

## ANÁLISIS FORENSE DE UN MOTOR DIESEL

### Forensic Analysis of a Diesel Engine

#### RESUMEN

Este trabajo busca determinar las causas que generaron una serie de grietas longitudinales sobre la pared interna de una camisa de un motor de combustión interna diesel V12 turbocargado, el cual se utilizaba para bombeo de crudo. La falla de este componente se descubrió al realizarse una inspección de mantenimiento en la cual se encontró agua en el interior de la camisa, retirándose el motor de servicio e iniciando un estudio forense de la falla. El análisis de la superficie interna de la camisa reveló una elevada presencia de cavidades ubicadas en la zona del punto muerto superior, las cuales actúan como concentradores de esfuerzos, facilitando la nucleación de grietas.

**PALABRAS CLAVES:** Análisis de Falla, Análisis Forense, Motor Diesel.

#### ABSTRACT

*In this work, the root causes that generated longitudinal cracks on the internal wall of liners on a V12 turbocharged diesel engine, used for oil pumping, are presented. During a maintenance inspection of the engine, a water leak was discovered inside of engine's liner. Laboratory analysis revealed that the internal surface of the liner displayed cavities near the top dead center, which ended in both stress concentration and crack nucleation.*

**KEYWORDS:** Diesel Engine, Failure Analysis, Forensic Analysis.

#### 1. INTRODUCCIÓN

El análisis de falla es una herramienta útil, por que no solamente busca identificar los mecanismos de fractura o degradación que causan las fallas de elementos mecánicos y de equipos sino también, establecer responsabilidades y lo que tal vez sea más importante, facilitar la toma de medidas correctivas que previenen la recurrencia de la falla [1].

En cuanto a la falla del componente estudiado en este trabajo, se presenta como un conjunto de grietas longitudinales de diversos tamaños sobre la pared interna de una camisa, la cual hace parte de un motor diesel de combustión interna del tipo V12 de 4500 hp, utilizado para el bombeo de petróleo y con treinta y cinco mil horas de servicio, cumpliendo con un 43,8% de su vida útil.

Los ensayos realizados fueron análisis visual, análisis de la morfología de la fractura a través de microscopía óptica y electrónica de barrido, análisis químico, análisis de diseño, metalografía y dureza.

#### 2. MATERIALES Y METODOS

Fecha de Recepción: 14 Mayo de 2007  
Fecha de Aceptación: 20 Agosto de 2007

#### WILSON A HORMAZA R.

Ingeniero Mecánico, Ph. D.  
Profesor Asistente  
Universidad de los Andes  
whormaza@uniandes.edu.co

#### LUIS M MATEUS

Ingeniero Mecánico, M. Sc.  
Profesor Asociado  
Universidad de los Andes  
lmateus@uniandes.edu.co

#### ALEJANDRO MARAÑÓN

Ingeniero Mecánico, Ph. D.  
Profesor Asociado  
Universidad de los Andes  
emaranon@uniandes.edu.co

En esta etapa del trabajo se describen los procedimientos experimentales utilizados en esta investigación, con los cuales se pretende determinar la causa que llevo al agrietamiento de la camisa, (Tabla 1).

Técnica de Caracterización	Descripción
Inspección Visual	A partir del componente recibido se procedió a realizar una inspección visual detallada a fin de obtener información sobre el estado general de la camisa y del proceso de falla en estudio. Para complementar el estudio se realizó un ensayo de tintas penetrantes, según la norma ASTM E165, sección 03.
Composición Química	Con el fin de conocer la composición química del material de la camisa del motor, se realizó un análisis

	químico cuantitativo por espectroscopia de emisión de chispa con un equipo ARL 3520 OES.
Dureza	Se realizaron ocho mediciones (8) por indentación en cada una de las superficies interna y externa según norma ASTM E10 con ayuda de un durómetro WILSON BRINELL. Adicionalmente y para complementar el estudio se tomaron microdurezas de acuerdo a la norma ASTM E384, el equipo utilizado fue un microdurometro Row Rathenow M226802.
Caracterización Microestructural	A fin de caracterizar la microestructura del material base de la camisa, se prepararon probetas metalográficas de forma convencional para revelar la microestructura de acuerdo a la norma ASTM E3, para este fin se utilizó un microscopio metalografico Leitz Metallux II. Adicionalmente, se utilizó un microscopio electrónico de barrido PHILLIPS QUANTA 200.
Análisis Macroscópico	Para el análisis fractográfico se procedió a realizar un corte sobre la camisa, extrayéndose la región donde se encuentra la grieta que presenta mayor longitud. Una vez cortada la grieta se procedió abrirla en el laboratorio y posteriormente se realizo un estudio fractográfico, utilizándose un estereoscopio Olympus SZ-60 con el fin de auxiliar el análisis de la fractura.

Tabla 1. Procedimientos Experimentales.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 3.1 Inspección Visual

La camisa en estudio presenta un alto agrietamiento en la superficie interior de la camisa (alrededor de ocho (8) grietas fueron determinadas, presentando una distribución aleatoria), el crecimiento de estas grietas es en la dirección axial y las hay de diversas longitudes (mínima= 23.78 mm y máxima= 198.01mm). Al limpiar la superficie exterior de la camisa se encontró una grieta de longitud considerable en la dirección axial y al realizarse la comparación con el interior de la camisa resultó ser parte de la misma grieta que presentó la mayor longitud en el interior.

En la Figura 1 se muestra una de las grietas presentes en el interior del cilindro de la camisa. Al observarse con detalle la superficie interior del cilindro en su parte superior, se observa una superficie deteriorada, debido a la presencia de un gran número de cavidades, las cuales se encuentran muy cerca de las grietas.



Figura 1: Vista general de la camisa, donde se observa la presencia de grietas internas.



Figura 2: Vista exterior de la camisa, encontrándose una alta porosidad en la periferia del cilindro.

Al realizarse una inspección visual en el exterior de la camisa, específicamente en el surco donde es colocado el empaque superior, se determinó la presencia de poros como se aprecia en la Figura 02. Estos se presentan en todo el perímetro de la camisa y como puede observarse es un defecto notable.

Realizada la inspección con tintas penetrantes en la camisa se detectó la presencia de grietas y también se observó una serie de defectos superficiales, los cuales se pueden caracterizar por una morfología del tipo cavidad, (Figura 3).

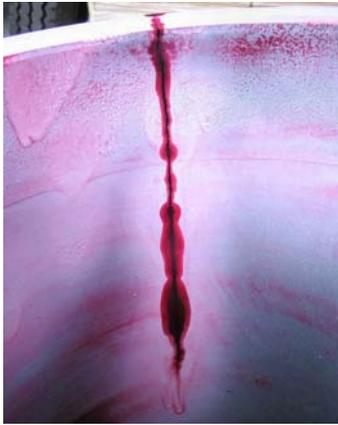


Figura 3: Vista de la grieta de mayor longitud presentada en el interior de la camisa, observándose la presencia de cavidades (puntos rojos) en la superficie.

### 3.2 Composición Química

La composición química por Espectroscopía de Chispa entregó los siguientes resultados: 3.49% C, 1.8% Si, 0.785% Mn, 0.073% P, 0.028% S, 0.211% Cr, 0.222% Mo, 0.906% Ni, 0.175% Cu, 0.01% Sn, 0.029% Ti, 0.01% Mg, y 0.008% Al. A partir de lo anterior, el Carbono Equivalente (CE) es 4.11 (fundición de hierro hipoeutéctica, [2]).

### 3.3 Dureza

Los valores medios de dureza Brinell (3000 kgf) obtenidos en la superficie interna (Región 1 y 2) y externa (Región 3 y 4) de la camisa, ver Figura 4 y 5, son respectivamente: 443±1 HB, 247±1 HB, 237±1 HB y 243±1 HB. La microdureza de la camisa obtenida de la muestra metalografía es 281.5 HV (5 kgf), equivalente a 266 HB (convertida).

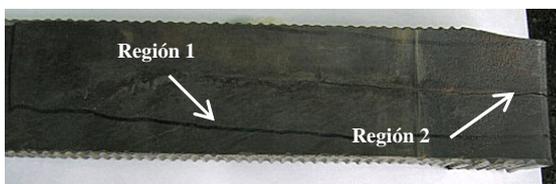


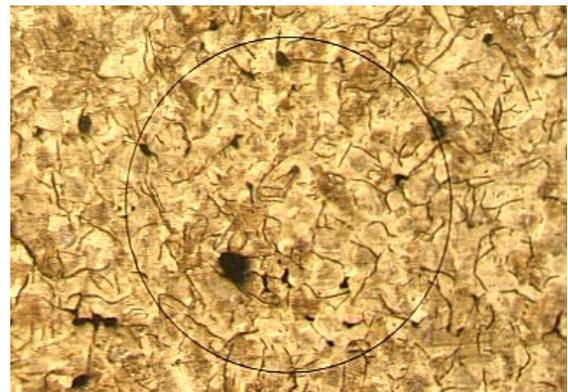
Figura 4: Superficie interna de la camisa, donde se observan las regiones 1 y 2, utilizadas para la toma de durezas.



Figura 5: Superficie externa de la camisa, donde se observan las regiones 3 y 4, utilizadas para la toma de durezas.

### 3.4 Análisis Metalográfico

El análisis metalográfico de la camisa se realizó sobre cortes transversales y longitudinales cerca a la grieta de mayor longitud. Se encontró una microestructura característica de una fundición de hierro gris, donde se observan las hojuelas de grafito contenidas en una matriz perlítica. También se observa la presencia de finos carburos dispersos, ver Figuras 6 a 7. Sobre el corte longitudinal se observó la presencia de partículas finas de grafito secundaria.



Figuras 6: Micrografía vista en dirección axial de la camisa, cerca a la grieta a 100X.

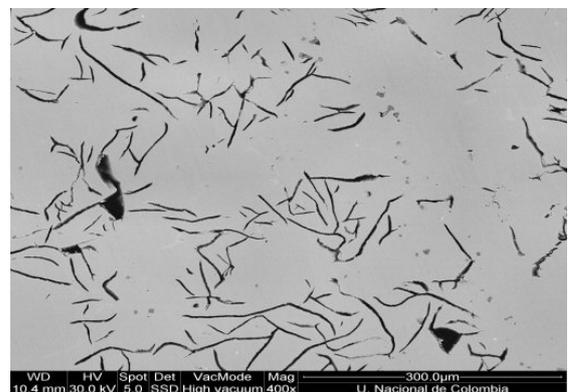


Figura 7: Micrografía vista en dirección axial de la camisa, cerca a la grieta a 400X.

### 3.5 Análisis Fractográfico

Sobre la superficie de fractura 1, (Figura 8), la zona de nucleación de la grieta (región A) tiene una textura rugosa, opaca y porosa (Figura 9). La morfología de la fractura tiene un aspecto planar frágil que es muy común en este tipo de material.

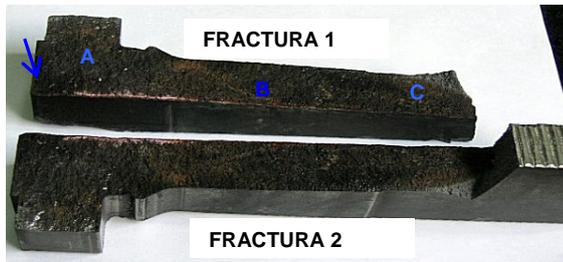


Figura 8: Vista general de la superficie de fractura de la grieta de mayor longitud ubicada en la camisa, observándose sobre la superficie residuos de la combustión de color mas oscuro.



Figura 9: Vista de la región A, mostrando el sitio de nucleación de la grieta.

Una observación de la superficie interna de la camisa, Figura 10, reveló la presencia de una serie de cavidades (diámetro promedio de 3 mm), las cuales son un defecto característico de los procesos de fundición.



Figura 10: Región interior de la camisa, observándose la zona de alto deterioro superficial.

### 3.6 Modelo Teórico de Esfuerzos

Se estableció el estado de esfuerzos de la camisa a partir de la información disponible del motor que se muestra en la Tabla 2.

Parámetros	Valor
Modelo del motor	Motor diesel CAT 3612 Turbocargado.
Potencia nominal	4500hp @ 800-980 rpm
Peso	25140 Kg
Diámetro exterior camisa	0.321 m
Diámetro interno camisa	0.280 m
Carrera	0.3 m
Desplazamiento	221.7 litros
Número de cilindros	12
Vida útil aproximada	80000 horas
Vida actual estimada	35000 horas

Tabla 2. Parámetros del Motor.

A partir de los modelos clásicos para motores de combustión interna, se encontró que el torque desarrollado es de 35619 N.m y la presión media efectiva (mep) 2018 kPa (292.5 Psi). Este valor de presión esta cerca de los valores típicos reportados en la literatura para motores diesel turbocargados [3]. La relación de radio interior del cilindro a espesor de pared es 6.8 (cilindro de pared gruesa) [4]. Los esfuerzos máximos tangenciales en el cilindro  $\sigma_t$  y los esfuerzos máximos radiales  $\sigma_r$  en la pared de la camisa son, respectivamente, 14.86 MPa y 2.02 MPa, lo cual resulta en un esfuerzo cortante máximo de 8.44 MPa.

En los casos en los que un material frágil falla por fractura (hierro gris ASTM 40,  $S_t = 276$  MPa,  $S_c = 966$  MPa y  $E = 125$  GPa [5]), el criterio de falla del esfuerzo normal máximo predice que el material no fallará por efectos estructurales (factor de seguridad cercano a 18). A partir de la teoría lineal de la mecánica de fractura y utilizando el modelo para grietas superficiales [6], se calculó el valor de los esfuerzos que generaran inestabilidad en el crecimiento de grietas. Tomando para el material  $K_{Ic} = 6$  Mpa $\sqrt{m}$ , [7] y el diámetro promedio de los poros que presenta la pared interior del cilindro de 3 mm, y con una profundidad promedio de estas cavidades de 1 mm, (Figura 10) se obtiene que el esfuerzo máximo que resiste ese material antes de que se inicie el crecimiento de grieta es de 4 MPa, frente a los 14,86 MPa de esfuerzo tangencial que se desarrollan por la presión interior en el cilindro. En consecuencia, es muy probable que estos defectos hayan sido uno de los

causantes importantes de la generación de las grietas longitudinales que se presentaron en el cilindro.

### 3.7 Análisis de Falla

La falla de la camisa se inicio probablemente por la presencia de discontinuidades en la superficie de la camisa, es decir por los defectos generados por la rugosidad superficial de la fundición, los cuales pueden haber actuado como concentradores de esfuerzo que hayan disminuido la capacidad de carga de la camisa por debajo de las condiciones de diseño. Otra condición que colaboró en la falla de la camisa se debe a la presencia de diferentes formas de grafito, esta estructura se asocia a una tendencia frágil, ya que puede interpretarse como una discontinuidad alargada en la matriz que se asemeja a un defecto tipo grieta.

Las diferencias observadas en la microestructura de la camisa sugieren que el molde presento condiciones de enfriamiento diferentes y por lo tanto las propiedades en la camisa variarán como se pudo observar en los ensayos de dureza. La propagación de la falla se desarrolló por cuenta del tipo de cargas a las cuales estuvo sometido este componente, lo que conlleva, que en cada uno de los ciclos del motor la grieta se propague lentamente y se manifiesta con un mecanismo de falla, el cual parece ser del tipo intergranular.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos de los ensayos realizados y su posterior análisis se puede concluir que:

- El origen de la falla en la camisa se debe a una elevada presencia de cavidades ubicadas en la superficie interior del cilindro, mas exactamente en la región del punto muerto superior. Estas cavidades se consideran defectos originarios del proceso de fundición.
- Las cavidades actúan como concentradores de esfuerzo llegando al punto de reducir la resistencia del componente y así nuclear la grieta y precisamente en esta región se encuentran las mayores sollicitaciones de la camisa.
- Diferencias en microestructura evidencian que se trabajó con diferentes condiciones de enfriamiento, manifestándose como un segundo mecanismo de falla que se asocia con una tendencia frágil.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Hernandez, E. Espejo, “*Mecánica de Fractura y Análisis de Falla*,” Bogotá: Universidad Nacional de Colombia., 2002, p. 315.
- [2] C. Branco, V. Infante, A. Sousa, “A failure analysis study of wet liners in maritime diesel engines”, *Engineering Failure Analysis*, vol 9, pp 403-421, 2002.
- [3] J. Heywood, “*Internal Combustion Engine Fundamentals*”, New York: McGraw-Hill, 1988. p. 67.
- [4] M. Shigley, “*Mechanical Engineering Design*”, 7nd ed, New York: McGraw-Hill, 2004, p 405.
- [5] S. Avner, “*Introducción a la Metalurgia Física*”, McGraw-Hill., 1988, p. 535.
- [6] M. Ashby, D. Jones, “*Engineering Materials 1. An introduction to their properties & applications*”, 2nd ed, Butterworth Ed., 1996, p. 344-352.
- [7] J. Barsom, S. Rolfe, “*Fracture and fatigue control structures*”, ASTM, 3 ed., 1999, pp. 543-602.