



# Estudio de la rotura de un eje de generador eléctrico de un buque tanque

El estudio consiste en conocer las causas de la falla de un eje de un generador eléctrico de 140 mm de diámetro, instalado en un buque cisterna que se fracturó en servicio. El interés del comitente se centraba en que se desconocía la historia de la máquina por haber sido el buque comprado recientemente y no contar con antecedentes del mantenimiento de la misma. Entre las dudas que manifestaba el cliente se destacaban: la calidad del material del elemento, el diseño del mismo, posibles tratamientos térmicos, sobrecalentamientos por engrane del cojinete posterior del generador, soldaduras y cualquier otro aspecto referido a la condición metalúrgica del material. Para esto se realizó la caracterización del material, análisis de tensiones en torsión, Fractografía y otros relevamientos. Finalmente se establecieron las razones que se estima produjeron el colapso de la pieza.

**Palabras Claves:** Análisis de falla, fatiga, torsión, soldadura, inclusiones.

Trabajo presentado en el congreso CONAMET-SAM 2004 en la Universidad de la Serena Chile.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

El presente trabajo fue realizado a pedido de Directivos Técnicos de un astillero que debía reparar el eje de un generador eléctrico [1] de un buque tanque (B/T) de uso comercial. Se solicitaba el análisis de falla del eje dañado, con especial interés en conocer si el mismo era original o presentaba reparaciones previas. Dado este último caso, se deseaba saber que procedimiento de reparación pudo haberse usado. Adicionalmente se informó que el rodamiento cercano a la rotura había sido cambiado luego del accidente. Asimismo se realizaron

ajustes en el alineado de ejes del generador y la transmisión mecánica.

### 1.2 Material recibido

El comitente entregó un trozo de acero de 140mm de diámetro de un largo aproximado de 90mm que presentaba una de las superficies de fractura del eje en un extremo y marcas variadas en todas las superficies. En la Figura 1 se muestra la fotografía de la muestra para analizar.

Se determinó la resistencia y demás parámetros de tracción en sentido transversal, ya que era la única forma de extraer probetas. Los valores fueron:  $\sigma_{max}$  de 652 MPa y  $\sigma_{0,2}$

de 493 MPa, con alargamiento del 15%.

### 1.2.1 Composición química y tipo de material

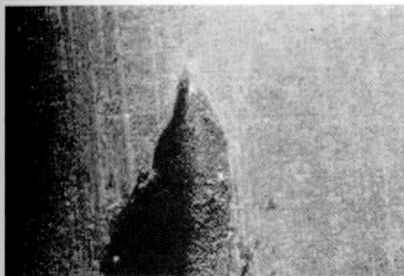
El material califica, con algunas limitaciones según las especificaciones, como un acero AISI-SAE 1030, indicado para usar en cementación, aunque responde bien al temple en diámetros menores a 15 mm.



**Figura 1:** Fotografía de la muestra, como fue recibida

**Tabla 1.** Composición química del acero recibido

Elemento	C	Mn	Sí	Cr	Al	P	S
Muestra	0.32	0.94	0.37	0.10	0.018	0.035	0.054



**Figura 2:** Detalle del socavado producido por un electrodo de repelado. 3x.

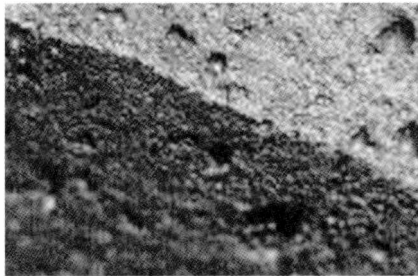
## 2. DESARROLLO DEL TRABAJO

El análisis de falla se llevó a cabo según el esquema siguiente:

- Determinación de la calidad del acero
- Análisis macroscópico
- Análisis microscópico
- Determinaciones de Dureza
- Fractografía

### 2.1 Determinación de la calidad del acero

El tipo y calidad del material de la barra original se definió en función de la composición química, las propiedades mecánicas y la metalografía de la pieza entregada. Como se indicó en el punto anterior, se trata de un acero tipo AISI-SAE 1030 tratado térmicamente.



**Figura 4:** Detalle de la Figura 3. 25x.

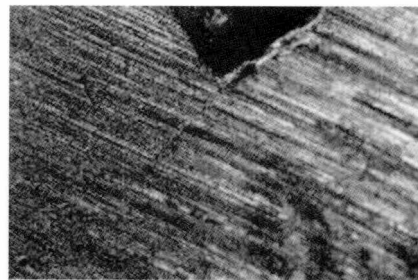
### 2.2 Análisis macroscópico

Se realizó en los siguientes pasos:

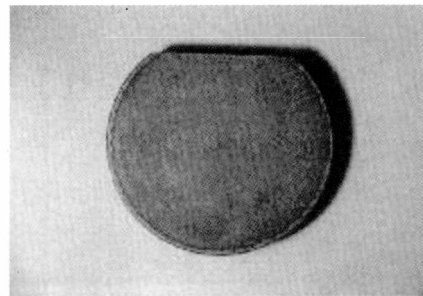
#### 2.2.1. Observación visual

La muestra recibida presenta algunas singularidades que se pasan a detallar:

- Se observan marcas de amolado en la superficie lateral cilíndrica cercana a la rotura (Figura 5).
- La superficie de fractura muestra profundas marcas de rozamiento.
- En el borde lateral del inicio de fractura se visualiza una marca de arranque de material.
- Se destaca sobre la parte cilíndrica lateral, una marca de forma alargada, localizada a una distancia de unos 20mm del borde de rotura. Figura 2.



**Figura 5:** Detalle de las marcas de amolado. Obsérvese la grieta helicoidal que continúa la rotura de la pieza. 15x.



**Figura 6:** Sección diametral del eje con ataque macrográfico. Se destaca el corte del casquete cilíndrico, que será usado para micrografías

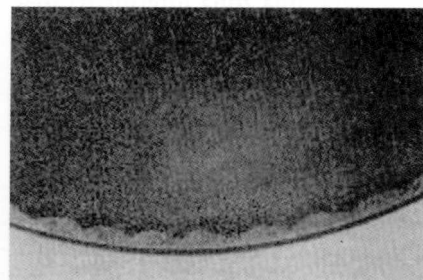
- La muestra presenta en la superficie, una mezcla de colores que van del azul tornasolado al gris metálico, indicación de un calentamiento diferenciado.

#### 2.2.2 Observación con lupa estereoscópica

Se usó una lupa estereoscópica Wild M8 con cámara fotográfica

En la Figura 2, se observa una marca profunda, que se identificó con el uso de electrodo de repelado, usado para preparar la superficie de soldadura.

En las Figuras 3 y 4 se muestran ampliaciones de zonas con salpicaduras (gotas solidificadas) de material de



**Figura 7:** Detalle de la Figura 6. Nótese el tratamiento térmico por inducción, revelado por el macroataque, que produce una imagen festoneada en la superficie. 1,5x.

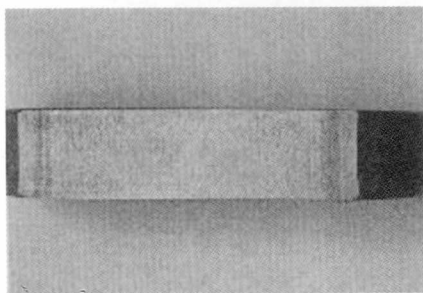
soldadura, originadas en una reparación defectuosa.

En las Figuras 6 y 7 se presenta las micrografías de una rodaja del eje obtenida por aserrado, que fue pulida y luego atacada con una solución al 50% de HCl, en ebullición durante 1 hora. Nótese que también fue cortado un casquete según la cuerda de la circunferencia, para tener una observación longitudinal del laminado y toma de microdureza.

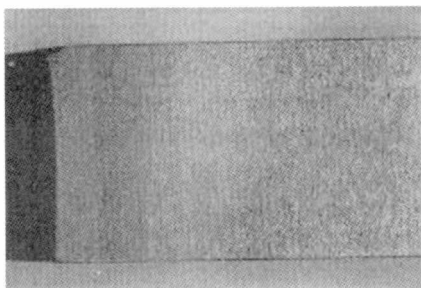
El casquete obtenido de la rodaja fue sometido a pulido y ataque micrográfico, para observación de la microestructura.

Como se aprecia en las Figuras 6, 7, 8 y 9, aparecen diferentes zonas en el material base del eje.

Resulta particularmente destacada una zona festoneada en el detalle de la Figura 7 que se identifica junto a la superficie. Esta zona de aproximadamente 3 mm, fue producida por un tratamiento térmico de temple superficial a la llama. El acero del eje presenta, un fibrado en sentido longitudinal, bien definido, característico de la laminación. También se aprecia decarburación superficial de aproximadamente 0.5 mm en la zona clara, una zona intermedia más



**Figura 8:** Micrografía longitudinal, mostrando un fibrado regular y bien orientado. 1x



**Figura 9:** Detalle de la Figura 6, mostrando el fibrado y el tratamiento térmico superficial. 4,5x

**Figura 9:** Detalle de la Figura 6, mostrando el fibrado y el tratamiento térmico superficial. 4,5x

oscura y luego el material original del núcleo.

## 2.3 Análisis microscópico

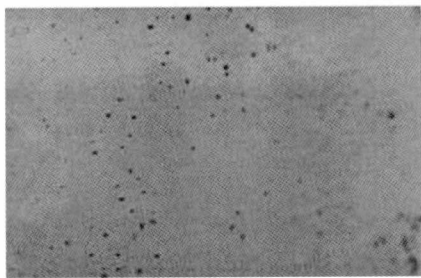
La estructura micrográfica fue observada en diferentes zonas de interés para el análisis de falla.

### 2.3.1 Inclusiones

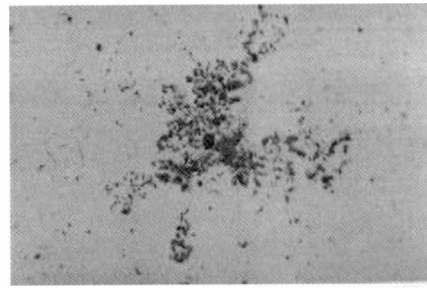
En la Figura 10 se observa la distribución de inclusiones no metálicas más frecuentes en todo el material. Adicionalmente hay zonas con mayor densidad de inclusiones como las de la Figura 11. En la Figura 12 se muestra un detalle del tipo de inclusiones compuesto por sulfuros de manganeso, óxido de hierro y aluminio.

### 2.3.2 Microestructura

La pieza presenta distintas microestructuras: la superficial decarburada parcialmente por el tratamiento térmico oxidante, donde predomina la



**Figura 10:** Distribución de inclusiones más frecuente en el acero base. 50x.



**Figura 11:** Aglomerado de inclusiones, presente en algunas zonas del material. 50x.

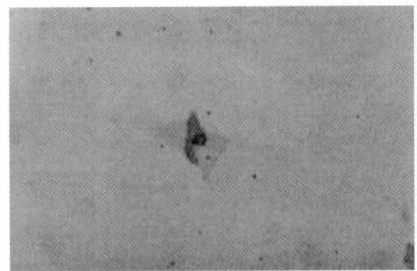
**Figura 11:** Aglomerado de inclusiones, presente en algunas zonas del material. 50x.

ferrita, mezclada con estructuras de temple poco resueltas (ver Figura 13). Le sigue una zona de temple defectuoso donde es clara la estructura tipo Widmanstätten que se puede ver en la Figura 14. Luego una zona de bandas alternadas de perlita y ferrita (ver Figura 15). Finalmente la estructura de normalizado del núcleo, de perlita y ferrita, como la mostrada en Figura 16.

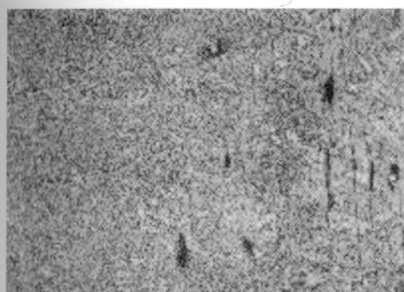
### 2.3.3 Determinaciones de Dureza

Se realizaron tomas de dureza Vickers, (Hv) con un microdurómetro Leco M 400 G, con una carga de 100 grs.

En la Tabla 2 se han volcado los valores promedios de 10 determinaciones de Hv en cada caso, efectuadas en los lugares indicados en la Figura 16 como Zonas 1, 2 y 3 de la muestra metalográfica.



**Figura 12:** Detalle de inclusiones de sulfuros y óxidos. 200x



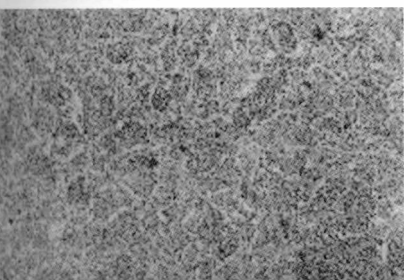
**Figura 13:** Microestructura superficial, parcialmente decarburada por la atmósfera oxidante del tratamiento térmico de temple a la llama. 50x.

**Tabla 2.** Microdureza Vickers promedio, según zonas

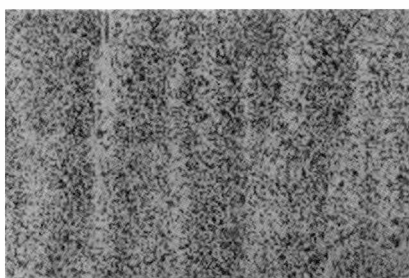
Zona	Hv [kgf/mm <sup>2</sup> ]
1	250±5
2	265±6
3	218±4

#### 2.4 Fractografía

Tal como puede observarse en las Figuras 1 y 17, la superficie de rotura, se presenta con una variedad de marcas de diversos aspectos, que indican diferentes orígenes. Entre ellas se destacan, para los investigadores, las profundas marcas radiales propias de la rotura de fatiga por torsión [2,3], donde los inicios se encuentran distribuidos en la periferia del eje analizado.



**Figura 14:** Zona de temple defectuoso. Se observa gran profusión de estructura Widmanstätten. 100x.

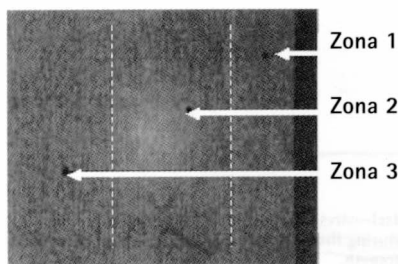


**Figura 15:** Zona intermedia de grano fino, se observan bandas de segregación, perlita, ferrita e inclusiones. 50x

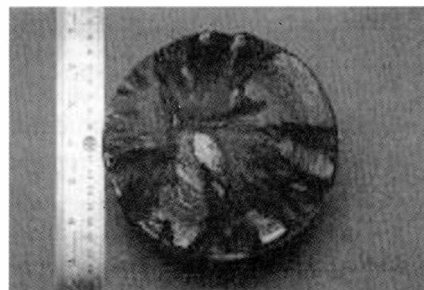
#### 3.DISCUSIÓN DE LOS ANÁLISIS Y RESULTADOS.

Como ocurre frecuentemente en Análisis de Falla, los elementos concurrentes son muchos y variados. Asimismo los resultados pueden ser mas o menos evidentes o bien se debe profundizar en varias disciplinas. En nuestro caso, tenemos la influencia de:

- Material original del eje;
- Tratamientos térmicos;
- Soldadura;
- Esfuerzos de torsión;
- Flexión y corte;
- Vibraciones;
- Períodos transitorios de carga;
- Períodos de cargas constantes,



**Figura 16:** Detalle de las zonas donde se realizaron las tomas de microdureza Hv100.



**Figura 17:** Vista de punta del eje mostrando las marcas de la rotura donde se destacan las "ratchet marks", distintivas de la rotura por fatiga en torsión.

- Comportamiento de otros componentes como son los rodamientos,
- Alineación de los ejes de los equipos;
- Vibraciones.

Como consecuencia de los estudios realizados, surgen elementos de juicio que se evalúan para interpretar los fenómenos que tuvieron lugar para que finalmente se produjera la rotura del eje en cuestión.

Observando las Figuras 3 y 4, donde aparecen las gotas solidificadas de material metálico proyectado, se desprende que en algún momento la pieza fue soldada. También aporta a esta conclusión la marca que se ve en la Figura 2, producto del uso de electrodos de repelado usados para preparar la junta de las soldaduras "in situ".

Las marcas de amolado de la Figura 5, son coincidentes con la terminación de la soldadura. También se destaca la coloración azul y en parte marrón oscuro de la superficie fracturada y la zona cercana a la misma: esta coloración se atribuye en parte al calentamiento debido al aporte calórico de la soldadura y por otro lado

al rozamiento entre las superficies de la fractura luego del colapso.

Continuando con el razonamiento, surge que los inicios de la rotura, tuvieron lugar antes de la soldadura [3]. Cabe la duda sobre sí, la sección del redondo rompió completamente y fue reparada o bien si alguna inspección de rutina indicó la aparición de fisuras y se tomó la decisión de hacer el mantenimiento correctivo. En cualquiera de las circunstancias descritas, la pieza reparada volvió a romperse en la zona soldada.

Como lo indica la bibliografía sobre el tema [4], en la rotura por fatiga, la influencia del modo de carga se combina con la presencia de concentradores de tensión, el tipo de material y su estado metalúrgico.

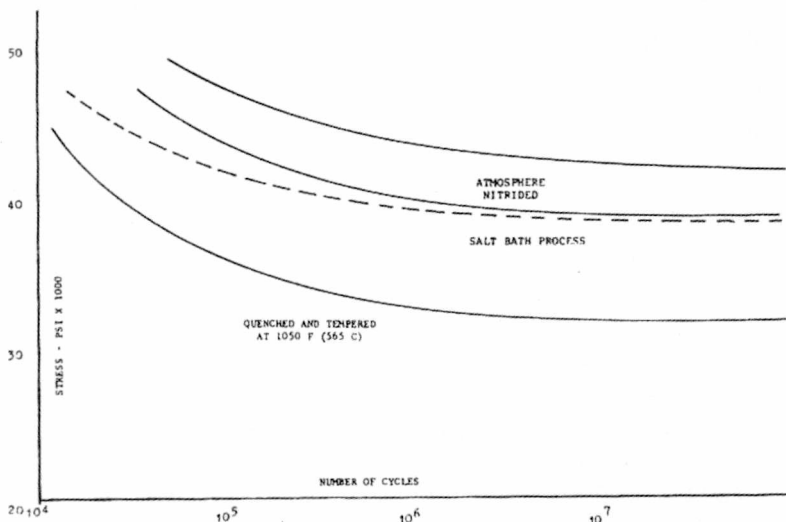
En el caso de un redondo sometido a torsión estática, si el material está en estado recocido o si se trata de aceros de bajo carbono, las tensiones de corte producen la rotura según un plano perpendicular al eje longitudinal del redondo [5, 6]. Por el contrario si el material estuviera endurecido, y la carga por torsión se aplican en un solo ciclo hasta la rotura, la fractura tiene lugar según una superficie helicoidal en el cuerpo del redondo. En el último caso las tensiones de corte no bastan para producir la deformación y rotura, y son las tensiones normales las que terminan separando las secciones. Cuando el material es de una resistencia intermedia y los esfuerzos son de fatiga por torsión, la rotura es producida según el avance de los frentes de fisuras iniciados en la superficie del cilindro, donde las tensiones son las mas altas y avanzan

según la cantidad de frentes que se hayan originado. Estos avances se extienden hasta interferirse entre sí, sin poder cruzarse, razón por la cual en el lugar de encuentro, se forma una colina, o diente de sierra conocidas como "ratchet marks". Si el material es aceptablemente isótropo y las cargas son de un ciclado constante, el dibujo de la superficie de fractura se presentará con algún grado de simetría, pero si sucede como en nuestro caso, que el material presenta heterogeneidades, debidas a la microestructura bandeada, la distribución de inclusiones, el material de soldadura y las modificaciones producidas por la misma, la superficie de rotura es mucho menos simétrica. También se deben considerar los ciclos de carga, tanto en intensidad como en frecuencia.

Un aspecto muy importante en el inicio de fisura, lo constituye el tratamiento térmico superficial que se observa en las Figuras 6, 7, 8 y 9. donde la decarburación, mostrada en la Figura 13, junto con la estructura Widmanstätten, mostrada en la Figura 14, presentan una condición muy desfavorable para la resistencia a la fatiga por torsión. En la Figura 18 se muestra un grafico referido a un acero 1035, similar al del trabajo, donde las curvas de fatiga cambian notablemente su limite de resistencia, cuando son nitradas con diferentes técnicas[7].

Adicionalmente, el espesor de la capa endurecida por temple superficial a llama Figuras 6 y 7 de aproximadamente 3 mm, resultó poco adecuado para la pieza analizada.

**3-2. AISI 1035: Effect of Gas and Salt Bath Nitriding**



Torsional fatigue strength of AISI 1035 steel—stress vs number of cycles for completely reversing torsional fatigue, featuring the effects of gaseous atmosphere and salt bath nitriding on fatigue strength.

**Figura 18:** Incidencia del tratamiento térmico superficial en la resistencia a la fatiga por torsión, Tomado de Boyer [7]

#### 4. CONCLUSIONES

- El eje analizado rompió debido a fatiga por torsión.
- El eje fue reparado mediante soldadura.
- La soldadura de mantenimiento correctivo no resultó una buena solución.
- El tratamiento térmico superficial fue realizado con la técnica de temple a la llama, que se hace normalmente con soplete oxiacetilénico de llama oxidante.
- El Tratamiento térmico, no provee un buen espesor y produce estructuras metalográficas de malas propiedades mecánicas a fatiga por torsión.
- Tampoco es adecuado un acero 1030 de diámetro tan grande para ser templado.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] GARCÍA PEYRANO y otros "Estudio del Comportamiento Dinámico de una Cabeza de Bobina de una Barra Estatorica de un Generador Eléctrico de Gran Potencia Ante Diferentes Estados de Tensión" Jornadas SAM/CONAMET/SIMPOSIO MATERIA 2003, S. C. de Bariloche 2003, pp687-690
- [2] DHABALT LORI J. and Calloway Cindy S. (Deere and Company) IDENTIFICATION OF PARTS FAILURE. Ed. John Deere Publishing. AlmonTIAC Building, Suite 104, 1300 -19th Street. East Moline, IL61244 - 1999, 6-1 to 6-12 - Section 6 .
- [3] DONALD WULPI, "UNDERTANDING HOW COMPONENTS FAIL" 4a edición. .Ed. ASM, 1988, 52 and 124-137. Sections 6 and 10.

- [4] ASM Handbook Volume 9;Fractography and Atlas of Fractographs (8thEdition), ASM Metals Park, 1974, p 43.
- [5] GERE JAMES M. and TIMOSHENKO STEPHEN P. MECÁNICA DE MATERIALES. 4ta edición International Thomson Editors. México 1998. 187-196 - Cap.3
- [6] ORTIZ BERROCAL LUIS ELASTICIDAD. 3ra edición. Ed. Mc Graw Hill Interamericana de España S:A.U.-1988, 273-279 - Cap. 7.
- [7] BOYER HOWARD E. ATLAS OF FATIGUE CURVES, ASM Metals Park, 1986, p 72.

#### 6. AGRADECIMIENTOS

Para la Universidad de la Marina Mercante y CITEFA que financian el Proyecto de Análisis de Falla de Componentes Mecánicos N° 015/04 (UdeMM) y N° 06 P 006/03 (CITEFA)