

## FRACTURA DE UN EJE ROTOR DE ACERO PERTENECIENTE A UNA CABLEADORA

J.M. Gallardo, J.A. Rodríguez y E.J. Herrera

Grupo de Metalurgia e Ingeniería de los Materiales  
Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales  
Escuela Superior de Ingenieros  
Universidad de Sevilla  
Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 SEVILLA

**Resumen.** El eje rotor de acero de una máquina de cablear había roto a los veinte días de servicio. Este eje sustituía a uno anterior que había durado, hasta su fractura, cuatro años. En el nuevo eje se habían introducido cambios de material y de diseño con el fin de alargar su vida en servicio. Se ha llevado a cabo la diagnosis del fallo (inspección visual, análisis químico, medidas de dureza, metalografía y microfractografía), en gran medida, haciendo un estudio paralelo de los dos ejes, antiguo y nuevo. Se concluye que la rotura del nuevo eje se debe a fatiga, promovida por grietas causadas por un proceso de recargue por soldadura en la zona de asiento del rodamiento.

**Abstract.** A rotating shaft belonging to a machine to manufacture ropes failed after twenty days of service. Failure analysis (chemical composition, hardness, microstructure, fractography, etc) has been carried out. The failure investigation was extended to a previous shaft which failed after four years of service. Both shafts had failed by fatigue. It is concluded that the early failure of the new shaft was originated by the presence of cracks introduced by an overlaid welding, probably used as reclamation of a product of improper dimensions.

## 1. INTRODUCCIÓN

El eje de una máquina de fabricación de cables había roto a los veinte días de su instalación. Dicho eje (con un diámetro variable entre 80 y 340 mm, y longitud de 1038 mm) servía de soporte y transmisión del movimiento de giro a la horquilla de la cableadora, sobre la que se disponía el tambor que recogía el cable formado. El conjunto citado, de unas tres toneladas de peso, gravitaba en voladizo sobre el eje siniestrado, y trabajaba a 150 rpm.

El eje objeto de estudio (en adelante eje nuevo) había sido fabricado en sustitución del eje original de la máquina, fallado previamente por la misma sección que el eje nuevo, después de cuatro años en servicio. El eje nuevo había sido rediseñado, incorporando cambios que, a priori, mejoran la resistencia a la fatiga [1], a saber:

- Se habían mecanizado acuerdos en los cambios de sección, con un radio de entre 3 y 5 mm.

- El acero F125 del eje original se había sustituido por un F1270M, según certificado del fabricante.
- En la zona de rotura del eje original se había aumentado la sección en un 15%, montando nuevos rodamientos con mayor capacidad de carga.
- Se había modificado la cogida eje-horquilla, sustituyendo las uniones soldadas originales por uniones atornilladas y pernos montados en caliente.

## 2. OBSERVACIONES VISUALES.

La rotura del eje nuevo, al igual que la del eje original, se ha producido en un cambio de sección, en el límite del asiento del cojinete adyacente a la horquilla (Fig.1). En esta zona no ha podido comprobarse la existencia o no de radios de acuerdo. En el resto de cambios de sección, sin embargo, el eje original no tiene mecanizados acuerdos, mientras que el eje nuevo tiene, aproximadamente, los señalados en plano.

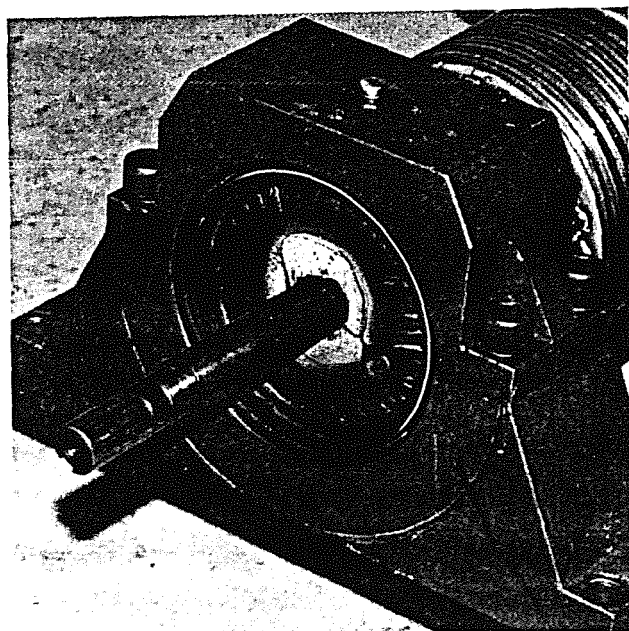


Fig. 1. Eje siniestrado en proceso de desmontaje ( $\times 0,2$ ).

La superficie de rotura muestra, en ambas piezas, original y nueva, dos zonas bien diferenciadas. En una de estas zonas se observan marcas conchoidales o de playa, propias de roturas producidas por fatiga. En el eje original, la grieta de fatiga se origina en un punto de la periferia de la pieza. En el eje nuevo aparecen multitud de grietas a lo largo de toda la periferia que, al propagarse hacia el centro van convergiendo en una sola, lo que da lugar al aspecto "en terrazas", que muestra la rotura en la periferia (Fig. 1). La segunda zona característica de las superficies de rotura es la que corresponde a la rotura final, súbita, que se produce por sobreesfuerzo. En el eje original, la zona de rotura final ocupa un 35%, aproximadamente, de la sección y se sitúa en oposición al lugar de inicio de la grieta de fatiga. En el eje nuevo, la zona de rotura final es algo menor y se sitúa centrada en la sección del eje. La presencia de un taladro centrado (para el paso del eje motor del carrete bobinador) y otro descentrado (para el paso del cable formado) no parecen afectar a la morfología de fractura.

### 3. ENSAYOS Y DISCUSIÓN.

#### 3.1. Análisis químico.

La composición química básica de los ejes, original y nuevo, según los ensayos realizados, se incluye en la Tabla I. También se incluye la composición química, según UNE 36-012-75, de los aceros de los que, supuestamente, están fabricados los ejes. En general, las composiciones de los ejes corresponden a los valores normalizados, teniendo en cuenta las variaciones que se admiten para análisis sobre producto. Solo cabe destacar el mayor contenido de carbono del eje original y su

contenido de níquel, del mismo orden que el exigido para el acero F1270. De hecho, salvo por el carbono, la composición del eje original puede encajarse dentro de la correspondiente al acero normalizado F-1270. En cualquier caso, la rotura del eje no cabe atribuirla a deficiencias en la composición química del acero.

Tabla I. Composiciones químicas determinadas para los ejes nuevo y original, así como márgenes normalizados.

%	F1270	EJE NUEVO	F1250	EJE ORIGINAL
C	0,32-0,38	0,37	0,32-0,38	0,42
Mn	0,55-0,85	0,71	0,60-0,90	0,73
Si	0,15-0,40	0,28	0,15-0,40	0,27
S	<0,035	0,006	<0,035	0,025
P	<0,035	0,04	<0,035	0,04
Cr	0,65-0,95	0,93	0,85-1,15	1,06
Ni	1,60-2,00	1,74	---	1,13
Mo	0,15-0,30	0,51‡	0,15-0,25	0,29‡

‡ Determinación semicuantitativa

#### 3.2. Metalografía.

Se ha preparado una sección longitudinal del eje nuevo cercana a la rotura. La figura 2 muestra un montaje, en la posición respectiva original, de dos trozos macroatacados, donde la parte superior corresponde a la sección de rotura y la izquierda a la superficie exterior. En la estructura se aprecian formaciones dendríticas más propias de productos moldeados, o con una deformación en caliente poco intensa. En la superficie del eje, en el asiento del rodamiento, entre la rosca del anillo de retén y la sección de rotura, se aprecia un depósito de soldadura. El espesor del metal fundido es variable entre 1,5 y 2 mm, y la zona afectada alcanza hasta los 3,5 mm de profundidad, aproximadamente. Observando la superficie externa del eje se comprueba que el depósito de soldadura se ha formado mediante sucesivos cordones adyacentes, paralelos a la generatriz del eje. No puede determinarse

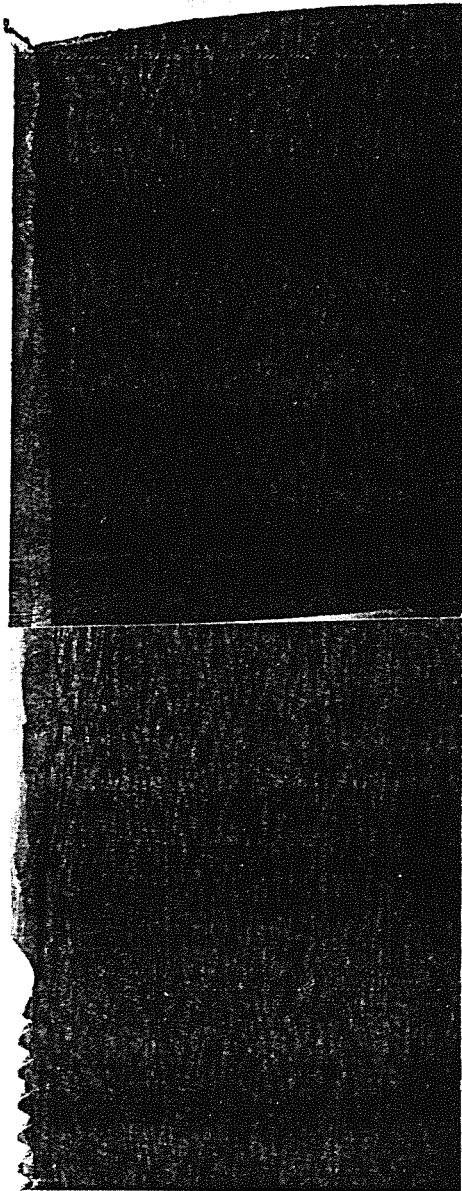


Fig. 2. Estructura longitudinal del eje denominado nuevo, adyacente a la rotura.

la dirección de soldadura, si es desde la rosca hacia el cambio de sección (zona de rotura) o viceversa.

Se han preparado secciones pulidas y atacadas de ambos ejes para su observación microscópica.

El eje nuevo muestra una estructura de tratamiento térmico, probablemente de temple y revenido alto (Fig 3). Pueden distinguirse diversas estructuras de transformación distribuidas no homogéneamente. La estructura cerca de la superficie, en la zona del asiento del rodamiento, y de acuerdo con lo observado macroscópicamente, corresponde a un depósito de soldadura que ha afectado térmicamente al metal base. En la superficie se distingue (Fig.4) el metal de aportación con la característica estructura columnar de solidifica-



Fig. 3. Microestructura correspondiente al núcleo del eje nuevo(x50).

ción. La zona afectada por el calor presenta dos partes diferenciadas. La más cercana al cordón, de color más claro, tiene principalmente estructura martensítica de temple. La más cercana al metal base, de coloración más oscura, corresponde a una estructura intermedia de transformación.

Por su parte, el eje original muestra una estructura ferrítico-perlítica, con un tamaño de grano mixto, en general inferior a 8 ASTM, pero que localmente puede llegar a 3. La perlita es muy fina o aparece parcialmente transformada lo que es propio de productos enfriados. El tratamiento ha penetrado hasta el interior de la pieza

### 3.3. Agrietamientos en el eje nuevo.

Tanto en el metal de aportación como en la zona afectada por el calor aparecen abundantes agrietamientos que siguen variadas direcciones.

Por una parte, se detectan grietas en la zona cercana a la superficie de rotura que son paralelas a la superficie fracturada. Estas grietas están situadas tanto en el metal de aporte como en la zona afectada por el calor (Fig.5, que corresponde a una probeta pulida). Observadas a mayores aumentos, en una probeta atacada (Fig.6), se comprueba que las grietas situadas en el metal de aporte se propagan a lo largo de la ferrita existente en límites de grano de la zona de solidificación.



Fig. 4. Microestructura cerca de la superficie, en la zona de asiento de rodamiento, del eje nuevo (x50).

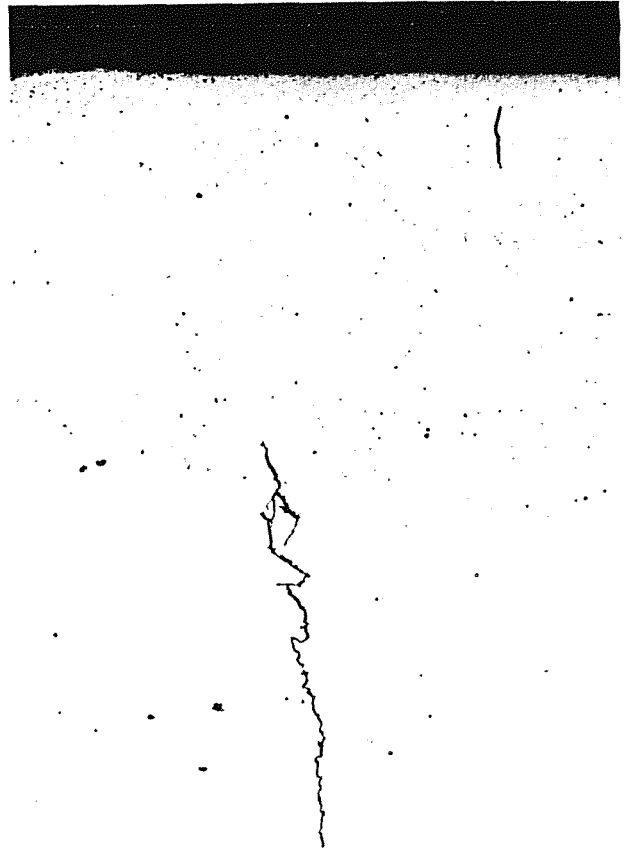


Fig. 5. Grietas en sentido axial existentes tanto en el metal aportado como en la ZAT del eje nuevo (x50).

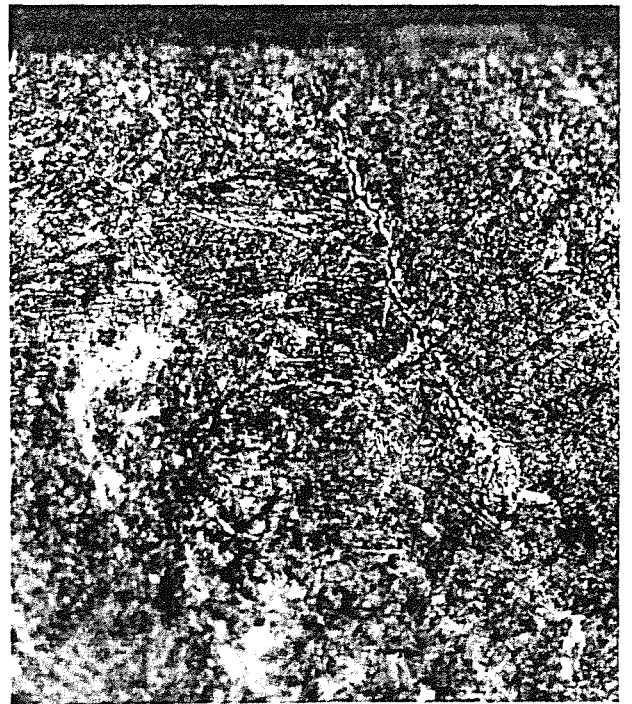


Fig. 6. Grieta axial en límite de grano del metal aportado (x400).

Por otra parte, lejos de la superficie de rotura, bajo el cordón, en la ZAT de coloración más clara, aparecen

agrietamientos paralelos a la generatriz del eje (véase Fig.4). A mayor profundidad, en la ZAT más oscura, siguen observándose grietas transversales al eje.

Los diversos tipos de grietas observadas pueden venir generadas por procesos ligeramente diferentes. En todo caso, la causa principal es la aparición de estructuras de temple y elevadas tensiones como consecuencia del rápido calentamiento y enfriamiento producido por el recargue de un acero con elevado contenido de carbono y elementos de aleación. De acuerdo con la composición química del acero, la normativa de la AWS [2] hubiese recomendado un precalentamiento previo a la soldadura. Además, estos aceros de altas características mecánicas son especialmente susceptibles al agrietamiento por hidrógeno [3].

Se estima que las grietas axiales en la zona afectada por el calor no templada podrían ser consecuencia de las tensiones axiales generadas al producirse la transformación martensítica en la ZAT templada. Por su parte, las grietas longitudinales localizadas en la ZAT templada, situadas inmediatamente bajo el cordón, son típicas del fenómeno conocido en la literatura inglesa como "underbead cracking", asociado a la absorción de hidrógeno en zonas afectadas por el calor de estructura martensítica [4]. Por último, las grietas axiales en el metal aportado, que se localizan en la fase ferrítica del límite de grano, guardan gran similitud con el fenómeno conocido como "ferrite vein cracking", que también se relaciona con la absorción de hidrógeno [5].

### 3.4. Microfractografía SEM.

No se han observado estriaciones de fatiga en los puntos de la superficie de fractura examinados. Esto suele ocurrir con algunos aceros ferríticos. Se ha comprobado, sin embargo, que la propagación por fatiga, en la zona afectada por el calor, como consecuencia de la aportación de material por soldadura, tiene lugar de una forma frágil intercrystalina.

### 3.5. Dureza.

Se han realizado medidas de dureza Vickers con carga de 10 kg a distintas profundidades. Las determinaciones se han llevado a cabo en secciones transversales de los ejes nuevo y original, paralelas a las caras de rotura y distantes de ellas unos 3 cm.

La figura 7 muestra la dureza HV10 en los cinco primeros milímetros de profundidad. El eje nuevo presenta una zona de elevada dureza alrededor de los 2 mm de profundidad, lo que corresponde a la zona de color claro afectada por el calor del recargue. En otras probetas, en la misma zona mencionada, se han medido puntualmente durezas mayores de 700 HV. En general,

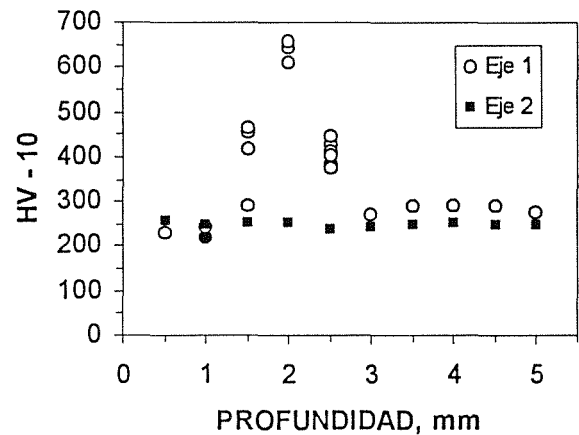


Fig. 7. Dureza HV10 a distintas profundidades del eje 1 (nuevo) y del eje 2 (original).

incluso en las zonas no templadas, la ZAT tiene una dureza del orden de 400 HV o superior. La dureza media hallada a profundidad superior a 5 mm, es de 281 HV10 para el eje nuevo y 226 HV10 para el original, lo que es consecuencia del distinto tratamiento térmico de ambos aceros.

### 3.6. Rugosidad superficial.

Es bien conocido que un mal acabado superficial favorece la iniciación de grietas que pueden propagar por fatiga. Se ha medido en ambos ejes, nuevo y original, el parámetro  $R_a$  (rugosidad media), habiéndose obtenido un valor similar para ambos, 1,93 y 1,91  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Estos valores de rugosidad son del orden de los recomendados para materiales que van a estar sometidos a fatiga.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

De acuerdo con los ensayos realizados y su interpretación pueden extraerse las siguientes conclusiones:

La rotura del eje nuevo se ha producido por sobreesfuerzo, después de que las grietas se propagaran por fatiga afectando aproximadamente a un 65% de la sección útil del eje.

La sección de rotura coincide con un cambio en el diámetro del eje, lugar donde, a pesar de la mecanización de radios de acuerdo, se produce una cierta concentración de tensiones.

La grieta inicial de fatiga ha sido producida por un proceso de recargue por soldadura en la zona del asiento del rodamiento. Este recargue por soldadura parece haber sido la causa principal que ha motivado la rotura del eje.

Para fabricar el nuevo eje se aconseja emplear,

básicamente, el mismo diseño utilizado en el eje nuevo, cuidando de mantener unos radios de acuerdo generosos y un buen acabado superficial.

El material a emplear puede ser un F1270, preferentemente preparado por forja, en estado de normalizado o bonificado con revenido alto.

Se evitarán calentamientos locales durante la mecanización o el montaje del eje, así como cualquier soldadura.

## 5. REFERENCIAS.

- [1] Stephens, R.I. Editor, "Case Studies for Fatigue Education", ASTM STP 1250 (1994).
- [2] Norma ANSI/AWS D1.1-88 Structural Welding Code-Steel 11th Ed., AWS, Miami (1988).
- [3] Easterling, K., "Introduccion to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworths, London (1983),
- [4] Yurioka, N. And Suzuky, H, Int. Met. Rev., 4, 35, (1990).
- [5] "Metals Handbook, Vol. 6", 9th. Ed., ASM, Metals Park, OH (1983).