

Optimización de la resistencia a la fatiga durante recuperación de árboles de máquinas*

Frank Manuel Rodríguez Hernández

Carrera: Ingeniería Mecánica.

Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez” (Cuba).

Resumen: El trabajo fue motivado por la falla por fatiga del árbol del ventilador de doble succión de gases calientes de la Empresa “Cementos Cienfuegos S.A”. Se trata de un árbol con la particularidad de que la sección de falla está ubicada del lado opuesto del motor, donde no se transmite torsión sino solamente cortante y flexión. Existían zonas en el árbol donde las tensiones eran mucho más pequeñas que en la sección de fractura siendo posible transmitir las cargas de flexión mediante el espigado por interferencia de un tramo de una barra del mismo acero. El diámetro de la espiga se determinó a partir de las relaciones entre la rigidez de la sección anular del lado del árbol a espigar y la sección circular maciza de la espiga. De esta manera la resistencia a la fatiga de ambas partes es igual, lo que permite optimizar la resistencia de la sección recuperada.

Palabras clave: Árbol de máquina; falla por fatiga; sección de fractura.

Maximizing fatigue resistance for recovery of machine shafts

Abstract: This work was conducted because of a shaft fatigue failure occurring on the existing double suction fan for hot gas applications at the Cementos Cienfuegos S.A Company. The particularity of this shaft is that the failed section is opposite to the motor where no torsion is applied but only shearing and bending. Some shaft sections revealed much less stress than the failed area; thus it is possible to transmit the bending load through tenoning due to interference from a bar section of the same steel. The diameter of the tenon was determined based on the relationship between rigidity of the annular section on the shaft side to be tenoned and the robust circular section to allow increasing the strength of the repaired section.

Key words: machine shaft; fatigue failure; fractured section.

Introducción

Los árboles de las máquinas constituyen elementos que trabajan en un régimen severo de tensiones, son tal vez las piezas de máquinas más susceptibles de falla por fatiga (el 90 % de los que fallan es por fatiga). El trabajo al que se hace referencia se trata de 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.

El objetivo del presente trabajo es mostrar el procedimiento recomendado para elegir la sección del árbol donde se realizará el espigado y cómo calcular el diámetro de la espiga para optimizar la resistencia a la fatiga de esa zona.

El ventilador del árbol y de la sección de fractura

En la Figura 1 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.

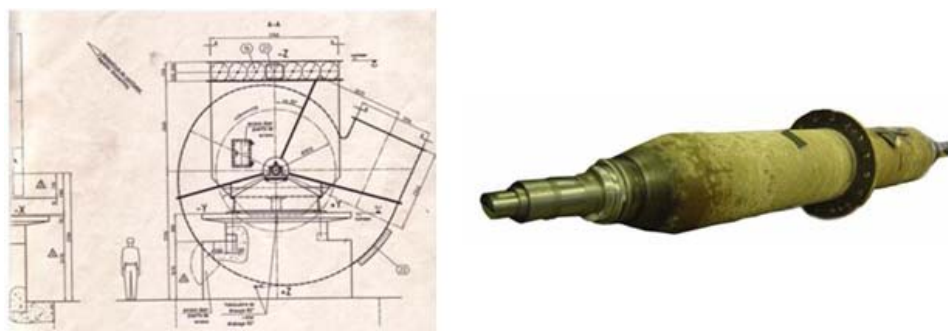


Figura 1. Vista general del ventilador con sus dimensiones exteriores y vista del árbol.

En la Figura 2 se muestra la sección de fractura del árbol, donde se puede apreciar una fractura por fatiga.



Figura 2. Vistas de la sección de fractura.

Elección de la sección donde se realizará 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 aun 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 qué 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 seis 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 3. 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 constituye 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, el mismo era un rollete cilíndrico de doble hilera autoalineante igual que el de la derecha, pero de 150 mm; el rollete derecho era de 140 mm.

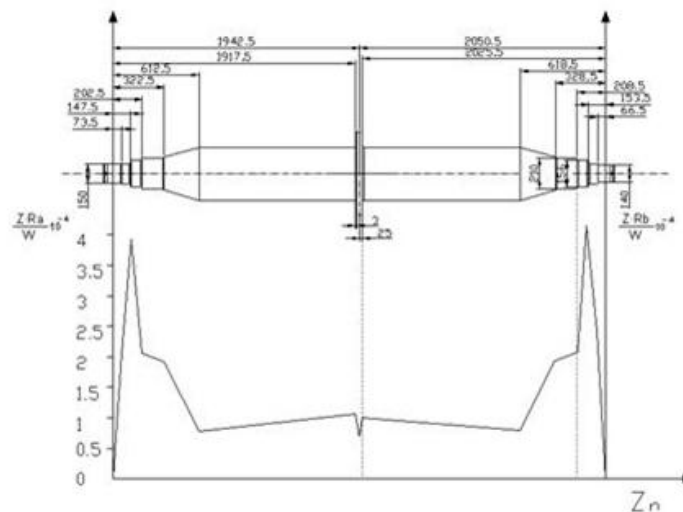


Figura 3. Distribución de Tensiones en función de las reacciones R_a y R_b para el árbol original.

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 una 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.

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 que se muestra en la Figura 4. La misma soportará básicamente flexión, aunque pudiera existir algún pequeño momento torsor debido a algún dispositivo que se accione por ese extremo del árbol.

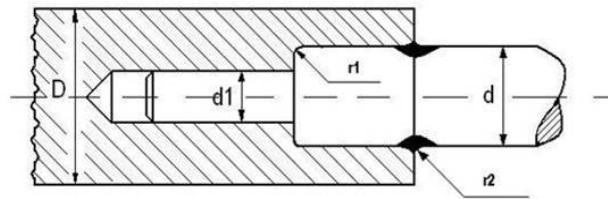


Figura 4. Esquema de la unión espigada.

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, transmitirán la fuerza de cortante longitudinal que exista en la sección y el momento torsor que sea necesario transmitir en esa zona del árbol. Para lograr la igualdad de resistencia a la fatiga en ambas piezas deberá cumplirse que:

$$\frac{k\sigma_1}{\varepsilon_1 \cdot \beta_1} \sigma_{a1} = \frac{k\sigma_2}{\varepsilon_2 \cdot \beta_2} \sigma_{a2} \quad (1)$$

Donde:

$k\sigma_1$ y $k\sigma_2$: Factores de concentración de tensiones de la pieza 1 (anillo) y de la pieza 2 (espiga) respectivamente, (Pisarenko *et al*, 1989).

ε_1 y ε_2 : Factores de tamaño de las piezas 1 y 2, respectivamente (Feodosiev, 1985)

β_1 y β_2 : factores de estado de la superficie de la pieza 1 y 2, respectivamente. En el análisis que se realizará a continuación se considerará para ambas piezas el mismo estado de la superficie después de su maquinado, o sea: $\beta_1 = \beta_2$. El ciclo de variación de las tensiones de flexión en el árbol es simétrico, o sea: $\sigma_{\max 1} = \sigma_{a1}$ y $\sigma_{\max 2} = \sigma_{a2}$. Las tensiones amplitud se calculan en una y otra pieza por las siguientes expresiones:

$$\sigma_{a1} = \frac{Mf_1}{W_1} = \frac{32 \cdot Mf_1}{\pi \cdot D^3 (1 - c^4)} \quad c = \frac{d}{D} \quad \sigma_{a2} = \frac{Mf_2}{W_2} = \frac{32 \cdot Mf_2}{\pi \cdot d^3}$$

Sustituyendo en (1)

$$\frac{32 \cdot Mf_1}{D^3 [1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4]} = \frac{Mf_2}{d^3} \left(\frac{k\sigma_2}{k\sigma_1} \right) \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)$$

Despejando Mf_2 en función de Mf_1 :

$$Mf_2 = \frac{d^3 \varepsilon_2 \cdot k\sigma_1 \cdot Mf_1}{D^3 (1 - c^4) \cdot \varepsilon_1 \cdot k\sigma_2} = \frac{c^3}{1 - c^3} Mf_1 \left(\frac{k\sigma_2}{k\sigma_1} \right) \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)$$

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:

$$Mf = Mf_1 + Mf_2 \quad (2)$$

Y los valores de Mf_1 y Mf_2 son directamente proporcionales a su rigidez ya que: de la ecuación diferencial aproximada de la curva elástica de una viga se tiene que como:

$$E \cdot I \cdot y'' = M_f \quad y \quad y''_1 = y''_2 \quad \text{Se tiene entonces que:}$$

$$\frac{Mf_1}{I_1} = \frac{Mf_2}{I_2} \quad Mf_2 = \frac{I_2 \cdot Mf_1}{I_1}$$

Pero como:

$$I_1 = \frac{\pi \cdot D^4}{64} (1 - c^4) \quad I_2 = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad Mf_2 = \frac{c^4}{(1 - c^4)} Mf_1 \quad (3)$$

Sustituyendo (3) en (2):

$$Mf = Mf_1 + \frac{c^4}{(1-c^4)} Mf_1$$

$$Mf = Mf_1 \cdot \frac{(1-c^4) + c^4}{(1-c^4)}$$

De donde, despejando Mf_1 .

$$Mf_1 = Mf(1-c^4) \quad (4)$$

Sustituyendo (4) en (1):

$$Mf_2 = \frac{Mf \cdot c^3 \cdot k\sigma_1 \cdot \varepsilon_2}{k\sigma_2 \cdot \varepsilon_1} \quad (5)$$

Sustituyendo (4) en (3):

$$Mf_2 = c^4 Mf \quad (6)$$

Finalmente igualando las expresiones (5) y (6) se obtiene:

$$c^4 = \left(\frac{c^3 \cdot k\sigma_1 \cdot \varepsilon_2}{k\sigma_2 \cdot \varepsilon_1} \right)$$

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

$$d = \left(\frac{k\sigma_1 \cdot \varepsilon_2}{k\sigma_2 \cdot \varepsilon_1} \right) \cdot D$$

Esta ecuación permite calcular el diámetro necesario d en la espiga para optimizar la resistencia a la fatiga de la unión espigada.

Para el acero AISI/SAE 4340 con $\sigma_u = 1148$ MPa, $D = 260$ mm, $r_1 = 8$ mm, $r_2 = 5$ mm, aplicando el Software elaborado en MatLab, cuyo algoritmo se muestra en la Figura 5, se obtuvo, después de las iteraciones correspondientes un diámetro de la espiga $d \approx 218$ mm. Para el cual se obtuvo: $k_{\sigma 1} = 1,97$, $k_{\sigma 2} = 2,37$, $\varepsilon_1 = 0,56$ y $\varepsilon_2 = 0,565$ (Burdon, 1965; Fernández, 1982; Pisarenko, 1989).

Esquemas y dimensiones de la zona espigada y del bisel 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 ludimento 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 5 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 (Dobrovolski, 1991).

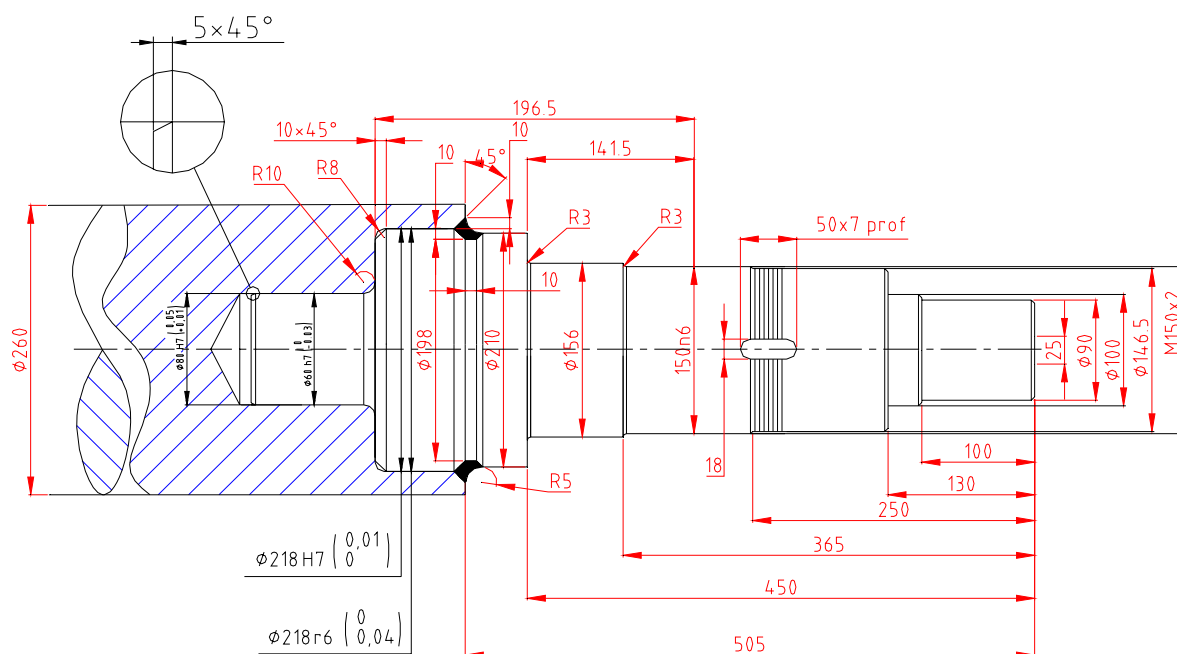


Figura 5. Ensamble de la espiga con el árbol.

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, se calculó ese parámetro estando entre: 0,68-0,9.

$$[C]_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15 \quad (7)$$

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) (AWS, 2001) y aplicar al finalizar el proceso un alivio de tensiones (AWS, 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 $290\text{ }^{\circ}\text{C}$. Al soldar este acero usando una temperatura de precalentamiento y entre pasadas entre 315 y $345\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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, incluso 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 veinte minutos después de alcanzar la temperatura indicada.

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 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. "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 (1 143 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, 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.

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 ludimento 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 °C durante 2 horas o seguir recomendación del fabricante. Los electrodos extraídos de paquetes herméticos o secados en horno se almacenarán en horno a una temperatura de 120–150 °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 (AWS, 1991). El cordoneo debe ser estrecho, dando como resultado un cordón de dos 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 realizarán 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 7. La temperatura de precalentamiento se mantendrá durante todo el proceso de soldadura. Se aplicará control visual por capas.

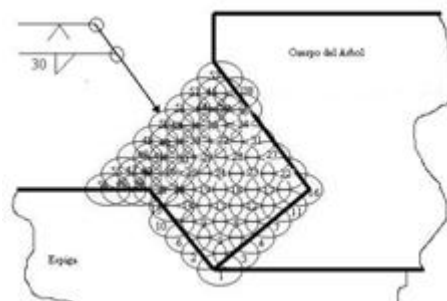


Figura 7. Secuencia de cordoneo.

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 (AWS, 2001), este tipo de

tratamiento térmico debe aplicarse en un rango de temperatura entre 595 a 675 °C, de acuerdo con las dimensiones de la sección de la pieza, después de estar a esta temperatura el tiempo de permanencia debe ser de tres 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 (AWS, 2001). En la Figura 8 se muestran vistas de todo el proceso de soldadura del árbol.



Figura 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.

Conclusiones

En el presente trabajo 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.

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 optimizó el diámetro del espigado garantizando igual capacidad de soportar cargas en el núcleo y en el anillo de la sección espigada 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.

Referencias bibliográficas

BURDON, E. S. 1965: The fatigue factors in engineering design. En: Engineering Design. T. F. Roylance: 133-186.

DOBROVOLSKI, V. 1991: Elemento de máquinas. Editorial MIR. Moscú.

LUKKAR, J. 1997: Heavy Welding for the Process Industry, Svetsaren.

FEODOSIEV, V. I. 1985: Resistencia de materiales. Tercera edición. Editorial MIR. Moscú.

PISARENKO, G. S.; YÁKOVLEV, A. P. & MATVEÉV, V. V. 1989. Manual de resistencia de materiales. Editorial MIR. Moscú.

*Trabajo presentado en el *XIX Fórum Científico Nacional de Estudiantes Universitarios de Ciencias Técnicas*. Tutorado por el Dr. C. Rafael Goytisol Espinosa y por el M.Sc. Rohary Padilla Rodríguez.