

Trabajo de Diploma

**Facultad de Ingeniería Mecánica
Colectivo de Mecánica Aplicada**



Título:

Diseño de una Metodología para Recuperar Árboles de Máquinas mediante el Espigado y la Soldadura.

Autor: Frank Manuel Rodríguez Hernández.

**Tutores: Dr.C. Rafael Antonio Goytisol Espinoza.
Ms.C. Rohary Padilla Rodríguez.**

Junio 2013, Cienfuegos, Cuba.

“Año 55 de la Revolución.”

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS



Sistema de Documentación y Proyecto.

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

Firma del autor.

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

Información Científico Técnico
Nombre y Apellidos. Firma.

Vice Decano.

Nombre y Apellidos. Firma.

Firma del Tutor

Sistema de Documentación y Proyecto.
Nombre y Apellido. Firma.



Exergo

Exergo

“Todos y cada uno de nosotros paga puntualmente su cuota de sacrificio consciente de recibir el premio en la satisfacción del deber cumplido, conscientes de avanzar con todos hacia el hombre nuevo que se vislumbra en el horizonte.”

Ernesto Ché Guevara.



Agradecimientos

Agradecimientos

A mis padres:

A ustedes, mis padres queridos, por darme siempre su apoyo incondicional en mis decisiones, en los momentos difíciles y en la vida; además de guiarme a seguir el camino correcto.

A mi familia:

Por hacerse sentir cuando los necesité y permitirme ser miembro de una familia tan unida.

A mis profesores:

Por sus enseñanzas brindadas a lo largo de mi carrera para formarme como un profesional comprometido con su labor. En especial a mis tutores Goytisoló y Rohary por apoyarme en mi tesis y por confiar en mí.

A mis amigos:

Por permitirme conocer que existe la amistad sincera, sobre todo en los instantes en que se necesita una mano amiga.

A la UCF:

Por cederme estudiar estos cinco años para formarme como un profesional Revolucionario comprometido con su país.

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



Dedicatoria

Dedicatoria

A mi madre Deysi Hernández Pérez, por ser lo más valioso que existe para mí, en tu comprensión y la grandeza que eso significa, tú eres única, no hay nadie como tú.

A mi padre Francisco Omar Rodríguez Pérez, por tu fé y confianza en mí, por ser ejemplo de todos los valores que han de caracterizar a los hombres.



Resumen

Resumen

RESUMEN.

El presente trabajo muestra una metodología para la recuperación de árboles sometidos a flexión como el ventilador de gases calientes en la Empresa “Cementos Cienfuegos S.A.” y sometidos a flexión y torsión como los de las bombas de agua de alimentación de las calderas de la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos “Carlos Manuel de Céspedes”. Consta de tres capítulos: un primer capítulo donde se caracterizan los distintos tipos de fallas y se abordan los métodos existentes para la recuperación de árboles de máquinas, lo que permite determinar las ventajas y desventajas de sus aplicaciones. En el capítulo dos se describe la metodología del procedimiento de espigado y soldadura mediante un software en MATLAB y su puesta en práctica para árboles sometidos a flexión. En el tercer capítulo se desarrolla la metodología y se ejemplifica un caso particular de un árbol sometido a flexión y torsión, demostrando la aplicación de esta tecnología y su utilidad en la obtención del diámetro necesario de la espiga, garantizando su resistencia a la fatiga.



Índice

Índice

ÍNDICE.

<i>INTRODUCCIÓN</i>	1
<i>CAPÍTULO I. Métodos descritos en la literatura para la recuperación de árboles averiados por diferentes causas</i>	3
1.1 Generalidades del Capítulo	3
1.2 Definición de avería o falla mecánica	3
1.3 Clasificación de las fallas mecánicas	3
1.3.1 Según su severidad	3
1.3.2 Según el momento de la ocurrencia	4
1.3.3 Clasificación de las fallas en servicio según su origen	4
1.4 Principales tipos de fallas mecánicas	7
1.4.1 Fallas mecánicas superficiales	7
1.4.1.1 Fallas por deformación plástica de la superficie	7
1.4.1.2 Fallas por fractura de la superficie	7
1.4.1.3 Fallas por desgaste mecánico	8
1.4.1.4 Fallas por corrosión	9
1.4.1.4.1 Desgaste corrosivo mecánico	9
1.4.1.4.2 Desgaste por frotamiento	10
1.4.2 Fallas mecánicas volumétricas	11
1.4.2.1 Fallas por deformación plástica	11
1.4.2.2 Fallas por fractura	12
1.5 Métodos de recuperación de árboles con fallas mecánicas superficiales	13
1.5.1 Recuperación de árboles mediante adhesivos y partículas de hierro	13
1.5.2 Recuperación para árboles gravemente desgastados	13
1.5.3 Recuperación de árboles mediante resinas y aleaciones de titanio	14
1.5.4 Recuperación de árboles mediante Pulvimetalurgia	16
1.5.5 Recuperación de árboles mediante Metalizado	16
1.5.5.1 Metalizado por arco eléctrico	17
1.5.5.2 Metalización con soplete	18
1.5.6 Recuperación de árboles mediante electroerosión	19
1.6 Métodos de recuperación de árboles con fallas mecánicas volumétricas	19
1.6.1 Recuperación de árboles mediante encasquillado	19
1.6.1.1 Preparación de la zona dañada	20

1.6.1.2 Preparación del casquillo.....	20
1.6.1.3 Área Recuperada.	21
1.6.2 Recuperación de árboles mediante soldadura.....	21
1.6.3 Recuperación de árboles mediante espigado.	22
1.7 Comparación, ventajas y desventajas de los métodos.....	23
1.8 Conclusiones parciales del Capítulo I.	25
<i>CAPÍTULO II. Metodología para la elección del diámetro de la espiga para optimizar la resistencia a la fatiga de los árboles que transmiten sólo flexión en la zona fracturada.....</i>	
2.1 Características de la unión espigada y soldada del árbol a recuperar para garantizar la resistencia a la fatiga.	26
2.2 Aplicación de la metodología aplicada para recuperar el árbol del Ventilador de Gases Calientes en la Empresa “Cementos Cienfuegos S.A.”	29
2.2.1 Caracterización del árbol del Ventilador de Gases Calientes.....	29
2.2.2 Vistas del ventilador, del árbol y de la sección de fractura.	30
2.2.3 Elección de la sección donde se realizara el espigado y la soldadura.....	30
2.2.4 Elección del diámetro de la espiga para optimizar la resistencia a la fatiga de los componentes de la unión.	32
2.2.5 Esquema y dimensiones de la zona espigada y biseles para la soldadura.....	32
2.2.6 Descripción de la tecnología de soldadura empleada en la recuperación.	33
2.3 Conclusiones parciales del Capítulo II.	37
<i>CAPÍTULO III. Metodología para la elección del diámetro de la espiga para optimizar la resistencia a la fatiga de los árboles que transmiten flexión y torsión en la zona fracturada.....</i>	
3.1 Características de la unión espigada y soldada del árbol a recuperar para optimizar la resistencia a la fatiga de la unión.	38
3.1.1 Análisis de la flexión:	38
3.1.2 Análisis de la Torsión:.....	38
3.2 Aplicación de la metodología elaborada para la recuperación del árbol de la Bomba de Agua de Alimentación de Calderas de la C.T.E. “Carlos Manuel De Céspedes”	41
3.2.1 Características del árbol y de las averías.	41
3.2.2 Esquema de análisis y solución por el método de las fuerzas del árbol.	42
3.2.3 Cálculo de la potencia de la bomba de aceite, el momento flector y el momento torsor provocado en el árbol.....	43
3.2.4 Influencia en la resistencia a la fatiga de la posible desalineación en el acoplamiento y el plato de empuje.	44

3.2.5	Cálculo de X1 por el método de los parámetros de origen.	45
3.2.6	Elección de la sección donde se realizara el espigado y la soldadura.	47
3.2.7	Calculo del diámetro de la espiga para el árbol de la Bomba de Agua Alimentación de la CTE “Carlos Manuel De Céspedes”.	48
3.2.8	Esquema y dimensiones de la zona espigada y soldada.	48
3.3	Conclusiones parciales del Capítulo III.	49
	<i>CONCLUSIONES.</i>	50
	<i>RECOMENDACIONES.</i>	52
	<i>BIBLIOGRAFÍA.</i>	53
	<i>ANEXOS.</i>	40



Introducción

Introducción

INTRODUCCIÓN.

Los árboles de las máquinas constituyen, salvando la distancia, el “corazón” de las mismas. Si el árbol de una máquina no posee la adecuada resistencia se puede decir que la misma tiene “muy poca salud” y a pesar de que los ingenieros hacen todo lo posible por lograr su adecuada resistencia, los mismos fallan y el 90 % de los que fallan lo hacen por fatiga. Si se preguntara sobre la posibilidad de actuar sobre un árbol fracturado por fatiga para recuperarlo y ponerlo nuevamente en funcionamiento, sería necesario responder que eso no es posible por razones muy simples: Los árboles de máquinas son las piezas que presentan el régimen de tensiones más severo, están sometidos a flexión, cortante directo y torsión, operan en condiciones de tensiones cíclicas con frecuencias de variación de las mismas que oscilan desde unos cientos hasta miles de veces en un minuto, como regla presentan geometría compleja, con numerosos puntos de concentración de tensiones. En el presente trabajo se describe como se llevó a cabo la recuperación del árbol de grandes dimensiones del Ventilador de Gases Calientes de la Empresa “Cementos Cienfuegos S.A.” fracturado por fatiga próximo a uno de los apoyos, donde el momento flector es pequeño, pero sin embargo, la tensión normal era la mayor, lo que condicionó la falla por fatiga. En este caso se desarrolló un procedimiento general para elegir la sección donde se realizará la recuperación por espigado y soldadura y para elegir las dimensiones de la espiga y del cordón de soldadura. La sección para espigar y soldar se eligió buscando en el diagrama tensiones vs. longitud una sección de menor tensión que la de falla. El diámetro de la espiga se eligió partiendo de relaciones entre las rigideces de la sección anular a espigar y la sección circular maciza de la espiga, optimizándose la resistencia. Algo similar está ocurriendo en las Bombas de Alimentación de Calderas de la CTE “Carlos M. de Céspedes”, con la diferencia que en la sección de falla el árbol transmite un determinado momento torsor.

Problema:

La necesidad de diseñar una metodología para recuperar árboles de máquinas que fallan por fatiga sometidos a flexión y torsión.

Hipótesis:

El diseño de una metodología a través de una aplicación del software MATLAB mediante el espigado y la soldadura, permite recuperar los árboles de máquinas que fallan por fatiga sometidos a flexión y torsión.

Objetivo General:

Diseñar una metodología con aplicación en el software MATLAB que contribuya a recuperar árboles de máquinas sometidos a flexión y torsión, mediante la tecnología de espigado y soldadura.

Objetivos Específicos:

- Realizar una búsqueda bibliográfica de los métodos existentes para la reparación y/o recuperación de árboles.
- Elaborar el gráfico de tensiones contra longitud del Árbol del Ventilador de Gases Calientes en la Empresa “Cementos Cienfuegos S.A.”.
- Aplicar la metodología como caso particular en el Árbol del Ventilador de Gases Calientes en la Empresa “Cementos Cienfuegos S.A.”.
- Desarrollar una tecnología de soldadura adecuada en función del material del Árbol del Ventilador de Gases Calientes en la Empresa “Cementos Cienfuegos S.A.”.
- Elaborar el gráfico de tensiones contra longitud del Árbol de la bomba de agua de alimentación de calderas en la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos “Carlos Manuel De Céspedes”.
- Aplicar la metodología como caso particular en el Árbol de la bomba de agua de alimentación de calderas en la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos “Carlos Manuel De Céspedes”.



Capítulo I

Capítulo I

CAPÍTULO I. Métodos descritos en la literatura para la recuperación de árboles averiados por diferentes causas.

1.1 Generalidades del Capítulo.

En este capítulo se muestran los distintos tipos de fallas mecánicas, así como sus características y un panorama de los métodos existentes para la recuperación de árboles de máquinas. La recuperación de las partes de los mismos se realizan por los métodos de: tratamientos con adhesivos, tratamientos con resinas, metalizado, encasquillado, aportes de soldadura y se enuncian someras características de espigado. Se le efectúan comparaciones y críticas con el objetivo de evocar el más eficaz y fiable procedimiento para maximizar la vida útil y obtener un rendimiento seguro de estas piezas.

1.2 Definición de avería o falla mecánica.

El término avería o falla en la industria mecánica en general no se asocia únicamente a la fractura o rotura de un elemento o sistema en particular, sino que es un término que se utiliza comúnmente para denominar algunas de las situaciones en las que la cual un elemento, estructura o máquina (Goytisolo, 2008):

- a) Puede funcionar pero no satisface plenamente su función (pobre funcionabilidad).
- b) Puede continuar operando pero no es confiable para su explotación (pobre confiabilidad).
- c) Se ha destruido total o parcialmente y resulta totalmente inoperable.

1.3 Clasificación de las fallas mecánicas.

1.3.1 Según su severidad.

Las fallas mecánicas según su severidad pueden ser clasificadas en dos grandes grupos:

- a) No destructiva: el elemento, estructura o máquina puede ser reparada y continuar su explotación.

- b) Destructiva o catastrófica: se produce la destrucción total del elemento, estructura o máquina, o los daños son tan severos que no resulta factible económicamente su reparación.

1.3.2 Según el momento de la ocurrencia.

Dependiendo del momento en que se produce la falla mecánica esta se puede clasificar de la siguiente manera:

- a) Durante la fabricación. Fractura durante la soldadura, el tratamiento térmico, la fundición, etc.
- b) Durante la prueba.
- c) Durante el transporte.
- d) Fallas durante la explotación.

El tipo más común de fallas y que será objeto de estudio en el presente material son las fallas durante la explotación conocidas como: fallas en servicio.

1.3.3 Clasificación de las fallas en servicio según su origen.

Las fallas en servicio tienen su origen en muy diversas causas que van desde el diseño hasta la fabricación o la explotación. En el presente epígrafe se clasifican las fallas en servicio según su origen o causa fundamental de la siguiente manera:

a) Fallas por deficiencias de diseño.

Un diseño mecánico puede ser deficiente por muy diversas causas, entre estas se encuentran.

- Incorrecta selección de los materiales en general o, de base y de aportación en el caso de uniones soldadas.
- Incorrecta elección de la forma del elemento. cargas excéntricas, transiciones bruscas y agudas cambios de forma innecesarias, selección incorrecta de la geometría de las secciones transversales, incorrecta ubicación de los apoyos, etc.
- Incorrecta selección de las tolerancias de forma y posición.

- Valoración incorrecta de la resistencia mecánica o de la durabilidad, esquemas de análisis o métodos incorrectos de cálculo.
- Rigidez insuficiente. Muchas fallas mecánicas tienen su origen en una insuficiente rigidez de los elementos, por ejemplo, en el caso de los cojinetes la causa de falla puede estar en una insuficiente rigidez del árbol, de igual forma puede ocurrir en los engranajes o elementos de transmisión en general. Por otro lado hay que tener presente que en otras ocasiones una excesiva rigidez es perjudicial, por ejemplo, en el caso de los sistemas hiperestáticos en general los elementos más rígidos asimilan mayor carga, en los árboles mientras más rígido sea el mismo su velocidad crítica es menor y puede acercarse a la velocidad de trabajo. En el caso de cargas dinámicas los elementos y sistemas en general deben ser flexibles. La adecuada rigidez hay que elegirla de acuerdo con las condiciones de explotación (Goytisolo, 2008).

b) Fallas por defectos de fabricación.

Las fallas en servicio pueden tener su origen en defectos en fabricación que no fueron detectados durante el control de la calidad. Realmente no es fácil asignarle la responsabilidad a uno u a otro pues muchas veces los defectos de fabricación son hasta cierto punto impredecibles o en ocasiones resultan incluso indetectables por los métodos de control de la calidad técnica y económicamente justificados. En general se puede decir que este tipo de falla tiene su origen en dos causas fundamentales:

- Selección o aplicación incorrecta de la tecnología de fabricación.
- Control de la calidad insuficiente.

Los del primer grupo pueden ser por:

- Fallas por defectos de fundición: segregación, poros, inclusiones no metálicas, grietas, rechupes, tensiones residuales, etc.
- Fallas por defectos de soldadura: insuficiente penetración, poros, grietas, tensiones residuales, etc.
- Fallas por defectos del tratamiento térmico: grietas, distorsiones, descarburación, sobrecalentamiento, quemado, precipitación de fases frágiles, tensiones residuales, etc.

- Fallas por defectos en productos de fabricados por deformación plástica en frío o en caliente: grietas, pliegues, laminaciones, etc.
- Fallas por defectos de maquinado: acabado superficial inadecuado, violación de las tolerancias dimensionales, de forma o de posición, etc.

c) Fallas por defecto de montaje.

La causa u origen de una falla puede encontrarse en alguna insuficiencia durante el montaje como son:

- Alineación insuficiente.
- Insuficiencias en el anclaje
- Huellas o marcas superficiales durante el montaje.
- Apriete incorrecto de tornillos, pernos, etc.
- Deformaciones durante el montaje.
- Otros.

d) Fallas por deficiencias en el mantenimiento.

La causa de una falla en servicio puede encontrarse en insuficiencias durante los mantenimientos como son:

- No se ejecutan los mantenimientos en el tiempo programado.
- No se realizan adecuadamente las operaciones previstas en los mantenimientos: cambios de lubricantes, alineación, ajustes, aprietes, cambios de piezas defectuosas, etc.
- No se aplica política de diagnóstico: inspecciones periódicas, control de espesores, medición de vibraciones, control de los parámetros de explotación.
- No se aplican técnicas de inspección: líquidos penetrantes, ultrasonido, radiografía, etc.

e) Fallas por condiciones de servicio muy severas.

Las fallas en servicio ocurren en muchas ocasiones por violaciones de las condiciones normales de explotación

- Sobrecargas instantáneas.

- Sobrecargas cíclicas.
- Incorrecta protección contra la acción del medio ambiente: polvo, medio agresivo, medio corrosivo.
- Choque térmico.
- Golpes de ariete.
- Sobrecalementamiento
- Sobrepresión.
- Otros.

f) Fallas por agotamiento de la vida de servicio.

Los elementos, estructuras y máquinas tienen una vida limitada para la cual fue diseñado. La falla mecánica puede ocurrir entonces por causas que son previsibles y que no necesariamente implican en una violación de los aspectos anteriormente, por ejemplo, un cojinete de rodamiento bien montado, bien lubricada bajo la carga de diseño debe fallar por picadura superficial después de agotada su vida de servicio.

1.4 Principales tipos de fallas mecánicas.

1.4.1 Fallas mecánicas superficiales.

1.4.1.1 Fallas por deformación plástica de la superficie.

Este tipo de falla ocurre en los elementos de maquinas sometidos a la acción de tensiones de contacto cuando la dureza superficial es $HB < 350$. En estas condiciones si se producen sobrecargas instantáneas considerables se puede deformar plásticamente la superficie afectando entonces las condiciones geométricas del contacto y produciéndose a partir de ese momento cargas dinámicas suplementarias durante la explotación (Goytisoló, 2008). Este tipo de falla ocurre con frecuencias en transmisiones dentadas de baja dureza y se requiere realiza en ellas el cálculo correspondiente para prevenirla.

1.4.1.2 Fallas por fractura de la superficie.

Este tipo de falla ocurre a diferencia de la anterior cuando la dureza de la superficie es alta $HB > 350$. En este caso, bajo la presencia de considerables sobrecargas, la

superficie no se deforma sino que se cuartea o agrieta, pudiendo incluso producirse caries que no son producto de la fatiga sino de un proceso de sobrecargas instantáneas (Goytisolo, 2008). En este caso también se realizan cálculos para prevenir este tipo de deterioro.

1.4.1.3 Fallas por desgaste mecánico.

Las fallas superficiales generalmente son conocidas como fallas por desgaste, el desgaste es un término general que se refiere a muchas formas de fallas, todas ellas relacionadas con modificaciones en las superficies conjugadas de las piezas, estas formas de fallas son denominados, mecanismos de desgaste y algunos no han sido totalmente comprendidos, presentándose teorías divergentes para explicarlas y en algunos casos insuficiencias en los métodos de cálculo. Otro aspecto polémico sobre el desgaste ha sido las diversas clasificaciones utilizadas para su estudio, llegando al consenso entre la mayoría de los expertos de agruparlos en cinco categorías generales: que se relacionan a continuación con un estimado aproximado del % total de casos de desgaste en que el mecanismo incide.

- Desgaste por adhesión 15%
- Desgaste por abrasión 50%
- Desgaste por erosión 10%
- Desgaste por corrosión 5%
- Desgaste por superficial 20%

La falla por desgaste esta casi siempre asociada a la pérdida de material de las superficies conjugadas y a la reducción de las dimensiones de las piezas en la dirección normal a las superficies desgastadas y su estudio cobra gran importancia pues es reconocido en la literatura que más del 70% de los salidas de servicio de piezas de máquinas se debe a esta causa.

El desgaste es una falla caracterizada por la gradualidad de su ocurrencia y por el hecho de ser inevitable, es prácticamente imposible diseñar una máquina en la que se excluye totalmente su presencia, lo que se hace es tomar una serie de medidas en el diseño que minimicen su desarrollo con lo que se prolonga la vida útil de las máquinas.

La falla por desgaste de las piezas de maquinas casi siempre están relacionada con la presencia simultánea de varios mecanismos de desgaste, para determinar cual es el preponderante es de vital importancia la inspección visual de las superficies deterioradas, en la siguiente Tabla 1.1 se relacionan las características fundamentales de estas.

Tabla 1.1 Aspecto de las superficies desgastadas.

Tipo de mecanismo.	Aspecto de la superficie desgastada.
Fatiga superficial	Grietas y caries
Abrasivo	Escoriación, arañazos y ralladuras, la superficie es lisa.
Adhesivo	Protuberancia, escamas y caries.
Corrosivo	Productos de reacción, películas de compuestos de la corrosión, polvos metálicos.

1.4.1.4 Fallas por corrosión.

1.4.1.4.1 Desgaste corrosivo mecánico.

A diferencia de los mecanismos de desgaste hasta aquí estudiados que se explican fundamentalmente por la acción de deformación y adhesión mutua entre las superficies en contacto, el desgaste corrosivo metálico tiene lugar en condiciones de acción del medio y la acción interactiva y dinámica entre todos los elementos presentes en la zona de fricción. Si las dos superficies en contacto reaccionan con el medio ambiente dan lugar a la generación y eliminación interrumpida de productos de esta reacción.

El proceso de desgaste corrosivo mecánico se desarrolla cíclicamente en tres etapas:

- 1 Las superficies 1 y 2 reaccionan con el medio 3, formándose productos de la reacción 1-3 y 3-3 en la superficie de los cuerpos.
- 2 Ocurre el desplazamiento de los productos de la reacción, provocando como resultado la formación de grietas y el desgaste abrasivo por la acción de los residuos en el contacto de las superficies 1 y 2.

En el desgaste corrosivo mecánico intervienen procesos químicos como resultado de los cuales aparecen los productos de reacción. Debido a la activación calórica y mecánica, en las irregularidades superficiales tienen lugar las siguientes transformaciones:

- La actividad química se incrementa debido al aumento de la temperatura en las irregularidades, como resultado de lo cual se aceleran las reacciones.
- Las propiedades mecánicas en las capas superficiales de las irregularidades varían, incrementándose la frecuencia de roturas frágiles.

1.4.1.4.2 Desgaste por frotamiento.

Por lo general los mecanismos de desgaste ya descritos actúan simultáneamente, el proceso de adhesión y los fenómenos tribomecánicos producen la variación de las propiedades de las superficies, formándose como resultado residuos del desgaste o el traslado de material de un cuerpo a otro, los procesos se activan por la energía mecánica calórica transmitida o disipada en las irregularidades superficiales y en el volumen del material, todos estos procesos conllevan a la formación de residuos del desgaste que propician el desgaste abrasivo o por fatiga superficial.

La corrosión por frotamiento es una forma de desgaste que aglutina los cuatro mecanismos estudiados hasta ahora y se produce cuando dos cuerpos en contacto experimentan un movimiento relativo de oscilación con una amplitud menor de 100 μm . Este fenómeno es típico de uniones árbol – cubo, empaquetaduras y sellos estáticos, embragues, etc.

Como consecuencia del desgaste por frotamiento en la superficie de los elementos aparecen grietas y se generan residuos que reducen la resistencia al desgaste por fatiga de tres a cuatro veces. Este proceso consta de las siguientes etapas.

- 1 Se produce una deformación por contacto variable lo que provoca el surgimiento y propagación de grietas superficiales, así como también la eliminación de las impurezas superficiales y la formación y destrucción de enlaces adhesivos.
- 2 Se forman productos de desgaste, ya sean como resultado de la fatiga superficial o como resultado de los procesos adhesivos, en esta etapa se produce la oxidación de los productos del desgaste.

Los productos del desgaste ejercen una acción abrasiva lo que a su vez permite la repetición de las dos etapas.

1.4.2 Fallas mecánicas volumétricas.

1.4.2.1 Fallas por deformación plástica.

- **A temperatura ambiente.**

Las fallas por deformación plástica a temperatura ambiente pueden ocurrir por dos causas fundamentales.

- a) Por exceder la tensión de trabajo al límite de fluencia del material (falla por fluencia).
- b) Por pérdida de la estabilidad del equilibrio con tensiones que están por debajo de la fluencia (falla por pandeo, bajo sollicitación a compresión).

En las piezas de maquinas o en elementos de las estructuras este tipo de falla ocurre solamente en condiciones de sobrecargas instantáneas bruscas (Goytisolo, 2008).

- **A elevadas temperaturas.**

La falla por deformación plástica a elevadas temperaturas puede ser:

- a) Falla por creep (fluencia lenta).
- b) Falla por relajación
- c) Falla por colapso plástico.

a) La falla por creep o fluencia lenta es una falla por deformación plástica que ocurre a tensiones de trabajo constantes y cuyos valores están por debajo del límite de fluencia del material, incluso a la temperatura de trabajo. Es conocido que la fluencia del material depende de la temperatura. En el caso de los aceros ésta descende progresivamente en la medida que la temperatura se eleva. La falla por fluencia lenta ocurre a tensiones que están por debajo de la fluencia, por acción combinada de la tensión, la temperatura y el tiempo, o sea, la falla por fluencia lenta no es una falla instantánea sino que ocurre progresivamente en la medida que transcurre el tiempo.

El cálculo del tiempo necesario para que ocurra la falla por creep a una temperatura dada y a una tensión de trabajo dada se realiza de acuerdo a las gráficas aportadas por la Norma Internacional ISO/TR7468.

b) La relajación es un proceso similar al creep pero no idéntico. A diferencia del creep, en la relajación lo que permanecen constante en el tiempo no es la tensión, sino la deformación. Esto conduce a que por efecto combinado de la deformación, la temperatura y el tiempo, la tensión va disminuyendo y el sistema falla por esta causa

precisamente. La falla por relajación es típica en uniones atornilladas (bridas, tapas de motores, turbinas, etc.), en estos casos por efecto de relajación se produce la pérdida de la pretensión en las uniones roscadas y se produce por un lado la fuga del fluido correspondiente y por otro el aumento de la tensión amplitud de las cargas en el caso de cargas cíclicas que puede conducir a la falla por fatiga de los elementos de unión.

c) La falla por colapsación plástica es una falla por fluencia rápida a elevadas temperaturas.

La falla ocurre cuando la máxima tensión de trabajo del elemento (incluyendo las posibles sobrecargas) alcanza el valor de la tensión de flujo. La tensión de flujo es una tensión que se asume en la literatura igual al valor medio entre la resistencia máxima del material y el límite de fluencia, y se corresponde con aquella tensión para la cual el proceso combinado de la acción, el tiempo y la temperatura se acelera y se hace inevitable la falla por deformación plástica.

1.4.2.2 Fallas por fractura.

La falla volumétrica por fractura puede ocurrir por diversos mecanismos. Estos son:

1. Fractura por corrosión bajo tensión (ocurre bajo tensiones constantes en un ambiente corrosivo).
2. Fractura por absorción de hidrogeno (ocurre bajo tensiones cíclicas en un ambiente corrosivo).
3. Fractura por termofluencia (ocurre bajo tensiones constantes a elevadas temperaturas, creep o relajación).
4. Fractura por fatiga (ocurre bajo tensiones cíclicas).
5. Fractura por fatiga-corrosión (ocurre bajo tensiones cíclicas en un ambiente corrosivo).
6. Fractura por fatiga térmica (ocurre bajo tensiones cíclicas provocadas por la variación de las tensiones originadas por los cambios de temperatura).
7. Combinación de las anteriores.

1.5 Métodos de recuperación de árboles con fallas mecánicas superficiales.

1.5.1 Recuperación de árboles mediante adhesivos y partículas de hierro.

Muchos árboles ensamblados han incorporado este sistema considerándose de un significativo valor capital. Es por ello de vital importancia, maximizar su vida útil y rendimiento seguro. Este mantenimiento proactivo reduce el tiempo improductivo y los costos de rupturas.

Este método es utilizado en muy disímiles casos de fallos en árboles y ejes de transmisión como: (H C H Wang, 2012) donde se plantea la recuperación de un eje de un helicóptero que fue dañado por el impacto de un proyectil. Se emplea un compuesto novedoso de fibras de carbón y resina epóxica para reparar el agujero. Se realiza un estudio detallado en (Banea, M D da Silva, L F M, 2009), (Kamal Krishna et al., 2009), (Rider, 2002) de los distintos tipos de compuestos existentes y las aplicaciones de acuerdo con su resistencia, apoyándose en técnicas de laboratorio y método de elementos finitos (MEF). Ha sido empleado también en (Davis et al., 2006), (Fekih et al., 2012), (Jones et al., 2007), (Duong & C. H. Wang, 2007) para reparar partes y estructuras en equipos de aviación.

1.5.2 Recuperación para árboles gravemente desgastados.

La reparación para árboles gravemente desgastados se lleva a cabo con el compuesto Loctite® Fixmaster® Superior Metal.

1. Usando un torno, se rebaja el árbol en el área desgastada de la siguiente manera:
Para diámetros: 13mm – 25mm; rebajar: 1.5mm.
Para diámetros: 25mm – 75mm; rebajar: 3mm.
2. Finalizando el corte con la máquina, la superficie debe quedar con una rugosidad superficial de (e.g., $R_z = 100 \mu\text{m}$).
3. Limpiar la sección con Loctite® ODC Free Cleaner & Degreaser.
4. Aplicar una capa muy fina de Loctite® Fixmaster® Superior Metal y fuércelo hasta el final de superficie y girar el árbol a baja velocidad y continuar aplicando el adhesivo usando un cuchillo color crema o Similar. Desarrolle la superficie por encima del nivel final deseado.

5. Permitir que el adhesivo cure horas por 12 en la temperatura de habitación. Si desea, aplicar aire seco con calor al área de reparación para acelerar la cura.
6. Cortar la tela con el componente seco, usar cuchillas de carburo o alto Acero de velocidad. Si requiere una superficie pulida, use un trabajo abrasivo.



Figura 1.1. Aplicación del compuesto Loctite® Fixmaster® Superior Metal.

1.5.3 Recuperación de árboles mediante resinas y aleaciones de titanio.

Los árboles poden ser reparados con SUPER ALLOY TITANIUM REPAIR COMPOUND.

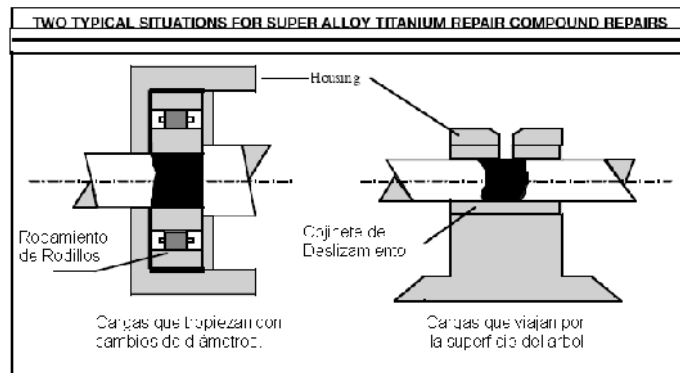


Figura 1.3. Dos típicas situaciones para el uso de SUPER ALLOY TITANIUM REPAIR COMPOUND.

También pueden repararse árboles con cojinetes no metálicos, así como árboles pequeños de bombas, hasta grandes menores de 100 Tonelada como son los árboles de hélices marinas. Para todos estos casos el procedimiento debe ser el siguiente:

- A. Preparo de superficie:** El área gastada debe ser rebajada a máquina a un mínimo de 3/32" (2 mm), partiendo de un enhebrar o roscado.

Este preparado de superficie suministra la mejor cerradura mecánica posible para SUPER ALLOY TITANIUM REPAIR COMPOUND.

El área de reparación debe ser lavada con disolvente de seguridad 1XT - 59 de IMPAX, para retirar toda grasa, aceite y fluidos mordaces (usar unos fiambres, moños de vieja o estopas para retirar partículas diminutas.) Secar al aire. [Nota: Llevar anteojos de seguridad y guantes de goma.]

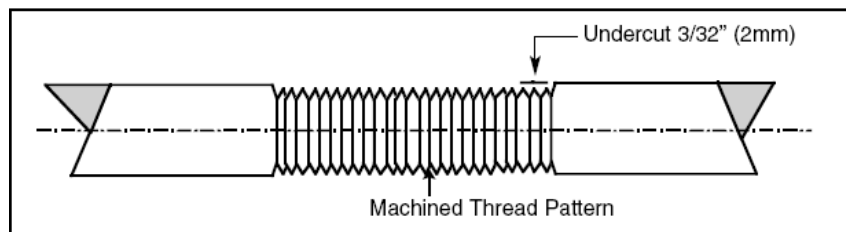


Figura 1.4. Preparo de superficie para SUPER ALLOY TITANIUM REPAIR COMPOUND.

- B. Mezclar:** SUPER ALLOY TITANIUM REPAIR COMPOUND debe ser mezclado con las especificaciones correspondientes.
- C. Aplicación:** Con el cuchillo color crema suministrar la pasta en el área dañada con una capa muy fina de SUPER ALLOY TITANIUM REPAIR COMPOUND. Llenando cada uno de las roscas hechas por la máquina.
[Nota: Es posible girar en un torno el árbol, a velocidad lenta, suministrando la pasta.]
Evitar siempre que queden Burbujas atrapadas y llenar el área de reparación hasta que su diámetro sea 1/16" (1.6 mm) más grande que el diámetro de eje original. Permita que la aleación cure 3 horas en 72° F (21° C).
- D. Maquinado:** Trabaje a máquina la tela curada usando cuchillas de carburo o puntas de acero de alta velocidad con tratamientos térmicos.
- E. Aplicaciones de baja fricción:** Para ejes con rodamientos de balines, el área trabajada a máquina debe ser brillante en 1,500 Pies./Minuto (457m / minutos.) Utilice una varilla de grafito "Blanda" o engrudo de molybdenum – disulfide.

F. Reparación de superficie por llamas: Según las recomendaciones de:

American Standard "Near White Finish" SSPC-SP-10-63T British Standard 4232 "Second Quality".

Los componentes antes expuestos a los ácidos o al agua de mar deben ser tratadas después de 24 horas para permitir que sales arraigadas se lixivien a la superficie. Un tratamiento con llama podría ser necesario para retirar componentes contaminantes debido a largas inmersiones en aceite.

1.5.4 Recuperación de árboles mediante Pulvimetalurgia.

La Pulvimetalurgia o metalurgia de polvos es un proceso de fabricación que, partiendo de polvos finos y tras su compactación para darles una forma determinada (compactado), se calientan en atmósfera controlada (sinterizados) para la obtención de la pieza.

Este proceso es adecuado para la fabricación de grandes series de piezas pequeñas de gran precisión, para materiales o mezclas poco comunes y para controlar el grado de porosidad o permeabilidad. Girando en el torno el árbol cargado eléctricamente positivo y negativamente el polvo, la diferencia de potencial realiza la adherencia dándole consistencia a la pieza. Algunos productos típicos son rodamientos, árboles de levas, herramientas de corte, segmentos de pistones, guías de válvulas, filtros, etc.

1.5.5 Recuperación de árboles mediante Metalizado.

Consiste en depositar pequeñas partículas metálicas, en estado de semifusión, sobre la superficie a metalizar, hasta conseguir un recubrimiento adherente. Estas partículas pasan a través de una fuente de calor muy intensa y se proyectan a elevadas velocidades sobre la superficie de la pieza, donde forman partículas metálicas de pequeño espesor. El metal de aportación en forma de polvo o de alambre, se hace pasar a través de una llama oxigás, que lo funde en forma de gota. Un chorro de aire a presión actúa sobre estas gotas, dividiéndolas en partículas muy pequeñas y proyectándolas sobre la superficie a metalizar, a la que llegan con velocidades que pueden estimarse entre 100 y 250 m/s, según sea el diseño de la pistola. La unión se consigue por la energía calorífica desarrollable en el choque, que permite fundir tanto

las pequeñas partículas como la película de óxido formada durante el transporte en el interior del chorro de aire. El éxito de la operación depende del grado de limpieza y rugosidad de la superficie a metalizar. Para conseguir una buena adherencia es necesario eliminar óxidos, aceites, grasas, polvos o cualquier otra suciedad. La rugosidad superficial permite disponer de una especie de anclaje mecánico que también contribuyen a una mejor adherencia de la película de metalizado. Esta técnica tiene una aplicación en la recuperación de superficies desgastadas de elementos de máquinas, principalmente cuando no existan grandes exigencias en resistencia a la tracción y porosidad.



Figura 1.5. Pistola de Metalizar.

1.5.5.1 Metalizado por arco eléctrico.

Con esta técnica las partículas se depositan más calientes y fluidas que en la metalización con llama oxiacetilénica. El calor necesario para fundir el hilo lo genera un arco eléctrico, en lugar de la llama. Puesto que en el arco se alcanzan temperaturas mucho más altas que en la llama (380°C), las partículas de aportación, muy calientes, pueden ligarse más íntimamente con la pieza a metalizar. Además, el arco permite conseguir recubrimientos con menor contenido de óxidos. En (Schubert et al., 1999), se emplea esta técnica pero apoyado en la precisión de un haz laser Nd: YAG, una nueva tecnología de revestimiento con baja potencia que logra para pequeñas dimensiones y con la entrada de calor mínima, un revestimiento de alta precisión. Los cortos tiempos de interacción y un buen control del proceso aumentan la precisión en la generación de óptimos compuestos de recubrimientos para la reparación industrial de componentes. También en (Nowotny et al., 2012) utilizan la pulverización térmica con láser, que es

una tecnología de revestimiento de superficie adecuada en particular para los componentes de carga dinámica. En (Merchán Moreno, 2012) se aplica en la reparación del rotor de un motor eléctrico que sufrió desgaste.



Figura 1.6. Equipo de metalización por arco eléctrico (B&W Machine Co. Inc)

1.5.5.2 Metalización con soplete.

El soplete como se muestra en la Figura 1.7 constituye un dispositivo adecuado para metalizar con un pequeño recipiente, dispuesto sobre el cuerpo del soplete se introduce el material de aportación en forma de polvo, en la corriente gaseosa. La salida de polvo se controla mediante una palanca que se acciona y las partículas del material de aportación funden al llegar a la llama, que las proyecta, sobre la superficie a metalizar. La llama se emplea para precalentar la pieza, para fundir el polvo de aportación y para proyectarlo sobre la superficie a metalizar. La llama se emplea para precalentar la pieza, para fundir el polvo de aportación y para proyectarlo sobre la superficie. Esta técnica ha sido empleada en (G. Zhang et al., 2005) donde se rapara un cigüeñal de un motor de seis cilindros, por pulverización doble por arco eléctrico con recubrimientos de 48 MnV y 3Cr13 respectivamente. La recuperación de un rotor de un motor eléctrico de 150 HP mediante el empleo de la soldadura y el metalizado en caliente por técnicas de rociado de polvo (Calderon de León, 2007). En este, la reparación por soldadura fue realizada con un electrodo inoxidable E-312 y el metalizado en caliente con polvo CPM-1205. En (Finco & Núñez, 2002) se describe el diseño y la construcción de una máquina para el termo-rociado de cojinetes de metal Babbitt. Se ha visto en (Gautam Das et al., 2003) la influencia de esta técnica en la falla por fatiga posterior de un árbol.



Figura 1.7. Soplete de Metalización (B&W Machine Co. Inc)

1.5.6 Recuperación de árboles mediante electroerosión.

En la aplicación de este técnica solo se ha encontrado (Tarel'nik & Martsinkovskii, 2004) y se describe la reparación de piezas de máquinas como bombas, ventiladores y compresores que en muchos casos, algunos de sus componentes que son prácticamente imposibles de reparar y tienen que ser intercambiados. El método de fortalecimiento y reparación por electroerosión es un método apropiado para subsanar los daños ocurridos por el desgaste y picaduras.

1.6 Métodos de recuperación de árboles con fallas mecánicas volumétricas.

1.6.1 Recuperación de árboles mediante encasquillado.

Esta manera de recuperar partes de ejes o árboles de máquinas en las áreas de rodamientos viene a cubrir un aspecto importante, cuando el daño o desgaste no es intensivo, es posible recuperarlo adicionando cordones de soldadura por cualquiera de los métodos mencionados o conocidos.

Aún cuando este método presenta ventajas tiene sus limitaciones, entre las cuales está, que no se recomienda su uso o aplicación en aquellas partes donde existan cuñeros o ranuras para presillas que fijan ruedas dentadas, impelentes y otros. Se aplica en (Stakevich et al., 1997) donde se repara el árbol del generador No 4 de una hidroeléctrica, que se desgastó en la zona de los apoyos, mediante el encasquillado de esa zona y soldadura del extremo donde se va a ubicar el casquillo.

1.6.1.1 Preparación de la zona dañada.

Cuando ya es determinado el daño o desgaste que no puede recuperarse aportando o rellenando con soldadura, se define preparar la parte para ser encasquillada.

Esto consiste en desgastar hasta tener una superficie uniforme, maquinando un espesor aproximado de 3 mm a 6 mm al radio del árbol en la zona a recuperar. (Ver Figura 1.8)

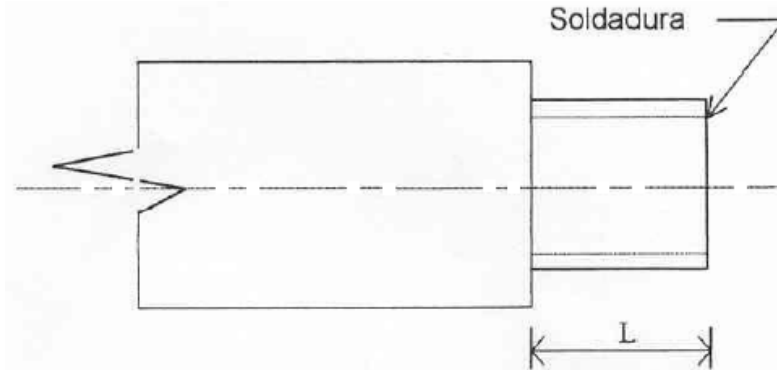


Figura 1.8. Preparación del área dañada.

1.6.1.2 Preparación del casquillo.

a) Una vez habilitada la superficie, se dimensionan diámetro y longitud, se prepara el casquillo con dimensiones adecuadas, de diámetro y espesor necesario. (Ver figura 1.9)

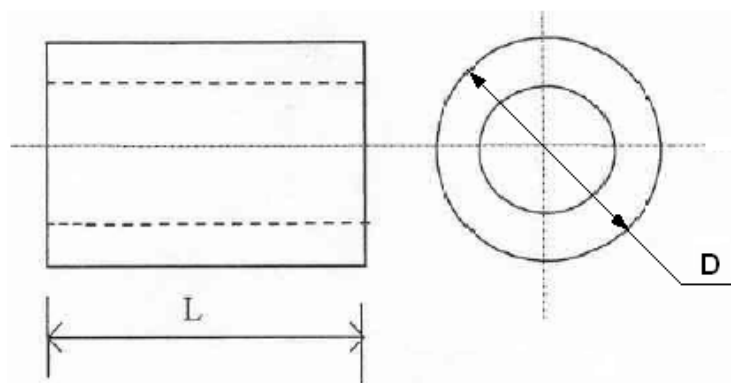


Figura 1.9. Preparación del casquillo.

b) Después de montado aún cuando se realiza por interferencia, para mayor seguridad y evitar que se desprenda el casquillo cuando esté en funcionamiento el equipo es

recomendable, puntear con soldadura la cara frontal del árbol que se encasquilló ya sea colocando puntos de soldadura en un ángulo 90° o bien soldando el perímetro frontal de contacto entre casquillo y árbol, por lo cual será necesario habilitar con un bisel en donde se deposite la soldadura (Ver Figura 1.10)

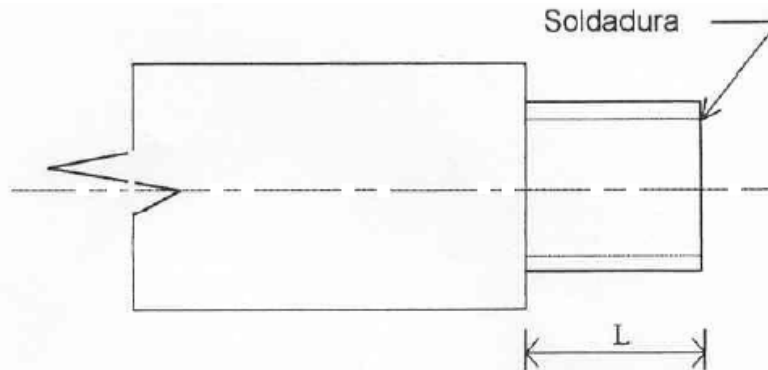


Figura 1.10. Montaje del casquillo.

- c) Es necesario tener presente que el material del casquillo será el mismo que el del eje o flecha necesariamente para un mejor funcionamiento, así mismo la soldadura utilizada será compatible con ambos, casquillos y árbol o eje.

1.6.1.3 Área Recuperada.

Después de montar el casquillo en la parte a recuperar se procede a maquinar las dimensiones originales de trabajo que tenía el árbol o eje en la zona recuperada.

Cabe mencionar que se desgasta de 0.2 a 0.4 mm. Al diámetro, esto es, que el casquillo de su diámetro exterior se prepara a la dimensión final de funcionamiento evitándose con esto mayor pérdida de tiempo en la rehabilitación del árbol o eje. Finalmente mencionaremos que existen algunas otras formas de encasquillar partes mecánicas o ejes según las diversas máquinas existentes así como la necesidad de recuperación de las mismas.

1.6.2 Recuperación de árboles mediante soldadura.

El soldado de ejes y árboles consiste en depositar una capa metálica dura y resistente sobre la superficie y bordes de piezas desgastadas. Se considera como uno de los métodos más económicos para la reparación de herramientas, máquinas y equipos de

construcción. Así esta técnica permite una fácil recuperación de ejes, ruedas dentadas y herramientas cortantes.

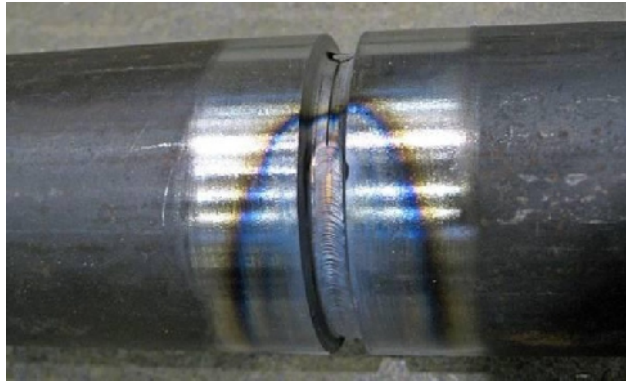


Figura 1.11. Árbol reparado por soldadura.

Ha sido estudiada por (Celada Rios, 2012), (Velasco Molina & Chalá Gonzalón, 2010), (Babakr et al., 2009), (Bolaños et al., 2005), donde podemos encontrar una amplia retrospectiva bibliográfica de los materiales y métodos para recuperar por soldadura estos elementos de máquinas y se ha estudiado la influencia en la vida de los mismos. Es el más utilizado en la práctica de la vida industrial por ser sencillo, rápido de ejecutar y en ocasiones no es necesario desarmar todos los elementos para su ejecución. Se ha determinado en (Harris & Jur, 2009) la influencia del empleo de este método en la fatiga de árboles.

1.6.3 Recuperación de árboles mediante espigado.

El espigado es el procedimiento que se emplea en la práctica para recuperar árboles fracturados por fatiga, sin embargo, es necesario aclarar que se realiza empíricamente sin ninguna argumentación técnica de cómo realizarlo.

Este procedimiento de recuperación de árboles es el aspecto medular del presente trabajo. Su esencia es preparar las dos partes las cuales serán ensambladas, teniendo en cuenta parámetros de diseño como diámetros y radios de redondeo, así como el largo de la espiga (Fragoso Ortiz & Trujano Galicia, 2008). El método se asienta en los siguientes pasos:

- a) Determinación y corte del área dañada.
- b) Espigar y soldar.

c) Maquinado del área recuperada.

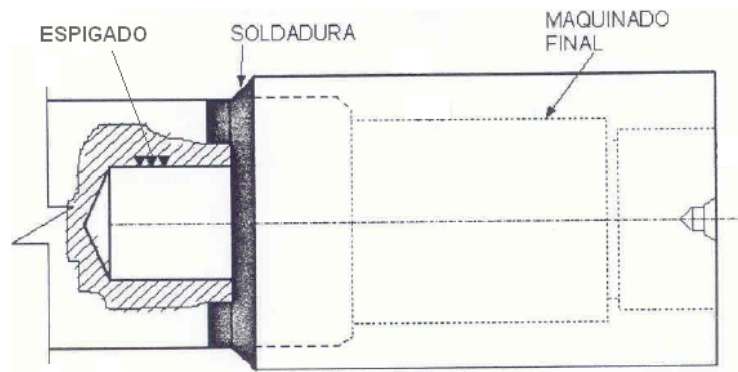


Figura 1.12. Esquema de la unión ensamblada por espigado y soldadura.

1.7 Comparación, ventajas y desventajas de los métodos.

Recuperación de árboles mediante adhesivos y partículas de hierro.

Ventajas:

- ✓ Solución con uso de maquinarias estándar y no requiere equipamiento ni entrenamiento especializado.
- ✓ Previene el tiempo improductivo y reduce costos de reparación.
- ✓ Reparación de la sección desgastada

Desventajas:

- ✓ Se muestra ineficiente en la recuperación de árboles fracturados por fatiga.

Recuperación de árboles mediante resinas y aleaciones de titanio.

Ventajas:

- ✓ Pueden ser reparados ejes con cojinetes no metálicos.
- ✓ Eficaz para árboles pequeños de bombas hasta grandes menores de 100 Tonelada.

Desventajas:

- ✓ No es recomendado para árboles que rotan a altas velocidades.
- ✓ Se muestra ineficiente en la recuperación de árboles fracturados por fatiga.

Recuperación de árboles mediante metalizado.

Ventajas:

- ✓ No presenta limitaciones en cuanto a tamaño de objetos a metalizar.
- ✓ Pueden ser reparados ejes con todo tipo de cojinetes.

- ✓ No requiere precalentamiento ni pos calentamiento.

Desventajas:

- ✓ Contraproducente en árboles que no existan grandes exigencias de resistencia a la tracción y a la porosidad.
- ✓ Requiere uso de maquinaria especializada.
- ✓ Se muestra ineficiente en la recuperación de árboles fracturados por fatiga.

Recuperación de árboles mediante encasquillado.

Ventajas:

- ✓ Sustituye la soldadura en cuanto aumento considerable de diámetros.
- ✓ Pueden ser reparados árboles con todo tipo de cojinetes.

Desventajas:

- ✓ Se necesita el casquillo.
- ✓ No es recomendable su aplicación secciones donde existan chaveteros o ranuras para presillas.
- ✓ Requiere uso de maquinaria especializada.
- ✓ Se muestra ineficiente en la recuperación de árboles fracturados por fatiga.

Recuperación de árboles mediante Soldadura.

Ventajas:

- ✓ Existen electrodos con materiales de aportación para todo o casi todo tipo de árboles.
- ✓ Cubre desgastes masivos.
- ✓ Muy económico.

Desventajas:

- ✓ Requiere personal calificado.
- ✓ Deflexión en los árboles al depositar la soldadura.
- ✓ Se muestra ineficiente en la recuperación de árboles fracturados por fatiga.

Recuperación de árboles mediante espigado.

Ventajas:

- ✓ Cubre daños severos.
- ✓ Reduce el tiempo improductivo de las máquinas.
- ✓ Maximiza la vida útil y un rendimiento seguro de los árboles
- ✓ Eficiente en la recuperación de árboles fracturados por fatiga.

Desventajas:

- ✓ Solo si no es aplicado correctamente.
- ✓ Preparación de superficie.

1.8 Conclusiones parciales del Capítulo I.

1. En la literatura se describen y argumentan técnicamente diferentes procedimientos para la recuperación de árboles pero todos para solucionar averías por desgaste de determinadas zonas de árboles o daños superficiales de diferente índole.
2. El único procedimiento para recuperar árboles fracturados por fatiga es el espigado y la soldadura, pero en la práctica este procedimiento se emplea empíricamente en la misma zona fracturada sin argumentar como realizarlo.



Capítulo II

Capítulo II

CAPÍTULO II. Metodología para la elección del diámetro de la espiga para optimizar la resistencia a la fatiga de los árboles que transmiten sólo flexión en la zona fracturada.

2.1 Características de la unión espigada y soldada del árbol a recuperar para garantizar la resistencia a la fatiga.

La unión espigada del árbol a recuperar es como la mostrada en la Figura 2.1. La misma soportara básicamente flexión, aunque pudiera existir algún pequeño momento torsor, producto de algún dispositivo que se accione por ese extremo del árbol.

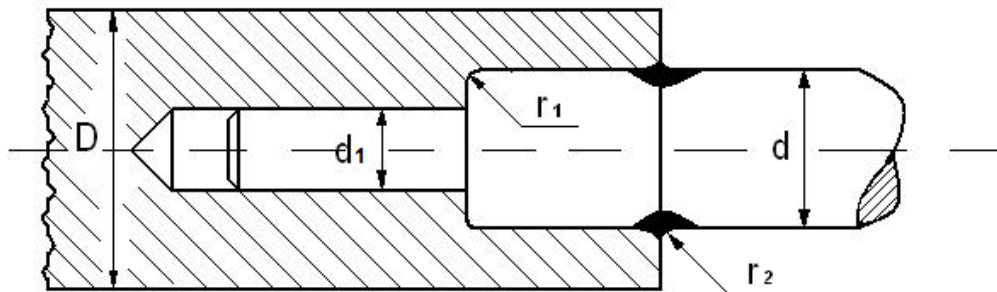


Figura 2.1. Esquema de la unión espigada y soldada.

La espiga de diámetro d_1 se coloca solo para centrar la unión durante el ensamblaje y debe tener un ajuste deslizante. Ella tiene mayor longitud que la de la espiga de trabajo de diámetro d para que cumpla la función de guiar a ésta durante el ensamblaje. El cordón de soldadura, junto con la unión por interferencia de la espiga, transmitirá el posible momento torsor que sea necesario transmitir en esa zona del árbol. Para lograr la igualdad de resistencia a la fatiga por flexión en ambas piezas deberá cumplirse que:

Donde:

y : Factores de concentradores de tensiones de la pieza 1(anillo) y de la pieza 2 (espiga) respectivamente.

y : Factores de tamaño de las piezas 1 y 2 respectivamente.

y : Factores de estado de la superficie de las piezas 1 y 2 respectivamente. En el análisis que se realizara a continuación se considera para ambas piezas el mismo estado de la superficie después de su maquinado, El ciclo de variación de las tensiones de flexión en el árbol es simétrico, o sea: y . Las tensiones amplitud se calculan en una y otra pieza por las siguientes expresiones.

$$\sigma_1 = \frac{M}{I} y_1$$

$$\sigma_2 = \frac{M}{I} y_2$$

$$\sigma = \frac{M}{I} y$$

Sustituyendo en (2.1).

$$\sigma_1 = \frac{M}{I} y_1$$

Despejando en función de .

$$\sigma_1 = \frac{M}{I} y_1$$

En la sección donde se va a espigar existe un momento flector (M_f). Una parte de este momento se transmite por la pieza interior (espiga) y otra parte por la exterior (anillo) de manera que:

Y los valores de M_{f1} y M_{f2} son directamente proporcionales a su rigidez, ya que:

De la Ecuación Diferencial aproximada de la Curva Elástica de una viga se tiene que:

, y ; se obtiene entonces que:

$$\sigma_1 = \frac{M}{I} y_1$$

$$\sigma_2 = \frac{M}{I} y_2$$

Pero como:

$$\sigma_1 = \frac{M}{I} y_1$$

Sustituyendo (2.3) en (2.2):

De donde, despejando Mf_1 .

Sustituyendo (2.4) en (2.1):

Sustituyendo (2.4) en (2.3):

Finalmente igualando las expresiones (2.5) y (2.6) se obtiene:

Despejando d , teniendo en cuenta que $c = d/D$ se obtiene:

La ecuación (2.7) permite calcular el diámetro necesario d en la espiga para optimizar la resistencia a la fatiga de la unión espigada. Para realizar este cálculo se elaboró el algoritmo que se muestra en la Figura 2.2 el cual se programó en MATLAB.

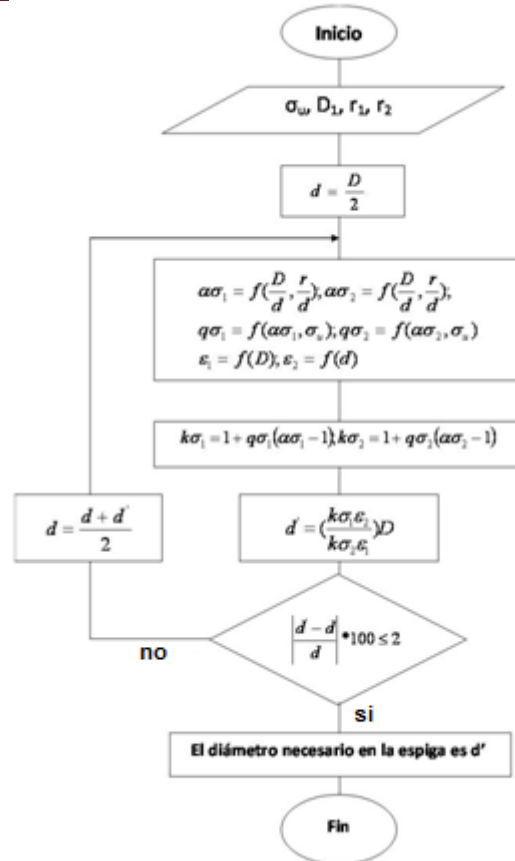


Figura 2.2. Algoritmo para optimizar la resistencia a la fatiga de árboles recuperados por espigado y soldadura que soportan sólo flexión.

2.2 Aplicación de la metodología aplicada para recuperar el árbol del Ventilador de Gases Calientes en la Empresa “Cementos Cienfuegos S.A.”

2.2.1 Caracterización del árbol del Ventilador de Gases Calientes.

El trabajo que dio origen a esta investigación fue la falla por fatiga del Árbol del Ventilador de Gases Calientes de la Empresa “Cementos Cienfuegos S.A.” en Cuba, la misma se produjo en una sección próxima a uno de los cojinetes de apoyo. Se trata de un árbol de grandes dimensiones de un acero aleado al cromo - nickel – molibdeno, de baja soldabilidad, pero con la particularidad que la sección de falla está ubicada del lado opuesto del motor, donde no se transmite torsión, sino solamente cortante y flexión. Estas particularidades implican que en la zona donde se realizó el espigado durante la recuperación, las tensiones eran mucho más pequeñas que en la sección de fractura, lo que hace posible transmitir las cargas de flexión a través de la espiga colocada por

interferencia y entonces depositar un pequeño cordón de soldadura cuya función es soportar las tensiones de cortante longitudinales y proteger la unión de la acción erosiva y corrosiva de los gases calientes ya que dicha sección está en contacto con los mismos. La influencia de la temperatura de los gases fue tomada en cuenta en la reducción de las propiedades mecánicas del metal.

2.2.2 Vistas del ventilador, del árbol y de la sección de fractura.

En la Figura 2.3 se muestra una vista del ventilador, donde se puede evaluar su tamaño comparado con el de un hombre y se muestra una vista del árbol.

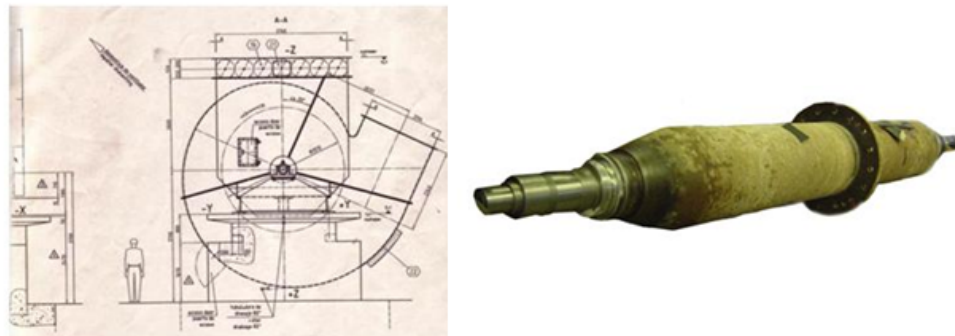


Figura 2.3. Vista general del ventilador con sus dimensiones exteriores y vista del árbol.

En la Figura 2.4 se muestra la Sección de Fractura del Árbol, donde se puede apreciar evidentemente se trata de una Fractura por Fatiga.

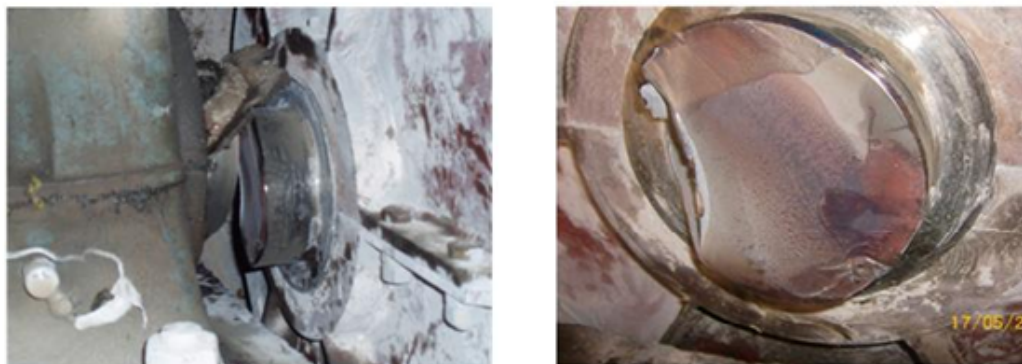


Figura 2.4. Vistas de la sección de fractura.

2.2.3 Elección de la sección donde se realizara el espigado y la soldadura.

El espigado y la soldadura para la recuperación del árbol no se puede realizar en la misma sección de fractura ya que si el árbol sufrió la fractura por fatiga en dicha sección

era señal de que estaba incorrectamente diseñado, el espigado y la soldadura lo debilitarán aún más y no será capaz de soportar las cargas actuantes en dicha sección. Se hace preciso construir el gráfico de tensiones de flexión en el árbol contra longitud de manera de poder encontrar en que sección donde las tensiones y los concentradores de tensiones sean menores que la zona de fractura para en dicha sección realizar entonces el espigado y la soldadura. En este caso se escogió para espigar y soldar una zona de diámetro $D = 260$ mm, con un módulo a la flexión W veces mayor que el de la sección de fractura. Al mismo tiempo se hace necesario rediseñar la sección donde se produjo la fractura, reduciendo las tensiones o la concentración de tensiones para elevar la resistencia a la fatiga en dicha zona. Una señal evidente de que el árbol del ventilador de gases calientes objeto de estudio, estaba incorrectamente diseñado es la gráfica de distribución de tensiones con relación a la longitud que se muestra en la Figura 2.5, donde se aprecia que lejos de disminuir las tensiones hacia la zona de los apoyos lo que sería lo lógico pues los momentos flectores en un árbol con apoyos en los extremos los momentos flectores son cero en los apoyos y van aumentando en el centro. Si el árbol se aproxima a una viga de igual resistencia el diámetro del árbol debe ir disminuyendo hacia los apoyos de manera que las tensiones en el mismo se mantengan prácticamente constantes a lo largo de la longitud. En el árbol original se observa precisamente un pico de tensión en la sección

De fractura, lo cual es la causa esencial de la falla. La sección donde aparece otro pico de tensión en la sección de la izquierda es en la zona próxima al otro apoyo, sin embargo en esta sección está ubicado un rollete cilíndrico de doble hilera autoalineante igual que el de la derecha, pero de 150 mm, el rollete derecho era de 140 mm. Esta diferencia se aprovechó para rediseñar la sección de fractura del árbol recuperado ya que se utilizarían rolletes iguales en ambos apoyos de 150 mm de diámetro. Esto ofrece ventajas durante el mantenimiento ya que no se requieren rolletes diferentes de repuesto y con un solo rollete de repuesto se puede resolver avería de emergencia en los mismos. El factor de seguridad a la fatiga del árbol en la sección de fractura aumentó considerablemente con esta solución. El árbol rediseñado se fabricó en México y es el que está instalado.

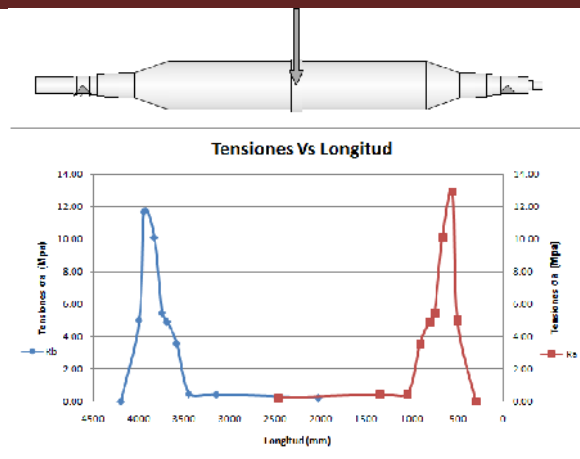


Figura 2.5. Distribución de tensiones en función de las reacciones R_a y R_b para el árbol original.

2.2.4 Elección del diámetro de la espiga para optimizar la resistencia a la fatiga de los componentes de la unión.

La unión espigada del árbol a recuperar es como la mostrada en la Figura 2.1 La misma soportara básicamente flexión, aunque pudiera existir algún pequeño momento torsor producto de un dispositivo existente en ese extremo del árbol para el enfriamiento del árbol durante una parada brusca.

Los datos disponibles son: Acero aleado del árbol de la marca AISI/SAE 4340 con $\sigma_u = 1148 \text{ MPa} = 11706 \text{ kgf} / \text{cm}^2 = 117 \text{ kgf} / \text{mm}^2$, $D = 260 \text{ mm}$, $r_1 = 8 \text{ mm}$, $r_2 = 5 \text{ mm}$, aplicando el Software elaborado en MatLab cuyo algoritmo se muestra en la Figura 2.2 se obtuvo, después de las iteraciones correspondientes un diámetro de la espiga $d \approx 218 \text{ mm}$. Para el cual se obtuvo: $k_{\sigma 1} = 1,97$, $k_{\sigma 2} = 2,37$, $\varepsilon_1 = 0,56$ y $\varepsilon_2 = 0,565$; (Fernández Levy, G.S, 1982); (Birger, Schorr, & Schneiderovich, 1986); (Pisarenko, Yákovlev, & Matveév, 1989).

2.2.5 Esquema y dimensiones de la zona espigada y biseles para la soldadura.

La espiga del árbol recuperado se colocó por interferencia en su posición para evitar los movimientos deslizantes elásticos durante el giro del árbol y evitar el desgaste por ludimiento de las partes. Se colocó un pequeño cordón de soldadura el cual además de contribuir junto con la interferencia de la espiga a soportar las fuerzas de cortante que surgen en esa sección, hermetiza la zona recuperada para impedir la acción

corrosiva de los gases calientes al penetrar en las superficies de encaje. En la Figura 2.6 se muestra el ensamble de la espiga con el árbol así como algunas de sus dimensiones y las tolerancias para el ajuste deslizante entre el agujero y la guía de la espiga y el ajuste por interferencia de la espiga, el cual fue calculado para transmitir el torque de giro libre (Dobrovolski, 1970)

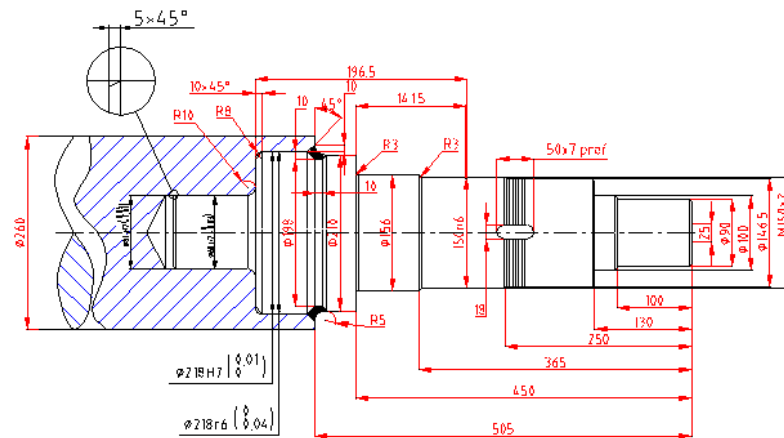


Figura 2.6. Ensamble de la espiga con el árbol.

2.2.6 Descripción de la tecnología de soldadura empleada en la recuperación.

De acuerdo a la composición química y utilizando la fórmula del carbono equivalente $[C]_{eq}$ del (International Institute of Welding, 1991), se calculó ese parámetro estando entre: 0,68-0,9.

Para estos niveles de $[C]_{eq}$ que posee este material (0,68-0,9) y teniendo en cuenta las dimensiones de la pieza, su soldabilidad se puede clasificar como mala, por lo que fue necesario aplicar precalentamiento para evitar el agrietamiento en la zona afectada por el calor (Lukkar, 1997), así como utilizar un consumible de soldadura que sea capaz de aportar bajos niveles de hidrógeno (< 5 ml de hidrógeno/100 g de metal) (American Welding Society, 1991) y aplicar al finalizar el proceso un alivio de tensiones (American Welding Society, 1993). Del análisis de la transformación isotérmica para el acero AISI/SAE 4340, la temperatura de M_s (temperatura de inicio de la transformación de austenita en martensita durante el enfriamiento), es aproximadamente $290^\circ C$. En el diagrama, también se muestra que se necesitan $370^\circ C$ y aproximadamente 3 h para

completar la transformación isoterma de austenita en bainita (ferrita y carburos). Al soldar este acero usando una temperatura de precalentamiento y entre pasadas entre 315 y 345 °C y manteniendo esta temperatura un mínimo de 3 h durante la realización de la soldadura, puede lograrse una microestructura bainítica en la ZIT. Es esencial mantener el precalentamiento inclusive después de culminar la soldadura durante un tiempo suficiente prolongado para permitir que se produzcan estas transformaciones, unido a este el manteniendo del precalentamiento durante la soldadura también promueve la salida del hidrógeno y reduce el riesgo de agrietamiento inducido por hidrógeno. Con la ayuda de una grúa se colocará el árbol en posición vertical, con la zona de la junta a soldar hacia arriba. Se iniciará el precalentamiento de la zona a soldar mediante la utilización de una antorcha oxiacetilénica de 1/16 " y un régimen de trabajo de 4.2 kg/cm² de presión de oxígeno y 0.1 kg/cm² de presión de acetileno. Se calentará esa zona del árbol, 20 min después de alcanzar la temperatura indicada en este epígrafe. El calentamiento se realizará de forma que la zona a calentar abarque 50 mm a ambos lados de la unión, aunque la permanencia de la llama debe estar la mayor cantidad de tiempo sobre la parte más masiva del árbol. El proceso se debe controlar mediante de un termómetro digital. La selección del consumible de soldadura debe partir de la premisa de que el mismo debe ser del tipo, de bajo hidrógeno. Teniendo en cuenta el nivel de resistencia del material, se selecciona el electrodo E-12018-M. Según especificación (AWS A.5.5, 1998). "Specification for low-alloy steel electrodes for shielded metal arc welding" (AWS, 1998), el cual garantiza, una tensión última de más de 830 Mpa, la cual es muy inferior al del material base (1143 MPa), sin embargo de acuerdo a criterios de los autores, la sección transversal del árbol es la encargada de transmitir el momento flector en dicha sección con la correspondiente reducción en el Módulo de la Sección, como se vio en el Capítulo I, transmitiendo la soldadura sólo las tensiones de cortante que existan a esa altura de la sección producto de la flexión y el pequeño posible momento torsor proveniente del motor auxiliar, que se utiliza para romper la inercia del Ventilador de Gases Calientes. Además la unión por interferencia que existe entre la espiga y el cuerpo del árbol contribuye en esta función. Es por ello que la unión soldada solo es la encargada de garantizar la estabilidad geométrica de todo el conjunto y hermetizar la zona de interferencia de manera que los gases

calientes puedan penetrar en esa zona y crear algún efecto de corrosión por ludimiento en presencia de los componentes corrosivos de estos. Este electrodo, además es recomendado para trabajos de alta responsabilidad como el caso en estudio. Los electrodos deben emplearse con el revestimiento seco. En caso de que se compruebe al abrir el paquete que el mismo presenta falta de hermeticidad previo a su empleo estos electrodos deben hornearse a $260 - 430\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 2 horas o siguiendo recomendación del fabricante. Los electrodos extraídos de paquetes herméticos o secados en horno se almacenarán en horno a una temperatura de $120 - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, de donde se extraerán en pequeñas partidas que serán empleadas inmediatamente. Una vez extraídos del horno, estos electrodos, podrán permanecer expuestos al ambiente durante un período no mayor de 30 minutos, que si se sobrepasa requerirá un nuevo secado (téngase en cuenta que estos electrodos admiten como máximo dos calcinaciones. Al tener el árbol a la temperatura indicada, se comenzará la soldadura del mismo siguiendo el régimen tecnológico siguiente. Los parámetros del proceso de soldadura será el SMAW con Electrodo Tipo E-12018 (AWS 5.5) de diámetro 3,5 mm. La corriente de soldadura es del Tipo Directa con Electrodo Positivo con Voltaje 20 - 25 Volts e intensidad de corriente 115-165 Amperes (American Welding Society, 1991). El cordoneo debe ser estrecho, dando como resultado un cordón de 2 veces el diámetro del electrodo (aproximadamente). Se realizará en todo el perímetro de la unión, iniciando en el fondo y terminando con un filete de 30 mm. Los cordones se realizaran de tal forma que un cordón ocupe 1/3 del área del anterior, para evitar inclusiones de escoria. La secuencia se muestra en la Figura 2.7. La temperatura de precalentamiento se mantendrá durante todo el proceso de soldadura. Se aplicara control visual por capas.

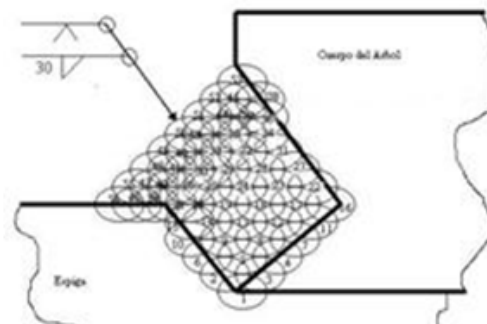


Figura 2.7. Secuencia de Cordoneo.

Una vez que esté completamente soldada la unión, y sin disminuir la temperatura entre pasadas, se dará inicio al tratamiento térmico posterior o de alivio de tensiones. Según, ASME (American Society of Mechanical Engineers) en (American Welding Society, 1991), este tipo de tratamiento térmico debe aplicarse en un rango de temperatura entre 595 a 675 °C, de acuerdo a las dimensiones de la sección de la pieza, después de estar a esta temperatura el tiempo de permanencia debe ser de 3 horas. El calentamiento deberá ser lento, a razón de 300 °C/h. El ancho de la zona calentada deberá ser de 200 mm a ambos lados de la junta. El enfriamiento debe realizarse cubriendo todo el cuerpo del árbol con mantas de lana mineral, para evitar el rápido enfriamiento y el impacto de corrientes de aire. El árbol deberá ser inspeccionado posterior al enfriamiento utilizando control visual y ultrasonido (American Welding Society, 1991).

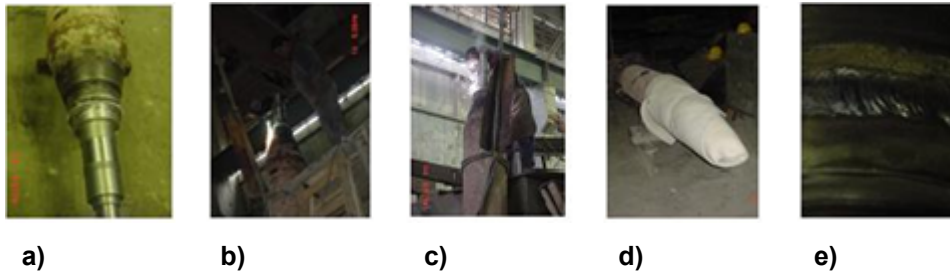


Figura 2.8. Vistas de diferentes momentos del proceso de soldadura.

- a) Árbol listo para comenzar el proceso de soldadura. b) Proceso de Precalentamiento de la Zona a Soldar. c) Proceso Soldadura. d) Proceso de Enfriamiento. e) Cordón de soldadura terminado.**

2.3 Conclusiones parciales del Capítulo II.

1. En el presente capítulo se demostró evidentemente que la zona de fractura era la de mayor tensión de flexión y el rediseño del árbol para la fabricación de uno nuevo en México se orientó hacia el incremento del diámetro en dicha zona de diámetro 140 mm a 150 mm, lo que además de elevar la resistencia a la fatiga y prolongar la vida del mismo tal como se demostró en los cálculos realizados en la investigación, representa una serie de ventajas adicionales desde el punto de vista del mantenimiento y los surtidos necesarios para garantizar el mismo.
2. En la Investigación se realizó la recuperación del árbol fracturado lo que implicó el análisis y la selección adecuada de la sección de espigado, las dimensiones de la espiga y de la unión y la forma de realizar este proceso teniendo en cuenta que la sollicitación fundamental del árbol en esa zona era fundamentalmente a flexión. Se determinó el diámetro de la espiga garantizando igual capacidad de soportar cargas en el núcleo y en el anillo de la sección espigada avalando la resistencia a la fatiga. Ambas partes fueron ensambladas por interferencia y soldadas para evitar los posibles deslizamientos elásticos y hermetizar la sección espigada de la acción erosiva y corrosiva de los gases calientes. Se desarrolló la tecnología de soldadura en función de la mala soldabilidad del metal.



Capítulo III

Capítulo III

CAPÍTULO III. Metodología para la elección del diámetro de la espiga para optimizar la resistencia a la fatiga de los árboles que transmiten flexión y torsión en la zona fracturada.

3.1 Características de la unión espigada y soldada del árbol a recuperar para optimizar la resistencia a la fatiga de la unión.

La metodología de cálculo se desarrolla apoyándose en la Figura 3.1.

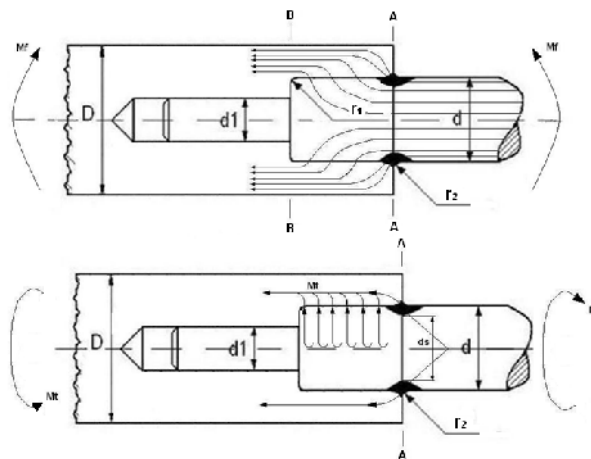
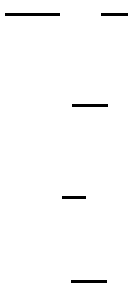


Figura 3.1. Esquema de la unión sometida a flexión y Torsión.

3.1.1 Análisis de la flexión:

En la sección A-A.



3.1.2 Análisis de la Torsión:

En la sección A-A.

Donde:

Se despeja M_{t_c} de (3.1).

Sustituyendo en (3.2).

En la sección A-A.

La condición de igualdad de la resistencia es:

A la flexión el ciclo es simétrico.

A la torsión el ciclo es constante.

Sustituyendo en (3.3) se obtiene la condición de igualdad de resistencia entre la espiga y el anillo, que constituye la condición de optimización de la resistencia.

=====

=====

La ecuación (3.4) permite calcular el diámetro necesario d en la espiga para optimizar la resistencia a la fatiga de la unión espigada sometida a flexión y torsión.

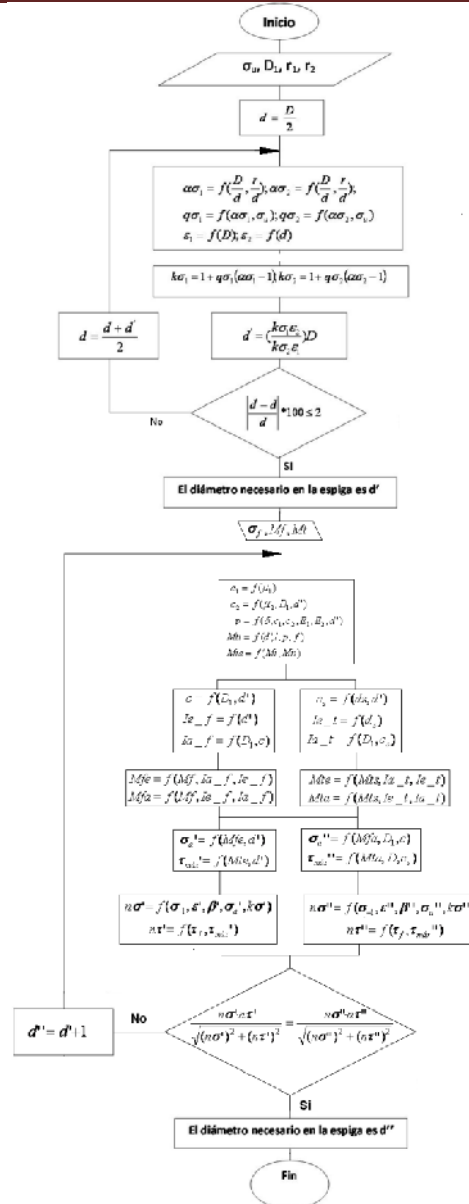


Figura 3.2. . Algoritmo del el Software elaborado en MATLAB.

3.2 Aplicación de la metodología elaborada para la recuperación del árbol de la Bomba de Agua de Alimentación de Calderas de la C.T.E. “Carlos Manuel De Céspedes”.

3.2.1 Características del árbol y de las averías.

La metodología elaborada se aplicará a la recuperación de los árboles de las Bombas Multietápicas de Alimentación de Agua a las Calderas de la C.T.E. “Carlos Manuel De Céspedes”. Las fallas de este han ocurrido después de un período prolongado de

funcionamiento, sin embargo, después de la primera rotura se han realizado modificaciones geométricas y cambios en el material que han provocado que las fracturas se hayan producido de forma reiterada y mucho más frecuentes en un menor número de ciclos de trabajo del árbol. Un elemento significativo en todas las fracturas es que las mismas han ocurrido fuera de la zona más cargada del árbol, o sea, fuera de la zona de los impelentes donde el árbol transmite cargas de flexión y de torsión. El segmento del árbol donde han ocurrido todas las averías está localizado cerca del extremo teóricamente menos cargado del árbol, entre el cojinete de apoyo radial-axial y el extremo del mismo donde está ubicado el acoplamiento flexible que transmite el movimiento a la bomba de aceite.

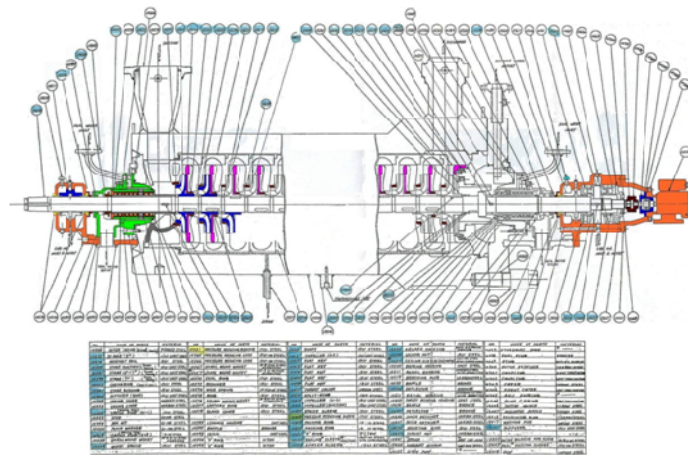


Figura 3.3. Esquema de la bomba de agua de alimentar calderas.

3.2.2 Esquema de análisis y solución por el método de las fuerzas del árbol.

El árbol es hiperestático pues posee tres apoyos, para poder calcular las tensiones en la zona de fractura hay que resolver dicho sistema hiperestático y se debe considerar en la solución, el hecho de que la rigidez en la zona de fractura es menor que en resto del árbol. La bomba tiene nueve impelentes con difusores, o sea, las fuerzas provocadas por el fluido se pueden despreciar y considerar como cargas exclusivamente, el peso de los impelentes como cargas concentradas y el peso del árbol como una carga distribuida $q = \frac{W_a}{l}$, donde l es la longitud que hay entre los apoyos y W_a su peso (Carballo García, 2011).

El esquema de análisis que se empleará en la solución se muestra en la Fig. 3.1

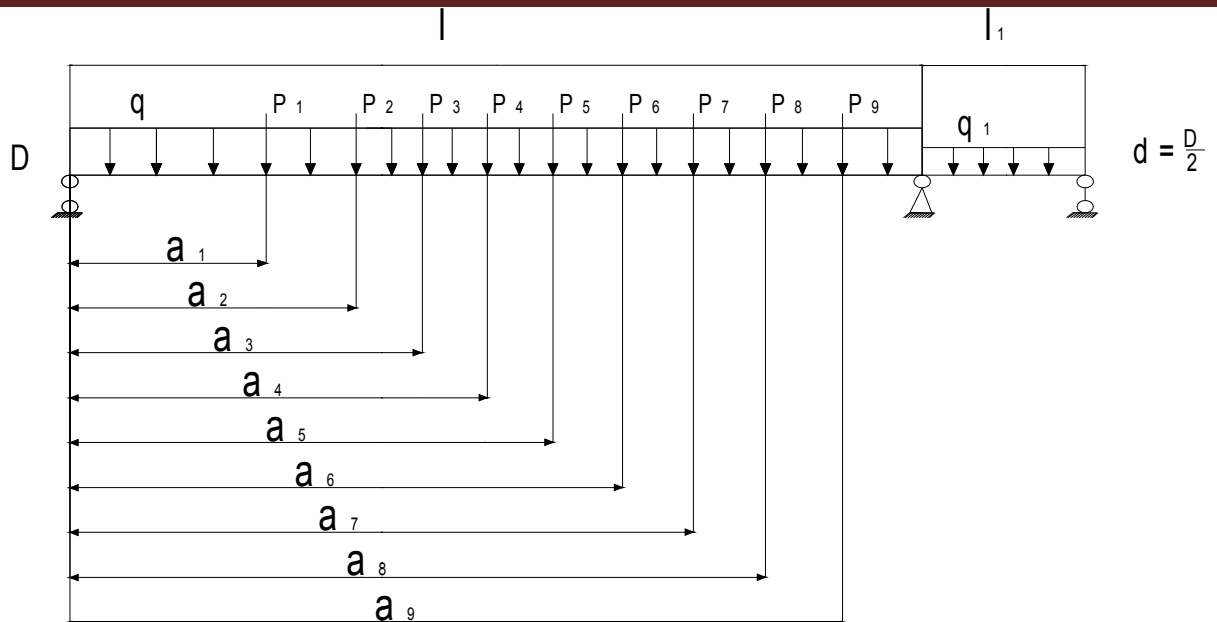


Figura 3.4. Esquema de análisis del árbol.

En el tramo de la derecha del árbol existen varios tramos con pequeños diámetros y un acoplamiento elástico, pero indudablemente en el apoyo derecho se tiene que producir una reacción mucho más pequeña que en los otros dos apoyos que pudiera provocar tensiones de flexión en la sección de falla, que pueden haber condicionado la fractura (Miguel Luis Carballo García, 2011).

El sistema equivalente es el siguiente:

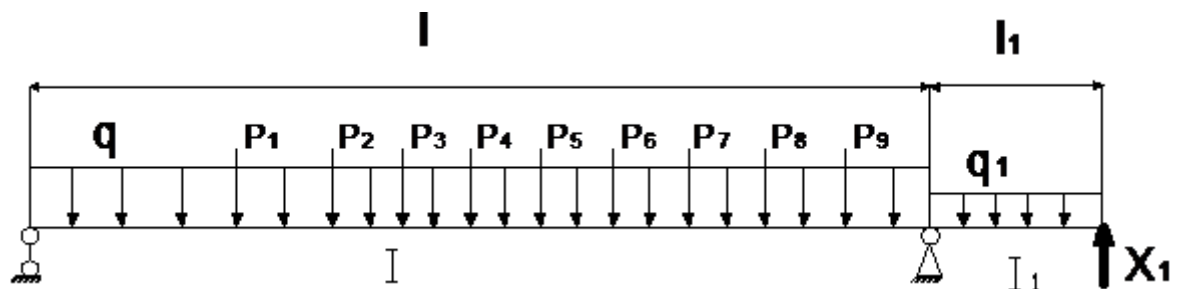


Figura 3.5. Sistema equivalente.

Utilizando el método de las fuerzas empleado en (Miguel Luis Carballo García, 2011) obtenemos que:

3.2.3 Cálculo de la potencia de la bomba de aceite, el momento flector y el momento torsor provocado en el árbol.

Dado a que se conocen las condiciones de trabajo de la bomba de aceite acoplada en el extremo del eje, es posible determinar el torque que transmite la misma. Este se determina a partir de los datos siguientes y del cálculo previo de la potencia que absorbe la misma (Miguel Luis Carballo García, 2011):

Datos iniciales para el cálculo:

Calculando la potencia absorbida por la bomba de aceite:

Sustituyendo en la ecuación (3.5).

Calculando el Momento torsor de la bomba de aceite:

Sustituyendo en la ecuación (3.6).

3.2.4 Influencia en la resistencia a la fatiga de la posible desalineación en el acoplamiento y el plato de empuje.

Despejando P_t nos queda:

Donde:

Sustituyendo en la ecuación (3.8)

Sustituyendo en la ecuación (3.7)

÷

Sustituyendo en la ecuación (3.9)

3.2.5 Cálculo de X1 por el método de los parámetros de origen.

El Método de los Parámetros de Origen es un método de cálculo de desplazamientos. Su aplicación se ilustrará para la solución de las vigas hiperestáticas, o sea, utilizando lo que se conoce como Ecuaciones Universales de la Curva Elástica de una viga se pueden calcular los desplazamientos tanto lineales como angulares en cualquier punto de una viga (Feodosiev, 1985); (Pisarenko et al., 1989).

Planteando las ecuaciones universales de la curva elástica de la viga para calcular los desplazamientos en algunos puntos cuyos desplazamientos son cero, o poseen valores conocidos, es posible obtener las ecuaciones suplementarias requeridas para resolver las vigas hiperestáticas.

$$\frac{EI}{L} \left(\frac{1}{2} \theta_1 + \frac{1}{2} \theta_2 \right) = \frac{1}{2} P L$$

Donde:

Sustituyendo la ecuación (3.57) en la (3.58)

$$\frac{EI}{L} \left(\frac{1}{2} \theta_1 + \frac{1}{2} \theta_2 \right) = \frac{1}{2} P L$$

Despejando X_{1_1}

$$\frac{EI}{L} \left(\frac{1}{2} \theta_1 + \frac{1}{2} \theta_2 \right) = \frac{1}{2} P L$$

Para $\theta = 1^\circ = 0.017 \text{ rad}$, el valor de $X_{1_1} = 2.54 \text{ kN}$. (Carballo, 2011)

Donde:

3.2.6 Elección de la sección donde se realizara el espigado y la soldadura.

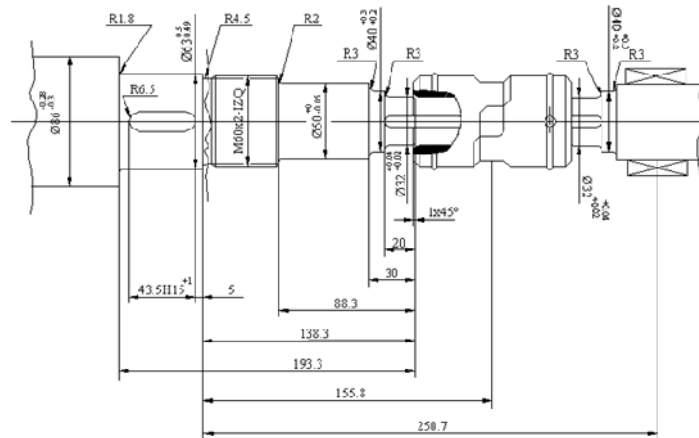


Figura 3.6. Esquema de la sección de fractura del árbol acoplado a la bomba de lubricación.

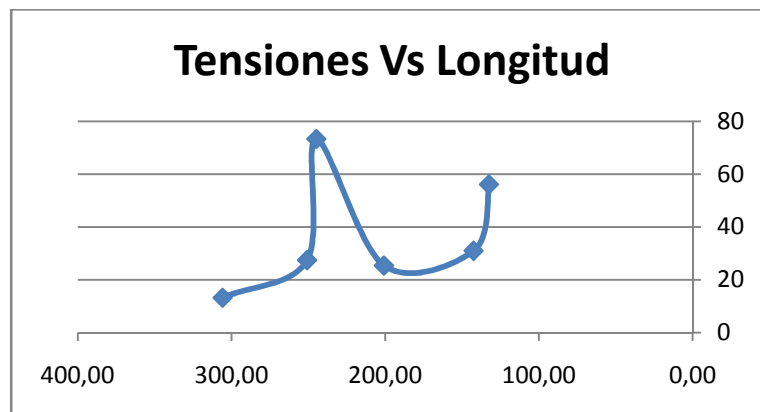


Figura 3.7. Gráfico de tensiones de flexión contra longitud del árbol.

El gráfico se realizó en (Microsoft Office Excel 2007) y apoyándose en la Figura 3.6. Las longitudes parten desde el apoyo del árbol de la bomba de aceite hasta el apoyo del árbol de la bomba de agua de alimentación de caldera. El Gráfico tomó un pico de tensiones en la zona de la fractura entre el asiento del plato de empuje y la tuerca del mismo, demostrando de esta forma que en la zona de fractura existían valores elevados de tensiones. Es necesario salir de la zona de mayor tensión para realizar entonces el espigado y soldadura. Hacia el extremo izquierdo de la gráfica descienden las tensiones producto que aumenta el diámetro del árbol en esa sección y se encuentra un apoyo del árbol de la bomba de agua de alimentación de calderas. Al realizarse la recuperación es

esta sección, debe tomarse en cuenta maquinarse la superficie a las características superficiales del apoyo, una vez terminada la recuperación.

3.2.7 Calculo del diámetro de la espiga para el árbol de la Bomba de Agua Alimentación de la CTE “Carlos Manuel De Céspedes”.

Para el acero SUS 403 del árbol de la Bomba de Agua Alimentar, el cual posee un límite de fluencia $\sigma_f = 390$ MPa y una Resistencia Máxima del Material $\sigma_u = 590$ MPa. Las dimensiones de la zona a espigar son: $D_1 = 89$ mm, $r_1 = 2$ mm, $r_2 = 0.5$ mm, aplicando el Software elaborado en MatLab, después de las iteraciones correspondientes se obtuvo el diámetro de la espiga: Diámetro de la espiga $d \approx 45$ mm.

3.2.8 Esquema y dimensiones de la zona espigada y soldada.

El dibujo del ensamble se realizó con el programa (AutoCAD Mechanical, 2011). La espiga del árbol recuperado se colocó por interferencia en su posición para evitar los movimientos deslizantes elásticos durante el giro del árbol y evitar el desgaste por ludimiento de las partes. Se colocó un cordón de soldadura el cual además de contribuir junto con la interferencia de la espiga a soportar el momento torsor que exista en esa sección y además hermetiza la zona recuperada para impedir la acción corrosiva del medio ambiente al penetrar en las superficies de encaje. En la Figura 3.5 se muestra el ensamble de la espiga con el árbol así como algunas de sus dimensiones y ajuste el por interferencia de la espiga, el cual fue calculado para transmitir el torque (Dobrovolski, V., 1970).

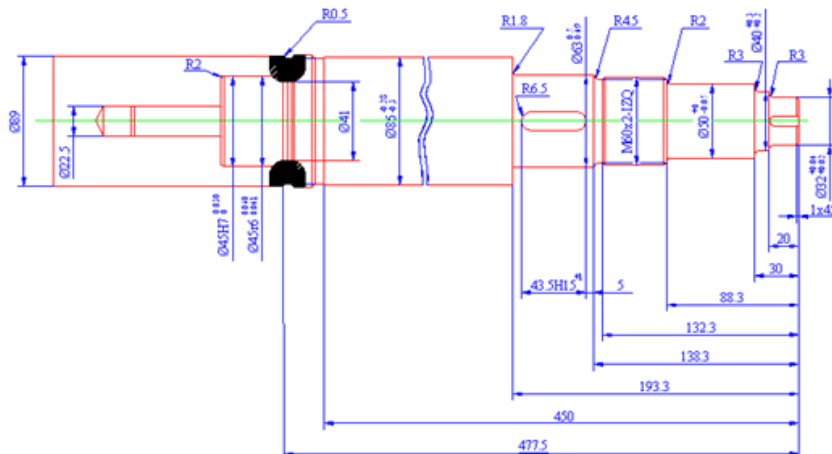


Figura 3.5. Ensamble de la espiga con el árbol.

3.3 Conclusiones parciales del Capítulo III.

1. Se eligió la sección adecuada para realizar el espigado y soldadura, y se optimizaron los componentes de resistencia a la fatiga de la unión.
2. Se optimizó el diámetro de la espiga con la aplicación del software realizado en MATLAB garantizando la capacidad de soportar cargas de flexión y torsión en la espiga y en el anillo respectivamente. Se realizó el esquema de ambas partes que serán ensambladas por interferencia y soldadas, para evitar los posibles deslizamientos elásticos y hermetizar la sección espigada de la acción corrosiva del medio ambiente y de las condiciones de trabajo del árbol.



Conclusiones

Conclusiones

CONCLUSIONES.

1. Se muestran ineficientes los métodos referenciados para la reparación y/o recuperación de árboles, exceptuando el espigado y la soldadura, para árboles fracturados por fatiga, aunque se manifiestan oportunos para árboles que presentan fallas superficiales como el desgaste o la picadura.
2. Se evaluaron las condiciones en que se produjo la fractura del árbol original del Ventilador de Gases Calientes de la Empresa “Cementos Cienfuegos S.A.”. En la investigación, realizando el gráfico de tensiones vs. Longitud, se demostró evidentemente que la zona de fractura era la de mayor tensión de flexión. Se determinó el diámetro del espigado ($d = 218 \text{ mm}$) garantizando igual capacidad de soportar cargas en el núcleo y en el anillo de la sección espigada. Ambas partes fueron ensambladas por interferencia y soldadas para evitar los posibles deslizamientos elásticos y hermetizar la sección espigada de la acción erosiva y corrosiva de los gases calientes.
3. Se desarrolló una tecnología de soldadura adecuada para lograr mejores resultados en esta operación partiendo de la mala soldabilidad del material empleado en el árbol.
4. Se abordó la problemática de la recuperación del árbol de las Bombas de Alimentación de las Calderas de la C.T.E. “Carlos Manuel De Céspedes” que soporta torsión y flexión, lo que implicó el análisis y la selección adecuada de la sección de espigado y la forma de realizar este proceso teniendo en cuenta que la sollicitación fundamental del árbol en esa zona a flexión y torsión. Se determinó el diámetro del espigado ($d = 45 \text{ mm}$) garantizando igual capacidad de soportar cargas en el núcleo y en el anillo de la sección espigada. Ambas partes fueron ensambladas por interferencia y soldadas para evitar los posibles deslizamientos elásticos por la flexión y transmitir el torque de la bomba de lubricación.

5. Se diseñó una metodología con aplicación en el software MATLAB que contribuyó a recuperar árboles de máquinas sometidos a flexión y torsión,



Recomendaciones

Recomendaciones

RECOMENDACIONES.

1. Generalizar la metodología y el software elaborado a la recuperación de otros árboles averiados por fatiga en condiciones similares.
2. Comprobar con un modelo experimental (Probetas) recuperadas por espigado y soldadura la resistencia mecánica, para validar la metodología expuesta.



Bibliografía

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA.

- Altshuler, T.L. (1986). *Life Predictions for materials selection and design*. Metal Park OH: American Society for Metals.
- American Welding Society. (2001). *Requirements for pressure vessels fabricated by welding* (Vol. 1). The American Society of Mechanical Engineers, Boiler and Pressure Vessel Code: UW.
- American Welding Society. (1998). *Specification for low-alloy steel electrodes for shielded metal arc welding*. AWS A.5.5-98.
- American Welding Society. (2002). *Structural Welding Code-Steel*. AWS D 1.1/1.1M.
- American Welding Society. (1973). *The Procedure Handbook of Arc Welding* (Twelfth.). The Lincoln Electric Company.
- American Welding Society. (1991). *Welding Handbook, Welding Process* (8º ed.). Miami: AWS.
- American Welding Society. (1993). *Welding, Brazing, and Soldering* (Vol. 6). ASM Handbook.
- Avilés, R. (1995). *Fatiga de materiales en el diseño y análisis mecánico*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Bilbao.
- Babakr, A Bradley, R Al-Ahmari, A. (2009). Failure Analysis of Mill Shaft Roll, 9, 107-113.
- Banea, M D da Silva, L F M. (2009). Adhesively bonded joints in composite materials: an overview, 223, 1-18.
- Birger, J., Schorr, B., & Schneiderovich, R. (1986). *Cálculo de la resistencia de las piezas de máquinas*. Moscú: Mashinostroenie.
- Bolaños, Cesar Cerón Rivas, John Sandro Coronado, John Jairo. (2005). Caracterización fracto-mecánica de soldaduras usadas en la recuperación de ejes., 2, 5-15.
- Broek, D. (1983a). *Fracture Control for the Chemical Process Industries*. St. Louis: The Materials Technology Institute of the Chemical Process Industries Inc.

- Broek, D. (1983b). *Fracture Mechanics*. USA: Institute of the Chemical Process Industries. Inc.
- Broek, D. (1989). *The Practical Use of Fracture Mechanics*. Dordrecht Kluwer.
- Calderon de León, Sigrid Alitza. (2007). *Recuperación de rotor de motor eléctrico de 150 HP en planta San José Calderas*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. Retrieved from biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0123_MT.pdf.
- Cary, H. B. (1994). *Tecnología de Soldadura Moderna*. Prentice-Hall.
- Celada Rios, Eduardo Santiago. (2012). *Metodología para el reacondicionamiento de ejes de acero AISI 1045, por medio de soldadura*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Retrieved from http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0705_M.pdf.
- Control de calidad en soldadura. (1984). 1.
- Das, Gautam Ray, Ashok Kumar Ghosh, Sabita Das, Swapan Kumar Bhattacharya, Dipak.Kumar. (2003). Fatigue failure of a boiler feed pump rotor shaft, 10, 725-732.
- David Augusto Fragoso Ortiz y Azael Leonel Trujano Galicia. (2008). *Reacondicionamiento de ejes solidos por el método de injerto*. Escuela Superior de Ingenieria Mecánica y Eléctrica, Azcapotzalco, Mexico. Retrieved from <http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/162/1/TESIS%20FINALfragoortiz.pdf>.
- Davis, M J Janardhana, M Wherrett, SQNLDR A. (2006). Adhesive bonded repair technology : supporting aging aircraft. Retrieved from <http://www.adhesionassociates.com/papers/53>.
- Dobrovolski, V. (1970). *Elementos de Máquinas* (Moscú: MIR.).
- Dowling, N. E. (1999). *Mechanical behaviour of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue* (Upper Saddle River (NJ).). Prentice Hall, cop.
- Duong, Cong N Wang, Chun Hui. (2007). *Composite Repair Theory and Desing*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780080451466>.
- Fekih, S M Albedah, A Benyahia, F Belhouari, M Bachir Bouiadjra, B Miloudi, A. (2012). Optimisation of the sizes of bonded composite repair in aircraft structures, 41, 171-176.

- Feodosiev, V. I. (1985). *Resistencia de Materiales* (Tercera.). Moscú: MIR.
- Fernández Levy, G.S. (1982a). *Investigación sobre el origen y desarrollo de la falla en árboles de molinos de centrales azucareros*. Tesis Doctoral, Universidad Central de las Villas.
- Fernández Levy, G.S. (1982b). *Resistencia de Materiales*. Universidad Central de las Villas.
- Finco, Arturo Núñez, Iván. (2002). *Diseño y construcción de un sistema automático de desplazamiento longitudinal y rotacional para el termo-rociado de cojinetes de Babbitt*. Universidad Central de Venezuela. Retrieved from <http://saber.ucv.ve/123456789/133>.
- Goytisolo, R. (2000). *Mecánica de la Fractura. Folleto para la Maestría de Mecánica Aplicada*.
- Guliaev, A. (1983). *Metalografía*. Moscú: MIR.
- Harris, Dean Jur, T. (2009). Classical Fatigue Design Techniques as a Failure Analysis Tool, 9, 81-87.
- Henkel Corporation. (2008). Shaft Repair Service Manual. Retrieved from http://www.henkelna.com/us/content_data/192137_LT5338_Shaft_Repair_final.pdf.
- Hofer, K. E. (1968). *Equations for Fracture Mechanic. Machine Design*. USA.
- Hugot, E. (1974). *Manual para Ingenieros Azucareros*. México: Editorial Continental.
- ITW resin technologies. (2012). shaft repair techniques and surface preparation recommendations. Retrieved from <http://www.itwresintech.com/pdf/library/sprepair.pdf>.
- J. M. Barsom, & S. T. Rolfe. (1987). *Correlations between K_{Ic} and Charpy V-Notch test results in the transition-temperature range*. American Society for Testing and Materials.
- Jones, R Peng, D Cairns, K Pitt, S. (2007). Composite Repairs To Cracked Metallic Components- Experiment and Theory, 1-6.
- Kamal Krishna, R Sajikumar, K S Asok Kumar, N. (2009). Finite Element Analysis of Composite Bonded Single Lap Joint under axial tensile force . (pp. 39-44). Presented at the 10th National Conference on Technological Trends (NCTT09). Retrieved from <http://117.211.100.42:8180/jspui/bitstream/123456789/684/1/ME-MD-04.PDF>.
- Li, H C H Wang, J Baker, A. (2012). Rapid composite bonded repair for helicopter tail drive shafts, 43, 1579-1585.

- Lukkar, J. (1997). *Heavy Welding for the Process Industry*. Svetsaren.
- Merchán Moreno, Gonzalo Omar. (2012). *Reparación de un Eje de Motor Eléctrico Mediante un Proceso de Metalización*. Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP). Retrieved from www.dspace.espol.edu.ec/handle/.../21113.
- Miguel Luis Carballo García. (2011, June). *Análisis de las averías del árbol de la bomba de alimentación de calderas de la Central Termoeléctrica "Carlos Manuel De Céspedes"*. CIENFUEGOS CUBA.
- Murakami, Y. (1992). *Intensity Factors Handbook*. Pergamon Press (Vols. 1-2, Vol. 1). Oxford: Pergamon Press.
- Nowotny, Steffen Spatzier, Joerg Kubisch, Frank Scharek, Siegfried Ortner, Jens Beyer, Eckhard. (2012). Repair of Erosion Defects in Gun Barrels by Direct Laser Deposition. Retrieved from <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11666-012-9817-3>.
- Petit, J. (1988). *Fatigue crack growth under variable amplitude loading*. London: Elsevier.
- Pisarenko, G. S., Yákovlev, A. P., & Matveév, V. V. (1989). *Manual de Resistencia de Materiales*. Moscú: MIR.
- Rafael A. Goytisol Espinoza. (2012). *Gestión de Vida como Metodología General en el Análisis de Averías*.
- Rider, Andrew. (2002). The Durability of Epoxy Titanium Alloy Titanium Alloy. Retrieved from <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA409002>.
- Rolfe, S. T., & Barsom, J. M. (1987). *Fracture and Fatigue Control in Structures* (2º ed.). Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
- Rolfe, S. T., & Barsom, J. M. (1977). *Fracture and fatigue control in structures Applications of fracture Mechanics*. New Jersey: Prentice Hall. Retrieved from <http://pil.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/14644207JMDA219>.
- Schubert, E Seefeld, T Rinn, A Sepold, G. (1999). Laser Beam Cladding : A Flexible Tool for Local Surface Treatment and Repair, 8, 590-596.

- Shigley, J., & Mischke, C. R. (2001). *Mechanical Engineering Design* (Sexta.). Boston: Mc Graw Hill.
- Silenok, S., Grizak, Y. S., Lisenko, V., & Nefedov, D. (1969). *Equipamiento Mecánico para la producción de materiales de materiales para la construcción*. Moscú: Mashinostrenie.
- Stakevich, V L Aitkeev, B A Mikhailov, M G. (1997). Repair of the damaged shaft of the No. 4 generator of the Uch-Kurgan hydroelectric station, *31*, 420-422.
- Tada, H., Paris, P. C., & Irwin, G. R. (1973). *The stress analysis of cracks handbook*. St. Louis (MO): Del Research Corporation.
- Tarel'nik, V B Martsinkovskii, V S. (2004). Strengthening and Repair of Parts of Rotary Machines by Electroerosion Alloying, *40*, 371-375.
- Timoshenko, S. (1965). *Resistencia de Materiales*. Moscú: Nauka.
- United States Steel Corp. (1963). *Isothermal Transformation Diagrams*.
- Velasco Molina, Edwin Daniel Chala Gonzalón, Jorge Xavier. (2010). *Análisis y selección de los procesos para recubrimientos duros en la recuperación de piezas industriales*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2322/1/CD-3066.pdf>.
- Voskoboinikov, V., Kudrin, V. & Yakushev. (1982). *Metalurgia General*. MIR.
- Wikipedia. (2012). Pulvimetalurgia. In *Wikipedia*. Retrieved from <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Pulvimetalurgia&oldid=56302481>.
- Zhang, Guo-qing Wang, Cheng-tao Pu, Geng-qiang. (2005). Fatigue life prediction of crankshaft repaired by twin arc spraying, *12*, 70-76.



Anexos

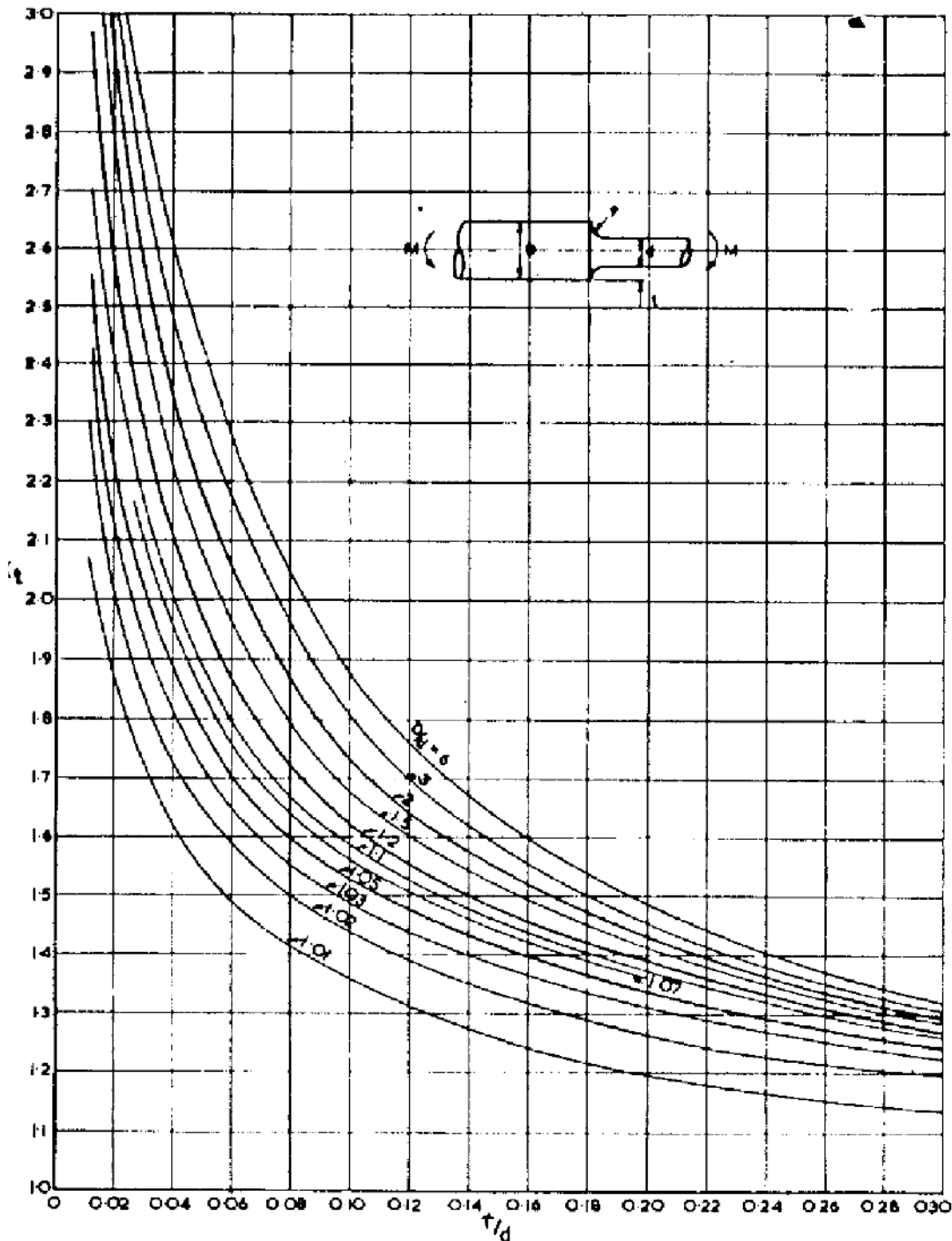
Anexos

ANEXOS.

Anexo 1. Factores teóricos de concentración de tensión sometidos a flexión.

Factores teóricos de concentración de tensión.

Sometido a Flexión.

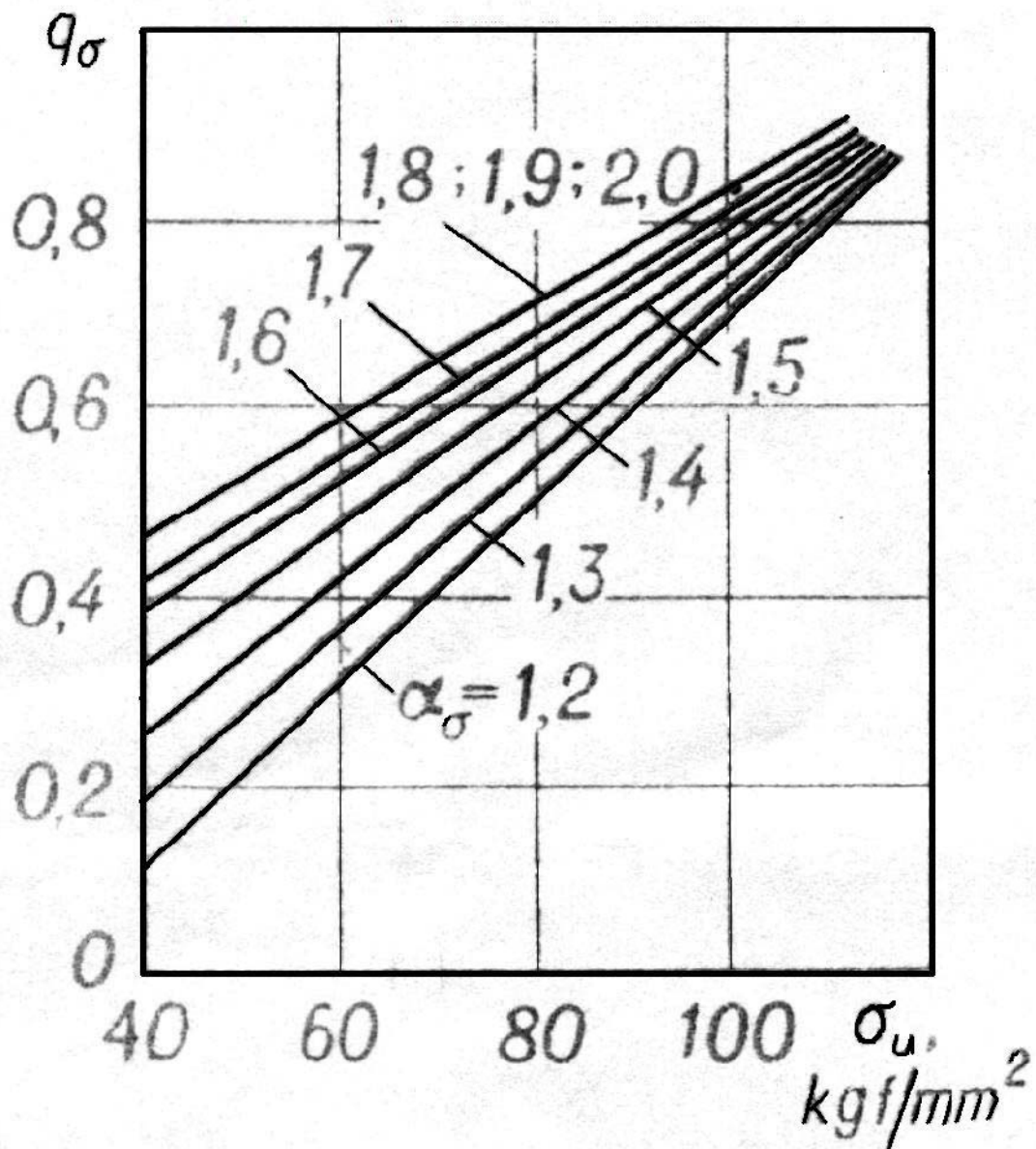


Anexo 2. Factor de sensibilidad a la concentración de tensiones.

Factor de sensibilidad a la concentración de tensiones.

El ajuste de las curvas se realizó para la forma lineal cuya ecuación es:

$$y=a+bx$$

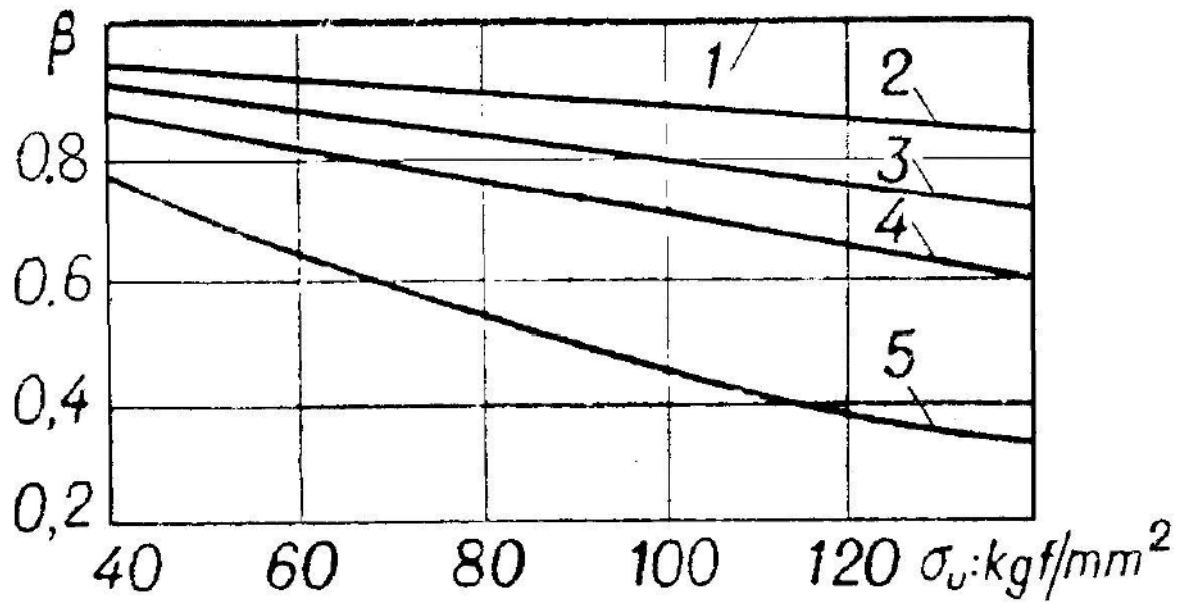


Anexo 3. Factor de estado de la superficie.

Factor de estado de la superficie

El ajuste de las curvas se realizó para la forma lineal cuya ecuación es:

$$y=a+bx$$

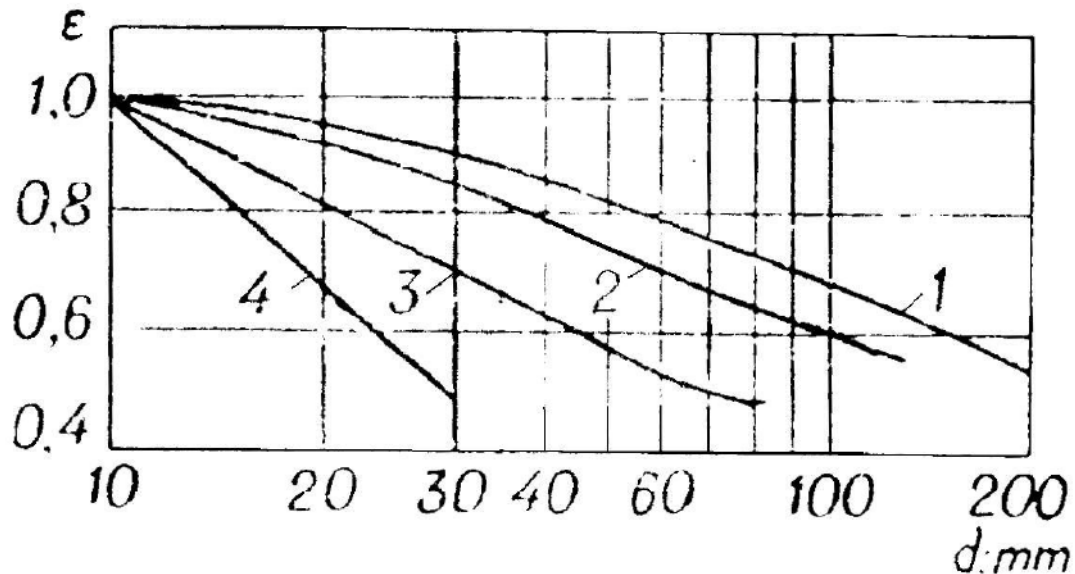


Anexo 4. Factor de tamaño.

Factor de tamaño.

El ajuste de las curvas se realizó para la forma bleasdale cuya ecuación es:

$$y=(a+bx)^{-1/c}$$



Curva 1 Aceros al carbono sin concentrador de tensiones.

Curva 2 Aceros aleados sin concentrador de tensiones o aceros al carbono con concentrador de tensiones.

Curva 3 Aceros aleados con concentrador de tensiones.

Curva 4 aceros con gran concentración de tensiones.

Anexo 5. Esquemas de principios de la fractura por fatiga dado por (Dobrovolski 1970).

Tipo de carga	Concentrador débil local		Concentrador débil por la periferia		Concentrador fuerte por la periferia	
	a moderada sobrecarga cíclica	a considerable sobrecarga cíclica	a moderada sobrecarga cíclica	a considerable sobrecarga cíclica	a moderada sobrecarga cíclica	a considerable sobrecarga cíclica
Tracción y compresión cíclica						
Flexión unilateral cíclica						
Flexión bilateral cíclica						
Flexión simétrica a la rotación						

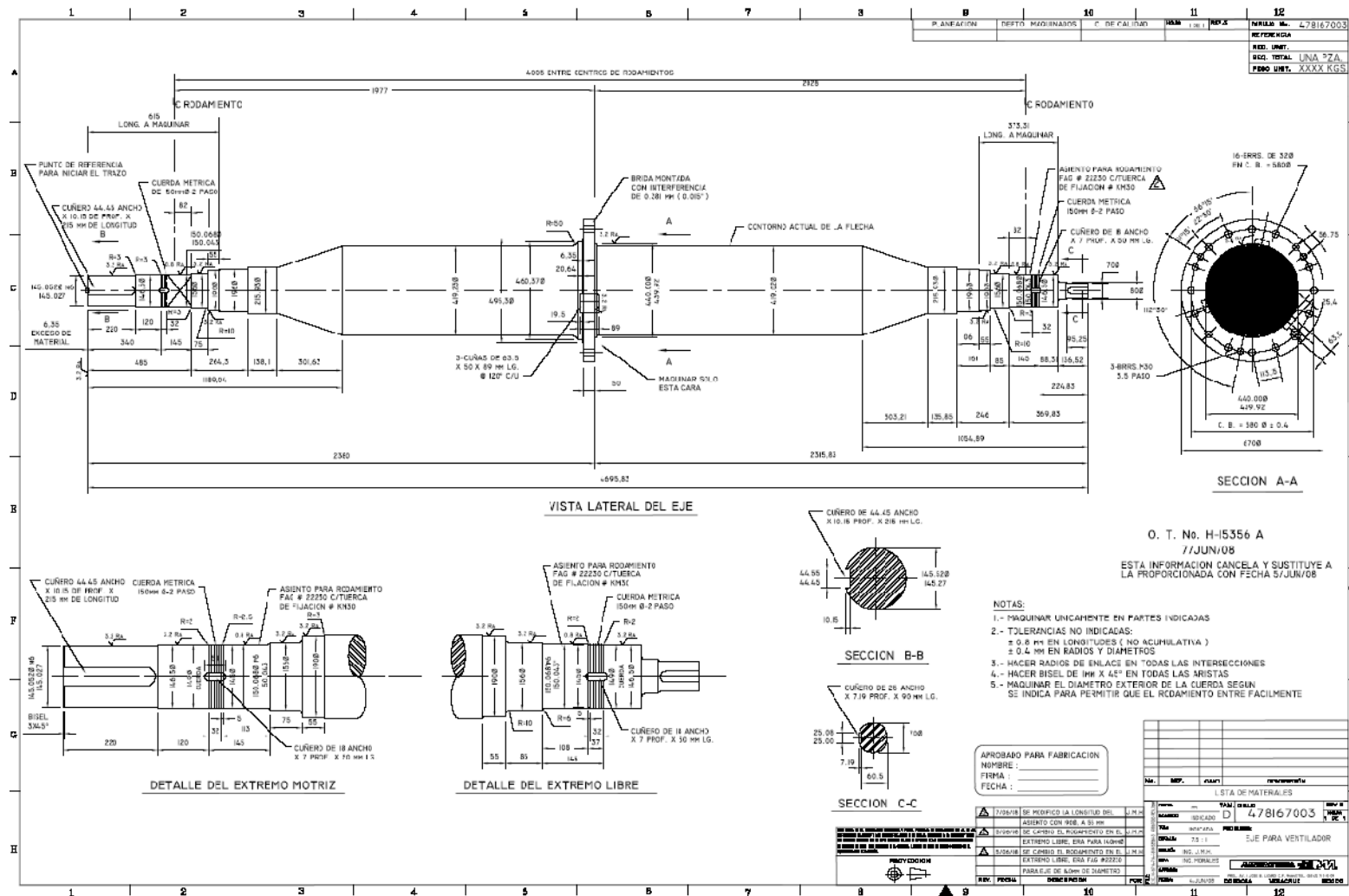
Anexo 6. Vista de la fractura en el árbol del ventilador de gases calientes y el motor eléctrico en la Empresa “Cementos Cienfuegos S.A.”.



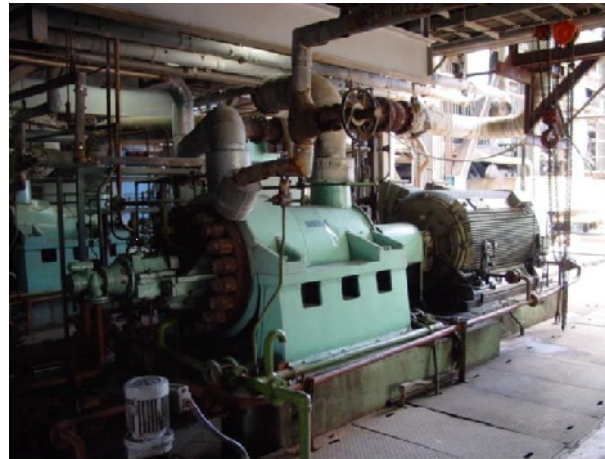
Anexo 7. Vista frontal de la fractura en el árbol del ventilador de gases calientes en la Empresa “Cementos Cienfuegos S.A.”.



Anexo 8. Plano general del árbol del ventilador de gases calientes de la Empresa "Cementos Cienfuegos S.A."



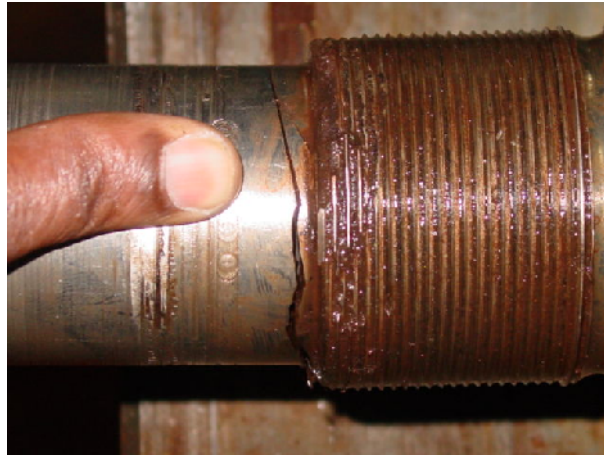
Anexo 9. Vista exterior de la bomba de agua de alimentación de caderas de la C.T.E. “Carlos Manuel De Céspedes”.



Anexo 10. Árbol de la bomba de agua de alimentación de caderas de la C.T.E. “Carlos Manuel De Céspedes”.



Anexo 11. Vista del desarrollo de la grieta de fatiga en el árbol de la bomba de agua de alimentación de caderas de la C.T.E. “Carlos Manuel De Céspedes”.



Anexo 12. Vista de la fractura en el árbol de la bomba de agua de alimentación de caderas de la C.T.E. “Carlos Manuel De Céspedes”.



Anexo 13. Plano general del árbol de la bomba de agua de alimentación de caderas de la C.T.E. “Carlos Manuel De Céspedes”.

