



**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA  
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”  
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

# **TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERA MECÁNICA**

**Título: Análisis de la fractura del cigüeñal de  
un motor de cuatro cilindros en línea**

**Autora: Yumila Marrero Maceo**

**Tutor: Dr Alberto Velázquez del Rosario**

**“AÑO 52 DE LA REVOLUCIÓN”  
MOA 2010**

## **Declaración de autoridad**

Yo: Yumila Marrero Maceo

Autora de este trabajo de diploma, certifico su propiedad a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Autor: Yumila Marrero Maceo

Tutor: Dr Alberto Velázquez del Rosario

Firma: \_\_\_\_\_

Firma: \_\_\_\_\_

## **PENSAMIENTO**

“Nos forjaremos en la acción cotidiana creando un hombre nuevo con una nueva técnica”

Che

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Revolución, por haberme dado la oportunidad de formarme y superarme profesionalmente y realizar mis sueños.

A mi tutor el Dr Alberto Velázquez del Rosario por su dedicación y ayuda desinteresada en el desarrollo de esta investigación.

A todos los profesores que contribuyeron a mi formación profesional, en especial a los M.Sc. Isnel Rodríguez González y Tomás Fernández Columbié.

A mis padres y a mi hija que han sido mi motor impulsor.

A los nombrados y demás personas que verdaderamente consideran merecer este sincero agradecimiento y que imperdonablemente he olvidado.

A Todos Muchas Gracias.

## **DEDICATORIA**

A mis padres y a mi hija por todo el tiempo  
que no pude dedicarles.

A mi familia.

A mis amigos.

A todos los que me quieren.

## **RESUMEN**

Se realiza un análisis de la falla del cigüeñal de un motor de combustión interna de cuatro cilindros en línea de un auto del tipo MWM después de 115 434 kilómetros de recorrido. Se realizan los correspondientes análisis fractográfico, metalográfico, de la composición química y dureza del material, así como la verificación del estado tensional mediante el MEF. El análisis fractográfico, de la composición química y la dureza del cigüeñal colapsado, permitieron establecer que la falla se produjo por fatiga bajo las condiciones de servicio del automóvil. A pesar de que la microestructura observada en el análisis metalográfico es la apropiada para resistir cargas de torsión como las que trasmite el cigüeñal, la ausencia de tratamiento térmico de endurecimiento superficial como la nitruración o la cementación proporcionan un punto de fluencia bajo y por lo tanto con una baja resistencia a la fatiga. La fractura prematura del elemento analizado se atribuye a la inadecuada microestructura del material por ausencia de tratamiento superficial.

**ABSTRACT**

The failure analysis of a crankshaft from an internal combustion engine of four aligned cylinders from MWM car after 115 434 km of operation is done. The corresponding fractographic, metallographic, chemical composition analysis so as the stress analysis using FEM were carried out. Fractographic analysis, chemical composition and hardness results allowed establishing that the failure was by fatigue under the automobile service conditions. Even though the microstructure was appropriated to support torsion loads such as transmitted by the crankshaft, the lack of case hardening such as nitriding or carburizing give a lower yielding point and, of course, a lower fatigue strength. The earlier failure of the crankshaft was attributed to the inappropriate microstructure because of the lack of case hardening.

## Tabla de contenidos

INTRODUCCIÓN .....	1
Objeto de estudio.....	2
Objetivo de la investigación .....	2
Hipótesis.....	3
Tareas de trabajo.....	3
CAPITULO I. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS Y ESTADO DEL ARTE.....	4
1.1 INTRODUCCIÓN .....	4
1.2 Desarrollo histórico y evolución de los Motores de Combustión Interna (MCI)..	4
1.3 Árboles y ejes .....	5
1.3.1 Tipos fundamentales de árboles.....	5
1.3.2 Materiales para los árboles y ejes .....	6
1.3.3 Causas fundamentales de rotura de los árboles y ejes .....	7
1.3.4 Diferencias entre árboles y ejes .....	7
1.4 Descripción de proceso tecnológico de fabricación de un cigüeñal.....	9
1.5 Duración del cigüeñal .....	10
1.6 Elementos de la mecánica de la fractura.....	11
1.6.1 Mecanismo de fractura dúctil.....	12
1.6.2 Mecanismo de fractura frágil .....	12
1.6.3 Evolución de la fractura por fatiga .....	13
1.6.4 Velocidad de propagación de la grieta .....	14
1.7 Trabajos precedentes sobre fallas de árboles cigüeñales.....	14
1.8 Características del cigüeñal estudiado .....	16
1.9 Conclusiones del Capítulo I .....	17
CAPITULO II. MATERIALES Y METODOS.....	18
2.1 Introducción.....	18
2.2 Fundamentación de las propiedades a investigar .....	18
2.3 Análisis fractográfico.....	20
2.4 Análisis químico.....	20



---

2.5 Ensayos de dureza.....	21
2.6.1 Selección y preparación de muestras.....	21
2.6.2 Caracterización microestructural .....	23
2.7 Verificación del estado tensorial mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF).....	23
2.7.1 Condiciones y parámetros establecidos .....	23
2.8 Conclusiones del capítulo II .....	24
CAPITULO III. ANALISIS DE LOS RESULTADOS .....	25
3.1 INTRODUCCIÓN .....	25
3.2 Análisis fractográfico.....	25
3.3 Análisis químico.....	28
3.4 Ensayo de dureza.....	29
3.5 Análisis metalográfico.....	30
3.6 Verificación del estado tensional mediante el MEF .....	31
3.7 Efecto económico y social .....	33
3.8 Conclusiones del capítulo III.....	34
CONCLUSIONES .....	35
RECOMENDACIONES.....	36
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	37

## **INTRODUCCIÓN**

Los motores de combustión interna alternativos, vulgarmente conocidos como motores de explosión (gasolina) y motores diésel, son motores térmicos en los que los gases resultantes de un proceso de combustión empujan un émbolo o pistón, desplazándolo en el interior de un cilindro y haciendo girar un cigüeñal que entrega el movimiento de rotación a la transmisión.

El motor en línea es un motor de combustión interna con todos los cilindros alineados en una misma fila, sin desplazamientos. Se utilizan comúnmente en automóviles, locomotoras y aviones, aunque el término "en línea" tiene un significado más amplio cuando se refiere a motores de aviación.

Los motores con configuración en línea son notablemente más fáciles de construir que sus equivalentes con configuración en V o de cilindros opuestos ya que tanto el bloque del motor como el cigüeñal se pueden fabricar a partir de un único molde para metal y requiere una única culata y por tanto menos árboles de levas. Además los motores en línea son más compactos en cuanto a sus dimensiones físicas globales que los de distribución radial, y se pueden montar en cualquier dirección.

Todos los motores de combustión interna se basan en el principio de obtener trabajo de la expansión de gases causada por la combustión de una mezcla aire combustible en el interior de una cámara de combustión. El movimiento lineal de los pistones dentro de los cilindros se trasmite a las bielas y se transforma en un movimiento rotatorio del cigüeñal que, a su vez, se transmite a las ruedas y otros elementos como un volante de inercia.

El cigüeñal es un elemento estructural del motor. Es un eje con codos y contrapesos que, aplicando el principio del mecanismo de biela-manivela, transforma el movimiento rectilíneo alternativo en rotatorio y viceversa. Los cigüeñales normalmente se fabrican de aleaciones capaces de soportar los esfuerzos a los que se ven sometidos y pueden tener perforaciones y conductos para el paso de lubricante.

Los árboles cigüeñales se utilizan extensamente en los motores alternativos, siendo la pieza del vehículo que, entre las que tienen movimiento, gira a mayor velocidad y pesa más. Un cigüeñal normalmente está proyectado para durar, sin ser reparado, tanto como el automóvil; sin embargo, estos pueden presentar averías por malas operaciones o violaciones en el ciclo de mantenimiento. La Dirección de Inversiones del Grupo Empresarial Cubaníquel posee un parque automotriz compuesto por autos ligeros que cubren los servicios administrativos de las respectivas direcciones y de ellos, existen cuatro del tipo MWM. Recientemente, uno de ellos sufrió una avería determinada por la fractura del cigüeñal después de 115 434 kilómetros de recorrido. Hasta el momento, se desconocen las causas que originaron la falla del cigüeñal del motor, por lo que la **situación problemática** de la presente investigación constituye:

La rotura prematura en condiciones de servicio del cigüeñal del motor de combustión interna de cuatro cilindros en línea del auto MWM matrícula OSC 496 de la Dirección de Inversiones del Grupo Empresarial Cubaníquel, origina pérdidas económicas por concepto de mantenimiento y riesgos de accidentes que pudieran poner en peligro la vida de las personas.

Sobre la base de la situación problemática antes mencionada, el **problema de investigación** se identifica como:

Desconocimiento de las causas que originaron el surgimiento y propagación de grietas de fractura que propiciaron el colapso del cigüeñal del auto ligero MWM.

### **Objeto de estudio**

Cigüeñal de auto ligero MWM.

### **Objetivo de la investigación**

Determinar las causas que provocaron la fractura prematura del cigüeñal de un auto MWM perteneciente a la Dirección de Inversiones del Grupo Empresarial Cubaníquel.

### **Hipótesis**

Los análisis fractográfico, de la composición química y la dureza del cigüeñal colapsado de un auto MWM, permitirán determinar las causas y caracterizar el tipo de fractura en condiciones de servicio para evitar o prevenir que esta se presente en otros elementos similares.

### **Tareas de trabajo**

1. Revisión bibliográfica para establecer el Estado del Arte sobre el objeto investigado.
2. Análisis fractográfico, metalográfico, de la composición química y la dureza del cigüeñal.
3. Determinación de las causas que originaron el surgimiento y propagación de grietas de fractura.
4. Análisis y discusión de los resultados.

## **CAPITULO I. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS Y ESTADO DEL ARTE**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

Para el desarrollo de la investigación es necesario buscar acerca de la temática y los principales trabajos que estudian lo relacionado con el tema. En el presente capítulo se exponen cuestiones generales sobre el desarrollo histórico y evolución de los motores de combustión interna (MCI), la teoría general de los árboles y ejes y las causas fundamentales de rotura de los mismos, la descripción de proceso tecnológico de fabricación de un cigüeñal, elementos generales de la mecánica de la fractura y los trabajos precedentes sobre fallas de árboles cigüeñales.

De esta manera, el objetivo del presente capítulo es: Realizar un análisis de la bibliografía existente que permita definir el estado del arte en la temática abordada y sustentar los resultados alcanzados en la investigación.

### **1.2 Desarrollo histórico y evolución de los Motores de Combustión Interna (MCI)**

El motor a combustión interna fue un invento que ayudó muchísimo a mejorar el transporte, casi al mismo nivel que la rueda. Por primera vez, se pondría una máquina pequeña y bastante eficaz que hizo posible la producción de aviones y automóviles. Este permite quemar nafta en su interior que es lo que le permite producir energía. El combustible arde dentro de un tubo denominado cilindro, y de esta manera produce gases calientes al quemarse, estos empujan un pistón hacia abajo del cilindro. El movimiento de este pistón produce la fuerza que se necesita para mover ruedas o maquinaria.

En el año 1859, Etienne Lenoir, un inventor de origen belga (1822–1900) creó el primer motor de combustión interna movido por gas.

El ingeniero Nikolaus Otto, de origen alemán (1832-1891) inventó un motor mejorado del antecesor en el año 1876. Este nuevo motor usaba cuatro movimientos del pistón para producir energía, fue conocido como motor de cuatro tiempos. Fue desarrollado por Gottlieb Daimler y Kart Benz, y dio como resultado la producción del primer auto en el año 1886.

Daimler y Benz adaptaron el motor creado en el año 1876 por Otto para que pudiera utilizar gasolina, esta era más ventajosa que el gas. Esto hizo que no se sujetara al uso del gas y pudiera la potencia generada mover un vehículo de pasajeros.

El modelo T de Ford, creado en el año 1908, fue el primer auto de producción en masa. Se hicieron cerca de 18 millones antes de que su producción se suspendiera en el año 1927. Por el año 1910 se había establecido los rasgos principales de los autos posteriores, motor de cuatro tiempos al frente, con la fuerza llevada a las ruedas traseras por un eje de transmisión.

### 1.3 Árboles y ejes

Los árboles y ejes son elementos de máquinas sobre los cuales montan las partes giratorias de las máquinas y son los ejes geométricos de estas partes en rotación.

**Árboles:** Son cargados por momentos torsores (esfuerzos tangenciales) y pueden soportar **momentos flectores** (esfuerzos normales).

**Ejes:** Son cargados solo por momentos flectores (esfuerzos normales).

#### 1.3.1 Tipos fundamentales de árboles

Por la forma del eje geométrico del árbol se dividen fundamentalmente en dos grandes grupos árboles rectos y acodados, ( ver figura 1-2 y 3)

1. Árboles rectos:

- De sección circular constante: el árbol o eje está formado por un único diámetro

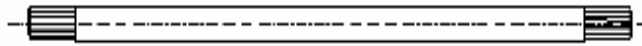


Figura 1

- Escalonado: la sección del árbol es variable compuesta por diferentes diámetros



Figura 2

2. Árboles acodados (cigüeñales): Formado por codos con apoyos intermedios.



Figura 3

### 1.3.2 Materiales para los árboles y ejes

Los materiales fundamentales para la fabricación de los árboles y ejes son los aceros:

- Al carbono
- Aleados

Tratamiento térmico.		Marca del acero
Normalización, mejoramiento.	Aleados y al carbono	45; 4X; AISI 1040, 3140, 5052-H32
Temple a corazón		5052-H32, 3140, 8742
Temple superficial		AISI 1040, 45
Temple por CAF a corazón.		5052, 3140
Cementación		1015, 1020, 3120,
Nitruración		1035, 4140 3140

### 1.3.3 Causas fundamentales de rotura de los árboles y ejes

En la caso de cargas variables, las roturas por falta de resistencia mecánica pueden producirse con esfuerzos muy por debajo de las tensiones admisibles consideradas aceptables en diseño estático y de forma repentina. Este fenómeno por el cual los materiales pierden resistencia cuando están sometidos a ciclos de tensiones variables en el tiempo, se denomina: FATIGA (ver figura 4)



Figura 4: Ejemplo de falla por fatiga de un árbol

La rotura de estos elementos se puede producir por la combinación de esfuerzos longitudinales y transversales generadas por las vibraciones.

El desgaste superficial es un factor que afecta a los árboles y ejes cuando sobre estos van colocados cojinetes de contacto plano.

### 1.3.4 Diferencias entre árboles y ejes

Los ejes y árboles son elementos de movimiento giratorio, y la diferencia entre ellos es que los primeros son elementos de sustentación de los órganos giratorios de la máquina y no transmiten potencia, mientras que los árboles son elementos que si transmiten potencia.



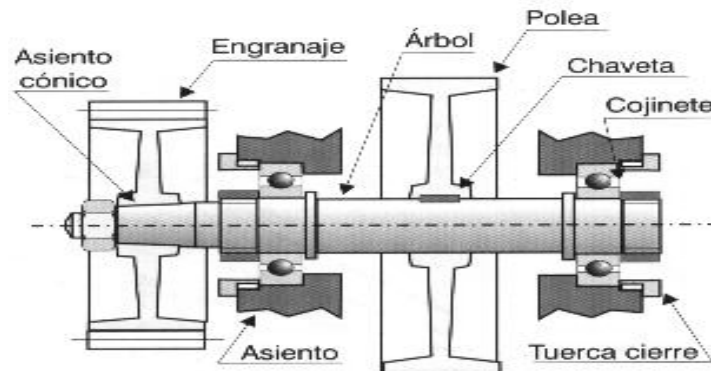


Figura 5: árbol con diferentes elementos

Los ejes son cilindros cuya longitud es mucho mayor en proporción que su diámetro, mientras que los árboles se diseñan de forma que su longitud sea la menor posible respecto al diámetro para soportar mejor las sollicitaciones de flexión.

Los árboles pueden ser de perfil o estriados, dependiendo del momento de giro a transmitir. Existen árboles lisos pero los más comunes son aquellos que presentan diferentes diámetros a lo largo de su longitud, (ver figura 6), produciéndose una zona de concentración de tensiones en estos cambios, llamada puntos de entalladura, que influyen notablemente en la resistencia del árbol. Con el fin de disminuir este efecto de entalladura se rodean los cambios de sección.

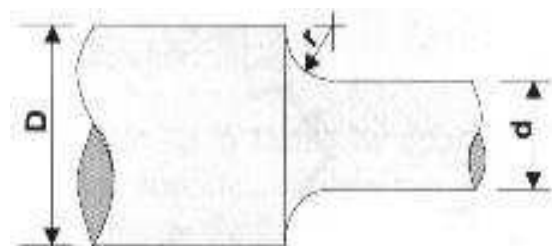


Figura 6: Árboles con diferentes diámetros a lo largo de su longitud.

Otros factores que influyen en el diseño de los árboles son la separación entre apoyos (se toma una longitud máxima de 100 veces la raíz cuadrada del diámetro del árbol) y la velocidad de giro, que ha de ser superior o inferior a la resonancia

(velocidad en la que los esfuerzos alternativos de flexión y torsión coinciden, produciendo efectos destructores).

#### **1.4 Descripción de proceso tecnológico de fabricación de un cigüeñal**

El cigüeñal forma parte del mecanismo biela manivela, es decir de la serie de órganos que con su movimiento transforman la energía desarrollada por la combustión en energía mecánica. El cigüeñal recoge y transmite al cambio la potencia desarrollada por cada uno de los cilindros. Por consiguiente, es una de las piezas más importantes del motor. Se utilizan extensamente en los motores alternativos, donde el movimiento lineal de los pistones dentro de los cilindros se transmite a las bielas y se transforma en un movimiento rotatorio del cigüeñal que, a su vez, se transmite a las ruedas y otros elementos como un volante de inercia.

El cigüeñal lleva en el extremo destinado a transmitir la potencia, una brida para la fijación del volante; éste a su vez, soportará el embrague. El otro extremo está conformado para hacer solidarios con él el engranaje de mando de la distribución y las poleas para el accionamiento por correa de los órganos auxiliares: bomba de agua, generador eléctrico, ventilador, etc. La forma de las manivelas varía y depende del número de cilindros, el número de apoyos de bancada, del sistema de fabricación y sobre todo de si existen o no contrapesos.

El material empleado generalmente para la construcción de los cigüeñales es de acero al carbono; en los casos de mayores solicitaciones se emplean aceros especiales al cromo - níquel o al cromo -molibdeno-vanadio tratados térmicamente. Se construyen también cigüeñales en fundición nodular que poseen unas características de resistencia semejantes a las del acero al carbono.

Cuando, a causa de las fuertes descargas, deben emplearse cojinetes con una superficie bastante dura (antifricción de aleación cobre- plomo, duraluminio, etc.), las muñequillas del cigüeñal se endurecen superficialmente mediante cementación, temple superficial o nitruración. En un sistema especial de temple superficial muy empleado en la fabricación en serie, el endurecimiento se produce mediante un

calentamiento superficial obtenido por procedimiento eléctrico (por inducción) y posterior enfriamiento con agua; este sistema de endurecimiento es muy rápido.

Otro sistema de endurecimiento superficial es el flameado, en el cual el calentamiento se obtiene con la llama. Cuando los problemas económicos pasan a segundo término, como sucede en el caso de los coches de carreras, se puede elegir un acero especial de alta resistencia y adoptar el endurecimiento por nitruración.

### **1.5 Duración del cigüeñal**

El cigüeñal es la pieza del vehículo, entre las que tienen movimiento, que gira a mayor velocidad y pesa más; no obstante, está proyectado para durar, sin ser reparado, tanto como el automóvil. Las técnicas de construcción modernas, los juegos de montaje cuidadosamente controlados y los progresos en el campo de los lubricantes le aseguran un amplio margen de seguridad y una óptima fiabilidad. Sin embargo, no es raro y esto sucedía con mayor frecuencia en el pasado que se produzcan averías en el cigüeñal, que suelen achacarse casi siempre al conductor. Las más importantes son: la rotura por fatiga del cigüeñal y el rayado de las muñequillas.

La primera es producida por las vibraciones de torsión y por las sollicitaciones anormales causadas por el bajo número de revoluciones, por el golpeteo contra la culata, por el encendido irregular en algún cilindro o, finalmente, también por el equilibrado incorrecto del cigüeñal. Especialmente, los juegos excesivos en los cojinetes de bancada causan vibraciones de flexión que pueden producir la rotura.

La segunda avería, es decir el rayado de las muñequillas, depende de la lubricación y del filtrado del aceite; esta circunstancia puede producirse por las causas más diversas: por ejemplo, acelerando el motor en frío cuando el aceite no está aún en circulación, tomando las curvas con el nivel de aceite por debajo del mínimo, viajando a plena carga con bajo número de revoluciones, o bien, finalmente, cuando el lubricante o la instalación de lubricación no funcionan correctamente. En todos estos casos mencionados, la presión del aceite es el valor que más influye para una

buena lubricación y, por tanto, es aconsejable emplear un manómetro de aceite para que pueda controlarse constantemente.

En caso de rotura del cigüeñal es necesario cambiarlo junto con los cojinetes de bancada o de biela, y debe realizarse un nuevo equilibrado conjuntamente con el volante. A veces, conviene también efectuar un mandrilado de los apoyos de bancada - es decir, su alineación mediante escariado- con el fin de corregir las eventuales deformaciones.

En el caso de rayado de las muñequillas es necesario minorar las muñequillas del cigüeñal y proceder a su rectificación, volviendo a efectuar el montaje después con los cojinetes reducidos. La minoración es la disminución del diámetro de las muñequillas de bancada y de la biela para eliminar la parte dañada. Generalmente es posible efectuar una o dos disminuciones según la profundidad de la cementación. El valor de cada rectificación es, en general, de 0,2 mm, y el constructor lo indica en los manuales de reparación.

## **1.6 Elementos de la mecánica de la fractura**

La fractura simple es la separación de un cuerpo en dos o más piezas en respuesta a una tensión aplicada (es decir, constante o que cambia lentamente con el tiempo) y a temperatura que son relativamente baja en comparación con la temperatura de fusión del material. La tensión aplicada puede ser de tracción de compresión, cizallamiento o torsión. En los materiales de ingeniería existen dos tipos de fractura: dúctil y frágil. La clasificación está basada en la capacidad del material para experimentar deformación plástica.

Los materiales dúctiles exhiben normalmente deformación plástica substancial con muy alta absorción de energía antes de la fractura. Por otro lado en la rotura frágil existe normalmente poca o ninguna deformación plástica, con poca absorción de energía en el proceso de rotura.

### 1.6.1 Mecanismo de fractura dúctil

La fractura dúctil ocurre bajo una intensa deformación plástica. La cual comienza con la formación de un cuello y la formación de cavidades dentro de la zona de estrangulamiento. Luego las cavidades se fusionan en una grieta en el centro de la muestra y se propaga hacia la superficie en dirección perpendicular a la tensión aplicada. Cuando se acerca a la superficie, la grieta cambia su dirección a 45° con respecto al eje de tensión y resulta una fractura de cono y embudo (ver figura 8).

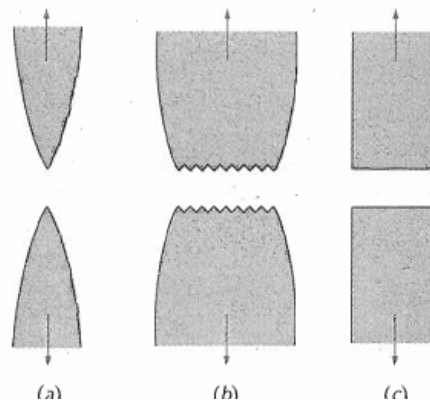


Figura 8. Esquema de los tipos de fracturas

a) Fractura muy dúctil b) Fractura moderna o dúctil c) Fractura frágil

### 1.6.2 Mecanismo de fractura frágil

La fractura frágil tiene lugar sin una apreciable deformación y debido a una rápida propagación de una grieta. Normalmente ocurre a lo largo de planos cristalográficos específicos denominados planos de fractura que son perpendiculares a la tensión aplicada.

La mayoría de las fracturas frágiles son transgranulares o sea que se propagan a través de los granos. Pero si los límites de grano constituyen una zona de debilidad, es posible que la fractura se propague intergranularmente. Las bajas temperaturas y las altas deformaciones favorecen la fractura frágil.

### 1.6.3 Evolución de la fractura por fatiga

El proceso de rotura por fatiga esta dado por tres etapas distintas:

1. Iniciación de la grieta, en donde se forma una grieta pequeña en alguna región de alta concentración de tensiones.
2. Propagación de la grieta, durante la cual esta grieta avanza de forma gradual en cada ciclo de carga.
3. La rotura final, la cual ocurre muy rápidamente una vez que la grieta ha alcanzado un tamaño crítico.

Las grietas asociadas con la rotura por fatiga casi siempre se inician (o nuclean) sobre la superficie de un componente en algún punto donde existen concentraciones de tensión. Los lugares de nucleación de la grieta incluyen las rayas superficiales, cantos vivos, ranuras de chaveta, roscas, mellas y otros similares. Además, las cargas cíclicas pueden producir discontinuidades superficiales microscópicas a partir de los escalones producidos por los de deslizamiento de dislocaciones, los cuales pueden actuar como concentración de tensión y por tanto como lugares de nucleación de las grietas.

Una vez que se ha nucleado la grieta, entonces se propaga muy lentamente y en metales policristalinos, a lo largo de planos cristalográficos de tención de cizalladura alta, esto se denomina etapa de la propagación (ver figura 9).

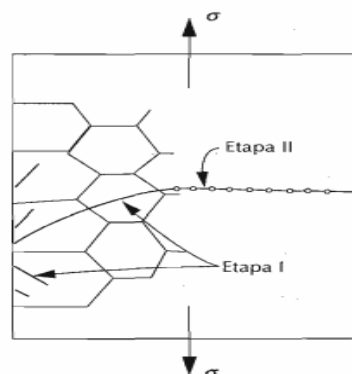


Figura 9: Etapa de la propagación

Esta etapa puede constituir una fracción grande o pequeña de la vida total de la fatiga, según el nivel de la tensión de la naturaleza de la probeta; tensiones elevadas y la presencia de entallas favorece la etapa de corta duración. En los metales policristalinos las grietas normalmente existen únicamente a través de varios granos durante esta etapa. La superficie de fatiga que se forma en la etapa I de propagación tiene aspecto plano y sin ningún detalle importante. La figura 9 es la representación esquemática mostrando las etapas de la propagación de grietas en metales policristalino.

Eventualmente empieza la segunda etapa de propagación (Etapa II), en la cual la velocidad de extensión de la grieta aumenta dramáticamente. Además, en este punto ocurre un cambio de la dirección de la propagación hasta alcanzar una dirección perpendicular a la tensión aplicada (figura 9). Durante esta etapa de propagación, el crecimiento de la grieta tiene lugar mediante un proceso repetitivo de enroscamiento y agudizamiento de la punta de la grieta.

#### **1.6.4 Velocidad de propagación de la grieta**

A pesar de las medidas que se toman para minimizar la posibilidad de rotura por fatiga, siempre existen grietas y lugares donde pueden nuclearse en los componentes estructurales. Bajo la influencia de tensiones cíclicas, las grietas se forman y se propagan de forma inevitable, si ese proceso no es evitado, al final puede conducir a la fractura. Los resultados de los estudios de fatiga han mostrado que la vida de un componente estructural puede relacionarse con la velocidad de crecimiento de la grieta. Durante la segunda etapa de propagación, las grietas pueden crecer desde un tamaño apenas detectable al tamaño crítico. Existen técnicas experimentales que se emplean para medir la longitud de la grieta durante la aplicación de las tensiones cíclicas.

### **1.7 Trabajos precedentes sobre fallas de árboles cigüeñales**

Garrett et al. (2001), Bhaumik et al. (2002), Silva (2003), Pandey (2003), Changli et al. (2005), Zhiwei et al. (2005), Chien et al. (2005), Antonio et al. (2006) y Estrada (2007)

A partir de la búsqueda bibliográfica realizada, se pudo constatar que en la literatura no existe abundante información relacionada con fallas de cigüeñales de motores de combustión interna. Sin embargo, a continuación se mostrarán los resultados de la investigación bibliográfica en relación con el desarrollo histórico y evolución de los Motores de Combustión Interna (MCI), las características generales y tipos fundamentales de los árboles y entre estos, los árboles de tipo cigüeñal, materiales más comunes utilizados en su fabricación, causas fundamentales de rotura de los árboles y los fundamentos de la mecánica de la fractura.

Estrada (2007) realizó un estudio sobre las fracturas mecánicas y las que clasifica en cuanto a forma, textura y color, a demás hace mención a las principales fallas que presentan los aceros.

Antonio et al (2006) realizaron un estudio en el cual se analizan las causas de la fallas en el cigüeñal de un motor de combustión interna, en dicho trabajo se determinó que la dureza de este era baja debido al tratamiento térmico, lo que conllevó a la fatiga del material y la propagación de la rotura.

Algunos autores coinciden en que un cigüeñal normalmente está proyectado para durar, sin ser reparado, tanto como el automóvil (Garrett et al 2001), sin embargo Bhaumik et al. (2002), Silva (2003), Pandey (2003), Changli et al. (2005), Zhiwei Yu et al. (2005) y Chien et al. (2005) reportan análisis de fallas de cigüeñales de motores de combustión interna provocadas por problemas de ensamble inadecuado, fatiga de contacto, pequeños radios de los filetes, incorrecto maquinado y rectificado.

Es importante la revisión de Callister (1998) en el cual se explica de forma detallada los fundamentos de la mecánica de la fractura, tipos de fracturas y los diferentes tipos de métodos de ensayo de impacto para la caracterización de la fractura de los materiales. A demás describe los factores que influyen en la vida de la fatiga.

Gómez (2009) en la tesis con opción a ingeniero realiza el análisis estructural a los cojinetes y el comportamiento micro estructural del árbol con una aleación Babbitt 83 UNS 55189.

Velázquez (2002) caracterizó las fallas en servicio de brazos de hornos de reducción de mineral laterítico, describiendo un mecanismo de fractura asociado a la



propagación de grietas elastoplásticas nucleadas en fases sigma localizadas en puntos triples de granos austeníticos.

### 1.8 Características del cigüeñal estudiado

Como quedó establecido anteriormente, el cigüeñal estudiado pertenece al auto ligero MWM chapa OSC 496 de la Dirección de Inversiones del Grupo Empresarial Cubaníquel. Este elemento es similar al mostrado en la figura 10.

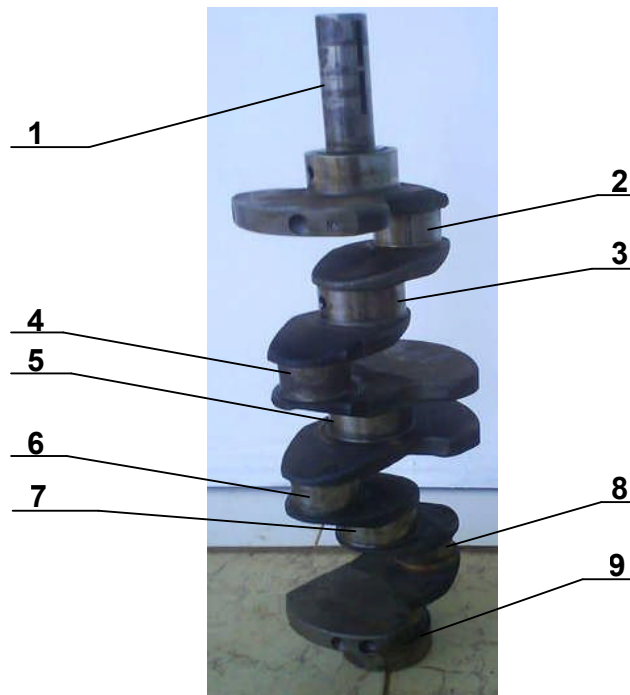


Figura 10. Cigüeñal de auto ligero similar al analizado en el presente trabajo.

Como se observa, el mismo posee cinco puntos de apoyo (1, 3, 5, 7 y 9) y cuatro muñequillas (2, 4, 6 y 8), donde se apoyan los pies de biela que sostienen los cuatro pistones con que opera el motor. En la Figura 11 se muestra una porción del elemento colapsado por fractura.

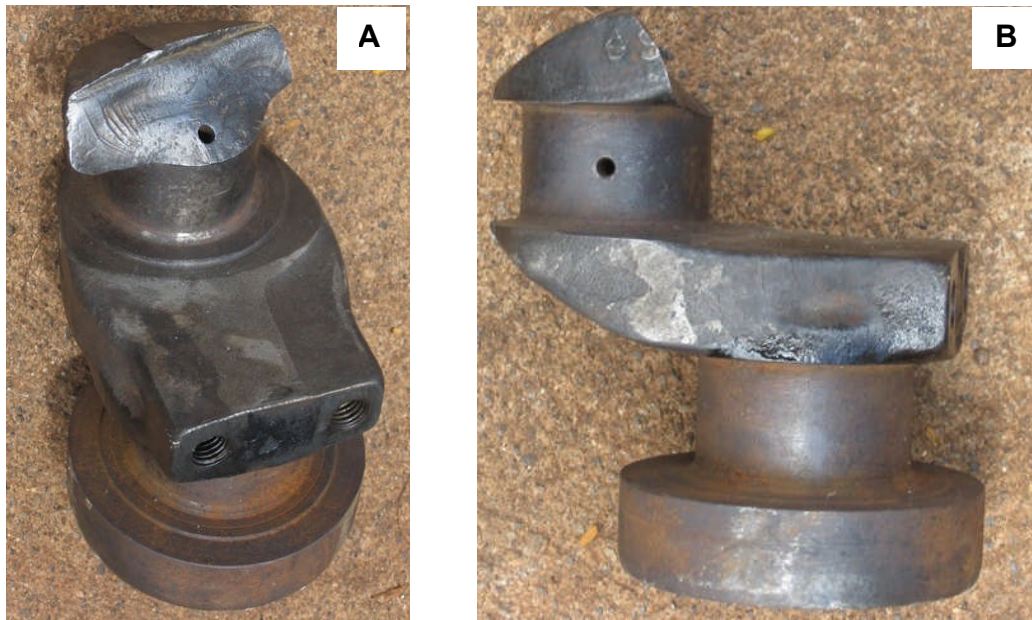


Figura 11. Porción del elemento analizado

A-Vista frontal mostrando la superficie de fractura

B- Vista lateral

## 1.9 Conclusiones del Capítulo I

Como resultado de análisis del estado del arte y la base teórica, se plantean las conclusiones siguientes:

1. En la literatura no existe abundante información relacionada con fallas de cigüeñales de motores de combustión interna.
2. Los postulados y teorías que sustentan la falla de árboles cigüeñales se ajustan a los principios generales de la mecánica de la fractura.

## **CAPITULO II. MATERIALES Y METODOS**

### **2.1 Introducción**

El conocimiento cabal de la falla de cigüeñales de MCI, debe llevar implícito una exhaustiva investigación que permita establecer la relación composición-estructura-propiedades de la aleación y sus efectos sobre el tipo de falla que se manifiesta. El tipo de falla se establece mediante el análisis de las superficies de fractura y la comparación de los datos disponibles con las condiciones de operación del componente respecto a las cargas actuantes a partir de la información obtenida en los diferentes ensayos que se puedan realizar.

Con el ensayo de los materiales deben determinarse los valores de resistencia, verificarse las propiedades y establecerse el comportamiento de aquellos bajo la acción de las influencias externas.

Este capítulo tiene como objetivo:

- Fundamentar las propiedades a investigar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones experimentales para la solución del problema.

### **2.2 Fundamentación de las propiedades a investigar**

El estudio y previsión de fallas de elementos que operan en máquinas automotrices constituye uno de los principales focos de atención para los investigadores por las incalculables pérdidas económicas y efectos sociales que implican para la humanidad. Es necesario, por tanto, hacer énfasis en el conocimiento de las regularidades que definen el comportamiento del objeto de estudio ante las condiciones impuestas.

En el caso de la fatiga, el análisis de falla está orientado a determinar por qué este fenómeno se presentó de forma prematura pues, aunque inevitablemente todas las piezas que están sometidas a cargas dinámicas cíclicas se fatigan, el diseñador y

el fabricante siempre tiene previsto un periodo de vida útil para ellas y se espera que los problemas aparezcan después de este tiempo. En el caso de ocurrir falla, este análisis consiste básicamente en una inspección de la superficie de fractura de la pieza, para ver su estado y determinar si hay evidencia de lo sucedido, posiblemente, un problema de material, de diseño, fabricación y/o sobrecarga de la pieza.

El análisis se realiza con el fin de identificar las posibles causas de la falla y tenerlas en cuenta para el rediseño de un nuevo componente, de hecho, el análisis de falla funciona como un procedimiento retroalimentador del diseño que permite reducir riesgos de fallas futuras y en general, mejorar considerablemente la calidad de las piezas que se fabrican a través del uso de mejores materiales y un mejor diseño.

Es importante señalar también que, el resultado final del análisis depende de la veracidad y amplitud de la información obtenida en cuanto a condiciones de operación de la máquina o pieza, historial de fabricación de la misma, etc., pues con base en esta información, se puede hacer la descripción de la misma y acercarse a sus causas reales.

Posteriormente, se llevan a cabo ensayos para determinar si existió una discontinuidad mayor que pudiese explicar la aparición de la grieta y un análisis fractográfico que permita determinar las marcas de inicio, propagación y fractura final. Adicionalmente, se lleva a cabo un estudio de metalografía sobre el material para conocer su microestructura y contenido de inclusiones. Posteriormente se realiza una lectura de dureza del material y un análisis de composición química.

Las informaciones obtenidas de los registros de averías de los vehículos de la Dirección de Inversiones y transporte del Grupo Empresarial Cubaniquel, el seguimiento prestado a la durabilidad de los elementos del motor según los ciclos de mantenimiento establecidos y los resultados obtenidos en investigaciones previas sobre la durabilidad de cigüeñales realizadas por Garrett et al. (2001), Bhaumik et al. (2002), Silva (2003), Pandey (2003), Changli et al. (2005), Zhiwei et al. (2005), Chien et al. (2005), Antonio et al. (2006) y Estrada (2007) permitieron

establecer el criterio de decisión a tomar en cuanto a la metodología a seguir para el desarrollo de la investigación.

A partir de las experiencias de estos autores, se procedió a la verificación exhaustiva de la resistencia mecánica del cigüeñal estudiado, por lo que se requiere la realización de los siguientes ensayos:

1. Análisis fractográfico
2. Análisis químico
3. Ensayo de dureza
4. Análisis metalográfico
5. Verificación del estado tensorial mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF)

### **2.3 Análisis fractográfico**

Para el establecimiento del tipo de falla se realizó el análisis fractográfico y la comparación de las condiciones de operación de los elementos con los datos e informaciones disponibles de las propiedades físico-químicas y mecánicas de las aleaciones. El análisis realizado incluye la caracterización macro y microestructural de las superficies de fractura. Los exámenes fractográficos para la caracterización de la superficie de fracturas se realizaron mediante la inspección visual con aumentos de 20X y un esteroscopio OLYMPUS AMX-6.

### **2.4 Análisis químico**

Se comprobó la composición química del elemento analizado para establecer su correspondencia con la aleación a investigar. El análisis químico se realizó empleando un Espectrómetro de Masa ESPECTROLAB 230 con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón.

## 2.5 Ensayos de dureza

Los ensayos de dureza se realizaron en un durómetro Rockwell con penetradores de bola de acero y cono de diamante, siguiendo los procedimientos de las normas ASTM E 92, ISO 3738 y GOST 20017.

## 2.6 Análisis metalográfico

### 2.6.1 Selección y preparación de muestras

Las muestras se escogieron de las regiones más cercanas al área de rotura, siguiendo. Se tomaron 10 muestras características de superficies de fractura de las zonas exteriores e interiores del elemento, como se muestra en la Figura 12. Las operaciones de clasificación, preparación y pulido de las muestras se realizaron siguiendo las normas NC 10-56:86 y ASTM E3-95.

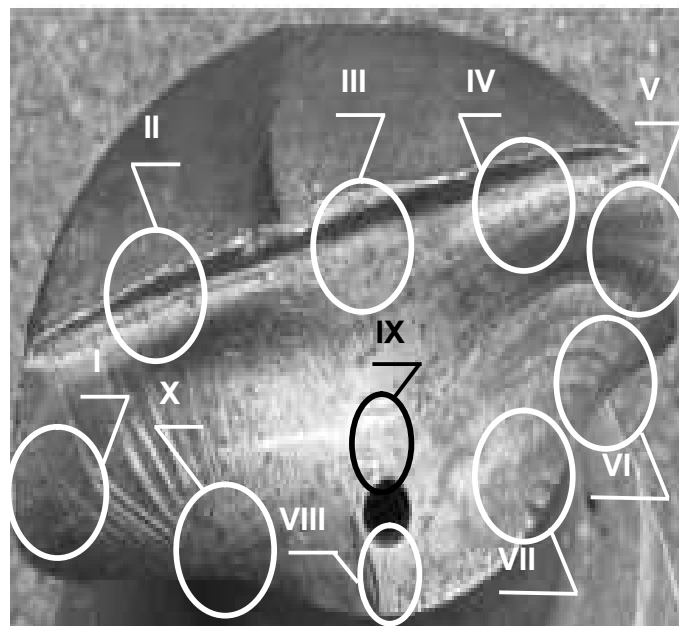


Figura 12. Muestra de cigüeñal fracturado y zonas donde se tomaron las muestras.

En general, se siguió la secuencia de operaciones siguiente:

**Corte:** Se realizó el corte con un disco abrasivo y refrigeración continua para evitar variación de la estructura. Las operaciones de corte se realizaron con una

cortadora de metales aplicando refrigeración intensa para evitar transformaciones adicionales en la estructura producto del calentamiento durante el corte.

**Rectificado:** Se aplicó rectificado en dos caras aproximadamente paralelas en una Máquina Rectificadora Horizontal 6T-82-1 con refrigeración continua. Se designó una de las caras para el pulido y ataque y la otra para el análisis químico.

**Pulido:** Las muestras fueron analizadas en los laboratorios del ISMM, se pulieron en una Pulidora Metalográfica modelo Rathenow-43 empleando papel abrasivo de las series 50,120, 400, 500, 600, paños de fieltro y una solución de pasta abrasiva de óxido de cromo hasta dejar la superficie en forma de espejo. Para garantizar un correcto pulido de la superficie sin redondeo en los bordes, las muestras se montaron sobre resina epoxídica.

**Limpieza, lavado y secado:** Después de la adecuada preparación de las superficies, las probetas se lavan con acetona para eliminar restos de grasa, polvo y pasta de pulir cuidando no frotar la superficie pulida para evitar microrayaduras. Posteriormente se limpian con etanol absoluto para eliminar cualquier vestigio de humedad. Finalmente, las muestras se sometieron a secado con aire caliente.

**Ataque de las superficies a investigar:** Inmediatamente después del secado, se procedió a realizar el ataque de las superficies a investigar. Se empleó la técnica de ataque manual con Nital al 5 % (solución de 5 ml de  $\text{HNO}_3$  en 100 ml de Etanol) durante 5 segundos.

**Limpieza y secado:** Después de atacadas, las superficies de las muestras se lavan con agua destilada y posteriormente en alcohol. Por último, las muestras se secaron con papel de filtro y se cuidó de no friccionar las superficies pulidas para evitar microrayaduras.

### **2.6.2 Caracterización microestructural**

Para la caracterización microestructural de las muestras se utilizaron las técnicas de microscopía óptica según la norma NC 10-56:86. Se utilizó un microscopio óptico NOVEL XJX 300, 6V/15W con cámara fotográfica acoplada y combinaciones de objetivo-ocular para obtener imágenes de 80 a 800 aumentos. Se midió el tamaño de los granos según las Normas NC 10-57:86 y ASTM E112.

### **2.7 Verificación del estado tensorial mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF)**

El Método de los Elementos Finitos (MEF) ha sido muy generalizado y constituye una potente herramienta capaz de resolver cualquier problema formulable de la matemática, la física y la mecánica; permitiendo simular y realizar una gran cantidad de análisis en componentes y estructuras complejos, difícilmente calculables por los métodos analíticos tradicionales.

En lo referido al cálculo estructural, el método de elementos finitos puede ser entendido como una generalización de estructuras al análisis de sistemas continuos. El principio del método consiste en la reducción del problema con infinitos grados de libertad, en un problema finito en el que intervenga un número finito de variables asociadas a ciertos puntos característicos del objeto denominado “nodos”.

Las incógnitas dejan de ser funciones matemáticas del problema cuando pasan a ser los valores de dichas funciones en un número infinito de puntos.

#### **2.7.1 Condiciones y parámetros establecidos**

Los análisis se realizaron utilizando el paquete ANSYS 4.5 utilizando como modelo de material: análisis estructural lineal elástico considerando el elemento analizado como isotrópico, homogéneo y continuo, empleando el método estáticamente determinado.



En el método estáticamente determinado se supone que el cigüeñal está simplemente apoyado en el centro de cada uno de sus gorriones de apoyo (apoyos 1, 3, 5, 7 y 9 de la figura 10). De ese modo, la reacción de un cojinete de bancada dado depende únicamente de los esfuerzos aplicados en los codos adyacentes a ese apoyo.

Se seleccionó como tipo de elemento el “solid92” con 10 nodos y sus correspondientes nodos intermedios.

## 2.8 Conclusiones del capítulo II

1. A partir de la necesidad de la descripción y caracterización del objeto de estudio para definir sus principales regularidades a través del empleo de métodos científicos de investigación se realizaron ensayos químico, de dureza y metalográfico para conocer el origen de la falla y dar solución al problema.
2. Los métodos de investigación utilizados se complementan con el empleo de una actualizada base experimental, tecnologías, software y equipamiento novedosos que garantizan precisión y confiabilidad a los resultados.

## **CAPITULO III. ANALISIS DE LOS RESULTADOS**

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

La actividad investigativa se conduce eficazmente mediante una serie de elementos que hacen accesible el problema tratado cuando sus resultados se enmarcan al conocimiento y de su divulgación y/o aplicación depende en gran medida el éxito de los resultados. Estos deben mostrarse de manera que se resalten los principios más importantes y las relaciones causa-efecto derivadas de su análisis. Además se debe explicar, en función de las observaciones hechas, las causas posibles de lo observado. Los resultados obtenidos se comparan con los de otros investigadores y se señalan las coincidencias y divergencias, la información pertinente al objeto, el cumplimiento del objetivo a través de sus tareas de trabajo y la verificación de la hipótesis.

En este capítulo se ofrece la interpretación de los resultados experimentales y las ideas básicas resultantes de la investigación. Se establece, además, el conjunto de criterios y postulados que sustentan las teorías que corroboran la veracidad de las hipótesis científica como resultado del análisis y el procesamiento de la información obtenida a través de la realización de ensayos para dar cumplimiento al objetivo y resolver el problema de investigación.

El objetivo del capítulo es:

Realizar la valoración crítica de los resultados y a través de ella, explicar los fundamentos científicos que dan solución al problema planteado a partir de la interpretación de las regularidades observadas.

### **3.2 Análisis fractográfico**

La Figura 13 representa una porción del cigüeñal fracturado en dos vistas: frontal y lateral. Por la geometría del pedazo de cigüeñal desprendido se deduce que la falla

ocurrió en el cambio de sección entre la muñequilla # 8 con el brazo del apoyo # 7 (Ver figura 10) que están ubicados en el extremo del volante.

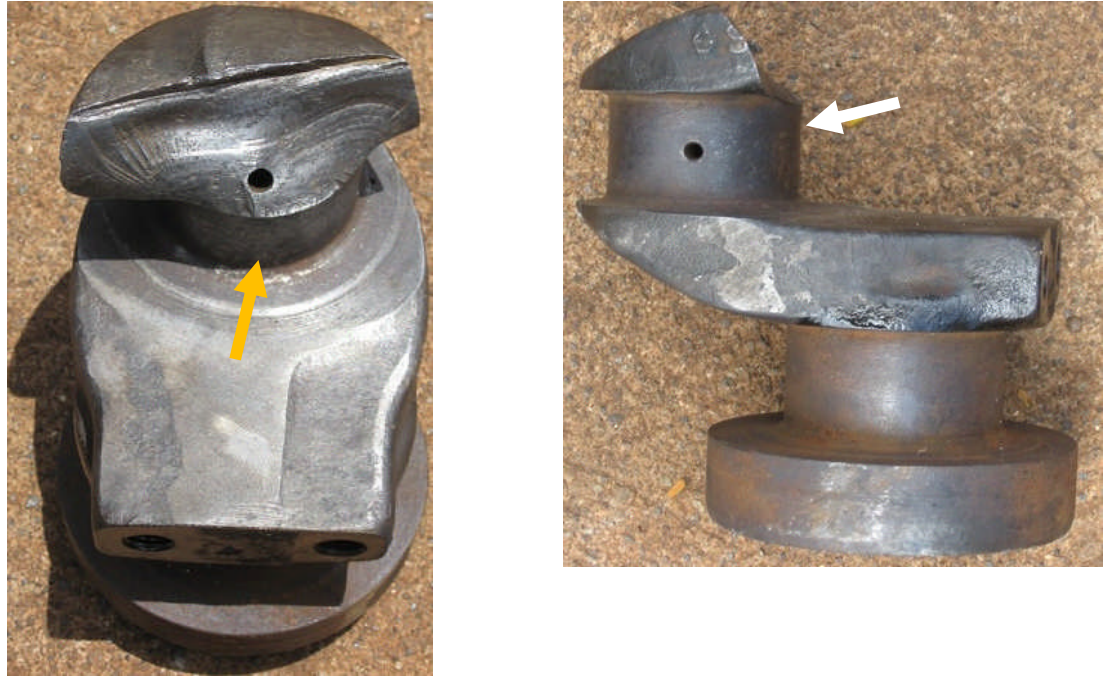


Figura 13. Vistas frontal y lateral de uno de los fragmentos del cigüeñal colapsado.

Las flechas indican la zona de inicio de la falla

En la observación detallada de las superficies de fractura como la que se muestra en la figura 14, se reconocieron las características morfológicas típicas de las fallas por fatiga en tres etapas bien definidas:

**Etapa I:** Etapa de iniciación de la grieta, correspondiente a la zona I. Esta es una zona de altas concentraciones de tensiones por los efectos del cambio de sección que existe entre la muñequilla y el brazo. En esta región se detectó que existe un inadecuado radio de curvatura que, aparejado a la presencia de un agujero de lubricación, provocó un incremento de los valores de tensiones y propició la nucleación y formación de una pequeña microgrieta.

**Etapa II:** Etapa de propagación de la grieta. Esta se corresponde con la zona II. Una vez formada la microgrieta, comienza esta segunda etapa de propagación, en la que velocidad de expansión de la grieta aumenta dramáticamente bajo los efectos de los ciclos de cargas.

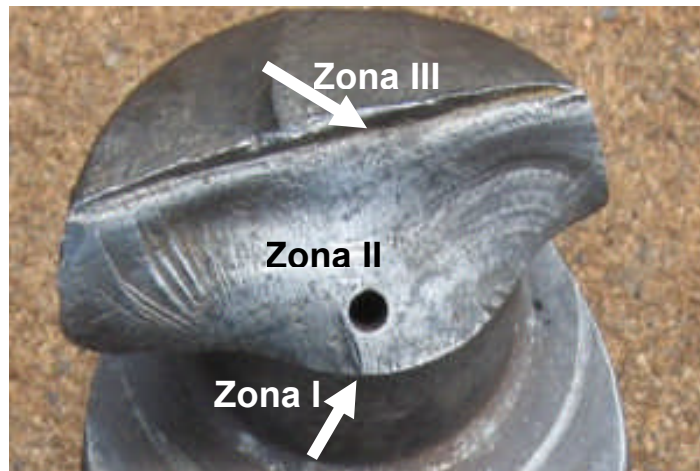


Figura 14. Superficie de fractura del elemento

La acción cíclica de las cargas trae consigo que el crecimiento de la grieta tenga lugar mediante un proceso repetitivo de enromamiento y agudización de la punta de la grieta. La figura 15 representa una ampliación de la zona II, donde se observan semianillos concéntricos alrededor de la zona I que asemejan marcas de playa, típicas de la rotura por fatiga de componentes que operan bajo ciclos interrumpidos de tensiones.



Figura 15. Marcas de playa típicas de la rotura por fatiga

Como se observa, estas marcas de playa son macroscópicas, visibles a simple vista. Las mismas indican la posición de la fisura progresiva en un instante dado y

por ende, su sentido de propagación con cada ciclo. Debido que el cigüeñal está sometido a cargas cíclicas, se presenta un mecanismo de deslizamiento localizado que orienta las marcas de playa alrededor de la zona de fisura. En la medida que la fisura crece, la sección transversal se debilita gradualmente, la grieta crece más rápido y las marcas de playa son más separadas y más grandes.

En el caso de los árboles cigüeñales, se consideran que están sometidos a elevados ciclos de tensiones, por lo que aún para pequeños valores de cargas aplicadas, los efectos de la figuración son progresivos y acumulativos, por lo que.

**Etapa III:** Rotura final, correspondiente a la zona III. Debido a la disminución de la sección transversal que soporta los esfuerzos, esta se debilita y finalmente se presenta una fractura súbita por desgarre ya que la sección del eje no puede soportar las cargas aplicadas. Las marcas de playa y estrías no aparecen en roturas rápidas.

Se debe destacar que 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 picadura o desprendimiento de material.

### 3.3 Análisis químico

El promedio de los resultados de tres mediciones de la composición química de las muestras analizadas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultado promedio de la composición química de las muestras

<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cu</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>
0,270	1,261	0,157	0,65	0,022	0,02	0,036	0,014	0,036

Como se observa, el contenido de carbono se encuentra entre 0,25 y 0,3 % y el elemento posee, además, alrededor de 1,2 % de Cr. Los demás elementos (Si, P,

S, Mn, Cu, Mo y Ni) se encuentran en valores inferiores a los establecidos por la norma para considerarlos como elementos de aleación, por lo que se consideran como impurezas.

Se conoce, 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 %.

De acuerdo con la composición química obtenida, se identifica el acero como AISI 5130. Este material se considera como un acero de bajo contenido de carbono, propicio para procesos de cementación. La presencia del Cromo mejora la difusión del Carbono hacia el interior del elemento durante la cementación, obteniéndose una capa cementada más uniforme y con mejores propiedades.

### **3.4 Ensayo de dureza**

Los resultados promedios de los ensayos de dureza arrojaron valores de dureza de 42 HRC en el núcleo y la superficie. Un valor de dureza del orden de los 42 Rockwell C, no garantiza una buena resistencia a la fatiga, sobre todo en la superficie del elemento. Sin embargo, este valor de dureza presupone el necesario compromiso entre dureza y plasticidad que propicia una buena resistencia a la torsión.

Para el caso que se analiza la relativamente baja dureza en la superficie es un factor a considerar por los efectos de los esfuerzos originados en los puntos de alta concentración de tensiones -como en los cambios de secciones. En caso de ciclos de trabajo prolongados, aún con bajos valores de tensiones, la acumulación progresiva de los esfuerzos, promueven la deformación plástica y facilitan el crecimiento y propagación de la fisura de fatiga.

### 3.5 Análisis metalográfico

La micrografía de la Figura 16 muestra la microestructura típica del acero AISI 5130 templado y revenido. Se pueden apreciar regiones de austenita residual de un color claro en cantidades de aproximadamente un 40 % en una matriz de martensita en cantidades aproximadas de un 60 %, atacada con nital al 2%. La cantidad de martensita para el contenido de carbono que se analiza, obedece a la presencia del cromo como elemento aleante en el acero. En este caso, el cromo mejora la templabilidad del material. Por otra parte, las trazas de austenita en cantidades considerables son el resultado del relativamente bajo contenido de carbono (0,27 %) en la aleación y su papel en el retardo de la transformación de la martensita durante el temple.



Figura 16. Microestructura del cicüeñal a 200X.

Los valores de dureza y la homogeneidad microestructural en la superficie y el núcleo indican la ausencia de tratamiento térmico de endurecimiento superficial. El endurecimiento superficial (cementación o nitruración) podría mejorar considerablemente la resistencia a la fatiga del elemento.

### 3.6 Verificación del estado tensional mediante el MEF

El análisis mediante el MEF permitió localizar dónde se concentran los determinar los valores de tensiones del elemento cargado. Las figuras 17 y 18 muestran el resultado del análisis tensorial empleando el paquete ANSYS. Como se observa, las tonalidades rojas indican la zona crítica del elemento cargado donde se localizan las tensiones críticas.

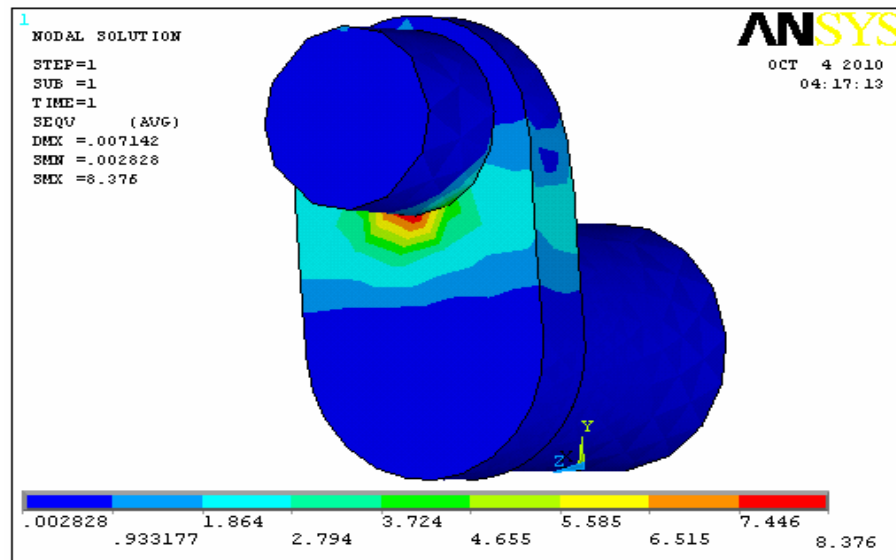


Figura 17. Estado tensional en una porción del cigüeñal correspondiente a la zona de análisis

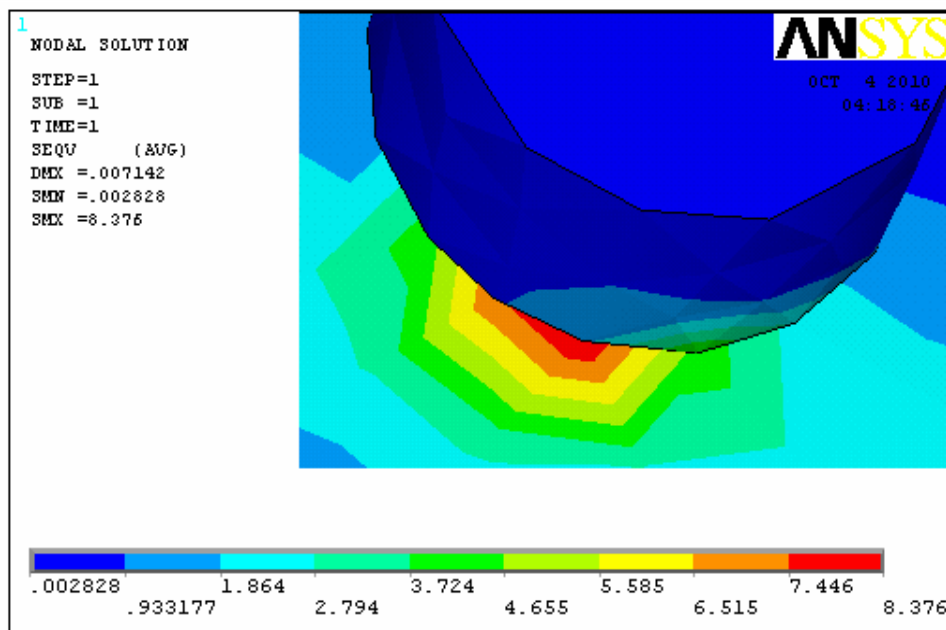


Figura 18. Ampliación de la zona crítica de concentración de tensiones de la figura 17



Si se compara la figura 17 con las figuras 13 y 14, se corrobora lo planteado en el epígrafe 3.1 en el sentido de que los mayores valores de tensiones aparecen en la unión entre los muñones y los brazos. En el caso analizado, se localizan en la zona por donde se inició la falla.

Cuando ocurre la explosión de la mezcla aire-combustible 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 que genera el estado tensorial de las figuras 16 y 17.

El orden de encendido del cigüeñal analizado es 1-3-4-2 y en este caso, las tensiones máximas en la unión de los muñones y los brazos del cigüeñal tienen lugar en el PMS de combustión del cilindro 1, que se acopla a la muñequilla 8 de la figura 10 (Capítulo I). De esta manera, los máximos valores de tensiones se acentúan en los brazos más cercanos a estos cilindros, en ese orden. 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, manifestándose la falla por fatiga que se presenta en el estudio analizado.

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 utilizando el paquete ANSYS.

Un estudio más completo pudiera realizarse si se conociera la evolución de las tensiones en cada uno de los radios de acuerdo de las diferentes secciones críticas del cigüeñal para calcular las tensiones media y alternada en cada punto y, por tanto, el valor del coeficiente de seguridad ante el fallo por fatiga. Otra posible investigación pudiera estar orientada hacia el conocimiento, para cada ángulo del cigüeñal, de su línea elástica, lo que permite estudiar el efecto de borde en aquellas situaciones en las que una gran flexibilidad del cigüeñal

podiera ocasionar contactos esporádicos entre el gorrón y los bordes laterales de los cojinetes. Estas posibilidades quedan abiertas para futuros de investigación.

### 3.7 Efecto económico y social

Es importante considerar los efectos económico-sociales en la prevención de fallas de motores por el colapso del cigüeñal por las consecuencias negativas aparejadas a los elevados costos de mantenimiento por concepto de inversiones como consecuencia de las averías y roturas repentinas que ocurren durante la explotación del parque automotor y la necesidad de prevención de posibles accidentes que pudieran poner en riesgo la vida de personas.

La tabla 2 muestra una apreciación de los costos en que se incurrieron en la realización de la investigación según fichas de costos del Laboratorio de Ciencia de los Materiales de la CUJAE.

Tabla 2. Equivalencia de costos de la investigación según CUJAE

Partidas de costos	Costos (CUP)
Análisis fractográfico	850,00
Análisis de composición química	1216,00
Preparación de muestras y análisis metalográfico	1347,16
Análisis tensorial mediante MEF	1500,00
Total	4913,16

Independientemente del valor de los costos incurridos en la realización de esta investigación, su principal mérito desde el punto de vista económico-social radica en el impacto que pudiera tener la generalización de sus resultados en talleres automotrices del territorio para prevenir fallas en elementos similares.

La elevada incidencia que tiene la adecuada respuesta de los árboles cigüeñales en la estabilidad operacional de los motores de automóviles y el estudio detallado de las posibles causas de averías justifica cualquier investigación en ese sentido.

### 3.8 Conclusiones del capítulo III

- 1 En el elemento analizado se produjo una falla por fatiga donde los mayores valores de tensiones aparecen en la unión entre los muñones y los brazos, lugar por donde se inició la falla.
- 2 La composición química del material se corresponde con la del acero AISI 5130, mientras que la microestructura y la dureza del material son típicas de este material en estado de temple y revenido con presencia de austenita y martensita en cantidades aproximadas de un 40 % y 60 %, respectivamente.
- 3 El análisis tensional aplicando el MEF arrojó que los mayores valores de tensiones aparecen en la unión entre los muñones y los brazos, zona por donde se inició la falla.

## **CONCLUSIONES**

1. Se determinaron las causas que provocan la fractura prematura del cigüeñal de un auto MWM perteneciente a la Dirección de Inversiones del Grupo Empresarial Cubaníquel, demostrándose que la misma se debió a la inadecuada microestructura del material por ausencia de tratamiento superficial.
2. El análisis fractográfico, de la composición química y la dureza del cigüeñal colapsado de un auto MWM, permitieron establecer que la falla se produjo por fatiga bajo las condiciones de servicio del automóvil.
3. A pesar de que la microestructura observada en el análisis metalográfico es la apropiada para resistir cargas de torsión como las que transmite el cigüeñal, la ausencia de tratamiento térmico de endurecimiento superficial como la nitruración o la cementación proporcionan un punto de fluencia bajo y por lo tanto con una baja resistencia a la fatiga.
4. Independientemente del valor de los costos incurridos, el principal mérito de esta investigación radica en el impacto que pudiera tener la generalización de sus resultados en talleres automotrices del territorio para prevenir fallas en elementos similares.

## **RECOMENDACIONES**

1. Generalizar los resultados de la presente investigación en talleres automotores donde se operen autos con las características del MWM analizado.
2. Realizar un estudio sobre la evolución de las tensiones en cada uno de los radios de acuerdo de las diferentes secciones críticas del cigüeñal para calcular las tensiones media y alternada en cada punto y con ellas, el coeficiente de seguridad ante el fallo por fatiga.
3. Profundizar en el conocimiento, para cada ángulo del cigüeñal, de su línea elástica para estudiar el efecto de borde en aquellas situaciones en las que una gran flexibilidad del cigüeñal pudiera ocasionar contactos esporádicos entre el gorrón y los bordes laterales de los cojinetes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Bhaumik, S.K., R. Rangaraju, Y. Kataswamy, M.A. Bhaskaran y T. A. Arameswara: Fatigue fracture of crankshaft of an aircraft engine. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 9, Issue 3, p.255-263, 2002.
2. Changli, W., Z. Chengjie, W. Deping: Analysis of an unusual crankshaft failure. *Engineering Failure Analysis*. Vol. 12, Issue 3. pp.465-473. 2005.
3. Chien, W., Y. Pan, J. Close., y S. D. Ho: 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.
4. Garrett, T. K., K. Newton y W. Steeds: *The Motor Vehicle*. Replika Press Pvt Ltd, Delhi (India). 2001
5. Pandey R. K.: Failure of diesel-engine crankshafts. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 10, Issue 2, p. 65-175, 2003.
6. Ritti, Tullia; Grewe, Klaus; Kessener, Paul (2007), "A Relief of a Water-powered Stone Saw Mill on a Sarcophagus at Hierapolis and its Implications", *Journal of Roman Archaeology* **20**: 138–163 (161)
7. Sally Ganchy, Sarah Gancher (2009), *Islam and Science, Medicine, and Technology*, The Rosen Publishing Group, p. 41, ISBN 1435850661
8. Silva, F. S. Analysis of a vehicle crankshaft failure. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 10, Issue 5, p. 05-616, 2003.
9. Valdés, J. A., J. J. Coronado y J. I. García: Comparación y Estudio de la Fractura del Cigüeñal de un Motor de Cuatro Cilindros en Línea. *Scientia et Technica* Año XII, No 31, Agosto de 2006
10. Velázquez, A. Fragilización de la Aleación HH por precipitación de Fases Sigma. Tesis Doctoral. Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa. 2002

11. Zhiwei, Y. y X. Xiaolei: Failure analysis of a diesel engine crankshaft. Engineering Failure Analysis, Vol. 12, Issue 3, p. 487-495, 2005
12. [http://www.tesisexarxa.net/TESIS\\_UPC/AVAILABLE/TDX-1112103-085326//03Parte\\_C.pdf](http://www.tesisexarxa.net/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-1112103-085326//03Parte_C.pdf)
13. [http://www.tdr.cesca.es/TESIS\\_UPC/AVAILABLE/TDX-0303105-162045//07Gaa07de11.pdf](http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0303105-162045//07Gaa07de11.pdf)
14. [http://www.d1105488.mydomainwebhost.com/portaleso/trabajos/tecnologia/mecanica/maquinas\\_y\\_circuitos/arboles.htm#marc](http://www.d1105488.mydomainwebhost.com/portaleso/trabajos/tecnologia/mecanica/maquinas_y_circuitos/arboles.htm#marc)