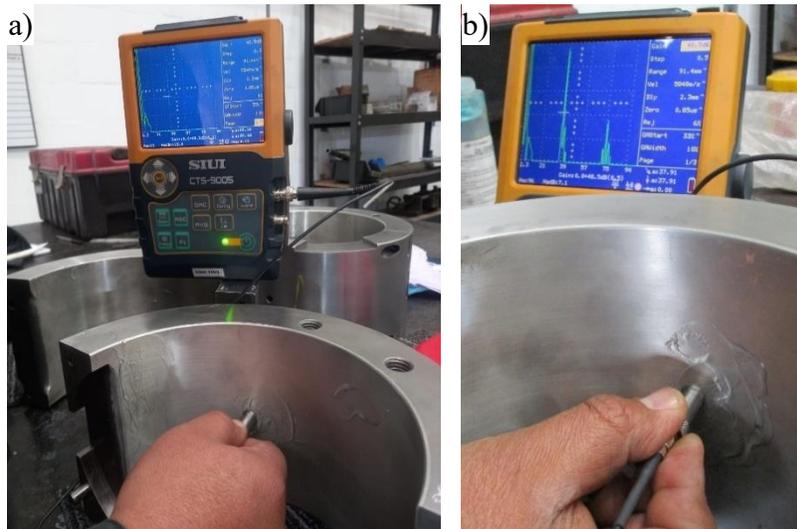


Figura 37. Prueba de ultrasonido.

4.4.11. Inspección dimensional final

Utilizando la referencia proporcionada en la Figura 28 para la medición de los cojinetes elípticos, se tomaron los datos correspondientes como se puede observar en la Figura 38.



Figura 38. Medición de cojinetes.

Los resultados de estas mediciones se detallan en la tabla X, demostrando medidas satisfactorias y apropiadas que cumplen con los requisitos específicos y las necesidades del proyecto.

| Cojinete #1 | | | | | Cojinete #2 | | | | |
|-----------------|-------|----------|---------|----------|-----------------|-------|----------|----------|----------|
| Med. Plano | Línea | A | B | C | Med. Plano | Línea | A | B | C |
| 8,0165''/-0,002 | V | 8,0145'' | 8,016'' | 8,0155'' | 8,0165''/-0,002 | V | 8,0155'' | 8,0165'' | 8,015'' |
| 8,0325''/-0,002 | H | 8,0312'' | N/A | 8,0305'' | 8,0165''/-0,002 | H | 8,031'' | N/A | 8,0315'' |

Tabla 12. Medidas finales del cojinete.

4.4.12. Liberación y despacho

Finalmente, tras completar todas las verificaciones de calidad y dimensionales para garantizar la integridad y el rendimiento óptimo del componente recuperado, se da inicio al proceso de despacho como se puede observar en la Figura 39a-b. El componente es cuidadosamente empaquetado (Figura 39c) y asegurado en conformidad con los estándares de embalaje especializados, considerando la protección completa durante el transporte. Se lleva a cabo una coordinación logística precisa y eficiente para garantizar la entrega oportuna y segura del componente a su destino final.

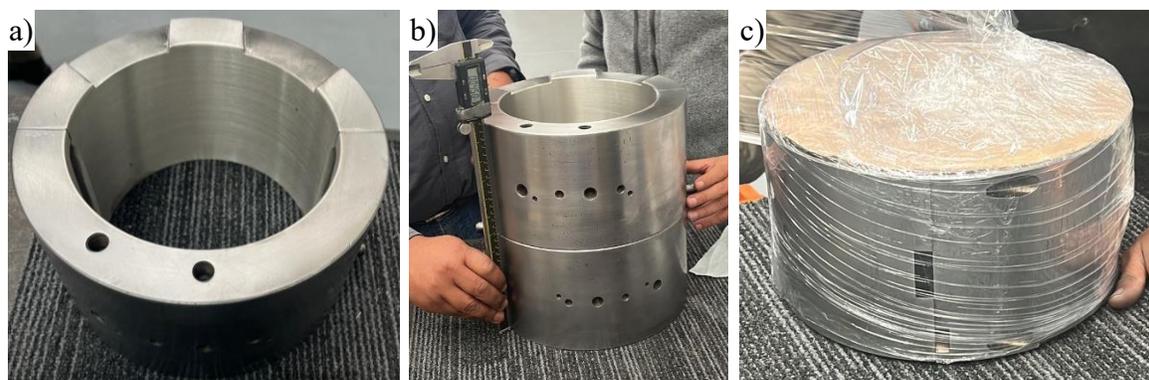


Figura 39a-b) Liberación de cojinetes y c) embalaje de cojinetes.

5. RESULTADOS

Como resultado de este proyecto, se logró exitosamente la recuperación de dos cojinetes radiales que actualmente están instalados en una de las turbinas a gas en la base de Cusiana ECP. Ambos cojinetes fueron recibidos en condiciones deterioradas y entregados en un estado que muchos de los clientes de Serviturbinas describen como indistinguible de un componente nuevo, como se puede observar en la Figura 40. Este logro no solo destaca la habilidad técnica y el compromiso de Serviturbinas con la excelencia en la recuperación de componentes críticos, sino también su capacidad para superar desafíos complejos dando soluciones rápidas y efectivas.

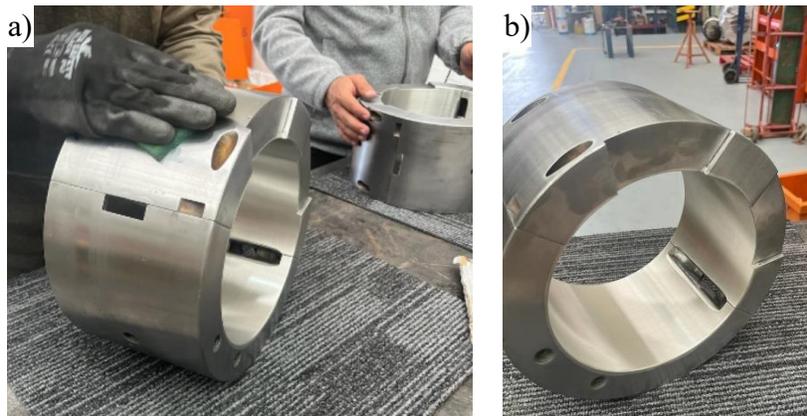


Figura 40. Resultado final de los cojinetes

5.1. Análisis de pruebas destructivas

Las pruebas destructivas realizadas a los componentes nuevos y recuperados por Serviturbinas arrojaron los resultados descritos anteriormente, con base en esto y luego de tener una reunión con las directivas de Ecopetrol, se puede analizar lo siguiente:

- En cuanto a la dureza, se observó una diferencia mínima, como se esperaba debido al cambio de material de aluminio a estaño. Sin embargo, según los especialistas en materiales esta variación no representa un factor significativo que afecte negativamente el desempeño del componente.
- La prueba de adherencia reveló un valor notablemente superior en el casquete recuperado por Serviturbinas en comparación con los componentes nuevos, lo que brinda una mayor confianza en la calidad del proceso de recuperación implementado por la empresa.
- El análisis metalográfico evidenció que el casquete nuevo presentaba una capa más gruesa de intermetálico (estañado) en comparación con el casquete recuperado. Sin embargo, esta disparidad no influyó de manera sustancial en el comportamiento del componente. La calidad de la aplicación del intermetálico demostró ser más crucial que su espesor, como se confirmó mediante la prueba de adherencia, lo que resalta las

diferencias en los procedimientos y conocimientos técnicos empleados por cada empresa.

- El casquete original tiene una capa de recubrimiento de babbitt sobre el diámetro interior, cuyo espesor es de 0,8 a 0,88 mm, la dureza de este recubrimiento en promedio es de 41,6 HV_{0,5}. El ensayo de adherencia muestra un valor promedio de resistencia del babbitt de 7316 psi o 0,0504 kN/mm². La microestructura indica que el babbitt tiene buena adherencia al material base y el babbitt está compuesto por dos capas.
- El casquete recuperado serviturbinas tiene una capa de recubrimiento de babbitt sobre el diámetro interior con un espesor de 1,57 mm, la dureza de este recubrimiento babbitt grado 3 está en promedio en 36 HV_{0,5}. El acero base tiene una microestructura de ferrita y poca perlita con granos equiaxiales organizados en sentido de laminación, el babbitt muestra tres capas. El ensayo de adherencia muestra una resistencia del babbitt promedio de 8702 psi o 0,060 kN/mm²

En vista de estos resultados satisfactorios, Serviturbinas y Ecopetrol continuarán el proceso de recuperación de casquetes de biela Waukesha y cojinetes de otros equipos en proyectos posteriores. Cabe destacar que la recuperación de los casquetes requerirá un período adicional de tiempo y no formará parte de este proyecto específico.

5.2. Análisis de recuperación de los cojinetes

Al realizar un análisis de los resultados obtenidos en la recuperación de los componentes, resulta crucial considerar detalladamente los precios actuales en el mercado de componentes nuevos. En este contexto, se observa que el valor de mercado de un cojinete nuevo asciende a alrededor de 250 millones de pesos, con un tiempo de entrega promedio de aproximadamente 8 meses. En contraste, el beneficio para el cliente resulta evidente, tanto en términos de tiempo como de costo, ya que el costo de recuperación de cada cojinete asciende a 30 millones de pesos, y la entrega en esta ocasión se completó en menos de 2 semanas. Además, al considerar el costo de recuperación en relación con el precio de mercado, se revela un margen de ganancia favorable para Serviturbinas en este proyecto específico, lo que resulta en un escenario de beneficio mutuo para todas las partes involucradas (GANAR-GANAR). Este análisis subraya la ventaja competitiva significativa que la recuperación de componentes ofrece en términos de optimización de costos y tiempos de entrega, respaldando así la viabilidad y el valor agregado de este enfoque en la gestión de activos industriales críticos.

En esta ocasión se disponía de una atenta presencia de un especialista en control de calidad de MASA-STORK, empresa reconocida por su labor en el mantenimiento de la base Cusiana de Ecopetrol. El hecho de que el componente haya sido aprobado con un procedimiento que pasó por pruebas destructivas que replican el proceso de recuperación, refuerza la confianza en la funcionalidad y el rendimiento óptimo de los cojinetes. Esta validación no solo subraya la destreza técnica de Serviturbinas, sino también su compromiso inflexible con la excelencia y la entrega de resultados de calidad. El éxito de este proyecto

no solo consolida la relación con el cliente, sino que también sienta un precedente valioso para futuras colaboraciones y desafíos técnicos.

Estos componentes recuperados con controles de calidad tan estrictos, al ser montados en una turbina a gas, desempeñarán un papel fundamental en la mejora del rendimiento general y la confiabilidad operativa del sistema. Un cojinete radial que ha sido recuperado de manera efectiva y restaurado a su funcionalidad óptima puede marcar una diferencia significativa en el funcionamiento de la turbina a gas. Algunos de los beneficios clave incluyen:

- **Mejora de la eficiencia:** Un cojinete bien recuperado contribuye a la reducción de la fricción y el desgaste, lo que a su vez ayuda a optimizar la eficiencia energética de la turbina a gas. Esto se traduce en un mejor aprovechamiento del combustible y una mayor generación de energía sin comprometer la estabilidad operativa.
- **Aumento de la confiabilidad:** La turbina a gas experimentará una mayor confiabilidad en su funcionamiento, lo que resulta en una disminución de los tiempos de inactividad no planificados y una mejora en la capacidad de producción sostenida a largo plazo.
- **Reducción de costos de mantenimiento:** Ayuda a reducir los costos asociados con el mantenimiento continuo y las reparaciones frecuentes. Esto se traduce en ahorros significativos en términos de tiempo, recursos y gastos operativos generales.
- **Prolongación de la vida útil:** Al proporcionar un soporte sólido y confiable para el funcionamiento suave de la turbina a gas, un cojinete bien recuperado contribuye a prolongar la vida útil del equipo en su conjunto, lo que permite un rendimiento sostenido y una operación eficaz a lo largo de su ciclo de vida útil esperado.

6. CONCLUSIONES

- Se ha culminado exitosamente el procedimiento de recuperación de dos cojinetes de turbina provenientes de la empresa Ecopetrol, en su campo Cusiana. Los componentes han sido validados con satisfacción antes de la fecha de publicación de este proyecto, operando durante un periodo superior a dos meses.
- Se han logrado identificar los procedimientos específicos empleados en la fabricación de estos cojinetes, considerando detalladamente cuáles de estos procedimientos destacan por su fiabilidad y eficacia.
- Durante el desarrollo del semestre de industria he estado involucrado de manera integral en todo el proceso de recuperación de los cojinetes, dedicando una atención especial a cada fase del proyecto.
- Se llevó a cabo la identificación positiva del material (PMI) con el fin de determinar su composición y proporciones correspondientes.
- Se proporcionó al cliente un informe técnico detallado que documenta exhaustivamente todas las etapas del proceso de recuperación de los cojinetes, tal como se evidencia en el presente proyecto.
- Es notable cómo las pruebas destructivas evidencian que la recuperación de componentes puede dar como resultado un producto igual o incluso de mayor calidad que el original. Este hecho es especialmente llamativo para muchas empresas con necesidades similares, ya que resalta la posibilidad y el potencial de mejorar la calidad de los componentes a través de procesos de recuperación.
- La recuperación de cojinetes o casquetes antifricción ofrece una solución ágil, eficaz y rentable para las empresas que poseen maquinaria rotativa, proporcionando una alternativa inmediata a disposición de los clientes.
- La prolongación de la vida útil de los equipos se puede lograr de manera significativa mediante una exhaustiva caracterización de los componentes, una selección cuidadosa de materiales y la implementación de rigurosos controles de calidad, facetas que únicamente empresas como Serviturbinas pueden garantizar.
- La restauración de cojinetes o casquetes antifricción tiene el potencial de reducir considerablemente los costos y responder de manera rápida a reparaciones imprevistas.
- La capacidad de intervenir en un componente recuperable que ha experimentado un fallo permite anticipar y abordar problemas antes de que se conviertan en fallas críticas, lo que conlleva a una reducción en el tiempo medio de reparación (MTTR), minimizando el tiempo de inactividad, los costos de producción y maximizando la disponibilidad operativa de los equipos.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Álvarez, F. V. (s/f). Máquinas eléctricas rotativas (7a ed.). <https://docplayer.es/3756182-Maquinas-electricas-rotativas.html>
- [2] Vargas, P. B. (s/f). CAP 4. BOMBAS Y EQUIPOS ROTATIVOS. En CAPACITACIÓN MECÁNICA INDUSTRIAL. https://www.academia.edu/36712622/BOMBAS_Y_EQUIPOS_ROTATIVOS_CAPITULO_4_CAPACITACION_MECANICA_IND
- [3] Dictionary of Energy, edited by Cutler J. Cleveland, and Christopher G. Morris, Elsevier, 2014. ProQuest Ebook Central. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.lib.ucalgary.ca/lib/ucalgary-ebooks/detail.action?docID=1821967>.
- [4] Connor, N. (2019, septiembre 24). El ejemplo del ciclo de Brayton – Problema con la solución. Definición. Thermal engineering. https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-ejemplo-del-ciclo-de-brayton-problema-con-la-solucion-definicion/#google_vignette
- [5] Hinojosa., F. J. (1979). PROCEDIMIENTOS DE CONTROL Y OPERACIÓN DE UNA UNIDAD GENERADORA OPERADA CON TURBINA A GAS TIPO INDUSTRIAREN LA EMPRESA ELÉCTRICA QUITO SAS. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5890/1/T819.pdf>
- [6] Rivas, A. G. (2003). Fundamentos de turbinas de gas. <https://www.kimerius.com/app/download/5780664553/Fundamentos.pdf>
- [7] de Antonio y Marta Muñoz Domínguez, A. R. (2015). Motores de Combustión Interna. UNED. <https://lopezva.files.wordpress.com/2019/11/343564272-motores-de-combustion-interna.pdf>
- [8] Unidad 1. (s/f). En El motor térmico clasificación y elementos constructivos. https://www.macmillaneducation.es/wp-content/uploads/2018/09/motores_libroalumno_unidad1muestra.pdf
- [9] de Energía-BUN-CA, F. R. (2011). Manual técnico. Motores eléctricos. <https://www.bunca.org/wp-content/uploads/2019/02/Motores.pdf>
- [10] Babbitt. (s/f). La Paloma Compañía de Metales S.A. de C.V. https://lapaloma.com.mx/lapaloma_metales/babbitt.html
- [11] METALES BABBIT - ZINSA. (2016). ZINSA Productos no ferrosos. <https://www.zinsa.com/es/derivados-de-otros/metales-babbitt>
- [12] Shaanxi World Iron & Steel Co. Ltd. (2023, abril 7). ¿Qué Es Babbitt Metal? World Iron and Steel. <http://es.worldironsteel.com/news/what-s-babbitt-metal-33158392.html>
- [13] Santora, M. (2016, septiembre 8). Aluminum tin bearing technology. Bearing tips. <https://www.bearingtips.com/aluminum-tin-bearing-technology/>
- [14] Aluminum Tin Bearings. (s/f). Waukesha Bearings. <https://www.waukbearing.com/en/products/fluid-film-bearings/advanced-materials/aluminum-tin-bearings.html>
- [15] Cojinetes Antifricción. (s/f). TM COMAS. <https://tmcomas.com/servicio/cojinetes-antifriccion/>
- [16] Cojinetes Antifricción. (s/f). TM COMAS. <https://tmcomas.com/servicio/cojinetes-antifriccion/>
- [17] Cojinetes Antifricción. (s/f). TM COMAS. <https://tmcomas.com/servicio/cojinetes-antifriccion/>