

COMPARACIÓN Y ESTUDIO DE LA FRACTURA DEL CIGÜEÑAL DE UN MOTOR DE CUATRO CILINDROS EN LINEA

RESUMEN

En este trabajo se analizó la causa de la falla del cigüeñal de un motor de combustión interna. Se hicieron pruebas de dureza, estudio metalográfico y análisis químico del material. Se encontró una dureza de núcleo del cigüeñal muy baja, debido a un inadecuado tratamiento térmico. La baja resistencia del cigüeñal disminuyó su resistencia a fatiga, permitiendo la propagación de la fractura en forma de marcas de playa debido a los esfuerzos fluctuantes en un punto de concentración.

PALABRAS CLAVES: Cigüeñal, falla por fatiga, esfuerzos fluctuantes.

ABSTRACT

In this paper the cause of the failure of an engine crankshaft was analyzed. Hardness test, metallographic and chemical analysis of the material was made. A very low core hardness of the crankshaft was found, due to an inadequate heat treatment. The drop resistance of the crankshaft diminished its fatigue resistance, allowing the propagation of the fracture in form of beach marks due to the fluctuating stress on a concentration site.

KEY WORDS: Crankshaft, fatigue failure, fluctuating stresses.

JAIRO ANTONIO VALDÉS

Ingeniero Mecánico, M.Sc. Estudiante del Doctorado en Ingeniería Mecánica y Aeroespacial West Virginia University (USA). Profesor Asistente Universidad del Valle Escuela de Ingeniería Mecánica
javaldes@univalle.edu.co
jairoantoniovaldesortiz@yahoo.com

JOHN JAIRO CORONADO

Ingeniero Mecánico, M.Sc. Estudiante de Doctorado en Ingeniería Mecánica, Universidad de São Paulo, Brasil. Profesor Asociado Universidad del Valle Escuela de Ingeniería Mecánica johncoro@univalle.edu.co
johnjairocoronado@yahoo.com

JOSÉ ISIDRO GARCÍA

Ingeniero Mecánico, M.Sc. Estudiante de Doctorado en Ingeniería Mecánica, Universidad de São Paulo, Brasil. Profesor Asociado Universidad del Valle Escuela de Ingeniería Mecánica
josgarme@univalle.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los motores de combustión interna, (motores a explosión), son los más usuales en los automóviles y sirven para producir fuerza. Están divididos en cuatro partes principales, que son: carter inferior, carter superior, bloque y culata. En el carter inferior se encuentra el depósito de aceite; en el superior están el cigüeñal y el eje de levas, que son los ejes principales del motor, también se encuentra la bomba de aceite. En el bloque están los cilindros dentro de los cuales trabajan los pistones con sus respectivos anillos de compresión y de lubricación. En la culata se encuentran las válvulas, el tren de balancines y los tubos múltiples.

El cigüeñal es el eje principal del motor, con codos en forma de manivela, que reciben el movimiento ascendente y descendente del conjunto biela-pistón, para convertir este movimiento en uno giratorio que será transmitido finalmente a las ruedas. Cada manivela está formada por dos brazos llamados brazos de manivela y por la muñequilla de manivela o muñón de biela, que gira sobre el cojinete de la cabeza de biela. Las muñequillas del eje de rotación del cigüeñal se denominan muñones de bancada. En los motores con los cilindros en línea el número de manivelas regularmente el mismo que el de

cilindros. En los motores en V, generalmente el número de manivelas es la mitad del de cilindros.

Se han investigado varias causas de fallas en los cigüeñales. Changli et al. (2005) encontraron que la falla del cigüeñal analizado se debió a los esfuerzos cortantes, causados por una fricción inusual entre la superficie del eje y el casquillo, por reparación y ensamble inadecuados. En la figura 1 se muestra la fuerza de fricción entre el eje y el casquillo, y esfuerzos cortantes en el eje.

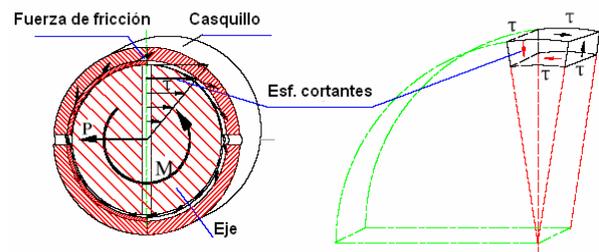


Figura 1. Representación esquemática de la fuerza de fricción y esfuerzos cortantes [1].

En otro estudio Silva (2003) encontró que la causa de la falla de los dos cigüeñales analizados fueron causados

por un incorrecto rectificado de los muñones (excesiva profundidad de corte, inadecuada lubricación y falta de acabado de la rueda), produciendo alta generación de calor sobre las superficies en contacto, originando pequeñas fisuras por fatiga térmica. En la figura 2 se muestra la superficie del muñón con fisuras en su parte central.

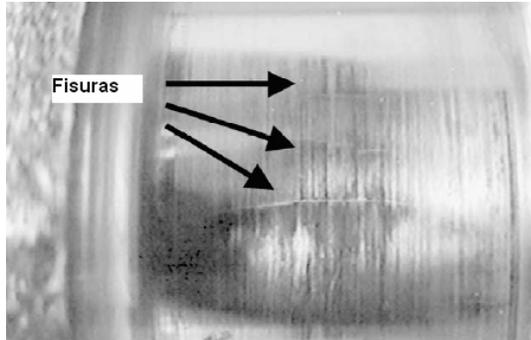


Figura 2. Detalle del muñón del cigüeñal con fisuras [2]

Zhiwei Yu et al. (2005) encontraron que la falla del cigüeñal analizado se debió a la ausencia parcial de la capa nitrurada (debido a un sobre rectificado después de la nitruración) lo cual hace que se reduzca la resistencia a la fatiga dejando una región débil para que se propague la fractura prematura por fatiga. En la figura 3 se muestra la superficie de fractura usando Microscopía electrónica de barrido (SEM) mostrando el origen de la fractura.

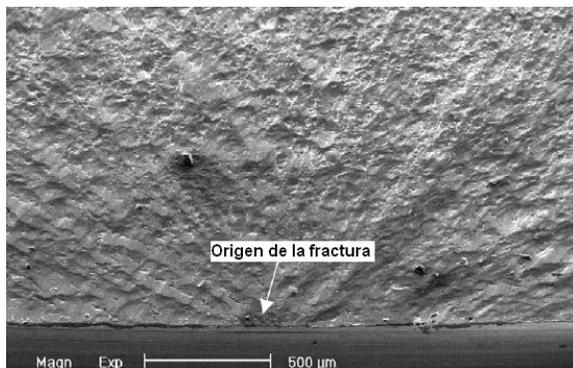


Figura 3. SEM del origen de la fractura [3].

Bhaumik et al. (2002) encontraron que las fisuras en el cigüeñal se originaron por fatiga de contacto debido a la alta presión y ciclos de carga. En este caso los esfuerzos de contacto se presentaron a causa de la fricción (debido al movimiento del cojinete, por a la carga axial sobre el eje) entre el casquillo y el muñón. En la figura 4 se observa marcas de playa originadas por picado, desprendimiento de material y fisuras, ocurridas después de muchas repeticiones de carga.



Figura 4. Superficie de la fractura cerca al origen de la falla [4].

Chien et al. (2005) investigaron la influencia de los esfuerzos residuales en los filetes de los cigüeñales inducidos en el proceso de fabricación en la falla por fatiga del hierro fundido nodular, usando elementos finitos. Pandey (2003) encontró que para evitar la frecuencia de falla en cigüeñales el maquinado y el rectificado final se deben realizar cuidadosamente para evitar la formación de discontinuidades como las fisuras y los radios de los filetes deben ser incrementados.

El análisis de falla del cigüeñal que se va a presentar en este artículo no se ha reportado en trabajos previos, ya que habitualmente la falla se presenta por: ensamble inadecuado, fatiga de contacto, pequeños radios de de los filetes, incorrecto maquinado y rectificado [1-6]. Por tal motivo es un caso particular, que es conveniente conocer para evitar que esta falla se presente en cigüeñales y en otros componentes mecánicos. La duración del cigüeñal fue de cuatro meses, el cual pertenecía a un motor diesel de cuatro cilindros en línea (2,956 cc), con una potencia máxima de 85 CV a 4,000 rpm y un par máximo de 18.5 kgf-m a 2,200 rpm y usado en un camión de carga 2.5 toneladas.

2. ESTADO DE CARGA

Durante la explosión en la cámara de combustión de cada cilindro, los gases calientes generan una fuerza sobre la cabeza del pistón que se trasmite a lo largo de la biela, la que junto con la reacción de igual magnitud que se genera en el muñón de bancada, constituyen un par fuerza o torque útil. Cuando el motor gira a una velocidad rotacional constante, también se genera una fuerza centrípeta sobre el cigüeñal debida a la inercia del conjunto pistón – biela por lo cual, el diseño del cigüeñal requiere la presencia de contrapesos que equilibren dinámicamente el motor.

Aunque las fuerzas causadas por la aceleración de los pistones en un motor de cilindros en línea se encuentran en el mismo plano, estas fuerzas no están en la misma línea de acción y se generan momentos desbalanceados en el plano de los cilindros. Con el fin de contrarrestar

estos momentos, los cigüeñales de los motores en línea como el estudiado en este caso, se diseñan de manera que presenten una simetría con respecto a un plano perpendicular al eje del cigüeñal que pasa sobre el punto medio en la dirección axial.

Las cargas en un cigüeñal generan efectos de flexión, torsión y cortante, por lo que se generan estados triaxiales de esfuerzos que cambian en el tiempo, siendo el modo de falla por fatiga el más crítico. Las características dinámicas del estado de carga y la geometría compleja de los cigüeñales hace prácticamente imposible calcular exactamente los esfuerzos aún cuando se conozcan los valores exactos de las cargas externas involucradas. No obstante, la racionalización del diseño de los cigüeñales se ha desarrollado mediante el análisis experimental de esfuerzos. La información más importante para el cálculo estructural de los cigüeñales se ha obtenido a través de la historia mediante el estudio experimental de los esfuerzos sobre cigüeñales modelo sometidos a cargas generadas bajo condiciones controladas de laboratorio.

Desde el punto de vista de la geometría del cigüeñal, sin considerar la respuesta mecánica del material, siempre que los radios de gran tamaño sean los apropiados, y los conductos de lubricación se ubiquen razonablemente, los radios de filete son la característica más importante en el diseño de un cigüeñal para alta resistencia a la fatiga [7].

3. ANÁLISIS MACROSCÓPICO

El análisis de la falla ocurrida al cigüeñal empezó realizando una observación macroscópica de las partes y las superficies de fractura. Inicialmente fueron identificados los muñones de bancada (1, 3, 5, 7 y 9) y de biela del cigüeñal (2, 4, 6, 8), los cuales fueron numerados como aparece en la figura 5. Además, en la misma fotografía se puede apreciar la posición de la falla respecto a la longitud total del cigüeñal. De acuerdo con la numeración de identificación propuesta, la falla ocurrió en el muñón de biela 2, cuando se completaron aproximadamente 179×10^6 revoluciones (4 meses).

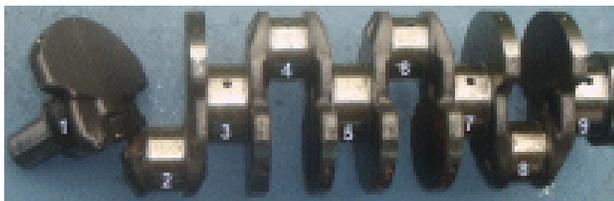


Figura 5. Posición del Muñón de biela fracturado.

La observación de las superficies de los muñones y contrapesos del cigüeñal permitió valorar la calidad de los acabados superficiales de mecanizado y se concluyó que las superficies fueron mecanizadas y rectificadas adecuadamente. Además el ensamble fue adecuado y no

existían reparaciones previas. No se evidenció picado o desprendimiento de material,

Por la geometría del pedazo de cigüeñal desprendido en la fractura con el muñón 1 se deduce que la falla ocurrió al lado del volante, extremo en el cual, se manifiesta la entrega del torque total hacia el resto de la transmisión de potencia. La región de la falla está localizada al lado del apoyo lateral del eje cigüeñal. Se reconoció que ésta es una de las zonas críticas del diseño, dado que se caracteriza por desarrollar los mayores esfuerzos a causa de las fuerzas cortantes y el torque transmitido, en combinación con los esfuerzos alternantes de flexión generados.

En la observación detallada de las superficies de fractura como la que se muestra en la figura 6, se reconocieron las características morfológicas típicas de las fallas por esfuerzos de fatiga, como son las denominadas zonas o marcas de playa. Se acepta ampliamente que estas zonas de playa se originan durante el crecimiento de una microgrieta bajo esfuerzos alternantes.



Figura 6. Superficie de fractura del pedazo desprendido del cigüeñal

En la figura 7 se muestra la otra mitad de la fractura donde se observa el inicio de falla en una discontinuidad del material. De la forma de las líneas o zonas de playa se pudo deducir que la fractura se inició por el crecimiento de una microgrieta o microfisura superficial en la zona del filete, la cual avanzó hacia el interior del eje, comprometiendo una zona débil a causa de la presencia del ducto interno de lubricación. Debido que el cigüeñal está sometido a cargas cíclicas, se presenta un mecanismo de deslizamiento atómico localizado. En este caso la fractura comenzó en una imperfección superficial donde la resistencia al corte del material del cigüeñal fue superada por los esfuerzos cortantes. Los esfuerzos fluctuantes provocan que se propaguen las fisuras sobre la superficie de fractura.



Figura 7: Detalle de la superficie de fractura del cigüeñal truncado.

La figura 8 es una representación esquemática de las marcas de playa y la propagación de la fisura. Las imperfecciones microestructurales ayudan en el inicio de fisuras que aumentan la concentración de esfuerzos. Las marcas de playa indican la posición de la fisura progresiva en un instante dado. Debido a que la sección transversal se debilita gradualmente, la fisura crece más rápido y las marcas de playa son más separadas y más grandes, de esta manera se puede identificar el origen de la falla. Finalmente se presenta una fractura súbita por desgarre ya que la sección del eje no puede soportar las cargas aplicadas.



Figura 8. Esquema de la falla por fatiga.

Como la resistencia a los esfuerzos de fatiga es significativamente dependiente de la cantidad y distribución de imperfecciones del material, se considera como una regla diseñar los elementos sometidos a fatiga con un factor de seguridad superior a dos.

4. ANÁLISIS METALOGRAFICO

A partir del cigüeñal fracturado se obtuvieron muestras de la región de fractura así como de uno de los contrapesos alejados en el extremo opuesto. Una vez realizada la preparación metalográfica y el ataque químico de las superficies se pudo identificar que la microestructura fue la misma en todo el cigüeñal. Esta microestructura fue identificada como martensita

revenida, tal como era de esperarse para un eje que requiere de una alta tenacidad. La figura 9 muestra la microestructura de martensita revenida, atacada con nital al 2% a una magnificación de 500X.

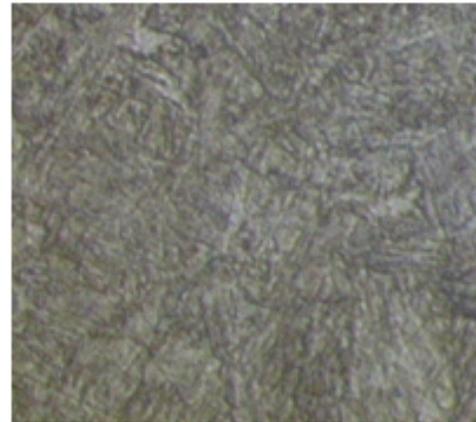


Figura 9. Microestructura del cigüeñal a 500X.

En la figura 10 se pueden apreciar regiones aisladas de austenita retenida de un color claro en una matriz de martensita revenida, atacada con nital al 2% a una magnificación de 200X. Las trazas de austenita son una señal de que la austenita obtenida durante la realización del temple contó con la presencia de aleantes en concentraciones suficientes para inhibir la transformación de la martensita. Debido a esto el material no presenta la dureza esperada para este tipo de elementos mecánicos. Además, no se encontró evidencia de un tratamiento térmico de endurecimiento superficial como la nitruración.

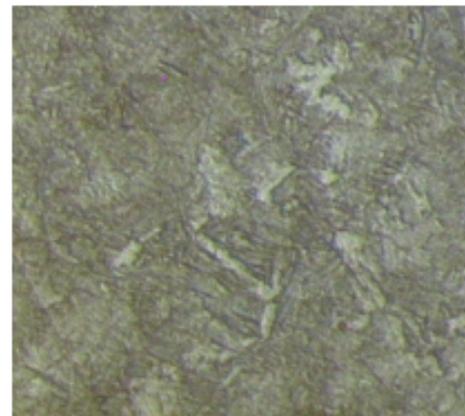


Figura 10. Microestructura del cigüeñal a 200X.

La microestructura de martensita revenida y austenita retenida con baja dureza puede ser el resultado de dos causas fundamentales. La primera de ellas consiste en la aplicación de un tratamiento térmico inadecuado, en el que se aporta energía térmica en exceso por una temperatura de revenido muy alta o un tiempo de revenido demasiado largo. La otra razón fundamental

consiste en que la aleación del acero no contiene una cantidad de carbono suficiente para que la martensita formada gane alta dureza.

5. MEDICIÓN DE DUREZA

El valor promedio de la dureza del material se obtuvo realizando mediciones independientes en dos durómetros diferentes debidamente calibrados. Los resultados de los valores de dureza se obtuvieron en distintos puntos del cigüeñal con el fin de obtener un valor promedio de dureza representativo. La magnitud de la dureza promedio fue de 26 puntos en la escala Rockwell C.

El proceso de manufactura recomendado debe incluir el tratamiento térmico de bonificado consistente en un temple seguido por un revenido, que permita disminuir la fragilidad de la martensita y obtener una dureza final superior a 45 HRC. Así, un valor de dureza del orden de 26 puntos en la escala Rockwell C, implica una baja resistencia a la fluencia y por lo tanto una baja resistencia a la fatiga. En los puntos de alta concentración, los esfuerzos toman magnitudes que superan el límite de fluencia del material produciendo la deformación plástica del material y el crecimiento de la fisura.

6. ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA

Se sabe a partir de la experiencia y de la literatura técnica pertinente, que los aceros más apropiados para la construcción de elementos de máquinas como un eje cigüeñal son los aceros al carbono de la serie AISI 10XX y los aceros aleados de las series AISI 41XX y AISI 43XX con un contenido de carbono no menor a 0,4 %. Los aceros más comúnmente utilizados son el AISI 1045, AISI 4140 y AISI 4340.

La composición química del acero fue determinada mediante la técnica de espectroscopia de absorción atómica. En la tabla 1 se presentan los resultados.

Valor	% elem	AISI 4140	AISI 4340
C	0.4208	0.38-0.43	0.38-0.43
Si	0.2130	0.15-0.35	0.2-0.35
Mn	0.6424	0.75-1.00	0.6-0.8
P	0.0128	<0.035	<0.035
S	0.0122	<0.040	<0.040
Cr	0.9123	0.8-1.1	0.7-0.9
Ni	0.0855	-	1.65-2.0
Mo	0.1073	0.15-0.25	0.20-0.30
Cu	0.1549	-	-
V	<0.001	-	-
W	<0.001	-	-
Co	0.0046	-	-

Tabla 1. Composición química

De acuerdo a este análisis químico el acero se podría clasificar como un acero AISI 4140, pues la baja cantidad de níquel permite descartar la serie de aceros AISI 43XX, los que presentan una cantidad de níquel superior al 1.65 %.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A pesar de que la microestructura observada en el análisis metalográfico es la apropiada para resistir cargas de fatiga (acero bonificado), la dureza de la martensita revenida no fue la esperada.

Es conveniente realizar un tratamiento térmico de endurecimiento superficial, como la nitruración. La baja dureza está directamente relacionada con un punto de fluencia bajo y por lo tanto con una baja resistencia a la fatiga.

El valor de dureza promedio obtenido del núcleo del cigüeñal fue de 26 puntos en la escala Rockwell C, que equivale aproximadamente a 255 puntos en la escala Brinell y a una resistencia de 85 Kg/mm². Se concluye que el tratamiento térmico de bonificado realizado sobre el cigüeñal de desarrolló fuera de las normas, obteniéndose una resistencia menor al límite mínimo recomendado.

Las causas por las cuales el tratamiento de bonificado no permitió lograr la resistencia mínima recomendada pueden ser la elección de una temperatura de austenización demasiado alta, la elección de una temperatura de revenido muy alta o bien un tiempo de mantenimiento excesivo a la temperatura de revenido apropiada.

De los resultados del análisis metalográfico se pudo identificar la presencia de austenita retenida, cuya proporción afecta inversamente la dureza y la resistencia final.

Se recomienda estudiar la bitácora del tratamiento térmico utilizado en la producción del cigüeñal, con el fin de identificar la etapa del tratamiento térmico que presenta el problema.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] CHANGLI, W., CHENGJIE, Z. DEPING, W. Analysis of an unusual crankshaft failure. Engineering Failure Analysis. Vol. 12, Issue 3. p. 465-473. 2005.
- [2] SILVA, F. S. Analysis of a vehicle crankshaft failure. Engineering Failure Analysis, Vol. 10, Issue 5, p. 05-616, 2003.

- [3] ZHIWEI YU, XIAOLEI XU. Failure analysis of a diesel engine crankshaft. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 12, Issue 3, p. 487-495, 2005.
- [4] BHAUMIK, S.K. RANGARAJU, R. KATASWAMY M.A. BHASKARAN, T. A. ARAMESWARA, M. A. Fatigue fracture of crankshaft of an aircraft engine. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 9, Issue 3, p.255-263, 2002.
- [5] CHIEN, W. Y. PAN, J. CLOSE, D. HO, S. Fatigue analysis of crank shaft sections under bending with consideration of residual stresses *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, Issue 1, p. 1-19, 2005.
- [6] PANDEY R. K. Failure of diesel-engine crankshafts. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 10, Issue 2, p. 65-175, 2003.
- [7] TAYLOR, The internal Combustion Engine in Theory and Practice. The MIT Press, 1968.