

Evaluación de la fractura por fatiga del cigüeñal de un motor Diesel.

R. A. Goytisol Espinosa, J. G. Noa Águila, N. Arzola de la Peña, L. Castellanos González, H. Hernández Herrera, L. López Torres, A. Fernández Cañizares.

Facultad de Mecánica. Universidad de Cienfuegos. Carretera a Rodas km 4, Cienfuegos.
Teléfono: 22 962. E-mail: ragoyti@fmec.ucf.edu.cu

(Recibido el 11 de Noviembre de 2004, aceptado el 15 de Enero de 2005)

Resumen.

En el Trabajo se presentan los resultados de una investigación realizada por el colectivo de Mecánica Aplicada de la Facultad de Ingeniería Mecánica de La Universidad de Cienfuegos, con vistas a esclarecer la causa de la fractura del cigüeñal de uno de los motores de la Moto Nave "Mar del Sur" de la Empresa EQUITALL.

La investigación del material del cigüeñal arrojó que se trata de acero 30. Los cálculos realizados demostraron, que la capacidad resistente de este acero es insuficiente para soportar las tensiones que se desarrollan en el codo de salida del cigüeñal y los factores de seguridad a la fatiga en algunos de los puntos mas críticos del cachete, por donde se produjo la fractura, dan inferiores a la unidad y la aplicación de la Mecánica de la Fractura Subcrítica, confirmó que la Vida Útil del árbol con dicho material, es muy limitada.

Palabras claves: Cigüeñal diesel, fractura por fatiga, mecánica de la fractura subcrítica.

1. Introducción.

En una operación de atraque por babor, se produjo la fractura del cigüeñal de uno de los motores de una Moto Nave. El motor había sido recientemente reparado por la, colocándole un cigüeñal nuevo, el cual tenía solo 91 días de explotación después de la reparación. Es el segundo cigüeñal que se rompía después de una reparación y ambos por la misma sección.

Se sospechaba que el material de los cigüeñales suministrado por la Firma canadiense, no satisface los requerimientos de resistencia de dichos motores.

La Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez" realizó la investigación para esclarecer la causa de la avería y elaborar un informe que pudiera servir para resolver el litigio entre la firma EQUITALL y la Empresa "Camagüey Diesel".

2. Desarrollo.

En las Figuras 1 a) y 1 b) se muestran vistas de la grieta de fractura, observadas desde ambos lados del muñón de biela y en las Figuras 1 c) y 1 d) se muestran vistas del aspecto externo de la zona fracturada.

La fractura como se observa está localizada en el cachete del extremo de salida del cigüeñal en la zona de solape de los muñones de apoyo y de biela.

El análisis químico de una muestra del metal y las observaciones metalográficas confirmaron que se trataba de un acero al carbono Grado 30 o similar, con un tratamiento termoquímico superficial en la zona de los muñones, dada la dureza HRC = 40 observada en dicha zona.

Para realizar el cálculo de las fuerzas sobre el cigüeñal es necesario conocer el diagrama indicado, sin embargo la información disponible del motor era prácticamente nula por lo se procedió a realizar el cálculo térmico del mismo según la metodología descrita en [1, 3, 5], de donde se obtuvo el diagrama indicado.



Figura 1a.



Figura 1b.

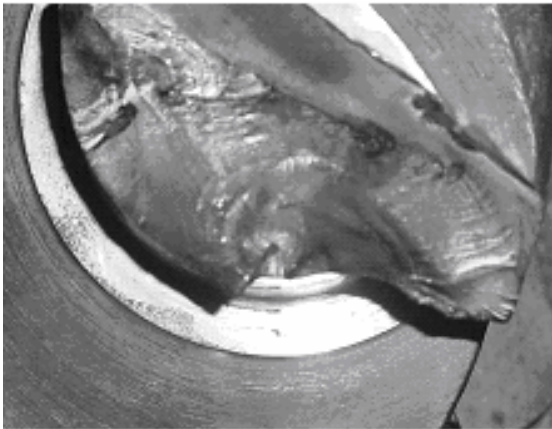


Figura 1c.



Figura 1d.

En la Figura 2 se muestra la variación obtenida de la presión de los gases con el ángulo de giro del cigüeñal y en la Figura 3 los valores de las fuerzas tangencial T_t y radial R_t sobre el codo en función del ángulo de giro.

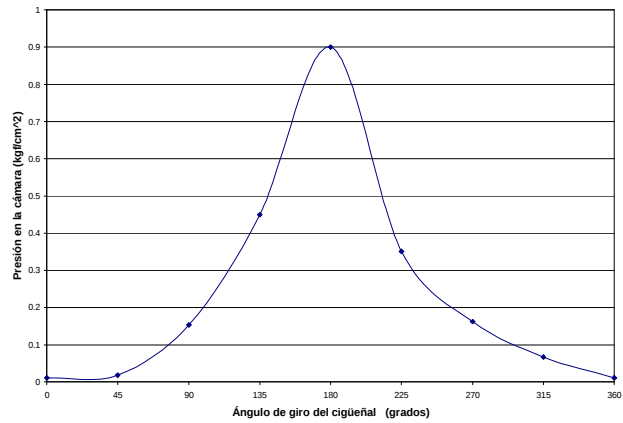


Figura 2. Presión de la cámara v.s. ángulo de giro del cigüeñal.

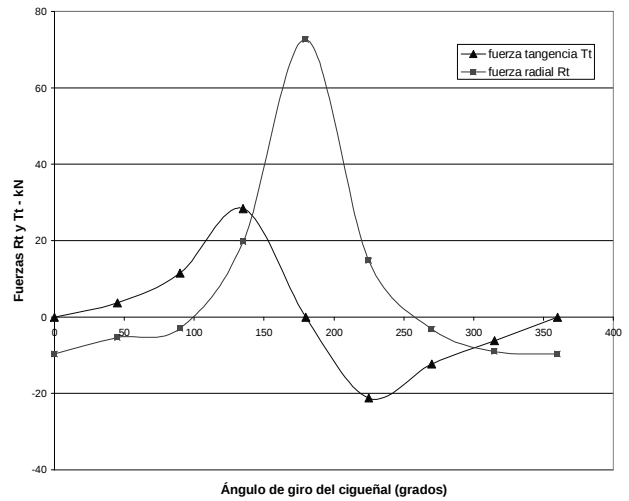


Figura 3. Fuerzas T_t y R_t v.s. ángulo de giro del cigüeñal.

La reacción A_i en el muñón de apoyo de salida se obtuvo de la ecuación de equilibrio correspondiente. Con todas estas fuerzas se construyeron los diagramas de Momentos Flectores en el plano del codo (Plano Vertical), en el plano perpendicular al plano del codo (Plano Horizontal) y el Momento Torsor en el codo del cigüeñal, obtenidos en dependencia de las cargas calculadas anteriormente y se obtuvieron las fuerzas internas que surgen en la zona del cachete [2] donde se produjo la fractura. Estas se obtuvieron aplicando el método de las secciones por las siguientes expresiones:

$$N = A_i - P_{ci} \quad kN \quad (1)$$

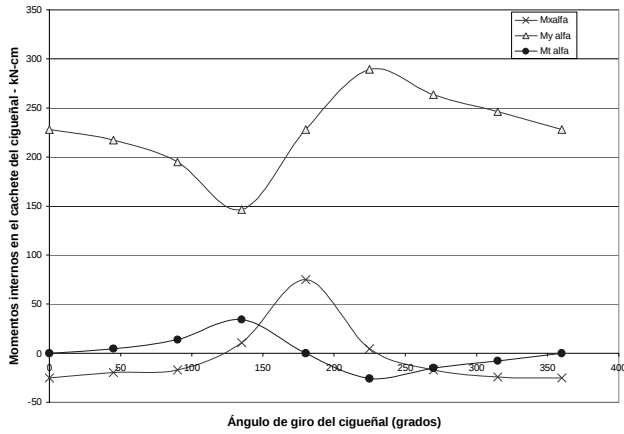
$$m_x = A_i \cdot b \quad kN - cm \quad (2)$$

$$M_y = M_t - \frac{T_t}{2} \cdot (R - Y) \quad kN - cm \quad (3)$$

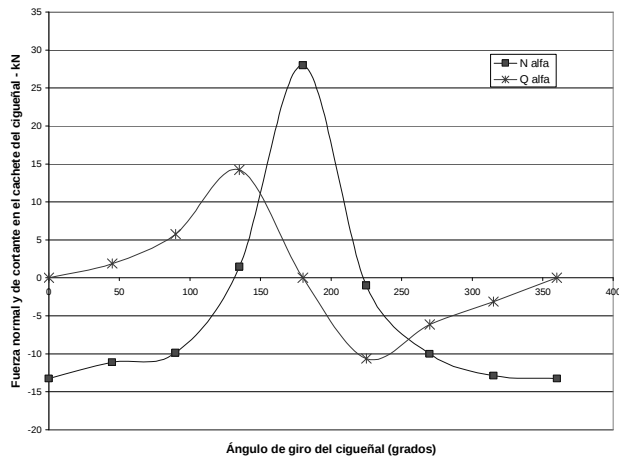
$$Q = \frac{T_t}{2} \quad kN \quad (4)$$

$$M_t = \frac{T_t \cdot b}{2} \quad kN - cm \quad (5)$$

Las fuerzas en función del ángulo de giro del cigüeñal se dan en las Figuras 4 a) y b)



a) Momentos internos en el cachete del cigüeñal



b) Fuerzas normal y de cortante en el cachete del cigüeñal.

Figura 4. Fuerzas internas en el cachete del cigüeñal.

Las tensiones provocadas por estas fuerzas internas son⁴:

$$\sigma_N = \frac{N}{B \cdot S} \quad kN / cm^2 \quad (6)$$

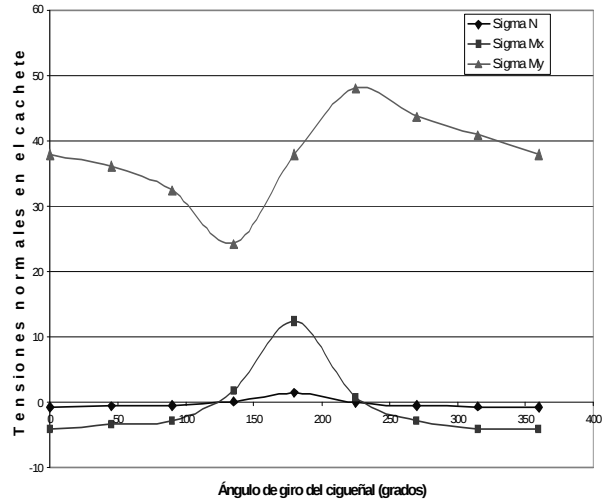
$$\sigma_{mx} = \frac{6 \cdot M_x}{B \cdot S^2} \quad kN / cm^2 \quad (7)$$

$$\sigma_{my} = \frac{6 \cdot M_y}{B \cdot S^2} \quad kN / cm^2 \quad (8)$$

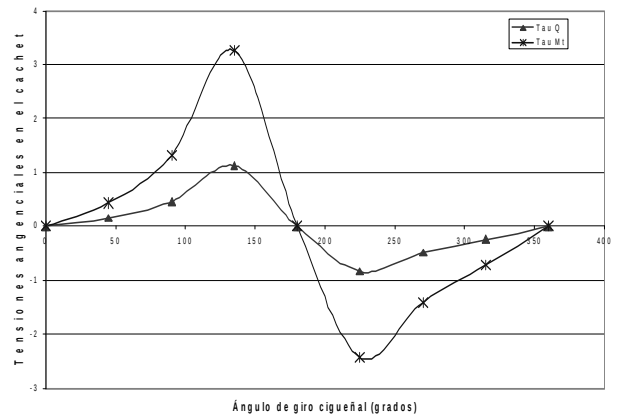
$$\tau_Q = \frac{3 \cdot Q}{2 \cdot B \cdot S} \quad kN / cm^2 \quad (9)$$

$$\tau_{Mt} = \frac{M_t}{\alpha \cdot B \cdot S^2} \quad kN / cm^2 \quad (10)$$

Estas en función del ángulo de giro del cigüeñal se dan en la Figuras 5 a) y b).



a) Tensiones normales.



Tensiones tangenciales.

Figura 5. Tensiones en el Cachete del cigüeñal.

La tensión normal en cada punto se halla superponiendo las tensiones normales originadas por las diferentes fuerzas internas, o sea:

$$\sigma_1 = -\sigma_N - \sigma_{mx} + \sigma_{my} \quad \text{kN/cm}^2 \quad (11)$$

$$\sigma_2 = \sigma_{mY} - \sigma_N \quad \text{kN/cm}^2 \quad (12)$$

$$\sigma_3 = -\sigma_N + \sigma_{mx} + \sigma_{my} \quad \text{kN/cm}^2 \quad (13)$$

$$\sigma_4 = -\sigma_N + \sigma_{mx} \quad \text{kN/cm}^2 \quad (14)$$

$$\sigma_5 = -\sigma_N + \sigma_{mx} - \sigma_{my} \quad \text{kN/cm}^2 \quad (15)$$

$$\sigma_6 = -\sigma_N - \sigma_{my} \quad \text{kN/cm}^2 \quad (16)$$

$$\sigma_7 = -\sigma_N - \sigma_{mx} - \sigma_{my} \quad \text{kN/cm}^2 \quad (17)$$

$$\sigma_8 = -\sigma_N - \sigma_{my} \quad \text{kN/cm}^2 \quad (18)$$

En la Figura 6 se muestra la variación de las tensiones normales en función del ángulo de giro del cigüeñal.

En la Figura 7 se muestra la variación de las tensiones tangenciales resultantes en función del ángulo de giro del cigüeñal.

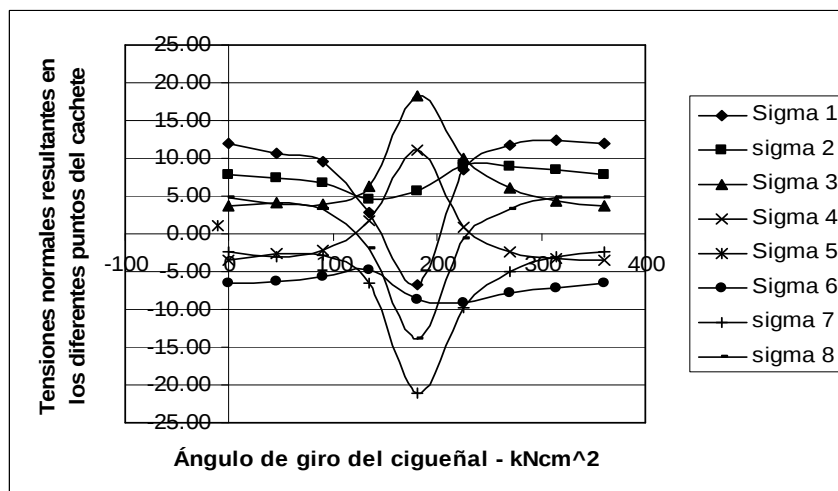


Figura 6. Variación de las tensiones normales en función del ángulo de giro del cigüeñal.

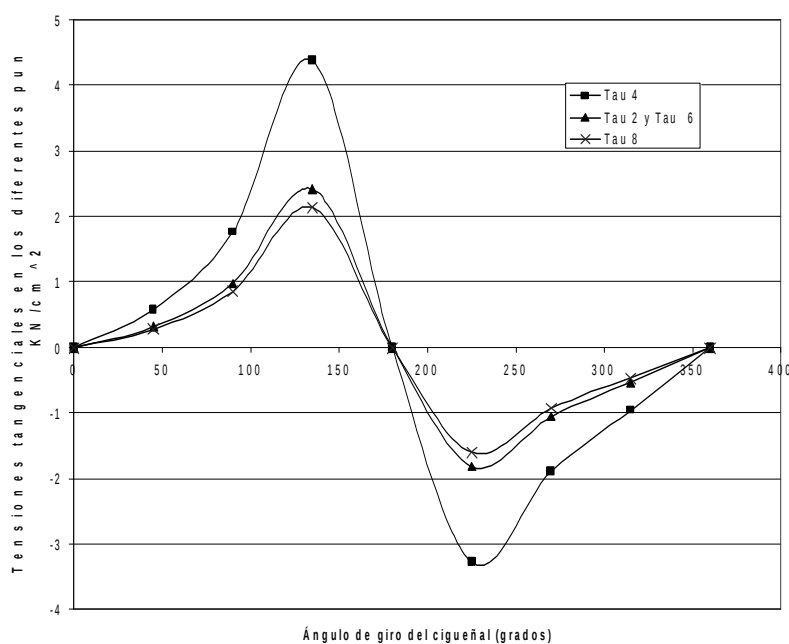


Figura 7. Variación de las tensiones tangenciales resultantes en función del ángulo de giro del cigüeñal.

Tabla No 2 Valores de las tensiones y factores de seguridad para los puntos más críticos del cachete.

Punto Del cachete	$\sigma_{\text{máx}}$ kN/cm ²	σ_{min} kN/cm ²	σ_m kN/cm ²	σ_a kN/cm ²	$n\sigma$	$\tau_{\text{máx}}$ kN/cm ²	τ_{min} kN/cm ²	τ_m kN/cm ²	τ_a kN/cm ²	$n\tau$	n_{res}
1	12.45	-6.73	8.09	9.59	0.91	-	-	-	-	-	0.91
2	9.18	4.54	7.41	2.32	3.62	2.42	-1.81	0.04	2.12	2.23	1.90
3	18.19	3.75	6.72	7.22	1.21	-	-	-	-	-	1.21
8	4.84	-13.93	0.93	9.39	0.94	2.14	-1.60	0.03	1.87	2.53	0.88

$$\Delta S = 2 \left[a_{11}(\theta_0) K_I \Delta K_I + a_{12}(\theta_0) (K_{II} \Delta K_I + K_I \Delta K_{II}) + a_{22}(\theta_0) K_{II} \Delta K_{II} + a_{33}(\theta_0) K_{III} \Delta K_{III} \right] \quad (19)$$

La metodología para el cálculo del factor de seguridad a la fatiga en los muñones de biela, muñones de apoyo y cachetes de los cigüeñales aparecen descrita en la referencia [2]. Siguiendo esta metodología se calcularon los factores de seguridad en diferentes puntos del cachete siguiendo el contorno del mismo. En la Tabla 2 se dan los valores de éste en los cuatro puntos más críticos del cachete.

Se aplicó la Tecnología de la Mecánica de la Fractura utilizando el criterio conocido como Factor de Densidad de Energía de Deformación, el cual para una carga cíclica, se calcula por la expresión (19):

La razón de crecimiento de la grieta se relaciona con ΔS , por la Ecuación de Paris.

$$\frac{da}{dN} = C_s \cdot \Delta S^{m/2} \quad (20)$$

$$C_s = C \cdot \left(\frac{2\pi E}{(1-2\nu) \cdot (1+\nu)} \right)^{m/2} \quad (21)$$

$$C = 6.89 \cdot 10^{-12} \text{ y } m = 3$$

La dirección en la cual crecerá la grieta se establece por la siguiente condición:

$$\frac{\partial S}{\partial \theta} = 0 \quad \frac{\partial^2 S}{\partial \theta^2} > 0 \quad \text{para } \theta = \theta_0 \quad (22)$$

Donde θ_0 es la dirección en la cual la densidad de energía de deformación es mínima y en la cual se propaga la grieta. Se obtuvieron las curvas de resistencia residual y las gráficas de inclinación de la grieta durante su crecimiento

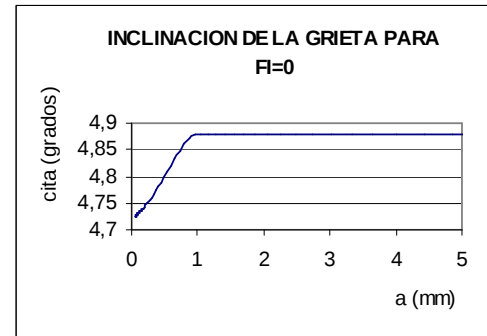


Figura 8. Inclinación de la grieta en el punto donde se inició la fisura.

Los cálculos confirmaron que la grieta se debía desarrollar en forma de concha tal como se observa en la gráfica de la Figura 8 y que se corresponde con el aspecto externo de la grieta observado en la Figura 1 c).

Utilizando un modelo de grieta inicial semicircular centrada ubicada en la superficie, se obtuvo que para el punto 8, de empalme del cachete con el muñón de apoyo, se produce la mayor razón de crecimiento de la grieta. La vida útil del cigüeñal analizando este punto es de solo 173 horas de trabajo del cigüeñal. Hay que tener en cuenta que los cálculos fueron realizados para el caso de que el motor estuviera funcionando a potencia máxima durante todo el período hasta que se produjo la fractura, lo cual es la situación más crítica pero muy improbable. Se confirma con este resultado que la vida útil del cigüeñal para ese material es extremadamente limitada.

3. Conclusiones.

1. La investigación del material del cigüeñal arrojó que se trata de acero 30, sin embargo en la literatura técnica [1, 2, 6] no se recomienda este tipo de acero para árboles y mucho menos para cigüeñales, mas aun tratándose de un motor de relativa gran

potencia como es el motor de la Moto Nave “Mar del Sur”.

2. Tal como se supuso, la capacidad resistente de este acero es insuficiente para soportar las tensiones que se desarrollan en el codo de salida del cigüeñal.
3. El punto más crítico es el punto del cachete que empalma con el muñón de apoyo, que es precisamente donde el fenómeno de concentración de tensiones es mayor y donde existen tanto tensiones normales como tensiones tangenciales.
4. Del cálculo de crecimiento subcrítico para los dos tipos de grietas ubicadas en las posiciones más críticas, es decir, en el centro y en una esquina de la sección, se obtuvo como resultado que la grieta debió comenzar en el centro del cachete, dado el escaso tiempo de propagación calculado (173 h).
5. El surgimiento y propagación de una grieta en una de las esquinas resulta improbable como causa de la falla en estudio, ya que el tiempo de crecimiento subcrítico resultó ser mayor que el transcurrido desde que se montó el cigüeñal nuevo hasta que ocurrió la avería.
6. Como resultado de la modelación del crecimiento subcrítico realizada se determinó la posible trayectoria de la grieta. Su inclinación resultó ser distinta para los diferentes puntos de su vértice para la grieta semicircular, poseyendo forma de concha.

La forma final de la concha se constató en la observación de la falla durante la etapa inicial de la investigación de la avería. Para una grieta en la esquina, la dirección de propagación resultó ser siempre perpendicular a la sección transversal del cachete del cigüeñal.

4. Bibliografía.

1. Alexeev I., Fernández E. Elementos de construcción y cálculo de motores de combustión interna. Tomo III. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1987.—175 p.
2. Birger I.a., Schorr B.F., Schneiderovich R.M. Cálculo de resistencia de piezas de máquinas. Moscú: Editorial Mashinostrenie, 1966.—616 p.
3. Choy R., Alexeev I. Elementos de construcción y cálculo de los motores de combustión interna. La Habana: Editorial ENPES, 1990.—246 p.
4. Feodosiev V. I. Resistencia de Materiales. Moscú: Editorial MIR, 1985.—583 p.
5. Jovaj M. S. , Maslov G.S. Motores de Automóvil. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1987.—534 p.
6. Pisarenko G.S., Yákovlev A.P., Matvéev V.V. Manual de Resistencia de Materiales. Moscú: Editorial MIR, 1989.—694 p.

Evaluation of the crank shaft fatigue failure of a boat diesel engine.

Abstract.

This research paper shows the results of an investigation carried out by the Applied Mechanics staff of the Mechanical Engineering faculty of the Cienfuegos University. It was developed in order to determine the crankshaft failure causes of engines of a boat diesel engine.

The crankshaft material investigation showed that it was steel grade 30. The calculations showed that the steel resistance capacity is not enough to support the stresses produced in the crankshaft output elbow. The fatigue security factors in some of the most critical areas of the cheek, where the failure took place, are lower than unity. The subcritical fracture mechanics application confirmed that the shaft working life is quite limited with this steel.

Key words: Diesel crankshaft, fatigue fracture, subcritical fracture mechanics.