

Análisis de falla del eje de un motor eléctrico de una fábrica harinera

Failure Analysis about the Shaft of an Electrical Motor in a Flour Mill

LIZTMAN BEJARANO RESTREPO

Estudiante de Ingeniería Mecánica en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle (Colombia). Integrante Grupo de Investigación en Fatiga y Superficies.
lizmbert@univalle.edu.co

JOHN JAIRO CORONADO MARÍN

Ingeniero Mecánico, Magíster en Ciencias en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Puerto Rico. Docente de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle (Colombia).
johncoro@univalle.edu.co
johnjairocoronado@yahoo.com

ADOLFO LEÓN GÓMEZ

Ingeniero Mecánico, Magíster en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Cincinnati. Profesor de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle (Colombia).
adogomez@univalle.edu.co

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de recepción: 21 de noviembre de 2005

Fecha de aceptación: 2 de junio de 2006

Palabras clave: eje; concentración de esfuerzos; defectos de soldadura; fractura frágil; análisis de falla.
Key words: shaft; stress concentration; welding defects, brittle failure; failure analysis.

RESUMEN

En este estudio se describe el análisis de falla realizado al eje de un motor eléctrico de un molino de harina. La falla sucedió después del último mantenimiento mayor realizado al motor. El estudio reveló que el eje fue soldado para recuperar material y debió perder movimiento relativo con el rodamiento, sin que se ejerciera el control requerido sobre este proceso. El examen microestructural muestra la aparición de grandes zonas de martensita en la zona térmicamente afectada, y de martensita de temple incompleto en la zona de fusión; estas microestructuras no son resistentes a cargas de flexo-

torsión (el estado de carga principal en el eje) y, por tanto, no las soportaron, originando la falla.

ABSTRACT

This paper describes the failure analysis carried out to the shaft of an electric motor of a flour mill. The failure happened after the last major maintenance carried out to the motor. The study revealed that the shaft was welded to add material, which was lost because relative motion between ball bearing inner race and shaft, without the required control about this process. Microstructural analysis showed the presence of big martensita areas, in the heat

affected zone (HAZ) and martensite of incomplete temper in the fusion area. These microstructures are not resistant enough to bending and torsional

loading (the main load cases in the shaft), so the failure was developed.

* * *

1. Introducción

Los ejes pueden experimentar una amplia gama de condiciones de carga. En general, ellos pueden soportar tensión, compresión, flexión, torsión o una combinación de éstas; pero además pueden experimentar cargas variables en el tiempo y tensiones vibratorias.

Una de las causas más comunes de falla de un eje es la fatiga, que comúnmente comienza en un concentrador de esfuerzos. Algunos concentradores de esfuerzos típicos encontrados en ejes son cambios de sección, chaveteros, surcos (por acabado superficial), entallas y corrosión localizada; pocas veces se presentan defectos de soldadura, dado que los materiales de mejor comportamiento en ejes de transmisión son de baja soldabilidad.

Este artículo presenta el análisis de la falla ocurrida en un eje de acero SAE 1045 usado en un motor eléctrico de un molino de harina que trabajó satisfactoriamente durante un periodo de cinco años. Después del último mantenimiento realizado por un proveedor externo, en el cual no se señalan trabajos sobre el eje del motor, éste falló en un periodo corto (aproximadamente dos semanas de servicio). Un esquema del montaje del motor y la transmisión de potencia en la máquina de preparación se muestra en la figura 1; en ella se señala el lugar de la fractura, ocurrida en el escalón del rodamiento lado acople en el cambio de sección hacia el rotor.

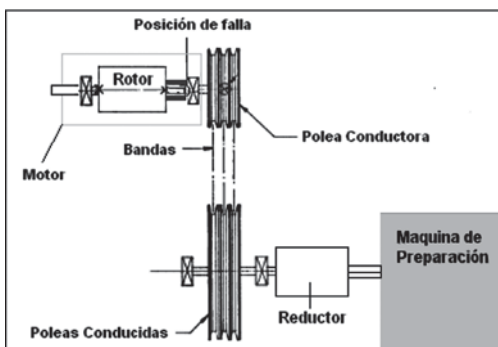


Figura 1. Esquema del sistema que presentó la falla.

Consultas realizadas en la literatura sobre casos similares al descrito condujeron a artículos en los cuales se estudian ejes y sus posibles causas de falla [1] [2], sin encontrar referencia a que la falla pueda ocurrir por aplicación de soldadura para recuperar material; en los estudios que consideraron la soldadura en los ejes, ésta no fue la causa de la falla [1].

2. Descripción del sistema

El eje que presenta la falla pertenece a un motor eléctrico que, por medio de un sistema de cinco correas, transmite a una máquina de proceso una potencia de 25 KW, con una frecuencia de rotación de 1764 rpm. El eje está fabricado con acero SAE 1045, que nominalmente alcanza el esfuerzo de fluencia (S_y) a 333,2 MPa y su esfuerzo último (s_{ut}) a 568,4 MPa [3]. Por formar parte de un motor eléctrico, el eje está diseñado a rigidez; esto significa que las deflexiones que se presenten sobre él deben ser pequeñas, por las tolerancias estrechas del entrehierro; de esta forma, el eje analizado tiene un alto factor de seguridad en fatiga; la representación del eje se muestra en la figura 2.

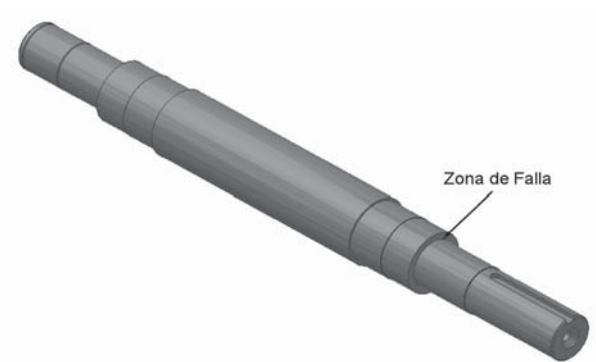


Figura 2. Eje del rotor del motor eléctrico.

La falla en el eje se presenta en el cambio de sección cercana a la salida de potencia que ocurre en las poleas (figura 3a). Se evidencia que no hay un redondeo o radio de acuerdo, que sirva para disminuir la concentración de esfuerzos en esa zona, lo que sí se presenta en el otro extremo (figura 3b). Por tanto, en la zona que no se tiene este radio hay un mayor concentrador de esfuerzos.

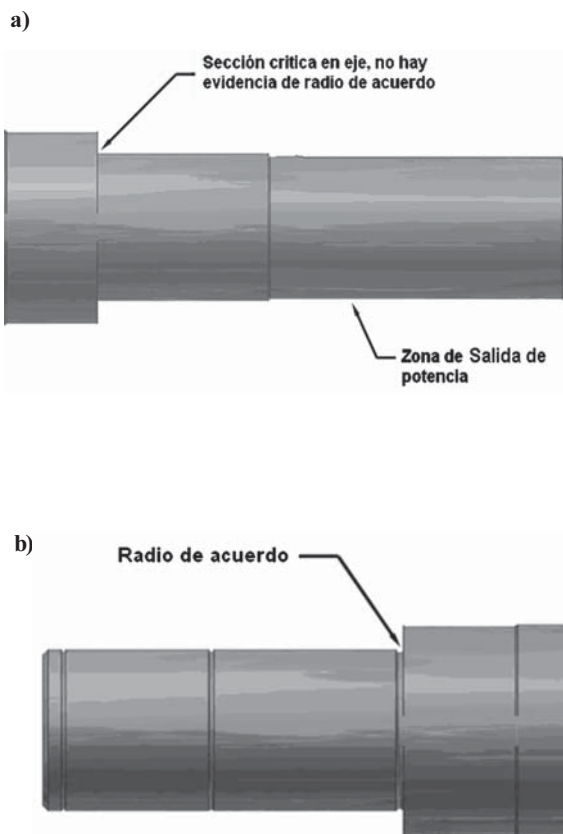


Figura 3. Cambios de sección en el eje (a) sin radio de acuerdo; (b) con radio de acuerdo.

3. Cálculo de cargas y esfuerzos

El análisis de cargas fue realizado para determinar el esfuerzo bajo funcionamiento en la zona de cambio de sección. Suponiendo que el sistema trabaja bajo 100% de carga se obtienen los siguientes

resultados:

- Torque aplicado: 135 Nm.
- Fuerza flexionante neta aplicada en la zona de poleas: 846 N.
- Momento flexionante en la zona crítica (cambio de sección sin radio de acuerdo) aplicado: 271 Nm.
- Esfuerzo combinado (tresca) en la zona de estudio: 22 MPa.

Para determinar la distribución de esfuerzos en el eje se empleó el método de elementos finitos (FEA, por su sigla en inglés); para este propósito se desarrolló un modelo geométrico (CAD) del eje y su estado de cargas, mostrado en la figura 4.

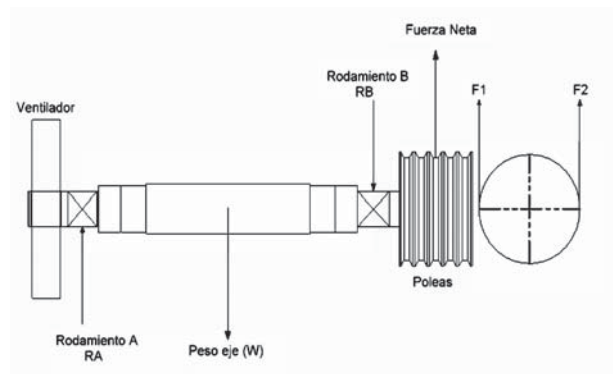


Figura 4. Diagrama de cuerpo libre (estado de cargas) del eje.

El modelo de elementos finitos es tridimensional, construido con elementos tipo *brick*; posee condiciones de borde tales como empotramiento en la zona de transmisión de potencia, lo cual simula las condiciones de carga del eje en operación. Este modelo se desarrolló y analizó en *ALGOR* (Figura 5a). La figura 5b muestra la alta concentración de esfuerzos en la zona de cambio de sección que no tiene radio de acuerdo para reducir el efecto.

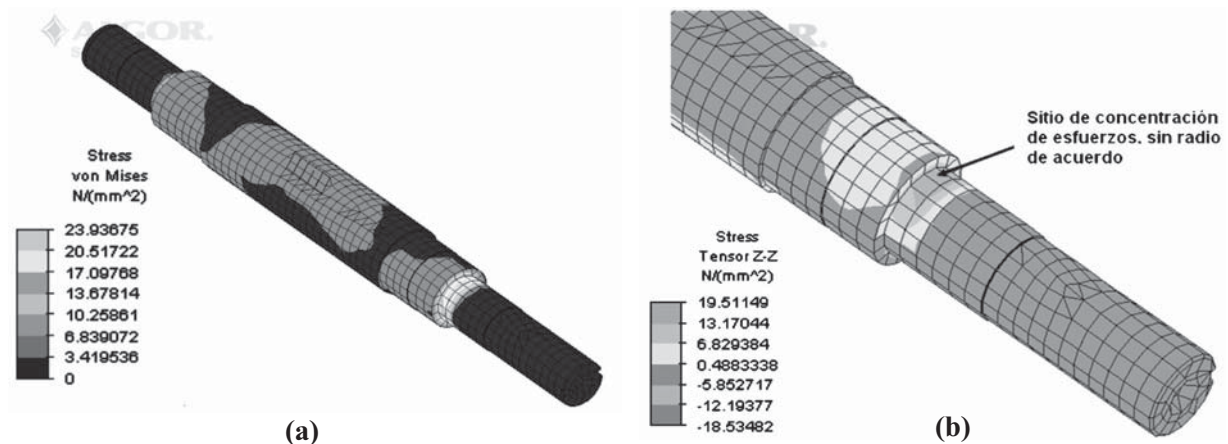


Figura 5. (a) Modelo completo; (b) Modelo especificando zona crítica.

El análisis incluyó el cálculo del factor de seguridad utilizando la teoría de fatiga de Soderberg (para materiales dúctiles) y, en un caso particular, analizando la flexo-torsión. A continuación se presenta la fórmula usada para el cálculo del factor de seguridad (FS):

Utilizando la teoría de Soderberg en flexo-torsión se tiene:

$$F \cdot S = \frac{S_y \cdot d\pi^3}{32 \sqrt{\left(M \left(\frac{S_y}{S_n} \right) \right)^2 + (T \max)^2}} \quad (1)$$

En la ecuación (1):

- d: diámetro sección transversal
- M: momento flexionante en la sección crítica
- Tmax: torque máximo en el sistema
- S_n: límite de fatiga modificado

El límite a la fatiga modificado es calculado mediante la expresión:

$$S_n = k_a k_b k_c k_d k_e k_f \cdot S'_n \quad (2)$$

S'_n: Límite a la fatiga

$$S'_n = 0,5 S_{ut} \quad (3)$$

Los factores que lo modifican son los siguientes [8]:

$$k_a = 0,5; _k_b = 0,8; _k_c = 0,75; _k_d = 1; _k_e = 0,2; _k_f = 1,2 \quad (3)$$

El FS encontrado fue 0,7, lo que indica que la falla en el eje empezó por la acción del mecanismo de falla por fatiga, en poco tiempo de servicio. Este resultado también se verifica mediante los análisis fractográficos.

4. Exámenes de fractografía

Se realizaron exámenes de fractografía en la superficie de falla del eje. La investigación cubrió los exámenes macroscópicos y microscópicos [4]. Para ello se utilizaron los siguientes medios:

4.1. Estudio de la superficie de la fractura

En la figura 6a se aprecia la superficie de fractura; en ella se evidencia su inicio y, además, una superficie en la que, al principio, se identifica una pequeña zona de fatiga que ayuda al crecimiento del defecto de soldadura (grieta). El principal mecanismo de falla es frágil, pues se evidencian marcas tipo *chevron* en casi toda la zona de rotura. En la figura 6b se observa el sitio de falla: la rotura del eje en la sección sin radio de acuerdo.

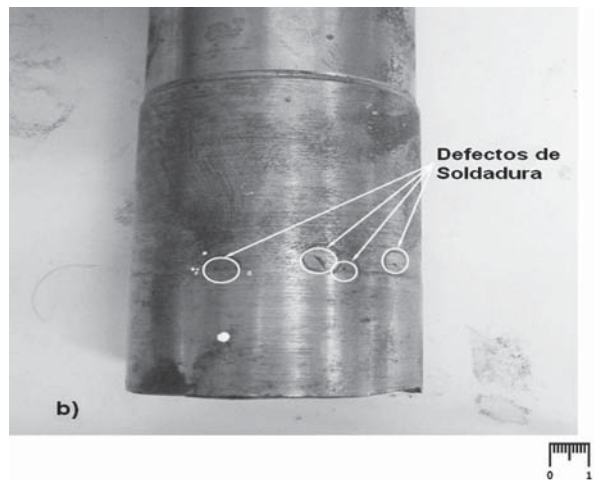
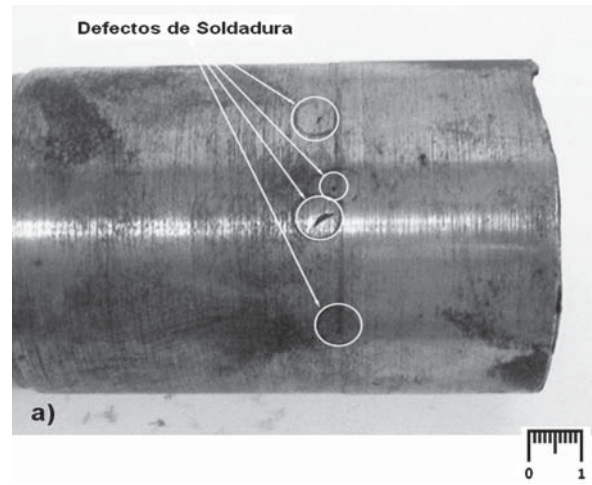
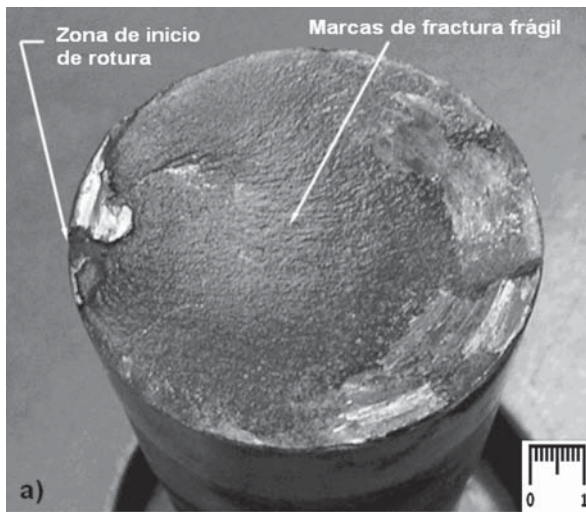


Figura 6. Fotografías en la zona de fractura. (a) Superficie de fractura; (b) cambio de sección en la zona de falla.

Figura 7. (a) y (b): Defectos de soldadura.

Ocasionalmente, cuando no se ejecuta el procedimiento adecuado, el origen de fallas está en las juntas de soldadura, que con frecuencia ocurren de manera catastrófica [5]. En las figuras 7a y 7b se observa que antes se aplicó soldadura en el eje, pues pueden observarse defectos en su superficie, después de realizar el maquinado. Estos defectos de soldadura pudieron ser causados por falta de fusión e inclusión de escoria, debido a la deficiente operación y falta control en el proceso de soldadura.

4.2. Estudio de la región de inicio de la falla utilizando microscopio estereoscópico

Al observar la figura 8 con aumento de 20X se aprecia que existe una iniciación de fisura debido a un defecto de soldadura; ello conduce a una falla por fatiga (pequeña) en el inicio de la rotura que evoluciona como un mecanismo de falla frágil, identificado por las marcas *chevron*, que se dirigen al origen de la falla.

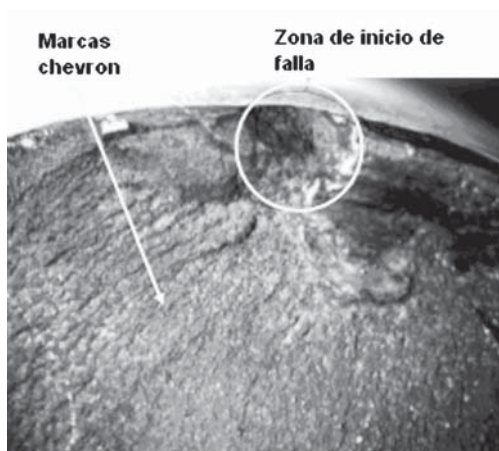


Figura 8. Microscopia en el inicio de la falla.
Aumento de 20X.

En las figuras 9a y 9b, obtenidas con un aumento de 22X y 23X, respectivamente, se comprobaron las hipótesis formuladas, desde el principio del análisis, que indicaban que el eje se soldó sin ejercer un control adecuado, probablemente con intención de recuperar material; luego se maquinó, sin considerar que debía obtenerse un adecuado acabado superficial, y además dejar un radio de acuerdo en el cambio de sección. De esta manera se creó un concentrador de esfuerzos adicional al cambio de sección del eje.

En la figura 9b se observa el mal acabado superficial después del maquinado que se hizo para dar

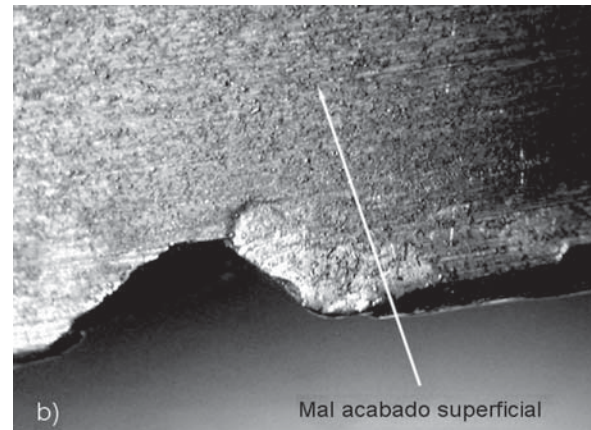
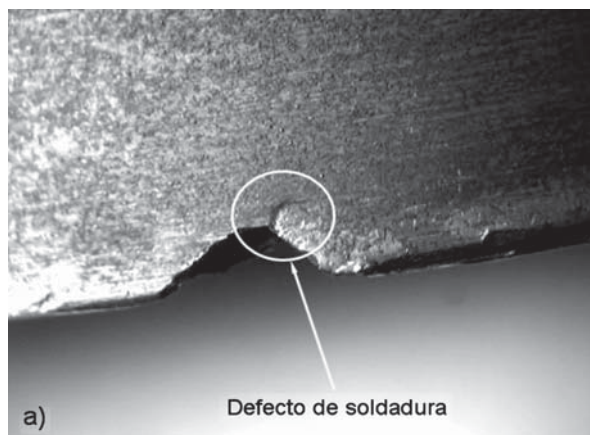


Figura 9. Micrografías en el inicio de la falla. a) Defecto de soldadura; b) mal acabado superficial cerca del inicio de falla.

dimensiones finales al eje. Mediante una prueba de rugosidad del material, el acabado superficial de la zona de falla puede compararse con su contraparte, que tiene el mismo cambio de sección al lado opuesto del eje (original de fabricante). Considerando que se trabaja con una medida estándar Ra de rugosidad (dada en unidades de μm), el examen produjo los siguientes resultados:

- Rugosidad Ra en zona de falla = 1,02 μm
- Rugosidad Ra en zona original de fábrica = 0,45 μm .

Debido a que la rugosidad en la zona fallada es más del doble de la medida en la zona sin falla, se comprueba que se maquinó con descuido para recuperar las dimensiones del eje después de soldar. Vale destacar que para mejorar el acabado superficial se debe maquinar con avances y profundidades bajos y alta velocidad de corte, además de tener una herramienta de corte con un radio de nariz adecuado.

5. Examen microestructural

Se realizaron pruebas de metalografía a varias posiciones a lo largo de la sección transversal del eje; empezando cerca del centro de la sección transversal y de la superficie exterior; ellas fueron hechas en un punto en el cual se evidenciaba un

defecto de soldadura. Las muestras fueron pulidas con óxido de aluminio de 0,3 micras, atacadas con nital al 2% y luego observadas en un microscopio óptico.

El análisis metalográfico reveló la variación en la microestructura del material del eje en la dirección radial, lo que puede observarse en las figuras 10 y 11. En el metal base (centro del eje) se tiene una

estructura de ferrita y perlita, típica de un acero SAE 1045 (hipoeutectoide). A continuación se encuentra una zona térmicamente afectada en el exterior del eje, con una microestructura típica de soldadura presente cerca de la superficie [5], evidente por un crecimiento dendrítico columnar. La metalografía mostrada en la figura 10 tiene un aumento de 250X, y la figura 11 uno de 400X.

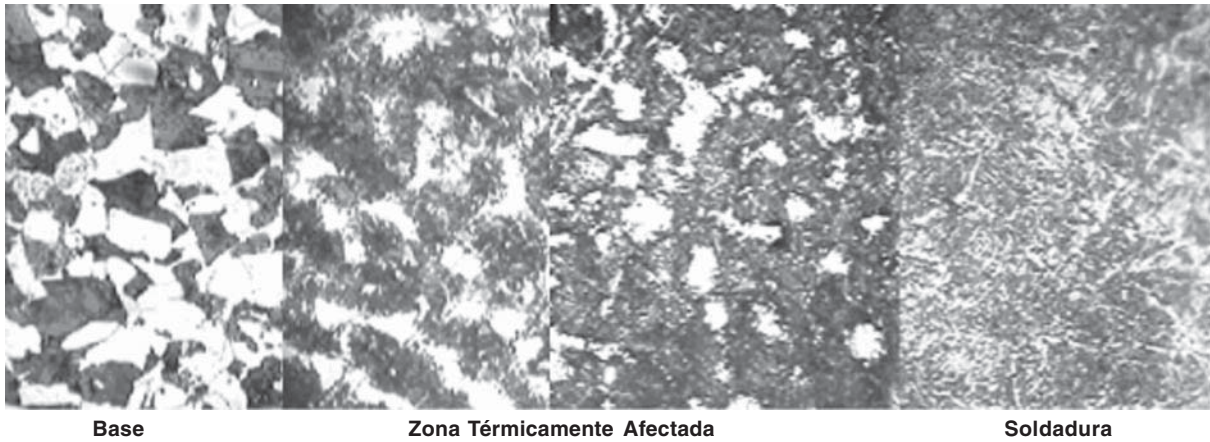


Figura 10. Cambio de la microestructura en el material cercano a la falla. Aumento 250X.

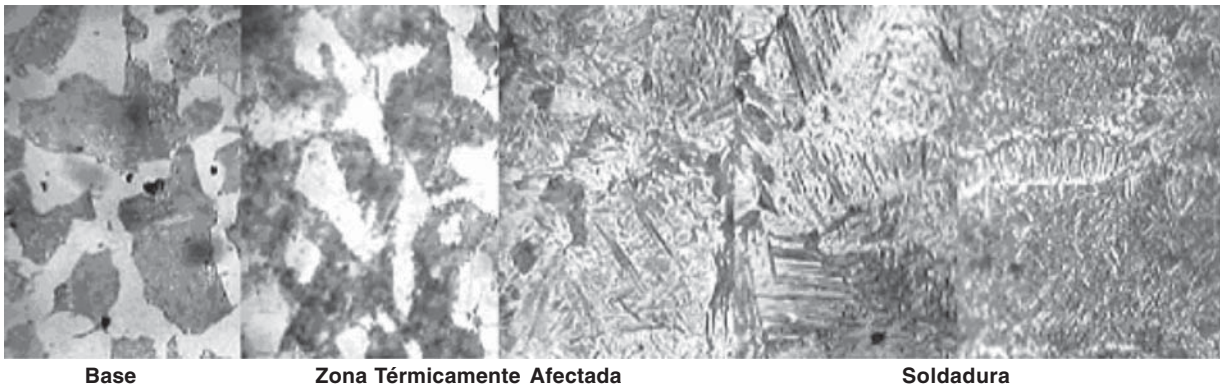


Figura 11. Cambio de la microestructura en el material cercano a la falla. Aumento 400X.

En la zona térmicamente afectada se encontró martensita (fase acicular dura y frágil), la cual es peligrosa en aceros de mediano carbono empleados para fabricar ejes buscando tenacidad (véase figura 12). También se observa comienzo de formación de martensita de temple incompleto, que es una estructura de fragilidad en los aceros [6]

(véase figura 13). Probablemente, dado que el eje no fue tratado térmicamente para aliviar tensiones en la zona soldada, se experimentan esfuerzos residuales que jugaron un papel significativo en el crecimiento de la fisura presente por el defecto de soldadura y, por último, en la falla del eje.

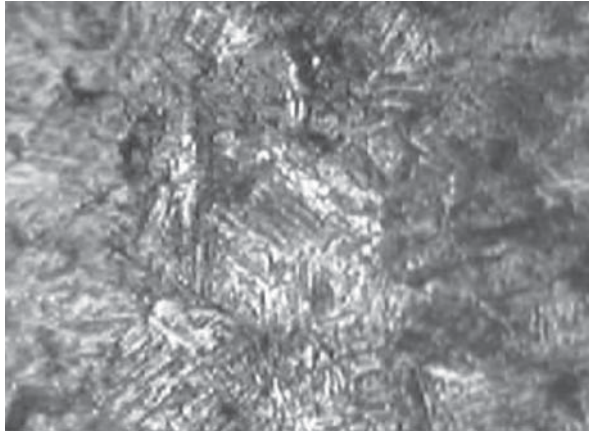


Figura 12. Martensita, aumento 400X.



Figura 13. Martensita de temple incompleto, aumento 400x.

6. Discusión

Los ejes de motores eléctricos son diseñados bajo un criterio de rigidez estática, que permite mantener las tolerancias en el entrehierro y una operación alejada de las frecuencias naturales; lo anterior garantiza un comportamiento a vida infinita en condiciones de servicio nominales. Por tanto, la única forma de falla posible es la inducida por aplicación de soldadura para recuperar metal perdido en alguna operación de mantenimiento o de trabajo del eje, sin tener los cuidados recomendados.

7. Conclusiones y recomendaciones

El examen micro-estructural muestra que, por ser un acero de medio contenido de carbono, el material requiere de un estricto control en un proceso de soldadura; éste consiste primero en precalentarlo y, luego del proceso de soldadura, aplicar un tratamiento térmico de alivio de tensiones; asimismo, el material de aporte debe ser seleccionado con gran cuidado.

Las metalografías muestran un proceso de soldadura pobre; se presenta una microestructura martensítica en la zona térmicamente afectada, y martensita de temple incompleto en la zona de fusión. Estas microestructuras no son resistentes a cargas de flexión, que son el estado de carga principal del eje.

La concentración combinada de esfuerzos combinada debidos al cambio de sección, ausencia de radio de acuerdo, aplicación de soldadura y el pobre acabado superficial reduce la capacidad del material para afrontar cargas variables. El factor de seguridad calculado (0,7 en la sección crítica) indica que en un principio el eje falló por el mecanismo de fatiga; al llegar a la zona térmicamente afectada, en la que se encuentran las microestructuras de martensita, la fractura se convirtió en frágil (marcas *chevron*).

El análisis fractográfico muestra la zona de inicio de la falla, comprobando que ella fue un defecto de soldadura con forma de grieta, que al tiempo agregó otro concentrador de esfuerzos en una zona de por sí de alta concentración.

Referencias bibliográficas

- [1] Sattari-Far I., Moalemi M. (2003): *Failure of Stainless Digester Shafts in a Paper Production Plant*. Engineering Failure Analysis, Vol. 10, Issue 6, pp. 675-682.
- [2] Heyes A.M. (1999): *Automotive Component Failures*. Engineering Failure Analysis, Vol. 5, Issue 2, pp. 129-141.
- [3] Das G., Sinha A.N., Mishra, S.K., Bhattacharya D.K. (1999): *Failure Analysis of Counter Shafts of a Centrifugal Pump*. Engineering Failure Analysis, Vol. 6, Issue 4, pp. 267-276.
- [4] ASM Metals Handbook (1992). *Failure Analysis and Prevention*, vol. 11.

- [5] ASM Handbook (1992). *Welding, Brazing and Soldering*. Vol. 6.
- [6] Seferian D. (1979). *Metalurgia de la soldadura*. Edición Revolucionaria.
- [7] Berndt F., van Bennekom A. (2001): *Pump Shaft Failures*. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 8, Issue 2, pp. 135-144.
- [8] Bhaumik S.K., Rangaraju R., Parameswara M.A., Venkataswamy M.A., Bhaskaran T.A., Krishnan R.V. (2002): *Fatigue Failure of a Hollow Power Transmission Shaft*. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 9, Issue 4, pp. 457-467.
- [9] Peterson R.E. (1974). *Stress Concentration Factors*. John Wiley & Sons, New York.